

NAUSIVIOS CHORA

A Journal in Naval Sciences and Technology



Volume 3/2010

NAUSIVIOS CHORA

A Journal in Naval Sciences and Technology



Τεύχος 3/2010

Σχολή Ναυτικών Δοκίμων
Τέρμα Χατζηκυριακού,
Χατζηκυριάκειο, Πειραιάς 18539

Hellenic Naval Academy
Hadjikyriakou Avenue,
Piraeus GR 185 39

Copyright © Σχολή Ναυτικών Δοκίμων 2006-2010
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή του παρόντος τεύχους, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον εκδότη.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τους συγγραφείς και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής Ναυτικών Δοκίμων.

ISSN: 1791-4469
Copyright © 2006-2010: Σχολή Ναυτικών Δοκίμων

TABLE OF CONTENTS

| | |
|---|------------|
| HNA Commandant's welcome note | 3 |
| International Advisory Committee | 4 |
| Editorial Board..... | 4 |
| Editor's Note..... | 5 |
| Acknowledgments | 6 |
| Section A: NAVAL SCIENCE AND OPERATIONS..... | 7 |
| H Επίδραση της Σομαλικής Πειρατείας στις Θαλάσσιες Μεταφορές και η Ευρωπαϊκή Ναυτική Επιχείρηση «ΑΤΑΛΑΝΤΑ». 8 | |
| Πλωτάρχης Δημήτριος Δαλακλής Π.Ν. | |
| Βελτιωμένες Μέθοδοι Επίλυσης Θεμελιωδών Προβλημάτων Ναυσιπλοΐας..... | 29 |
| Αθανάσιος Ηλ. Παλληκάρης | |
| Section B: ELECTRICAL ENGINEERING AND APPLICATIONS..... | 67 |
| Scattering of TE Waves from a Cylindrical Scatterer Buried Inside a Two Layer Lossy Earth with Sinusoidal Air-Earth Interface | 68 |
| C. N. Vazouras ^a , P. G. Cottis ^b and J. D. Kanellopoulos ^b | |
| Switched Photonic Delay Lines for True Time Delay Antenna Beam Steering: Technologies and Challenges 85 | |
| Nicholas Madamopoulos | |
| Transmission Lines Exposed to External Electromagnetic Fields in Low Frequencies | 103 |
| George P. Veropoulos ^a and Panagiotis J. Papakanellos ^b | |
| STANAG 1008 Design Constraints for Pulsed Loads in the Frame of the All Electric Ship Concept | 113 |
| George J. Tsekouras ^a , Fotis D. Kanellos ^b , John M. Prousalidis ^c and Ioannis K. Hatzilau ^a | |
| Section C: NAVAL ARCHITECTURE AND MARINE ENGINEERING..... | 153 |
| On the Seakeeping Operability of Naval Ships | 154 |
| Gregory J. Grigoropoulos | |
| Assessment of a Marine Gas Turbine Installation on a Liquefied Natural Gas Carrier | 173 |
| M. Bonet ^a , G Doulgeris ^a and P. Pilidis ^a | |
| Degradation Effects on Marine Gas Turbines | 187 |
| Ioannis Roumeliotis | |
| Thermal Efficiency and Environmental Performance of a Natural Gas – Diesel Compression Ignition Engine – An Experimental Approach. | 208 |
| R.G. Papagiannakis ^a | |
| Μία Προσεγγιστική Μέθοδος Υπολογισμού Των Καταναλώσεων Εξ' αιτίας της Εγκατάστασης Αερισμού Στα Νοσοκομεία | 231 |
| Ι. Σ. Κατσάνης και Γ. Ν. Μαλαχίας | |
| Ναυτιλιακά Καύσιμα – Προδιαγραφές και Προοπτικές | 244 |
| Σ. Καλλίγερος ^a , Π. Αντονάκος ^a , Ν. Μελανίτης ^a , Γ. Αναστόπουλος ^b , Υ. Ζαννίκου ^b , Φ. Ζαννίκος ^b | |
| Μελέτη Αστοχίας Οχητών Εισαγωγής Κυρίων Μηχανών Αρματαγωγού | 252 |
| Δ.Γ. Κάραλης, Ν.Ε. Μελανίτης | |
| Πειραματική Διερεύνηση της Επίδρασης των Ιδιοτήτων του Καυσίμου στη Λειτουργία και στις Εκπομπές Ρύπων Κινητήρων Diesel | 264 |

Θεόδωρος Ζάννης^a

Section D: MATHEMATICS AND NATURAL SCIENCES 285

Resonances in Symmetric and Asymmetric Semiconductor Laser Structures. 287

V.N. Stavrou^{a,b}, G.P. Veropoulos^a and A. Markopoulos^a

Prospects of Measuring High Energy Cosmic Rays and Neutrinos Using Radio Antenna Arrays 294

K. Papageorgiou^a and I. Gkialas^a

Evaluation of Compton scattering sequence reconstruction algorithms for a portable position sensitive radioactivity detector based on pixelated Cd(Zn)Te crystals..... 303

K. Karafasoulis^{a,b}, K. Zachariadou^{c,d}, C. Potiriadis^b, S. Seferlis^b, I. Kaissas^b, D. Loukas^d, C. Lambropoulos^e

Prediction of Autoignition Temperature for Diverse Organic Compounds using In Silico Methods and Molecular Descriptors..... 318

Georgia Melagraki^a, Antreas Afantitis^b, and Olga Igglessi - Markopoulou^b

Section E: HUMANITIES AND POLITICAL SCIENCES 327

Η Σημασία του Εμφύχου Δυναμικού στην Ελληνοτουρκική Διένεξη 328

Ανδρέας Σ. Ανδρέου^a & Γεώργιος Α. Ζομπανάκης^b

Αξιωματικοί και Συγγραφείς: Δύο Ασύμβατες Ιδιότητες; 344

Ευαγγελία Τσιαβού

Πρεσβευτές Στα Μπλε: Γερμανικός Στολίσκος Στο Λιμάνι Του Πειραιά..... 358

Αιμιλία Ροφούζου

Greek Naval Policy and Strategy, 1923-1932 365

Zisis Fotakis

HNA Commandant's welcome note

We cordially welcome the new issue of "Nausivios Chora" which illustrates the response of the Academic Community to the demand and need for the Hellenic Naval Academy to constitute a forum for the exchanging of ideas and information on the work accomplished in the Naval Sciences themselves and in the relevant sciences.

Nowadays, at a time when adverse conditions, which are not only of a financial nature, give rise to pessimism, to say the least, the publication of "Nausivios Chora" is a challenge that should be accepted by us all and should aim both at the subversion of these inauspicious circumstances and at the creation of positive prospects for the future of the Higher Military Educational Institutions of our country. To this end, the mainspring of our actions should not only be the planned educational reformation of Higher Education but also the maintenance of the military character of the Institutions in question.

Therefore, I greet the third issue of "Nausivios Chora" with the wish for it to act as the lighthouse that will show the way for further scientific and technological progress of the Hellenic Naval Academy.

Rear-Admiral G. Skiadas HN,
Commandant of the Hellenic Naval Academy

Χαιρετισμός Διοικητή ΣΝΔ

Με ιδιαίτερη ικανοποίηση καλωσορίζουμε το νέο τεύχος της «Ναυσιβίου Χώρας», που καταδεικνύει την ανταπόκριση της Ακαδημαϊκής Κοινότητας στην απαίτηση, αλλά και ανάγκη, να αποτελεί η ΣΝΔ βήμα διαλόγου και ενημέρωσης σχετικά με το έργο το οποίο επιτελείται στις Ναυτικές Επιστήμες, καθώς επίσης και στις επιστήμες που τις υποστηρίζουν.

Σήμερα, σε μια εποχή που τα προβλήματα και οι δυσκολίες που προκύπτουν από ένα δύσκολο οικονομικά - και όχι μόνο - περιβάλλον, προκαλούν τουλάχιστον απαισιοδοξία, η έκδοση της «Ναυσιβίου Χώρας» αποτελεί πρόκληση για όλους μας, με σκοπό την ανατροπή του ως άνω δυσοίωνα κλίματος και τη δημιουργία θετικών προσδοκιών για το μέλλον των Ανώτατων Στρατιωτικών Εκπαιδευτικών Ιδρυμάτων της χώρας μας, με γνώμονα αφενός τη σχεδιαζόμενη εκπαιδευτική μεταρρύθμιση στην τριτοβάθμια εκπαίδευση και αφετέρου τη διατήρηση του στρατιωτικού χαρακτήρα των εν λόγω Σχολών.

Κατόπιν των ανωτέρω, χαιρετίζω την τρίτη έκδοση της «Ναυσιβίου Χώρας», με την ευχή να αποτελέσει το φάρο που θα δείξει το δρόμο για την περαιτέρω επιστημονική και τεχνολογική πρόοδο της ΣΝΔ.

Υποναύαρχος Γ. Σκιαδάς ΠΝ
Διοικητής ΣΝΔ

International Advisory Committee

Prof. Raed A. Abd-Alhameed, University of Bradford, UK
Prof. Kalyan Annamalai, Texas A&M University, USA
Prof. Peter C. Chu, Naval Postgraduate School, USA
Prof. Marios Dikaiakos, University of Cyprus, Cyprus
Prof. Dr. Konstantinos A. Dimadis, Free University of Berlin, Germany
Prof. Francis X. Giraldo, Naval Postgraduate School, USA
Dr. Kris Jorgensen, Principal Research Engineer, Babcock & Wilcox, USA
Assoc. Prof. Dimitrios Kyritsis, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA
Prof. Alexandro F.Lopez de Vergara Mendez, University of La Laguna, Spain
Prof. Silvia Molina Plaza, Polytechnic University of Madrid, Spain
Dr. Thomas Morel, President, Gamma Technologies, USA
Prof. Haralambos Panagopoulos, University of Cyprus, Cyprus
Prof. Gnana Bhaskar Tenali, Florida Institute of Technology, USA

Editorial Board

Elias Yfantis, Professor, Editor-in-chief
Anna Assariotaki, Asstn. Professor
George Galanis, Asstn. Professor
Christos Kandyilas, Asstn. Professor
Elias Tempelis, Asstn. Professor
Antonis Tsapalis, Lecturer
Theodore Zannis, Lecturer
George Vardoulis, Lecturer, Journal's webmaster

Editor's Note

"Nausivios Chora" is a scientific journal published since 2006 by the Hellenic Naval Academy, the Institution that provides academic and professional training to the future officers of the Hellenic Navy. The faculty members of the Hellenic Naval Academy are devoted to the promotion of research and education on a broad range of scientific disciplines.

"Nausivios Chora" is a biannual, peer-reviewed, open access journal that publishes original articles in areas of scientific research and applications directly or indirectly related to the naval sciences and technology. The scope of the Journal is to provide a basis for the communication and dissemination of scientific results obtained in Hellenic or International academic and research institutions that may present a relevance to the sea element. "Nausivios Chora" hosts articles belonging to scientific disciplines which include Engineering and applications, Natural Sciences, Mathematics, Humanities, Naval Science and Operations. The present 2010 Edition Issue contains twenty two articles.

The International Advisory Committee members and the Body of Reviewers, all acknowledged experts in their field of interests, cover a wide range of scientific disciplines ensuring the integrity of the peer-review process and the academic excellence of the published articles in a way that best represents the aims and scope of the Journal.

Prof Dr Elias A Yfantis

Editor in chief

Acknowledgments

I wish to express my special thanks to Dr George Vardoulis for his excellent work as the developer and administrator of the “Nausivos Chora” website.

Special thanks to Dr Evangelia Karayanni for her creative work on the “Nausivos Chora” 2010 Edition.

E.A.Yfantis

Section A: NAVAL SCIENCE AND OPERATIONS

Η Επίδραση της Σομαλικής Πειρατείας στις Θαλάσσιες Μεταφορές και η Ευρωπαϊκή Ναυτική Επιχείρηση «ΑΤΑΛΑΝΤΑ».

Πλωτάρχης Δημήτριος Δαλακλής Π.Ν.

Μέλος Στρατιωτικού Διδακτικού Προσωπικού στον Τομέα Συστημάτων Μάχης, Ναυτικών Επιχειρήσεων, Θαλασσίων Επιστημών, Ναυτιλίας, Ηλεκτρονικών & Τηλεπικοινωνιών της Σχολής Ναυτικών Δοκίμων (ΣΝΔ)

Περίληψη. Με ακτογραμμή που ξεπερνά τα τρεις χιλιάδες χιλιόμετρα και γεωγραφική θέση πολύ κοντά σε κομβικές θαλάσσιες αρτηρίες, η Σομαλία είναι ένα από τα ιστορικά κέντρα πειρατείας στην Αφρική. Αλλά και κατά την τρέχουσα χρονική περίοδο, πέριξ του ανατολικού άκρου της Αφρικανικής ηπείρου, γνωστού και ως «Κέρατος της Αφρικής», κυκλώματα πειρατών επιτίθενται με καταγιστικό ρυθμό εναντίον της διερχόμενης κυκλοφορίας των πλοίων, ένα γεγονός με εξαιρετικά δυσμενή επίδραση στο θαλάσσιο σύστημα μεταφορών. Ορθά λοιπόν, η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) διεξάγει την πρώτη της επιχείρηση με αμιγή στρατιωτικό χαρακτήρα, τη ναυτική επιχείρηση ΑΤΑΛΑΝΤΑ, που θα αποτελέσει το βασικό αντικείμενο της παρούσας ανάλυσης, στην ευρύτερη θαλάσσια περιφέρεια του Κόλπου του Άντεν και της σομαλικής λεκάνης του Ινδικού Ωκεανού, προκειμένου να καταπολεμηθεί η πειρατική δραστηριότητα και να εξασφαλιστεί η ασφάλεια των θαλασσίων μεταφορών. Ένα ενδιαφέρον συμπέρασμα που προκύπτει από την παρούσα ανάλυση είναι ότι η χρήση στρατιωτικής βίας έχει θετική συνεισφορά στην πάταξη της πειρατείας, αλλά αποτελεί μόνο προσωρινή λύση. Μόνο η εγκαθίδρυση κράτους δικαίου, στην πολύπαθη αυτή χώρα, θα επιλύσει οριστικά το πρόβλημα της πειρατείας.

Abstract. Piracy in Africa has existed for as long as the nearby seas and oceans were plied for commerce. At the beginning of the 21st century, the level of piracy in Africa was rather low. However, as the international community failed to react upon the escalating situation in Somalia, outlaws and warlords expanded their activities towards the sea. After 2005, piracy in the vicinity of Somalia, in particularly in the waters between the Red Sea and the Indian Ocean, became the focus of attention. The Somali piracy phenomenon endangers the recovery of European economies, by putting additional pressure upon their already stressed “just enough-

just in time” model and creating world-wide disturbances for maritime transport. As a result, the European Union (EU) has been conducting operation ATALANTA – the main point of interest of the analysis that follows – since December 2008, with the aim to help deter, prevent and repress acts of piracy and armed robbery off the coast of Somalia. Later on, the Council of the EU decided to extend the mandate of the military operation for another year (until the 12th December 2010). It is EU's first ever naval operation and is being conducted within the framework of the European Security and Defense Policy (ESDP). However, this effort is only an interim solution; only when the rule of law is well established in Somalia, piracy will diminish.

Keywords: Θαλάσσιες μεταφορές, Σομαλία, Αφρική, Επιχείρηση ΑΤΑΛΑΝΤΑ.

PACS: 89.40.Cc

ΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΤΕΙΑ

Τα στατιστικά στοιχεία που εξυπηρετούν τις ανάγκες του ευρύτερου επιστημονικού κλάδου της Γεωγραφίας καταδεικνύουν ότι, αν και οι διάφορες ανθρώπινες πληθυσμιακές ομάδες κατοικούν και ευδοκίμουν μόνο πάνω σε χερσαίο έδαφος (ξηρά), το υγρό στοιχείο είναι κυρίαρχο στον πλανήτη μας. Και τούτο, διότι, οι θάλασσες και οι ωκεανοί αποτελούν περίπου τα 3/4 της συνολικής επιφάνειας της Γης. Τα ύδατα της γήινης σφαίρας, πέρα από το αναγκαίο πόσιμο νερό, χρησίμευσαν στον άνθρωπο ανέκαθεν για δύο κύριες δραστηριότητες: Η πρώτη από αυτές, πιθανώς, αποτελεί μία από τις παλαιότερες ενασχολήσεις του. Ανάγεται μάλιστα στην εποχή του τροφосуλλέκτη, καθώς σχετίζεται με την κάλυψη των καθημερινών διατροφικών του αναγκών μέσω της αλιείας. Αλλά και για τη δεύτερη δραστηριότητα υπό συζήτηση, είναι αρκετά δύσκολο να εντοπιστεί με ικανοποιητική ακρίβεια το χρονικό σημείο εκκίνησης της. Αφορά την εκμετάλλευση του υγρού στοιχείου για την επικοινωνία / μεταφορά ανάμεσα στα εδάφη, ηπειρωτικά ή / και νησιωτικά, που αποτελούν τον τόπο διαβίωσης της ανθρωπότητας¹ [1]. Σημειώνεται ότι με το όρο *μεταφορά* περιγράφεται η διακίνηση προσώπων και αγαθών από ένα γεωγραφικό σημείο σε άλλο [2].

Η προσπάθεια αναζήτησης αγαθών / προϊόντων, που εκλείπουν για διάφορους λόγους από κάποια δεδομένη περιοχή, και τα οποία μπορούν να παραχθούν / κατασκευασθούν σε κάποια άλλη απομακρυσμένη γεωγραφική τοποθεσία, μπορεί να θεωρηθεί ως ένα από τα πλέον βασικά κίνητρα για την επικοινωνία μεταξύ πληθυσμών εγκατεστημένων σε διαφορετικά σημεία του πλανήτη μας. Ενώ, σε όλο το ρου της ανθρώπινης ιστορίας, η εμπορική δραστηριότητα συνέβαλε τα μέγιστα στην εισαγωγή, καθιέρωση και ανάπτυξη των μέσων μεταφοράς. Παράλληλα, υπήρξε σε κάθε δεδομένη εποχή η αφετηρία και το βασικό υπόβαθρο για την οικονομική και πνευματική πρόοδο του ανθρώπου [3] [4]. Είναι σημαντικό να διευκρινιστεί ότι στο εννοιολογικό πεδίο της μεταφοράς εντάσσονται τόσο οι πρώτες ύλες και τα προς μεταποίηση ή τελικά προϊόντα, όσο και οι άνθρωποι [5]. Τέλος, θα πρέπει να γίνει ιδιαίτερη μνεία στο γεγονός ότι οι θαλάσσιες μεταφορές αποτελούν διαχρονικά το βασικό μηχανισμό με τον οποίο εξυπηρετείται το συντριπτικό ποσοστό της παγκόσμιας εμπορικής κίνησης, με βάση

¹ Επίσης, σε πολύ μεταγενέστερο χρόνο και προφανώς με βάση την τεχνολογική ωρίμανση της ανθρωπότητας που συντελέστηκε στο μεταξύ, όσον αφορά τη γενικότερη εκμετάλλευση του υγρού στοιχείου, προστέθηκαν προφανώς διάφορα θέματα που σχετίζονται με τους υποθαλάσσιους φυσικούς πόρους, με το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο να ξεχωρίζουν μεταξύ των υπολοίπων.

μια σειρά πλεονεκτημάτων, που θα παρουσιαστούν εξαιρετικά συνοπτικά παρακάτω, σε σχέση με τα υπόλοιπα μεταφορικά μέσα.

Επισημαίνεται ότι η πειρατεία είναι, επίσης, ένα φαινόμενο με διαχρονικό χαρακτήρα, καθώς, από την πρώτη στιγμή που ο άνθρωπος ανέπτυξε δραστηριότητα σε σχέση με τη θάλασσα, έχουμε ταυτόχρονα και την εμφάνιση πειρατών. Είναι χαρακτηριστικό ότι αναφορές για πειρατεία υπάρχουν ακόμα και πριν από το 13ο αιώνα π.Χ., στην περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου. Σε πλήθος ιστορικών κειμένων σημειώνεται ότι ο βασιλιάς της νήσου Κρήτης Μίνωας, περί το 1450 π.Χ., συγκρότησε το πρώτο στην ιστορία πολεμικό ναυτικό, ενώ, με τη βοήθεια του αδελφού του Ραδάμανθου εκδίωξε τους πειρατές από τις νήσους των Κυκλάδων, που αποτελούσαν το βασικό ορμητήριό τους [6]. Αργότερα, στην κλασική αρχαιότητα και τα ρωμαϊκά χρόνια, η πειρατεία ήταν μια ιδιαίτερα διαδεδομένη πρακτική [7]. Πειρατική δράση καταγράφεται σε όλη την ανθρώπινη ιστορία, με την κορύφωσή της να εντοπίζεται μετά την ανακάλυψη της Αμερικής και την ισπανική κατάκτηση της Καραϊβικής, την εποχή των συγκρούσεων των μεγάλων ευρωπαϊκών αυτοκρατοριών. Μέχρι την έλευση του ατμού στα δρώμενα της ναυτιλίας, τα πειρατικά περιστατικά ήταν ιδιαίτερα συχνά και αποτελούσαν μια από τις κύριες πηγές ανησυχίας, τόσο για τους πλοιοκτήτες και τα πληρώματα των πλοίων, όσο και για τις διάφορες κυβερνήσεις ιδιαίτερα των χωρών που χαρακτηρίζονται ως μεγάλες ναυτικές δυνάμεις και παραδοσιακά επιθυμούν να επεκτείνουν και στη θάλασσα τον αποτελεσματικό έλεγχο και κυριαρχία, τον οποίο με ευκολία γενικά ασκούν στη ξηρά [8].

Κατά συνέπεια, όταν η τεχνολογική ωρίμανση της ανθρωπότητας το επέτρεψε, οι μηχανοκίνητοι πλέον πολεμικοί στολίσκοι των διάφορων χωρών με έντονο ενδιαφέρον για την ανεμπόδιστη ναυσιπλοΐα, επιδόθηκαν με ζήλο στην ανελέητη καταδίωξη των πειρατών. Εκμεταλλευόμενες ιδιαίτερα το τεχνολογικό προβάδισμα του ατμού, καθώς οι παράνομοι της θάλασσας, μη μπορώντας τελικά να εκσυγχρονιστούν, παρέμειναν προσκολλημένοι στις πρακτικές της εποχής των ιστίων, οι μεγάλες ναυτικές δυνάμεις και τα πολεμικά πλοία τους πέτυχαν σημαντικό αριθμό συλλήψεων. Παράλληλα, στα πλαίσια της αποικιοκρατίας, η αποτελεσματική φύλαξη των ακτών σε σχεδόν όλα τα μήκη και πλάτη του πλανήτη, αποστέρησε τους πειρατές από τα αναγκαία «ασφαλή «καταφύγια²» και αυτοί υποχρεώθηκαν να σταματήσουν τη συγκεκριμένη δραστηριότητα ή κατέληξαν σε σύντομο χρόνο να συλληφθούν από τους αμείλικτους διώκτες τους. Αναπόφευκτα λοιπόν, η απειλή της πειρατείας υποχώρησε από το επίκεντρο ενδιαφέροντος κυβερνήσεων και θαλάσσιων μεταφορέων, ενώ, για μία περίοδο που ξεπερνά τα διακόσια χρόνια και ολοκληρώνεται λίγο πριν από τις αρχές της τελευταίας δεκαετίας του 20ού αιώνα, το φαινόμενο της πειρατείας είχε περιοριστεί σημαντικά. Αν και την χρονική περίοδο που προσδιορίστηκε παραπάνω, η παράνομη διαρπαγή στη θάλασσα δεν εξαφανίστηκε ποτέ ολοκληρωτικά, οι πειρατές είχαν μόνο σποραδική και εξαιρετικά περιορισμένη εμφάνιση, αποκλειστικά σε περιοχές που ανήκουν στον αποκαλούμενο αναπτυσσόμενο κόσμο [9].

Όμως, κατά την χρονική περίοδο που συμπίπτει με τη συμπλήρωση της πρώτης δεκαετίας του 21^{ου} αιώνα, η κατάσταση ως προς την πειρατεία, είναι τελείως διαφορετική σε σχέση με το πρόσφατο παρελθόν. Και τούτο, διότι, στη διάρκεια των τριών τελευταίων δεκαετιών – με διστακτικό βηματισμό στην αρχή, αλλά με αρκετά πιο γοργό βηματισμό στη συνέχεια – η πειρατεία επανέκαμψε ως υπαρκτή απειλή. Τα στατιστικά στοιχεία που ποικιλότροπα συλλέγει και επεξεργάζεται ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (International Maritime Organization-IMO) για τις πειρατικές επιθέσεις στα διάφορα σημεία του πλανήτη μας, καταδεικνύουν ότι η πειρατική δραστηριότητα αναδείχθηκε εκ νέου σε μείζον πρόβλημα για τη ναυτιλιακή βιομηχανία, ιδιαίτερα σε μερικά από τα πλέον γνωστά σημεία συγκέντρωσης της κυκλοφορίας των πλοίων ανά τον κόσμο [10]. Σημειώνεται ότι σήμερα, η παρουσία πειρατών και οι επιθέσεις αυτών εναντίον των

² Στη γενικότερη βιβλιογραφία και δημοσιογραφικές αναλύσεις στην αγγλική γλώσσα -αλλά και στην επίσημη στρατιωτική φρασεολογία που χρησιμοποιεί το NATO (North Atlantic Treaty Organization)- χρησιμοποιείται συνήθως ο όρος «safe heaven».

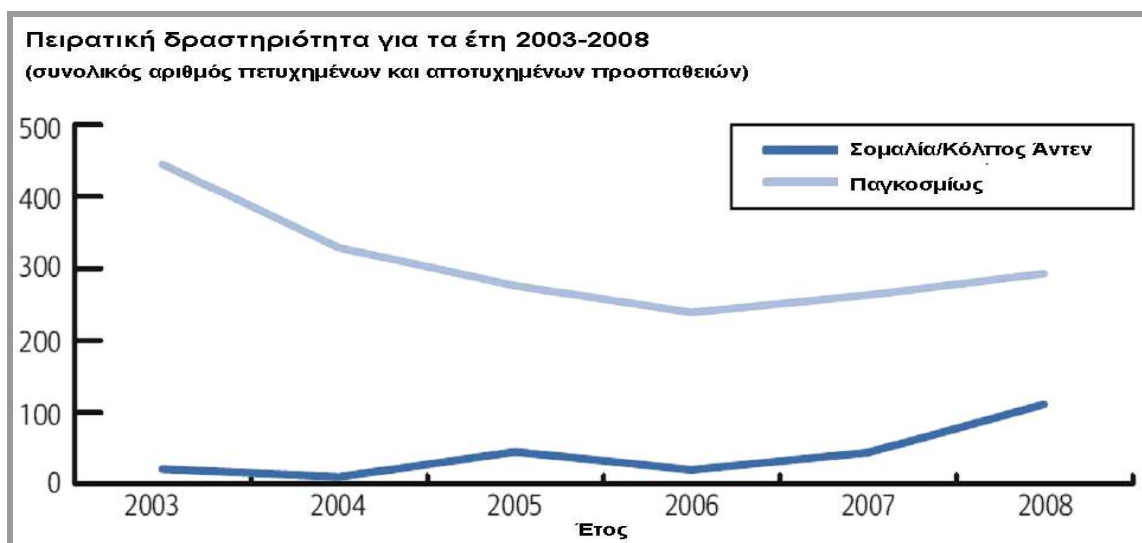
διάφορων μεγεθών εμπορικών πλοίων – π.χ. δεξαμενόπλοιων και φορτηγών, αλλά και των αρκετά μικρότερων σκαφών, όπως τα αλιευτικά ανοιχτής θαλάσσης και τα γιοτ αναψυχής – μπορούν με βάση τη γεωγραφία να εντοπιστούν κυρίως πλησίον των παραλιών ή συγκεκριμένων γεωγραφικών ιδιομορφιών. Χαρακτηριστικά παραδείγματα της τελευταίας περίπτωσης αποτελούν τα διάφορα στενά που συγκεντρώνουν τη ναυτιλιακή κίνηση (βλ. στενά της Μάλακκα), μια συνήθως πειρατική πρακτική και κατά το απώτερο παρελθόν. Παράλληλα, συγκεκριμένη κατηγορία πειρατών επωφελούνται από την ευρύτατη διάχυση, στο πλαίσιο της παγκοσμιοποίησης, της σύγχρονης ηλεκτρονικής τεχνολογίας και εκμεταλλεύονται σε ικανοποιητικό βαθμό τις δυνατότητες που αυτή παρέχει. Στην περίπτωση αυτή εντάσσονται οι φορητοί δέκτες του δορυφορικού συστήματος προσδιορισμού στίγματος GPS (Global Positioning System-GPS) και το σύστημα AIS (Automatic Identification System-AIS) [11]. Επισημαίνεται ότι ειδικά από το τελευταίο αυτό σύστημα, πέρα από την ιδιαίτερη συμβολή του σε διάφορα θέματα ασφάλειας της ναυσιπλοΐας, οι πειρατές μπορούν να αντλήσουν σημαντικές πληροφορίες σχετικές με το πλοίο εναντίον του οποίου και θα επιχειρήσουν να «επιτεθούν», όπως, π.χ., το γενικό τύπο του ή ακόμα και το όνομα του σκάφους.

Επομένως, αν και έπεται στη συνέχεια η αναλυτική παρουσίαση του τρόπου δράσης των πειρατών, ένα πρώτο συμπέρασμα που προκύπτει εδώ είναι ότι σήμερα, η ευρύτατη διάχυση της τεχνολογίας στέκεται αρωγός στην προσπάθεια κατάληψης των εμπορικών πλοίων, σε αντίθεση με το παρελθόν. Η σύγχρονη τεχνολογία είναι άμεσα και εύκολα προσιτή στους πειρατές, ενώ, οι δυνατότητες που αυτή παρέχει όχι μόνο συμβάλλουν, αλλά ουσιαστικά δημιουργούν από το μηδέν τις απαραίτητες προϋποθέσεις για την επέκταση της παράνομης δράσης τους μακράν της ακτογραμμής. Και τούτο, διότι επιλύουν σε μεγάλο βαθμό το μεγάλο πρόβλημα των πειρατών του παρελθόντος, δηλαδή, σε πρώτο στάδιο τον εντοπισμό του πλοίου-στόχου σε μεγάλες αποστάσεις και σε δεύτερο στάδιο τη γρήγορη άντληση πληροφοριών που θα διευκολύνουν την όλη εκτέλεση της επιβίβασής τους σε αυτό. Επομένως, περιστατικά πειρατείας καταγράφονται πλέον και σε πολύ μεγάλες αποστάσεις από τη ξηρά. Ωστόσο, το κρίσιμο ζήτημα στην όλη διαδικασία της πάταξης της πειρατείας εξακολουθεί να παραμένει το γεγονός ότι οι πειρατές διαθέτουν ασφαλή καταφύγια στην ξηρά, ως αποτέλεσμα της αδυναμίας (ή και σε συγκεκριμένες περιπτώσεις «απροθυμίας») για επαρκή αστυνόμευση.

Την τελευταία δεκαετία ειδικά, παρατηρείται σημαντική έξαρση των πειρατικών περιστατικών στις εκατέρωθεν ακτές της Αφρικής³. Μάλιστα, ιδιαίτερα από το έτος 2005 και μετά, τα μέσα μαζικής ενημέρωσης (ΜΜΕ) έχουν έντονα εστιάσει στα περιστατικά κατάληψης πλοίων που λαμβάνουν χώρα στον Ινδικό Ωκεανό και τον Κόλπο του Άντεν, καθιερώνοντας τον όρο «Σομαλική Πειρατεία», λόγω της γειννίας της πολύπαθης αυτής χώρας με τις παραπάνω γεωγραφικές περιφέρειες [12]. Η Σομαλία έχει εκτεταμένες ακτές βόρεια, ανατολικά και νοτιοανατολικά στον Κόλπο του Άντεν και τον Ινδικό Ωκεανό αντίστοιχα, καθώς βρίσκεται στο ανατολικό άκρο της Αφρικανικής Ηπείρου, μία περιοχή επίσης γνωστή υπό τον όρο «Κέρας της Αφρικής». Συνορεύει στα δυτικά και βορειοδυτικά με την Αιθιοπία και το Τζιμπουτί, ενώ, στα νοτιοδυτικά με την Κένυα [13]. Ας σημειωθεί ότι, το κατά κεφαλήν ΑΕΠ της χώρας ανέρχεται στα 600\$ ΗΠΑ ετησίως, επίδοση που εντάσσει τη χώρα αυτή στις τελευταίες θέσεις της παγκόσμιας κατάταξης, όσον αφορά τους δείκτες ευημερίας [14], [15]. Λαμβάνοντας υπόψη, λοιπόν, ότι η συγκεκριμένη χώρα είναι από τις φτωχότερες του κόσμου, σε συνδυασμό με τις πολύ περιορισμένες δυνατότητες της κεντρικής κυβέρνησης να επιβάλει την ηρεμία και την τάξη στην επικράτειά της, αλλά και το γενικότερο καθεστώς αστάθειας στην Ανατολική Αφρική, η πειρατεία

³ Επισημαίνεται ότι η Νιγηρία έχει κάνει σημαντικές προσπάθειες για τη μείωση της πειρατείας, αλλά ακόμα ευθύνεται για ένα αρκετό υψηλό ποσοστό των περιστατικών παγκοσμίως. Ενώ, η πειρατεία στα στενά της Μάλακκα, που απασχόλησε παλαιότερα σε αρκετά υψηλό βαθμό τη διεθνή ναυτιλιακή κοινότητα, σήμερα πλέον, με τη συντονισμένη δράση των πολεμικών ναυτικών της περιοχής (κυρίως της Μαλαισίας και Σιγκαπούρης, αφού οι γενικότερες δυνατότητες της Ινδονησίας είναι μάλλον περιορισμένες), το φαινόμενο έχει περιοριστεί σημαντικά.

θα συνεχίσει να αποτελεί μια αρκετά προσφιλή δραστηριότητα για τους χειμαζόμενους κατοίκους της περιοχής.



Σχήμα 1. Αντιπαραβολή συνολικού αριθμού πειρατικών προσπαθειών σε παγκόσμιο επίπεδο και των επιθέσεων που σχετίζονται μόνο με τη «Σομαλική Πειρατεία» [16].

Με βάση τα τεκταινόμενα στη θαλάσσια περιφέρεια πέριξ της Σομαλίας, η ελεύθερη κίνηση των πλοίων μέσω της διώρυγας του Σουέζ – μια εξαιρετικά σημαντική υποδομή για το σύγχρονο σύστημα θαλάσσιων μεταφορών, καθώς αυτή συντομεύει κατά πολύ το συνολικό δρομολόγιο μεταξύ των πλέον προσφιλών λιμένων από την Ασία προς τη Δύση (δηλαδή κυρίως της Ευρώπης και δευτερευόντως των ανατολικών ακτών των ΗΠΑ) και αντίστροφα [17] – αποτελεί πλέον παρελθόν. Την ίδια χρονική στιγμή, γίνεται σαφές ότι χωρίς εξωτερικές παρεμβάσεις ενδέχεται να μη μπορούν στο μέλλον να χρησιμοποιούν ανεμπόδιστα τα εμπορικά πλοία ούτε την ευρύτερη περιοχή του Ινδικού Ωκεανού [18], καθώς τίθεται σε αμφισβήτηση η ελευθερία της ναυσιπλοΐας, όχι μόνο πλησίον της ακτογραμμής, αλλά και σε πολύ μεγάλες αποστάσεις από αυτήν, οι οποίες και ξεπερνούν κατά πολύ τα 400-600 ναυτικά μίλια⁴ [19]. Αξίζει, επίσης, να σημειωθεί ότι έχουν καταγραφεί επιθέσεις πειρατών που έχουν το καταφύγιό τους στην «άναρχη» Σομαλία, μέσα στα χωρικά ύδατα του μακρινού Ομάν, που οριοθετείται στο νοτιοανατολικό άκρο της Αραβικής Χερσονήσου [20].

Η βασική επιδίωξη της παρούσας ανάλυσης είναι να φωτίσει τις διάφορες πτυχές της δράσης των προερχόμενων από τη Σομαλία πειρατών, να καταγράψει την επίδραση του φαινομένου αυτού στις θαλάσσιες μεταφορές και να περιγράψει τη χρήση στρατιωτικών μέσων για την καταπολέμηση της πειρατείας. Ακόμα και για όσους δεν παρακολουθούν εκ του σύνεγγυς τις εξελίξεις στις θαλάσσιες μεταφορές, γίνεται αντιληπτό ότι τα αυξανόμενα περιστατικά πειρατείας στη Σομαλία, πέρα από τη δυσμενή επίδραση στις θαλάσσιες μεταφορές, αναδεικνύονται σε ξεκάθαρη απειλή κατά του παγκόσμιου οικονομικού συστήματος. Η συγκεκριμένη παράνομη δραστηριότητα έχει σαφώς αναδειχθεί σε κίνδυνο που απασχολεί την παγκόσμια ναυτική κοινότητα, αλλά και τους διάφορους οργανισμούς που εμπλέκονται στη ναυσιπλοΐα και τις χώρες που έχουν έντονα συμφέροντα στον τομέα της ναυτιλιακής βιομηχανίας. Οι επιθέσεις των πειρατών στην ευρύτερη περιφέρεια που συζητήθηκε διεξοδικά παραπάνω, είναι ιδιαίτερα επικίνδυνες και μπορούν να προκαλέσουν αλυσιδωτές επιπτώσεις σε πολλούς τομείς. Οι θαλάσσιες μεταφορές είναι ένας απαραίτητος πυλώνας για την ομαλή διακίνηση του διεθνούς

⁴ Σημειώνεται η συνεχής αυξητική τάση της απόστασης από την ξηρά που λαμβάνουν χώρα οι πειρατικές, μεταξύ των ετών 2005-2010.

εμπορίου και λαμβάνοντας υπόψη τις επιπτώσεις της τρέχουσας παγκόσμιας οικονομικής κρίσης, μόνο ένα βελτιστοποιημένο και τελείως ασφαλές μεταφορικό περιβάλλον μπορεί να βοηθήσει στη γρήγορη έξοδο από την παρούσα κατάσταση.

ΟΙ ΚΥΡΙΑΡΧΕΣ ΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΔΙΑΔΡΟΜΕΣ.

Κατά την τρέχουσα χρονική περίοδο, το διεθνές εμπόριο αποτελεί το θεμελιώδη λίθο της οικονομικής δραστηριότητας σε παγκόσμιο επίπεδο. Παράλληλα, η εμπορική ναυτιλία συνιστά έναν ιδιαίτερα νευραλγικό τομέα τροφοδότησης και αναζωογόνησης της παγκόσμιας οικονομίας. Δεν είναι, απλά, μια λειτουργική έκφασή της, αλλά βρίσκεται σε άμεση αλληλεξάρτηση με το εμπόριο, την παραγωγή και την κατανάλωση. Θεωρώντας ότι το υγρό στοιχείο δεν χωρίζει, αλλά στην πραγματικότητα ενώνει τις ανθρώπινες κοινωνίες ως επιφάνεια μεταφορών, καθίσταται σαφές ότι η διακίνηση αγαθών και επιβατών, μέσω των θαλασσών και των ωκεανών του πλανήτη μας, αποτελεί έναν από τους πλέον απαραίτητους πυλώνες της παγκοσμιοποίησης [21]. Δηλαδή, σήμερα, οι θαλάσσιες μεταφορές – και φυσικά οι συνδεδεμένες με τη ναυτιλία δραστηριότητες – έχουν κυρίαρχο ρόλο στην παγκοσμιοποιημένη οικονομία. Και τούτο, διότι, η διεθνοποίηση του εμπορίου, η (μέχρι πρότινος)⁵ διαρκής ανάπτυξη της παγκόσμιας οικονομίας και η συνυφασμένη άνοδος των διεθνών εμπορευματικών συναλλαγών, έχουν επίσης τροφοδοτήσει έντονα τη ζήτηση για υπηρεσίες θαλάσσιων μεταφορών.

Πράγματι, μόνο χάρη στην ύπαρξη του εμπορικού πλοίου είναι τεχνικά και οικονομικά δυνατή η μαζική μεταφορά προϊόντων και των αναγκαίων πρώτων υλών για την κατασκευή τους, σε μια κοινωνία που έχει ολοένα και μεγαλύτερη ανάγκη για καταναλωτικά αγαθά. Παράλληλα είναι ενδεικτικό της κρίσιμης θέσης των διά του υγρού στοιχείου μεταφορών, όσον αφορά το παγκόσμιο οικονομικό σύστημα, ότι αυτές διακινούν ένα εξαιρετικά υψηλό ποσοστό φορτίων / εμπορευμάτων, το οποίο και προσεγγίζει τα 5.000 εκατομμύρια τόνους [23]. Με βάση τη σχεδόν αδιάκοπη τεχνολογική πρόοδο της ανθρωπότητας, οι θαλάσσιες μεταφορές, σε συνδυασμό με τις αερομεταφορές και τις χερσαίες (δηλαδή, οδικές και σιδηροδρομικές) μεταφορές αποτελούν το σύγχρονο παγκόσμιο δίκτυο μεταφορών. Σε κάθε περίπτωση, όμως, τα τέσσερα πέμπτα περίπου του συνολικού όγκου των εμπορικών πράξεων, ανά τον κόσμο, διεκπεραιώνονται μέσω θαλάσσης. Σε αυτό, πέρα από τη φυσική γεωγραφική διαμόρφωση του πλανήτη μας, συμβάλλει καθοριστικά και το γεγονός ότι η ναυτιλία διατηρεί το ανταγωνιστικό πλεονέκτημα απέναντι στις αεροπορικές ή διά μέσου ξηράς συγκοινωνίες. Προκειμένου να καταδειχθεί η επίδραση της γεωγραφίας στον τρόπο με τον οποίο διεκπεραιώνονται γενικά οι μεταφορές, επισημαίνεται εκ νέου ότι τα τρία τέταρτα περίπου της επιφάνειας της Γης καλύπτονται από θάλασσες, ωκεανούς και λίμνες. Επίσης, με εξαίρεση τις περιοχές των δυο γεωγραφικών πόλων, είναι δυνατή η θαλάσσια μεταφορά επιβατών και αγαθών από και προς οποιοδήποτε σημείο της υδρογείου [24].

Πράγματι, οι θαλάσσιες μεταφορές διαθέτουν αριθμό συγκριτικών πλεονεκτημάτων έναντι των οδικών, σιδηροδρομικών και αεροπορικών μεταφορών, ιδίως λόγω του χαμηλού κόστους κατασκευής αλλά και συντήρησης. Ανεξάρτητα από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του πλοίου που θα χρησιμοποιηθεί για τη διακίνηση ενός φορτίου, το θαλάσσιο μεταφορικό μέσο εμφανίζει βέλτιστο δείκτη που προκύπτει από τη σχέση κόστους - αποτελέσματος, συγκρινόμενο με τα άλλα βασικά μέσα μεταφοράς. Στην προαναφερθείσα σχέση κόστους -αποτελέσματος συμβάλλουν, όμως, και οι ακόλουθοι παράγοντες: (α) η σχέση επένδυσης κεφαλαίου και μεταφορικής ικανότητας, η οποία είναι μικρότερη από κάθε άλλο μέσο, (β) η σχέση αριθμού

⁵ Από τα τέλη του 2008 και μετά, ο αντίκτυπος της οικονομικής κρίσης στην πραγματική οικονομία είναι επίσης αισθητός και στον ναυτιλιακό τομέα. Ως αποτέλεσμα υφίσταται ανάγκη για συντονισμένη δράση και δημιουργία κατάλληλης πολιτικής, προκειμένου να εξασφαλιστούν οι συνεχείς επιδόσεις του ευρωπαϊκού συστήματος θαλάσσιων μεταφορών και η συμβολή του στην ανάκαμψη της παγκόσμιας οικονομίας [22].

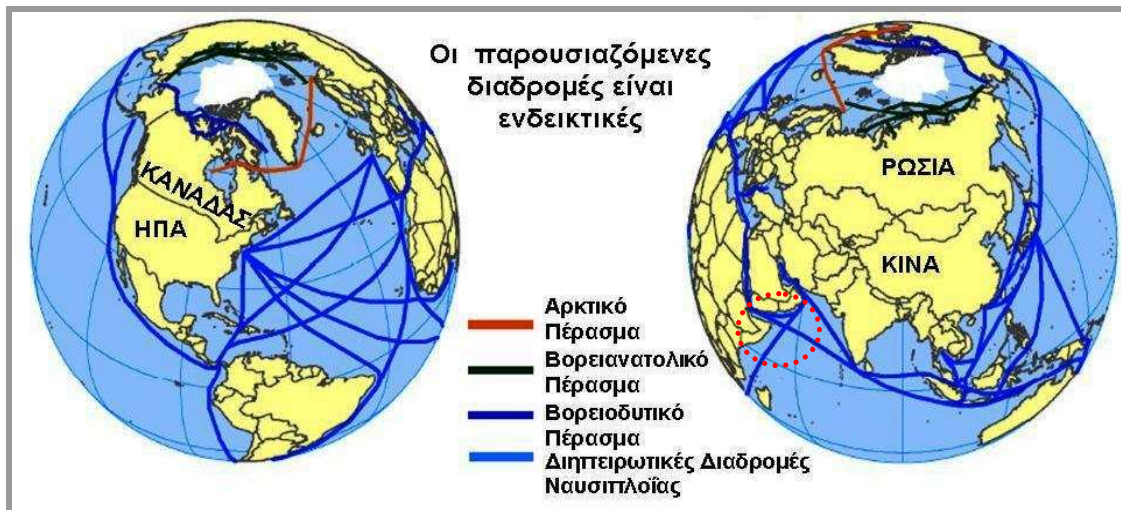
εργαζομένων στο πλοίο και μεταφορικής ικανότητας, (γ) η απόσβεση του κεφαλαίου που έχει επενδυθεί και το οποίο μόνο με το σιδηρόδρομο μπορεί να συγκριθεί, (δ) η σχέση δύναμης πρόωσης μεταξύ πλοίων και λοιπών μέσων μεταφοράς, η οποία είναι μικρότερη έναντι των μέσων που κινούνται σε οδόστρωμα ή σιδηροτροχιές, ενώ τα αεροπλάνα υπολείπονται έναντι των πλοίων, δεδομένου του μεγάλου όγκου που τα τελευταία δύνανται να μεταφέρουν, και (ε) οι δαπάνες που απαιτούνται για τη συντήρηση των εγκαταστάσεων υποδοχής των πλοίων και είναι κατά πολύ μικρότερες από αυτές των λοιπών μέσων [25].

Επισημαίνεται, επίσης, ότι η μεταφορά μαζικών χύδην φορτίων, όπως π.χ. πρώτες ύλες, καύσιμα ή δημητριακά, διενεργείται σχεδόν αποκλειστικά μόνον μέσω θαλάσσης σταθερά από τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο, χωρίς να υπάρχει προοπτική αλλαγής αυτού του καθεστώτος. Τούτο οφείλεται εν πολλοίς στην εντατικοποίηση της βιομηχανικής παραγωγής και κατά συνέπεια την αλματώδη αύξηση της ζήτησης για πρώτες ύλες και ενεργειακούς πόρους (καύσιμα) παγκοσμίως. Ειδικά η ανάδυση νέων βιομηχανικών χωρών, που απέχουν μεγάλες αποστάσεις από τις κύριες περιοχές προέλευσης πρώτων υλών ή περιβάλλονται αποκλειστικά από θάλασσα, όπως π.χ. η Ιαπωνία [26], δημιούργησε αυξανόμενες ανάγκες μεταφορών στις οποίες μόνο το εμπορικό πλοίο λόγω της υψηλής μεταφορικής ικανότητάς του, συγκρινόμενο με τα όλα τα υπόλοιπα μεταφορικά μέσα, μπορεί να ανταποκριθεί. Επομένως, οι λόγοι που οδηγούν στην επικράτηση της θαλάσσιας μεταφοράς έναντι των υπόλοιπων μέσων, όπως καταγράφηκαν αναλυτικά παραπάνω, είναι πολλοί και σημαντικοί.

Γενικά, η θαλάσσια μεταφορά έχει βαρυσήμαντο ρόλο στη μεταφορά ενεργειακών πόρων, όπως το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, ενώ μπορεί να εξυπηρετήσει ένα ιδιαίτερα πολυδιάστατο θεματικό πεδίο, από την αγορά πρώτων υλών έως την παράδοση έτοιμων προϊόντων [27]. Είναι, επομένως, αναγκαίο να διαχωρίσουμε τη ναυτιλιακή βιομηχανία σε ξεχωριστές αγορές. Ο διαχωρισμός αυτός, καθώς και ο εντοπισμός των ειδικότερων χαρακτηριστικών της κάθε αγοράς, γίνονται με τη βοήθεια διάφορων κριτηρίων. Για να πραγματοποιήσουμε τον αναγκαίο επιμερισμό, χρησιμοποιούμε δεδομένα και χαρακτηριστικά όπως είναι το μέγεθος και το είδος του φορτίου, η γεωγραφική περιοχή στην οποία γίνεται η διακίνηση, οι θαλάσσιες διαδρομές που χρησιμοποιούνται και ο τύπος του πλοίου. Όπως πολύ ορθά επισημαίνει ο καθηγητής Ν. Νικητάκος: «Μια από τις βασικές διακρίσεις της ναυτιλιακής βιομηχανίας η οποία στηρίζεται στο μέγεθος του φορτίου είναι η ναυτιλία γραμμών (*liner shipping*) και η ναυτιλία μεταφοράς χύδην φορτίων (*bulk shipping*). Σχετικά με τις απαιτήσεις των θαλασσιών διαδρομών, η ναυτιλιακή βιομηχανία διακρίνεται στην ποντοπόρο και στη ναυτιλία μικρότερων αποστάσεων (*short sea, coastal and inland waterways shipping*). Με βάση το είδος του φορτίου, η ναυτιλιακή βιομηχανία διαχωρίζεται σε δύο θεμελιώδεις κατηγορίες: την επιβατηγό ναυτιλία, η οποία αφορά κυρίως στην ακτοπλοΐα και η οποία εξυπηρετείται από επιβατηγά/οχηματαγωγά πλοία και τις θαλάσσιες μεταφορές πρώτων υλών, ημικατεργασμένων και τελικών προϊόντων. Η δεύτερη κατηγορία μπορεί να επιμεριστεί με βάση τον τύπο του πλοίου σε τρεις μεγάλες κατηγορίες: στην αγορά των δεξαμενόπλοιων (*Tanker Chemical, LPG/LNG Market*), των πλοίων χύδην ξηρού φορτίου (*Bulk carrier Market*) και των πλοίων εμπορευματοκιβωτίων (*Containership Market*)» [28].

Σύμφωνα με τα παραπάνω, τα διάφορα εμπορικά πλοία, διασχίζουν ακατάπαυστα σχεδόν όλες τις θάλασσες και τους ωκεανούς της Γης, ώστε να ανταποκριθούν σε ένα εξαιρετικά πολυποίκιλο μεταφορικό έργο και να καλύψουν τις διογκούμενες μεταφορικές απαιτήσεις της παγκόσμιας οικονομίας. Ωστόσο, ένας σχετικά περιορισμένος αριθμός θαλάσσιων διαδρομών, για τις οποίες θα χρησιμοποιήσουμε τον όρο «κυρίαρχες θαλάσσιες διαδρομές», συνδέει στην πραγματικότητα τις ηπείρους του πλανήτη μας μεταξύ τους. Επί το πλείστον, οι συγκεκριμένες διαδρομές συνδέουν περιοχές πολύ υψηλής γεωοικονομικής αξίας, οι οποίες και διαδραματίζουν καίριο ρόλο στη διεξαγωγή του θαλάσσιου εμπορίου (βλ. σχήμα 2), ενώ, η πυκνότητα της ναυτιλιακής κίνησης κατά μήκος των υπό συζήτηση διαδρομών, έχει άμεση συνάφεια με την εμπορική δραστηριότητα των χωρών που αποτελούν την αφετηρία και τον τερματισμό τους. Επίσης, πρέπει να αναδειχθεί ιδιαίτερα το γεγονός ότι συγκεκριμένες περιοχές συγκεντρώνουν

ιδιαίτερα υψηλό αριθμό πλοίων, με βάση τα γεωγραφικά δεδομένα του πλανήτη μας. Και τούτο, διότι η γενικότερη διαμόρφωση των ηπείρων και των ωκεανών έχει ως τελικό αποτέλεσμα τη σύγκλιση και συσσώρευση της κυκλοφορίας των πλοίων σε συγκεκριμένα σημεία, τα οποία χαρακτηρίζονται ως στρατηγικής σημασίας [29].



Σχήμα 2. Οι θαλάσσιοι δρόμοι του παγκόσμιου εμπορίου [30].

Σε κάθε περίπτωση, η θαλάσσια κυκλοφορία ακολουθεί την κατεύθυνση των ακτογραμμών των ηπείρων. Όσον αφορά το Αρκτικό Πέρασμα, ο πάγος ή / και τα παγόβουνα από τον Αρκτικό Ωκεανό, ιδιαίτερα τη χειμερινή περίοδο, επεκτείνονται πλησίον της συγκεκριμένης διαδρομής [31]. Ενώ, και τα άλλα δύο Πέρασματα (Βορειοανατολικό και Βορειοδυτικό αντίστοιχα) πλησίον του Βόρειου Πόλου (ΒΠ) της Γης έχουν, για παρόμοιους λόγους, πολύ περιορισμένες δυνατότητες αξιοποίησης για τις θαλάσσιες μεταφορές [32]. Επομένως, το ενδιαφέρον μας εστιάζεται στις σημειούμενες με ανοιχτό μπλε χρώμα γραμμές, που αναπαριστούν τις συνδέσεις μεταξύ των διαφορετικών ηπείρων. Ειδικότερα για το σχήμα 2, σημειώνεται ότι με την κόκκινη διακεκομμένη γραμμή, καταδεικνύονται οι περιοχές υπό την επίδραση της σομαλικής πειρατείας. Δηλαδή, πρώτιστα ο Κόλπος του Άντεν, ένας πολύτιμος κρίκος της μεταφορικής αλυσίδας από την Ασία προς την Ευρώπη μέσω της διώρυγας του Σουέζ, καθώς και οι ακτές της Σομαλίας (σομαλική λεκάνη) στον Ινδικό Ωκεανό. Παράλληλα, σημειώνεται ότι ο Περσικός Κόλπος, η μεγαλύτερη γεννήτρια θαλάσσιας μεταφοράς ενεργειακών πόρων, εντάσσεται στις περιοχές που επηρεάζονται δυσμενώς από τη σομαλική πειρατεία, ιδιαίτερα όσον αφορά τις εξαγωγές προς την Ευρώπη.

Επισημαίνεται ότι οι μεταφορές μέσω του Ατλαντικού και του Ειρηνικού Ωκεανού αφορούν σημαντικό αριθμό λιμένων και εντοπίζονται επομένως αρκετές διαδρομές που συνδέουν τις απέναντι ακτές, κατά βάση τόξα μέγιστου κύκλου, για να διεξαχθεί το ταξίδι στο μικρότερο δυνατό χρόνο. Στην Ασιατική ήπειρο, η Κίνα και η Ιαπωνία συγκεντρώνουν μεγάλο πλήθος λιμένων και παράλληλα αποτελούν πολύ μεγάλες γεννήτριες θαλάσσιων μεταφορών με βάση τη συνολική εξαγωγική δραστηριότητά τους. Σημειώνεται, ακόμα, ότι η τοποθεσία όπου εντοπίζεται μεγάλη συγκέντρωση πρώτων υλών (π.χ. μεταλλεύματα) και ενεργειακών πόρων (π.χ. πετρέλαιο) καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τα δρομολόγια για τα πλοία που μεταφέρουν χύδην φορτία, ενώ, η ύπαρξη μεγάλων βιομηχανικών περιοχών και το πού ακριβώς οριοθετούνται οι μεγάλες καταναλωτικές αγορές (π.χ. ΗΠΑ - ΕΕ) διαμορφώνουν καθοριστικά τα δρομολόγια των θαλάσσιων μεταφορών, όσον αφορά προϊόντα προς μεταποίηση, ή τα τελικά αγαθά προς κατανάλωση, τα οποία και μεταφέρονται συνήθως συσκευασμένα σε εμπορευματοκιβώτια (containers) (βλ. σχήμα 3).



Σχήμα 3. Δρόμοι διακίνησης του παγκόσμιου εμπορίου [33].

Αν και οι αντίστοιχες απεικονίσεις των υπό συζήτηση διαδρομών σε χάρτες μπορεί κάποιες φορές να παρερμηνευτούν, γιατί αποδίδονται με μία και μόνο λεπτή γραμμή, αυτές έχουν στην πραγματικότητα ένα πλάτος της τάξεως μερικών χιλιομέτρων. Η δημιουργία τους οφείλεται στην προσπάθεια των πληρωμάτων των πλοίων να «αποφύγουν» τις μεγάλες μάζες ξηράς που παρεμβάλλονται μεταξύ της αφετηρίας και του τερματισμού του ταξιδιού τους. Παράλληλα, διαμορφώνονται και από άλλες επιδράσεις, όπως για παράδειγμα οι επικρατούντες άνεμοι, τα θαλάσσια ρεύματα, το βάθος, αλλά και η ύπαρξη ναυτιλιακών κινδύνων, οι πλέον σημαντικοί από τους οποίους είναι η ύπαρξη υφάλων ή πάγου. Ρόλο διαδραματίζουν, επίσης, τα πολιτικά σύνορα και το γενικότερο πολιτικό καθεστώς μίας περιοχής. Έτσι, για παράδειγμα, είναι λογικό τα πλοία να αποφεύγουν εμπόλεμες περιοχές ή περιφέρειες με υψηλό βαθμό κινδύνου. Επομένως, μία περιοχή που μαστίζεται από πειρατεία είναι πιθανό να μη χρησιμοποιηθεί ως μέρος μιας μεταφορικής διαδρομής, εκτός και αν άλλοι (πολύ ιδιαίτεροι) λόγοι επιβάλλουν την αντίθετη συμπεριφορά. Επομένως, στο σημείο αυτό ακριβώς εντοπίζεται ο κίνδυνος από τη σομαλική πειρατεία για τις θαλάσσιες μεταφορές. Και τούτο, διότι, το φαινόμενο αυτό ασκεί πολύ δυσμενή επίδραση στην κυκλοφορία των πλοίων από και προς τη διώρυγα του Σουέζ. Η συγκεκριμένη τεχνητή κατασκευή, η οποία και σαφώς αποτελεί την πραγματική «ραχοκοκκαλιά» της παγκόσμιας μεταφορικής αλυσίδας, ως ένα εξαιρετικά πολυσύχναστο σημείο το οποίο αποτελεί τη ζωτική σύνδεση μεταξύ Ανατολής (Ασία) και Δύσης (Ευρώπη - ΗΠΑ), αλλά και την πύλη εισόδου για τους ενεργειακούς πόρους που με αφετηρία τον Περσικό Κόλπο θα ανακουφίσουν την ενεργειακά διψασμένη Ευρώπη.

Ο ΤΡΟΠΟΣ ΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΣΟΜΑΛΩΝ ΠΕΙΡΑΤΩΝ

Αποτελούμενη από ένα πρώην βρετανικό προτεκτοράτο και μία ιταλική αποικία, η Σομαλία συγκροτήθηκε ως χώρα το 1960, όταν οι δύο παραπάνω περιοχές ενώθηκαν. Από το δεδομένο χρονικό σημείο και μετά, η γενικότερη ανάπτυξη της έχει καθυστερήσει λόγω των τεταμένων σχέσεων με τα γειτονικά κράτη, στη βάση της εδαφικής διεκδίκησης περιοχών στην Αιθιοπία, την Κένυα και το Τζιμπουτί, οι οποίες κατοικούνται από Σομαλούς. Η λήξη του Ψυχρού Πολέμου επηρέασε αναπόφευκτα και το Κέρας της Αφρικής, ιδιαίτερα τη Σομαλία. Το 1991, ο Πρόεδρος Μπάρρε (Barre) ανετράπη από τους αντιπάλους του, οι οποίοι απέτυχαν, όμως, να συμφωνήσουν τελικά στο θέμα της αντικατάστασης του. Η χώρα ακολούθως βυθίστηκε στην αναρχία, την παρανομία και τις συγκρούσεις μεταξύ των συμμοριών. Ενδιαφέρον προκαλεί το γεγονός ότι μέχρι την ανατροπή του καθεστώτος Barre υπήρχε σε λειτουργία μια υποτυπώδης ακτοφυλακή, η οποία έστω και μερικώς αρκούσε για την πάταξη της πειρατείας. Από το 1991 μέχρι το 1995, η παρουσία μιας πολυεθνικής στρατιωτικής δύναμης, υπό την αιγίδα του ΟΗΕ (UNOSOM), εξασφάλιζε την απαραίτητη αποτροπή για παράνομη δράση στη θάλασσα.

Από το 1995 έως το 2000, οι τοπικοί ψαράδες ξεκίνησαν τις «επιθέσεις» κατά των αλιευτικών πλοίων νηολόγησης σε χώρες (π.χ. Ισπανία, Ιταλία) που δεν έχουν γεινίαση με την περιοχή, θεωρώντας ότι τα αλιεύματα της περιοχής τους ανήκαν [34]. Μεταξύ των ετών 2000 και 2004, καθώς η αλιευτική δραστηριότητα από τα ξένα κράτη συνεχιζόταν με αμείωτη ένταση, οι ντόπιοι ψαράδες κλιμάκωσαν περαιτέρω το επίπεδο βίας προκειμένου να καταδείξουν ότι δεν ήταν διατεθειμένοι να ανεχθούν τη συνέχιση αυτής της συμπεριφοράς και ξεκίνησαν να καταλαμβάνουν τα σκάφη αυτά. Κατά τα έτη 2005-2006 η ανάδειξη των Ισλαμιστών στην εξουσία βύθισε εκ νέου τη χώρα στο απόλυτο χάος. Οι ψαράδες, με τη βοήθεια των ντόπιων πολέμαρχων που παρείχαν οπλισμό και προσωπικό με εμπειρία στο χειρισμό του, μεταβλήθηκαν σε πειρατές που πραγματοποιούσαν καταδρομικές ενέργειες εναντίον των εμπορικών πλοίων που χρησιμοποιούσαν τη θαλάσσια περιοχή πλησίον των ακτών της Σομαλίας.

Επισημαίνεται ότι ο τρόπος με τον οποίο οι σύγχρονοι πειρατές επιβιβάζονται πάνω στα πλοία έχει σημαντικές ομοιότητες με το παρελθόν. Οι Σομαλοί πειρατές ουσιαστικά εφαρμόζουν ελαφρά τροποποιημένη την καταδρομική ενέργεια που στην ελληνική γλώσσα αποδίδεται ως ρεσάλτο [35]. Σε γενικές γραμμές, έχουν άνεση στο χειρισμό του φορητού οπλισμού που χρησιμοποιούν για να καταλάβουν ένα πλοίο. Και τούτο, διότι, οι συμμορίες των πειρατών αποτελούνται συνήθως από άτομα με προηγούμενη στρατιωτική εμπειρία (π.χ. πρώην μέλη του στρατού ή των ομάδων πολιτοφυλάκων, που επί χρόνια συγκρούονται μεταξύ τους για την κατάληψη της εξουσίας στη χώρα) [36]. Αλλά ακόμα και για όσους δεν διαθέτουν ανάλογη προύπηρεσία, η εξοικείωση στο χειρισμό των όπλων είναι ιδιαίτερα εύκολο να επιτευχθεί στη μαστιζόμενη από χρόνια αστάθεια Σομαλία, καθώς η καταφυγή στην ένοπλη βία αποτελεί την πλέον προσφιλή λύση για επίλυση ακόμα και προσωπικών διαφορών [37]. Παράλληλα, τόσο τα οργανωμένα κυκλώματα που εμπλέκονται με την πειρατεία (piracy rings), όσο και ο απλός πληθυσμός έχουν άμεση και εύκολη πρόσβαση σε κάθε είδους οπλισμό, με βάση τις δυνατότητες που παρέχουν οι συμμορίες του διεθνούς εμπορίου όπλων, για τις οποίες η Σομαλία θα πρέπει να θεωρηθεί «γη της επαγγελίας».

Δρουν σε ολιγομελείς ομάδες 5 έως 8 ατόμων και με κινήσεις σχεδόν στρατιωτικής ακρίβειας προσεγγίζουν τα εμπορικά πλοία με μικρά γρήγορα σκάφη, ώστε να έχουν υψηλό πλεονέκτημα ταχύτητας [38]. Μάλιστα, οι Σομαλοί πειρατές σε πολλές περιπτώσεις έχουν ανοίξει πυρ κατά του πλοίου που επιχειρούν να καταλάβουν, σε μια προσπάθεια εκφοβισμού του πληρώματος, με συνέπεια οι επιθέσεις τους να είναι πιο βίαιες από ποτέ. Και καθώς χρησιμοποιούν ολοένα και αυξανόμενη βία κατά τις προσπάθειες κατάληψης των εμπορικών πλοίων, οι ναυτικοί που απαρτίζουν τα πληρώματά τους καλούνται συχνά να ανταποκριθούν στο έργο τους, όχι μόνο

υπό την απειλή των όπλων αλλά στην κυριολεξία μέσα σε καταιγισμό από σφαίρες (βλ. σχήμα 4).



Σχήμα 4. Εμπορικό πλοίο μετά την επίθεση πειρατών [39].

Οι σύγχρονοι πειρατές δεν έχουν την εικόνα που έχουν καλλιεργήσει στο ευρύ κοινό οι κλασικές ταινίες του κινηματογράφου. Οι κρίκοι στα αυτιά, το μαντήλι στο κεφάλι, το μαύρο κάλυμμα στο μάτι και το ξύλινο πόδι ή ο γάντζος έχουν σήμερα αντικατασταθεί από αθλητικές ή στρατιωτικές φόρμες [40]. Είναι αδίστακτοι, καταφεύγουν στην ωμή βία και, μαζί με τα ήδη γνωστά από παλιά σπαθιά και χαντζάρια, φέρουν μια πανσπερμία παλαιότερων ή νεότερων αυτόματων όπλων. Σημειώνεται, επίσης, ότι ιδιαίτερα περίοπτη θέση στον οπλισμό των πειρατών καταλαμβάνουν τα γνωστά τυφέκια εφόδου AK47 ή M16 και οι εκτοξευτήρες ρουκετών RPG, στα οποία οι Σομαλοί έχουν σχετικά εύκολα πρόσβαση μέσω του διεθνούς παράνομου εμπορίου όπλων. Ο εξοπλισμός τους σε μεταφορικά μέσα μπορεί σε γενικές γραμμές να χαρακτηριστεί ως μικρών δυνατοτήτων ή πεπαλαιωμένος. Ιδιαίτερα τα πειρατικά σκάφη είναι στη συντριπτική πλειονότητα μικρά αλιευτικά σκάφη (Dhow) ή ακόμα και απλές (πλαστικές) ψαρόβαρκες με εξωλέμβιες μηχανές μεγάλης ιπποδύναμης (Skiff) (βλ. σχήμα 5). Επίσης, προκειμένου να κατορθώσουν να ανέλθουν στο κατάστρωμα του πλοίου και να το καταλάβουν διά των όπλων, χρησιμοποιούν συνήθως αλουμινένιες σκάλες ή τα «κλασικά» σχοινιά με γάντζους, που έχουν πολλές φορές παρουσιαστεί στις πειρατικές ταινίες του κινηματογράφου. Δηλαδή, τα μέσα, που χρησιμοποιούν οι σύγχρονοι πειρατές για να πραγματοποιήσουν την κατάληψη ενός πλοίου, είναι σε γενικές γραμμές κάπως παρωχημένα⁶.

⁶ Ωστόσο, έχει καταγραφεί και ένας συγκεκριμένος αριθμός περιπτώσεων, που οι πειρατές είχαν στη διάθεσή τους προηγμένες συσκευές ραντάρ και υπερσύγχρονο τηλεπικοινωνιακό εξοπλισμό για να συντονίζουν τις κινήσεις τους - π.χ. δορυφορικά τηλέφωνα- ή ακόμα και φορητούς δέκτες προσδιορισμού στίγματος κατά αναλογία με τον εξοπλισμό των σύγχρονων εμπορικών πλοίων.



Σχήμα 5. Αλιευτικό σκάφος (Dhow) και βάρκες με εξωλέμβιες μηχανές (Skiff) [41].

Το ιδιαίτερο στοιχείο ενδιαφέροντος στην υπό εξέταση περίπτωση, όμως, είναι ότι υπάρχει μεγάλη διαφορά στο «επιχειρηματικό» μοντέλο των πειρατών. Οι σύγχρονοι Σομαλοί πειρατές, χρησιμοποιούν μια ιδιαίτερη στρατηγική, καταλαμβάνοντας τα πλοία-στόχους και οδηγώντας τα σε ομηρία, σε σημεία (πειρατικά καταφύγια), όπου είναι πιο εύκολη η διατήρησή τους σε αιχμαλωσία⁷. Δηλαδή, το πλοίο που περιέρχεται στα χέρια των παρανόμων, οδηγείται σε κάποια «ασφαλή» σομαλική ακτή, όπου μαζί με τα μέλη του πληρώματος κρατείται σε ομηρία μέχρι να γίνει η καταβολή χρημάτων (λύτρα) σε μετρητά και να αφεθούν ελεύθεροι να συνεχίσουν (μαζί με το πλοίο και χωρίς την παραμικρή ζημιά στο φορτίο) το ταξίδι τους. Καθώς οι ναυτιλιακές εταιρείες ανησυχούν για την τύχη του πληρώματος, αλλά κυρίως γιατί τα χρήματα που απαιτούνται για να αφεθεί το πλοίο να συνεχίσει το δρομολόγιο αποτελούν κλάσμα μόνο της συνολικής αξίας του φορτίου, η καταβολή των λύτρων αποτελεί μια πάγια πρακτική για τις ναυτιλιακές εταιρείες, γεγονός που ωθεί ολοένα και περισσότερους Σομαλούς προς την παράνομη δραστηριότητα στη θάλασσα.

Ας σημειωθεί ότι μεσαία ή μεγάλα αλιευτικά σκάφη αποτελούν την πλατφόρμα εκκίνησης για τις επιθέσεις εναντίον πλοίων με μικρές ταχυκίνητες βάρκες, μια μέθοδο γνωστή και ως «ιδέα του μητρικού πλοίου» (mother ship concept). Αυτό καθιστά εξαιρετικά δύσκολη τη διάκριση μεταξύ πραγματικών ψαράδων και πειρατών, ενώ παράλληλα αφήνει πολύ μικρό περιθώριο αντίδρασης στα πολεμικά πλοία που περιπολούν στην περιοχή. Τέλος, από το καλοκαίρι του 2008 και μετά υπάρχει εμφανής αναβάθμιση της οργάνωσης και των δυνατοτήτων των πειρατών. Αντιλαμβανόμενοι τα μεγάλα κέρδη της πειρατικής δραστηριότητας, καθώς τα χρήματα για να αφεθούν το πλήρωμα και το φορτίο ελεύθερα, καταβάλλονται πάντα και μάλιστα ανέρχονται σε εκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ, οι τοπικοί φύλαρχοι άρχισαν να τους συνεπικουρούν σε όλα τα επίπεδα. Χαρακτηριστικά επισημαίνονται είτε δραστηριότητες αναγκαίες να πραγματοποιηθούν στο εξωτερικό – για παράδειγμα η ανάληψη μέσω εκπροσώπου των διαπραγματεύσεων με τις πλοιοκτήτριες εταιρείες που εδρεύουν κυρίως στην Ευρώπη – είτε παροχή τυχόν αναγκαίου προηγμένου τεχνολογικά εξοπλισμού, όπως δορυφορικά τηλέφωνα, φορητοί δέκτες προσδιορισμού στίγματος και πομποδέκτες για το συντονισμό των κινήσεων

⁷ Για την κατάληψη μάλιστα των πλοίων στην ανοιχτή θάλασσα χρησιμοποιούν και μεγαλύτερα πλοία, από τα οποία εφορμούν με μικρότερα σκάφη επεκτείνοντας έτσι την ακτίνα δράσης τους.

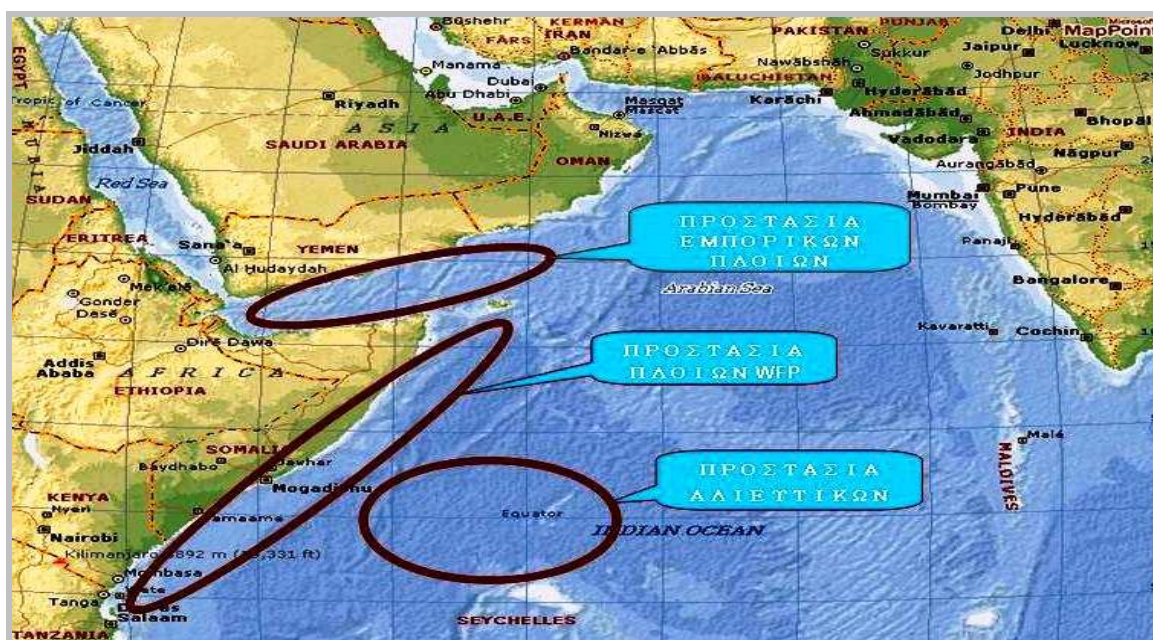
τους ή μηχανήματα για τον έλεγχο της γνησιότητας των χαρτονομισμάτων που καταβάλλονται ως λύτρα [42].

Η ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΝΑΥΤΙΚΗ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΗ «ΑΤΑΛΑΝΤΑ».

Το γεγονός ότι η δράση των Σομαλών πειρατών απειλεί κατευθείαν τη δυνατότητα διακίνησης του παγκοσμίου εμπορίου και ταυτόχρονα δημιουργεί ανησυχίες για τα ζητήματα που σχετίζονται με την ενεργειακή ασφάλεια, αναγκάζει τις κυβερνήσεις των ενδιαφερόμενων χωρών να χρησιμοποιήσουν ακόμα και στρατιωτικά μέσα, δηλαδή στην περίπτωση της ΕΕ την ενεργό συμμετοχή στη ναυτική επιχείρηση καταπολέμησης της πειρατείας ΑΤΑΛΑΝΤΑ, προκειμένου να διασφαλιστεί η ζωτική αυτή διαδρομή για τις θαλάσσιες μεταφορές. Άλλες χώρες, όπως για παράδειγμα η Κίνα, διατηρούν μια ευμεγέθη παρουσία πολεμικών πλοίων στην ευρύτερη περιοχή και συνοδεύουν τα εμπορικά πλοία τους κατά τη διέλευσή τους από την επικίνδυνη ζώνη, στα πρότυπα της συνοδείας νηοπομπών που εκτελούσαν οι Σύμμαχοι κατά το Β' Παγκόσμιο Πόλεμο για να κινηθούν τα εμπορικά πλοία μεταξύ των εκατέρωθεν ακτών του Ατλαντικού Ωκεανού. Σημαντική είναι, επίσης, η παρουσία και πλοίων άλλων εθνικοτήτων, είτε στο πλαίσιο του ΝΑΤΟ, π.χ. ΗΠΑ, είτε αυτοτελώς, π.χ. Ινδία. Παράλληλα, μια τελείως διαφορετική λύση στο πρόβλημα της πειρατείας, που προτιμά έναν αρκετά μικρό αριθμό εταιρειών διαχείρισης των πλοίων αποτελεί η επιβίβαση πάνω στα σκάφη ειδικά εκπαιδευμένου προσωπικού (ιδιωτικού, δηλαδή μισθοφόρων), που αναλαμβάνει την προστασία φορτίου και πληρώματος κατά τη διέλευση από την επικίνδυνη αυτή περιοχή⁸.

Υπενθυμίζεται ότι επιτρέπουσα συνθήκη της πειρατείας αποτελεί πρωτίστως η αδυναμία των κρατών να αστυνομεύσουν τα χωρικά ύδατά τους και κυρίως τις παράκτιες περιοχές τους, που αποτελούν τα ορμητήρια τέτοιων επιθέσεων. Κράτη που έχουν καταρρεύσει, όπως η Σομαλία, δεν έχουν ουσιαστικά ούτε τη βούληση, ούτε και τα αναγκαία μέσα για τέτοια καθήκοντα. Και καθώς πράξεις πειρατείας με εξαιρετικά υψηλό αντίκτυπο επιφέρουν τη διεθνή αντίδραση τόσο μονομερώς όσο και σε συλλογικό επίπεδο, η έξαρση της σχετικά πρόσφατης χρονικής περιόδου στις θάλασσες πέριξ της Σομαλίας, οδήγησε τελικά στη συνύπαρξη πολλών εμπλεκόμενων και κυρίως στη δημιουργία μίας διεθνούς (ευρωπαϊκής) ναυτικής δύναμης (EUNAVFOR), η οποία περιπολεί στα νερά της Ανατολικής Αφρικής και στα Στενά του Άντεν, προκειμένου να περιορίσει τη δράση των πειρατών (βλ. σχήμα 6)

⁸ Στην περίπτωση αυτή, δημιουργούνται ερωτήματα για τη νομιμότητα της χρήσης βίας από μη εντεταλμένα κρατικά όργανα. Επίσης, εκτιμάται ότι η επιλογή αυτή θα οδηγήσει τελικά σε ανθρώπινα θύματα γιατί ουσιαστικά κλιμακώνει την όλη κατάσταση.

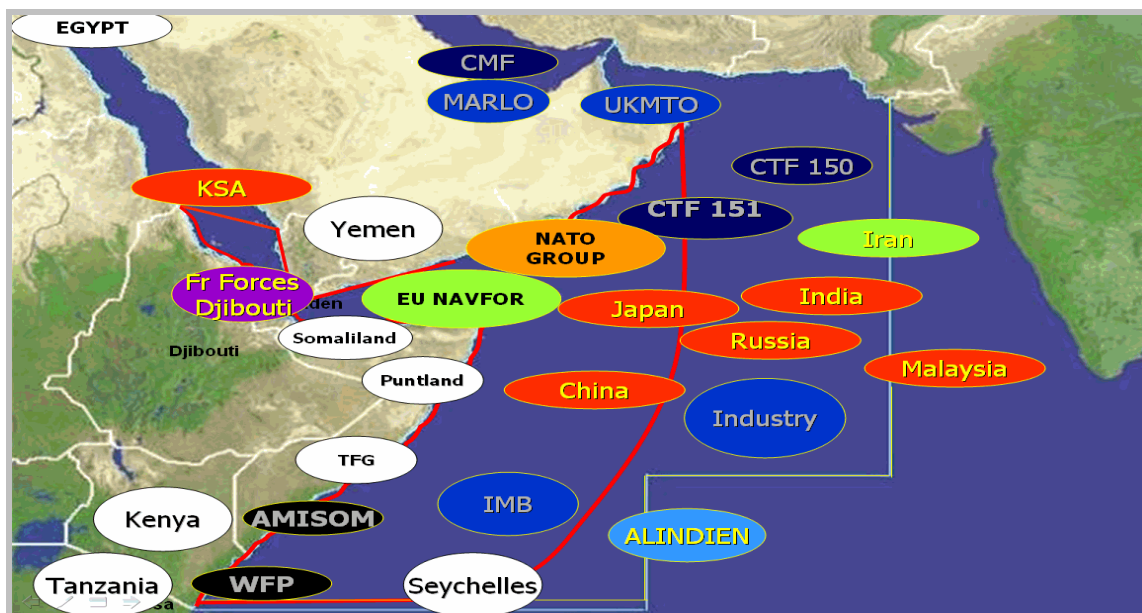


Σχήμα 6. Τα έργα της επιχείρησης «ΑΤΑΛΑΝΤΑ» [43].

Σημειώνεται ότι ο ΟΗΕ ενθάρρυνε επανειλημμένα την ανάληψη πρωτοβουλιών από τα κράτη που ενδιαφέρονται για την ασφάλεια των θαλάσσιων οδών και εξέδωσε τις αποφάσεις 1814, 1816, 1838 και 1846 του Συμβουλίου Ασφαλείας (ΣΑ), οι οποίες και αποτελούν τη νομοποιοτική βάση για τη δράση της ευρωπαϊκής δύναμης (ΕΥΝΑΥΦΟΡ) που διεξάγει την επιχείρηση «ΑΤΑΛΑΝΤΑ» [44]. Δηλαδή, για τη διευρυμένη αντιμετώπιση του φαινομένου της πειρατείας στα ανοικτά των ακτών της Σομαλίας, το ΣΑ του ΟΗΕ υιοθέτησε μία σειρά από ψηφίσματα, με απώτερο σκοπό να διευκολύνει τη διεθνή συνεργασία στην αποτροπή και την αντιμετώπιση της πειρατείας. Η αρχική ώθηση ήταν φυσικά η ανάγκη να αποφευχθούν επιθέσεις εναντίον των πλοίων που μετέφεραν βοήθεια (τρόφιμα) στα πλαίσια του Παγκόσμιου Επισιτιστικού Προγράμματος (World Food Program - WFP). Σε κάθε περίπτωση, ειδικά για την περίπτωση Σομαλίας, η αντίδραση της διεθνούς κοινότητας κορυφώθηκε το Δεκέμβριο του 2008 όταν το ΣΑ, με την απόφαση 1851 κάλεσε: «...όλα τα κράτη και τους οργανισμούς που διαθέτουν τα μέσα να συμμετέξουν ενεργά στην καταπολέμηση της πειρατείας και της ένοπλης ληστείας στα ανοικτά της Σομαλίας, με την ανάπτυξη ναυτικών δυνάμεων και στρατιωτικών αεροσκαφών και με την σύλληψη και κράτηση των σκαφών και των όπλων που χρησιμοποιούνται κατά την τέλεση αυτών των αδικημάτων.»

Ειδικά η απόφαση 1846, προγενέστερη βέβαια της 1851, αλλά με παρεμφερή διατύπωση ως προς τις δυνατότητες παρέμβασεις των ενδιαφερόμενων μελών, αποτελεί το κύριο γενεσιουργό αίτιο της ναυτικής επιχείρησης «ΑΤΑΛΑΝΤΑ». Επισημαίνεται ότι ήδη από τις 10 Νοεμβρίου 2008, το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο είχε υιοθετήσει τελικά μια κοινή δράση που αφορά σε μια ευρωπαϊκή (την πρώτη) στρατιωτική επιχείρηση για την αποτροπή και αντιμετώπιση πράξεων πειρατείας και ένοπλων ληστειών στις ακτές της Σομαλίας, με ημερομηνία ενεργοποίησης το Δεκέμβριο του ίδιου έτους. Η επιχείρηση αρχικά υπολογίστηκε ότι θα έχει είναι διάρκεια 12 μηνών – κατά τη διάρκεια του προηγούμενου έτους αποφασίστηκε η ανανέωσή της για ακόμα 12 – και φυσικά θα συνεχιστεί μέχρι την εξασφάλιση της ελεύθερης ναυσιπλοΐας στη συγκεκριμένη γεωγραφική περιφέρεια. Ας σημειωθεί ότι στο πεδίο δράσης της ευρωπαϊκής ναυτικής δύναμης, εκτός από τα διεθνή ύδατα, περιλαμβάνονται και τα χωρικά ύδατα της Υεμένης και Σομαλίας, ενώ, στο σχετικά πρόσφατο παρελθόν επιτεύχθηκε συμφωνία με την κυβέρνηση της Κένυας για τη διαδικασία κράτησης των πειρατών που συλλαμβάνονται επί το έργον, καθώς μέχρι τώρα υφίσταται κενό στο διεθνές θεσμικό πλαίσιο.

Είναι αξιοσημείωτο, επίσης, το γεγονός ότι είχε προηγηθεί τον Οκτώβριο του 2008, ύστερα από αίτηση του Γενικού Γραμματέα του ΟΗΕ Μπαν Κι-Μουν, η επιχείρηση του NATO «Allied Provider». Το NATO με βάση τα ψηφίσματα 1814, 1816 και 1838 του 2008 εξουσιοδοτήθηκε από το ΣΑ του ΟΗΕ να συνοδεύει τα πλοία που μετέφεραν φορτία του Παγκόσμιου Επισιτιστικού Προγράμματος, τα οποία διέσχιζαν το Κόλπο του Άντεν και τη σομαλική λεκάνη του Ινδικού Ωκεανού, κατευθυνόμενα προς τη Σομαλία. Η συγκεκριμένη ναυτική επιχείρηση του NATO ξεκίνησε στα μέσα Οκτωβρίου του 2008 και ολοκληρώθηκε το Δεκέμβριο του 2008, οπότε την αποστολή αυτή ανέλαβε η επιχείρηση της ΕΕ «ΑΤΑΛΑΝΤΑ». Σημειώνεται ότι από το Μάρτιο του 2009, το NATO ενεπλάκη εκ νέου στο Κέρασ της Αφρικής, με την έναρξη μίας νέας επιχείρησης, της «Allied Protector». Την διεξαγωγή της τελευταίας επιχείρησης ανέλαβε δύναμη πέντε ναυτικών μονάδων που ήταν μέρος της Μόνιμης Ναυτικής Ομάδος 1 του NATO (STANDING MARITIME GROUP 1 – SNMG1). Μετά τη λήξη της τον Ιούνιο του 2008 και ύστερα από σχετική απόφαση των Υπουργών Άμυνας του NATO η «Allied Protector» αντικαταστάθηκε από την επιχείρηση «Ocean Shield» [45]. Επομένως, πληθώρα ενδιαφερόμενων χωρών και διεθνών οργανισμών «συνωστίζονται» στο Κέρασ της Αφρικής, για να καταπολεμήσουν το φαινόμενο της πειρατείας (βλ. σχήμα 7)



Σχήμα 7. Τα εμπλεκόμενα μέρη στο Κέρασ της Αφρικής [46].

Ανεξάρτητα από την ονομασία της ναυτικής επιχείρησης που διεξάγεται κατά της πειρατείας, για τη διεθνή κοινότητα η αντιμετώπιση της πειρατικής δραστηριότητας στη Σομαλία αποτελεί ασφαλώς υψηλή προτεραιότητα, καθώς, εκτός από τη στέρηση της ελευθερίας και την προφανή ανησυχία για τη φυσική ασφάλεια των πληρωμάτων των εμπορικών πλοίων κατά τη διάρκεια της αιχμαλωσίας τους ή πάνω στην τέλεση μίας πειρατικής επίθεσης, είναι ιδιαίτερα μεγάλα τα συμφέροντα που διακυβεύονται από την απώλεια της ελευθερίας κίνησης αγαθών και εμπορευμάτων διά των θαλάσσιων οδών. Αυτός ακριβώς είναι και ο λόγος που έχει θεσμικά θωρακιστεί με διεθνείς συνθήκες το δικαίωμα της ελεύθερης ναυσιπλοΐας. Σημειώνεται, ακόμα, ότι η παρεμπόδιση της ελευθερίας της ναυσιπλοΐας – ιδιαίτερα στα ζωτικά σημεία σύγκλισης των θαλάσσιων οδών – έχει πολλές φορές κατά το παρελθόν αποτελέσει έναυσμα θερμών συγκρούσεων στην ιστορία του ανθρώπινου γένους. Επίσης, θα πρέπει να λάβουμε υπόψη το γεγονός ότι στην περίπτωση της Σομαλίας διαφαίνεται να υπάρχει διασύνδεση μεταξύ συγκεκριμένων ομάδων πειρατών και της ακραίας ισλαμιστικής οργάνωσης Al Shabaab. Είναι χαρακτηριστικά τα όσα σημειώνει στην αναφορά της προς το Συμβούλιο Ασφαλείας (ΣΑ) του

ΟΗΕ η υπεύθυνη ομάδα για την παρακολούθηση της κατάστασης στη Σομαλία όσον αφορά το εμπόριο των όπλων, τονίζοντας ότι σημαντικό μέρος από τα χρήματα, που λαμβάνονται ως λύτρα από τους πειρατές, διοχετεύονται στην αγορά όπλων και επομένως διαιωνίζουν τις ένοπλες συγκρούσεις στην πολύπαθη αυτή χώρα [47].

Η ευρωπαϊκή επιχείρηση «ΑΤΑΛΑΝΤΑ» έχει οδηγήσει στη σύλληψη δεκάδων πειρατών. Προηγουμένως παρουσιάστηκε (με τη βοήθεια του σχήματος 1) ο πραγματικά ιδιαίτερα μεγάλος αριθμός περιστατικών πειρατείας στις περιοχές πέριξ της Σομαλίας κατά τα προηγούμενα έτη. Σε αντιδιαστολή, λοιπόν, στη συνέχεια (βλ. σχήμα 8) παρουσιάζεται η ευεργετική επίδραση της παρουσίας πολεμικών πλοίων σε αυτές τις περιοχές, καθώς ο συνολικός αριθμός πειρατικών προσπαθειών και πλοίων υπό κατάληψη παρουσιάζει σημαντική κάμψη, γεγονός που πέραν των συλλήψεων επί το έργον, εν μέρει οφείλεται και στην αποθάρρυνση των πειρατών. Επίσης, είναι εύκολο να διαπιστωθεί στο ακόλουθο σχήμα και η επίδραση του καιρού, καθώς τις χρονικές περιόδους με μεγάλο κυματισμό τα μικρά ταχυκίνητα σκάφη, που χρησιμοποιούν οι Σομαλοί για να πραγματοποιήσουν το ρεσάλτο τους, καθίστανται ανίκανα.



Σχήμα 8. Μηνιαία κατανομή των επιθέσεων των Σομαλών πειρατών για το 2009 [48].

ΣΥΝΟΨΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Υπενθυμίζεται ότι κατά το 19^ο και για το μεγαλύτερο μέρος του 20ού αιώνα, η πειρατεία είχε περιορισθεί σημαντικά. Η αποικιοκρατική επέκταση⁹ και ο επακόλουθος ανταγωνισμός των ευρωπαϊκών δυνάμεων και των ΗΠΑ σε κάθε σημείο του πλανήτη μας, προώθησε τη δημιουργία ισχυρών πολεμικών στόλων, που κυνήγησαν χωρίς έλεος τους πειρατές. Τα εμπορικά οικονομικά συμφέροντα ήταν πλέον μεγάλης κλίμακας και στηρίζονταν στην προστασία του κράτους προέλευσης. Τα ισχυρά κράτη της περιόδου αυτής μεταβλήθηκαν σε μεγάλες δυνάμεις, οι οποίες, χάρη στην οικονομική τους ευμάρεια που εξασφάλισε το εμπόριο, ισχυροποιήθηκαν σε πολύ μεγάλο βαθμό και μπόρεσαν να χρηματοδοτήσουν τη ναυτική

⁹ Είναι χαρακτηριστικό ότι την περίοδο αυτή, τα περισσότερα νησιά και παράκτιες περιοχές του κόσμου εντάχθηκαν σε διοικητικές δομές, αρχικά αποικιοκρατικές και με την πάροδο του χρόνου εθνικές. Επίσης, το μέγεθος και η ταχύτητα των εμπορικών πλοίων, κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, αυξήθηκε σημαντικά και οι πειρατές δεν μπορούσαν πλέον εύκολα να καταλάβουν ένα πιθανό θήραμα

προστασία του εμπορίου τους, με πλέον χαρακτηριστικά τα παραδείγματα της Βρετανίας και αργότερα χρονικά των ΗΠΑ, και μάλιστα σε παγκόσμια κλίμακα.

Τα μεγάλα πολεμικά πλοία, με τη βοήθεια της τεχνολογίας, κυνήγησαν τους πειρατές στη θάλασσα και περιόρισαν τη δράση τους σε πολύ μεγάλο βαθμό. Επιπρόσθετα, τα κράτη της περιφέρειας και τα νέα κράτη απέκτησαν σταδιακά τον έλεγχο του εδάφους τους «ξεριζώνοντας» τις πειρατικές βάσεις, ενώ τα εδάφη, που δεν ανήκαν σε κανέναν (*terra nullius*), εξαφανίστηκαν από την εξωστρεφή επέκταση του σύγχρονου εδαφικού κράτους. Οι απομακρυσμένες ή απομονωμένες περιοχές των αδύναμων αυτοκρατοριών, που μέχρι τότε θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως καταφύγια της ανομίας, εξαφανίστηκαν από την επέκταση και ενδυνάμωση των κρατών. Έτσι, οι πειρατές έχασαν τα κρησφύγετά τους στην ξηρά και σταδιακά σταμάτησαν να αποτελούν απειλή για τη ναυτιλία. Η ιστορία, λοιπόν, μας διδάσκει ότι οι πειρατές ηττήθηκαν κατ' ουσίαν στην ξηρά και όχι στη θάλασσα. Σε κάθε περίπτωση, μέχρι σχεδόν το τέλος του 20ού αιώνα, η πειρατεία παρέμενε μόνο σε σημεία όπου η κρατική ισχύς παρέμενε ιδιαίτερα ασθενής, ή σε περιπτώσεις κατάρρευσης κάποιου κράτους.

Ειδικά για την περίπτωση της σομαλικής πειρατείας, επισημαίνεται ότι τα φτηνά κινεζικά προϊόντα για να φτάσουν στον ευρωπαϊκό καταναλωτή θα διασχίσουν αρχικά τον Ινδικό Ωκεανό και μέσω Σουέζ θα διέλθουν προς τη Μεσόγειο, ενώ, και το πετρέλαιο του Περσικού Κόλπου μεταφέρεται στη Δύση χρησιμοποιώντας παραπλήσια διαδρομή. Στον τομέα της ενέργειας, με αφετηρία τις πετρελαιοπαραγωγές χώρες του Κόλπου, τον Κόλπο του Άντεν/Διώρυγα του Σουέζ και είσοδο στη Μεσόγειο, σχηματίζεται μια κρίσιμη μεταφορική αλυσίδα που εξυπηρετεί ένα εξαιρετικά υψηλό ποσοστό του πετρελαίου και του φυσικού αερίου που καταναλώνεται στην Ευρώπη. Η θάλασσα έχει έναν υψηλής σπουδαιότητας ρόλο στην ευρωπαϊκή ανταγωνιστικότητα και αειφορία, αλλά όσον αφορά τα ζητήματα της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού και τη διατήρηση της πρωτοκαθεδρίας στα παγκόσμια οικονομικά δρώμενα, η απόλυτη ελευθερία των θαλάσσιων διαδρομών και η ανεμπόδιστη ναυσιπλοΐα μετατρέπονται σε ζωτικά συμφέροντα για την ΕΕ.

Η έξαρση της δράσης των πειρατών στην ευρύτερη περιοχή της Σομαλίας, οδήγησε στη θέσπιση της ευρωπαϊκής δύναμης ΑΤΑΛΑΝΤΑ, στα πλαίσια της οποίας, μια διεθνής ναυτική δύναμη περιπολεί στα νερά της Ανατολικής Αφρικής και κυρίως στον Κόλπο του Άντεν, προκειμένου να περιορίσει τη δράση των πειρατών. Η δράση της EUNAVFOR εκτιμάται θετικά και οι συλλήψεις πειρατών είναι σε ικανοποιητικά επίπεδα. Από την άλλη μεριά όμως, με ακτογραμμή που ξεπερνά τα τρεις χιλιάδες χιλιόμετρα και θέση πολύ κοντά σε κομβικές θαλάσσιες αρτηρίες, η Σομαλία είναι ένα από τα ιστορικά κέντρα πειρατείας στην Αφρική, ενώ η τρέχουσα κατάσταση στην περιοχή εξακολουθεί να απειλεί το διεθνές εμπόριο. Μέχρι πρόσφατα, οι πειρατικές επιθέσεις είχαν επικεντρωθεί ως επί το πλείστον στην περιοχή Πούντλαντ (Puntland) και έναντι της Υεμένης, δηλαδή στον Κόλπο του Άντεν, όπου και λόγω γεωγραφικών συνθηκών, τα πλοία είναι πιο ευπαθή¹⁰. Μετά, όμως, τις περιπολίες των πολεμικών πλοίων στην περιοχή του Άντεν, οι πειρατές έχουν μετατοπίσει τις προσπάθειές τους προς τη σομαλική λεκάνη του Ινδικού Ωκεανού, όπου λόγω του τεράστιου μεγέθους της είναι πρακτικά αδύνατον να προστατευθεί αποτελεσματικά η ναυσιπλοΐα.

Επισημαίνεται ότι οι επιθέσεις των πειρατών στην ευρύτερη περιφέρεια είναι ιδιαίτερα επικίνδυνες και μπορούν να προκαλέσουν αλυσιδωτές επιπτώσεις σε πολλούς τομείς, που συνοψίζονται ακολούθως, ενώ, δύο είναι ουσιαστικά οι κύριες επιλογές των πλοιοκτητριών εταιρειών όσον αφορά την περαιτέρω εκμετάλλευση των εμπορικών πλοίων που έχουν διαθέσιμα:

- Συνέχιση της ίδιας ακριβώς θαλάσσιας διαδρομής, αναλαμβάνοντας τον αυξανόμενο κίνδυνο κατά των φορτίων και των ζωών των πληρωμάτων και καταβάλλοντας αντίστοιχη προσπάθεια διαχείρισης αυτού.

¹⁰ Επισημαίνεται ότι η Υεμένη χωρίζεται από τη Σομαλία από τον Κόλπο του Άντεν, όπου το ευρύτερο σημείο προσεγγίζει τα 170 ν.μ., ενώ τα στενότερα σημεία είναι τα 100 ν.μ.

- Αλλαγή δρομολογίου μέσω του Ακρωτηρίου του Cape Town ώστε να μη διασχίζουν πλοία την επικίνδυνη περιοχή (περίπλους της Αφρικής).

Στη δεύτερη επιλογή εντοπίζονται αρνητικές επιπτώσεις σε βάρος [49]:

- της Αιγύπτου και της Αρχής Διαχείρισης της Διώρυγας του Σουέζ, εξαιτίας της μείωσης εσόδων από τον περιορισμό του αριθμού διελεύσεων. Καθώς η εισροή συναλλάγματος για τα τέλη διέλευσης της διώρυγας του Σουέζ είναι από τους βασικούς πυλώνες της οικονομίας της χώρας, το γεγονός αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει την Αίγυπτο σε οικονομική ύφεση. Στην περίπτωση αυτή, η συνυφασμένη ανεργία θα προκαλούσε, επίσης, έκρηξη κοινωνικής αναταραχής, ίσως και σε σημείο που να απειληθεί ακόμα και η βιωσιμότητα του τρέχοντος πολιτικού καθεστώτος ή, το λιγότερο, η σταθερότητά του.
- των Μεσογειακών Λιμένων και των Οργανισμών / Διαχειριστών, στη βάση της μείωσης εσόδων, λόγω της μείωσης του συνολικού όγκου των διακινούμενων από τις συγκεκριμένες υποδομές φορτίων. Το γεγονός αυτό, επίσης, πιθανόν να τους οδηγήσει σε περικοπές προσωπικού, ενώ επίσης παράγοντα ανησυχίας αποτελεί η πιθανή αδυναμία αποπληρωμής των ήδη πραγματοποιηθέντων ή εν εξελίξει έργων επέκτασης.
- των Ναυτιλιακών Εταιρειών / Διαχειριστών, είτε λόγω της μείωσης της συνολικής μεταφορικής δυνατότητας, αφού τα πλοία θα κάνουν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα να φτάσουν στον τελικό προορισμό τους, είτε λόγω των μειωμένων εσόδων, καθώς θα απαιτηθούν επιπλέον ασφάλιστρα και θα μεγαλώσει το λειτουργικό κόστος των πλοίων προκειμένου να αναληφθούν διάφορα μέτρα αυτοπροστασίας τους.
- της βιομηχανικής / μεταπρατικής δραστηριότητας, που επηρεάζεται επίσης αρνητικά. Ως βασικοί λόγοι μπορούν να θεωρηθούν η μειωμένη διαθεσιμότητα των πρώτων υλών, αλλά και το αυξημένο κόστος για τη διατήρηση μεγαλύτερου σε ποσότητα αποθέματος, καθώς ομαλή ροή και έγκαιρη χρονικά διακίνηση των αναγκαίων αγαθών είναι δύσκολο να εξασφαλιστούν.
- του καταναλωτή, λόγω της σχεδόν σίγουρης μετακύλισης του παραπάνω κόστους όλων των εμπλεκόμενων στην εμπορική αλυσίδα.

Την χρονική περίοδο που γινόταν η τελική επεξεργασία του παρόντος κειμένου, διάφοροι αναλυτές επί θεμάτων ασφάλειας και δημοσιογράφοι εξακολουθούσαν να εστιάζουν την προσοχή τους στην πολυποίκιλη δράση των Σομαλών πειρατών. Καθώς οι συνθήκες, στις οποίες ο σύγχρονος ναυτικός καλείται να ανταποκριθεί, είναι ξεκάθαρα ολοένα πιο πολύπλοκες και απαιτητικές, κάθε δυνατή βοήθεια είναι ευπρόσδεκτη, ακόμα και αν αυτή προέρχεται από τη χρήση στρατιωτικής βίας, προκειμένου να ελαττωθεί ο κίνδυνος για τα φορτία και τα πληρώματα των πλοίων. Το φαινόμενο της πειρατείας στη θάλασσα πάντα ήταν παρόν και δυστυχώς πάντα θα υπάρχει, επομένως όλοι οι εμπλεκόμενοι στις θαλάσσιες μεταφορές πρέπει να καταβάλλουν συνεχώς προσπάθειες για την ομαλή διεκπεραίωση των θαλάσσιων μεταφορών και τη διασφάλιση όλων των ανθρωπίνων ζώων, ναυτικών ή επιβατών. Προς αυτήν την κατεύθυνση, η ρύθμιση της θαλάσσιας κυκλοφορίας σε συγκεκριμένα γεωγραφικά όρια και με αυστηρά τηρούμενο χρονοδιάγραμμα διέλευσης, μια πρακτική που υποστηρίζει η EUNAVFOR, προκειμένου οι εμπλεκόμενες ναυτικές δυνάμεις να βελτιστοποιήσουν την προστασία που παρέχουν στα πλοία που απειλούνται κατά την κίνησή τους από τον Κόλπο του Άντεν, είναι ένα μέτρο απαραίτητο, ακόμη και αν θεωρηθεί ότι περιορίζει την παραδοσιακή ελευθερία που ήταν μέχρι τώρα το κυρίαρχο στοιχείο του ναυτικού επαγγέλματος.

Επίσης, είναι απαραίτητο να αναδειχθεί σαφώς το γεγονός ότι λόγω της τεράστιας γεωγραφικής περιοχής, μέσα στην οποία λαμβάνουν χώρα οι καταλήψεις των εμπορικών πλοίων από τους Σομαλούς, η οποία ουσιαστικά καλύπτει συνολικά τη Μεσόγειο και τη Μαύρη Θάλασσα, είναι πρακτικά αδύνατο ένας σχετικά μικρός αριθμός πλοίων, δηλαδή, τα 20 έως 25 πολεμικά πλοία που είναι σήμερα εντεταλμένα από τα διάφορα κράτη να περιπολούν στην περιοχή του Κόλπου του Άντεν και τον Ινδικό Ωκεανό, να είναι ανά πάσα στιγμή κοντά στο οποιοδήποτε εμπορικό πλοίο γίνεται στόχος τέτοιων πειρατικών εξορμήσεων και να προλάβουν

κάθε δυσάρεστο περιστατικό. Αλλά, ακόμα και αν αυξηθούν δραστικά τα πολεμικά πλοία που επιχειρούν στην περιοχή και πάλι τίποτε δεν προδικάζει ότι η πειρατεία θα παταχθεί, καθώς ευκαιρίες για παράνομη δραστηριότητα θα συνεχίσουν να υπάρχουν με βάση τα γεωγραφικά μεγέθη και το συνολικό αριθμό των εμπορικών πλοίων που χρησιμοποιούν τις περιοχές που συζητήθηκαν προηγουμένως.

Τέλος, είναι κρίσιμο να δοθεί βαρύτητα στο γεγονός ότι αν συνεχιστεί η συγκέντρωση πολεμικών πλοίων από τον αποκαλούμενο Δυτικό κόσμο, σε μία περιοχή που είναι ευαίσθητη γεωπολιτικά και μπορεί να θεωρηθεί ως ύψιστης σημασίας για το Μουσουλμανικό κόσμο, υπάρχει η πιθανότητα να αυξηθούν οι εντάσεις και να προκληθούν τριβές στο διεθνές σύστημα συνολικά. Επομένως, η λύση της εξωτερικής αστυνόμευσης μοιάζει ανέφικτη και η σταθεροποίηση της κεντρικής κυβέρνησης της Σομαλίας προβάλλει ως ζήτημα προτεραιότητας, γιατί μόνο με τον τρόπο αυτό οι ένοπλες συμμορίες θα αποστρατηθούν για πάντα των αναγκαίων λιμένων - καταφυγίων για την υποστήριξη των παράνομων δραστηριοτήτων τους. Μόνο με τη δημιουργία των κατάλληλων δομών και συνθηκών για την αποτελεσματική αστυνόμευση σε ξηρά και θάλασσα από τους ίδιους τους Σομαλούς είναι δυνατή η πάταξη της σομαλικής πειρατείας.

REFERENCES

1. Γ. Ι. Τσάλτας (επιμέλεια-παρουσίαση), *Περιβάλλον και Θαλάσσιες Μεταφορές. Σε Αναζήτηση μιας Βιώσιμης Προσέγγισης*, Εκδόσεις Ι. Σίδερης, Αθήνα, 2008, σελ. 25.
2. Ε. Γεωργαντόπουλος και Γ. Π. Βλάχος, *Ναυτιλιακή Οικονομική*, Τζέι & Τζέι Ελλάς, Πειραιάς, 1997, σελ. 27.
3. Δ. Δαλακλής & Α. Κατσίκης, «Πειρατεία και Θαλάσσιες Μεταφορές; Μια Διαχρονική Σχέση με Καταλυτική Επίδραση στη Μεσόγειο Θάλασσα», *Ναυτική Επιθεώρηση*, τευχ. 572, Υπηρεσία Ιστορίας Ναυτικού, 2010, σελ. 98.
4. Ε. Γεωργαντόπουλος. & Γ. Π. Βλάχος, *Ναυτιλιακή Οικονομική*, Εκδόσεις Τζέι & Τζέι Ελλάς, Πειραιάς, 1997, σελ. 34.
5. J. F. Wilson, *Carriage of Goods by Sea*, Pearson Education Limited, Harlow, 2004, σελ. 1-8.
6. Δ. Δαλακλής & Α. Κατσίκης, ό.π., σελ. 97-112 και ιδιαίτερα στις 101-2.
7. P. De Souza, *Piracy in the Greco-Roman World*, Cambridge University Press, Cambridge, 2002.
8. Π. Σιούσιουρας & Δ. Δαλακλής, «Η Συγκρουσιακή Σχέση Πειρατείας και Θαλασσίων Μεταφορών στη Σομαλία», *Ναυτική Επιθεώρηση*, τευχ. 573, Υπηρεσία Ιστορίας Ναυτικού, Αθήνα, 2010, σελ. 100.
9. Π. Σιούσιουρας & Δ. Δαλακλής, *Πειρατεία και Σύγχρονες Θαλάσσιες Μεταφορές-Το Φαινόμενο της Πειρατείας στον Τρίτο Κόσμο και το Διεθνές Δίκαιο*, Εκδόσεις Ι. Σιδέρη, Αθήνα, 2010.
10. http://www.eia.doe.gov/cabs/World_Oil_Transit_Chokepoints/Background.html, Φεβρουάριος 2010.
11. Για την πλήρη παρουσίαση των συστημάτων αυτών βλ. Α. Η. Παλληκάρης, Γ. Κατσούλης και Δ. Δαλακλής, *Ηλεκτρονικά Ναυτικά Όργανα*, Ίδρυμα Ευγενίδη, Αθήνα, 2008, σελ. 277- 96 και 305-30.
12. Π. Σιούσιουρας & Δ. Δαλακλής, «Η Συγκρουσιακή Σχέση Πειρατείας και Θαλασσίων Μεταφορών στη Σομαλία», ό.π., σελ. 99-113 και ιδιαίτερα στην 101.
13. <http://www.geografia.comxa.com/> (Σομαλία), Φεβρουάριος 2010.
14. <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/so.html>, Νοέμβριος 2009.

15. World Trade Organization, International Trade Statistics 2009, WTO Publications, Geneva, 2009, σελ 160, 183 και 203.
16. <http://www.imo.org/> (Piracy in the coast of Somalia), Οκτώβριος 2009, με επεξεργασία από το συγγραφέα του παρόντος άρθρου.
17. Για την καταλυτική επίδραση της διώρυγας του Σουέζ στον τρόπο διεκπεραίωσης του παγκόσμιου εμπορίου, βλ. επ. Δ. Δαλακλής, «Διώρυγες και Θαλάσσιες Συγκοινωνίες στον 21ο Αιώνα», *Ναυτική Επιθεώρηση*, τευχ. 568 και 569, Υπηρεσία Ιστορίας Ναυτικού, Αθήνα, 2009.
18. Π. Σιούσιουρας & Δ. Δαλακλής, «Η Συγκρουσιακή Σχέση Πειρατείας και Θαλασσίων Μεταφορών στη Σομαλία», ό.π., σελ. 107.
19. Δ. Δαλακλής, *Θαλάσσιες Μεταφορές, Πειρατεία και Διεθνές Δίκαιο: Γεωπολιτική Διάσταση*, από τα πρακτικά της διημερίδας στην Ανώτατη Διακλαδική Σχολή Πολέμου «Λαθρομετανάστευση και Σύγχρονη Πειρατεία ως Απειλές της Διεθνούς και Περιφερειακής Ασφάλειας», Θεσσαλονίκη, 25-26 Νοεμβρίου 2009, σελ. 122.
20. Π. Σιούσιουρας & Δ. Δαλακλής, *Πειρατεία και Σύγχρονες Θαλάσσιες Μεταφορές-Το Φαινόμενο της Πειρατείας στον Τρίτο Κόσμο και το Διεθνές Δίκαιο*, ό.π., σελ. 3-11.
21. Στο ίδιο, βλ. αναλυτικότερα τις λεπτομέρειες αναφορικά με τη διαλεκτική σχέση μεταξύ διεθνούς εμπορίου και παγκοσμιοποίηση που καταγράφονται στο κεφ. 3.
22. Ανακοίνωση της Επιτροπής στο Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, στο Συμβούλιο, στην Ευρωπαϊκή Οικονομική και Κοινωνική Επιτροπή και στην Επιτροπή των Περιφερειών, της 21^{ης} Ιανουαρίου 2009, *Στρατηγικοί Στόχοι και Συστάσεις Πολιτικής της ΕΕ για τις Θαλάσσιες Μεταφορές μέχρι το 2018*, COM(2009) 8 τελικό, σελ. 2.
23. Δ. Δαλακλής, *Θαλάσσιες Μεταφορές, Πειρατεία και Διεθνές Δίκαιο: Γεωπολιτική Διάσταση*, ό.π., σελ. 115.
24. Ε. Γεωργαντόπουλος & Γ. Π. Βλάχος, *Ναυτιλιακή Οικονομική Γεωγραφία*, Εκδόσεις Τζέι & Τζέι Ελλάς, Πειραιάς, 2002, σελ. 51.
25. Γ. Π. Βλάχος & Εμ. Νικολαΐδης, *Βασικές Αρχές της Ναυτιλιακής Επιστήμης*, Τζέι & Τζέι Ελλάς, Πειραιάς, 1999, σελ. 44-47.
26. Για μια ενδεικτική γεωγραφική κατανομή της παγκόσμιας βιομηχανίας βλ. Θ. Ε. Βρεττός & Α. Αγαλιανού-Βρεττού, *Οικονομική Γεωγραφία – Διεθνείς Εμπορικές Σχέσεις*, Ίδρυμα Ευγενίδη, Αθήνα, 1993, σελ. 79-80.
27. *World Trade Statistics 2007*, στο http://www.wto.org/english/res_e/statis_e/its2004_e/its2007_e.pdf, Οκτώβριο 2008.
28. Ν. Νικητάκος, «Ηλεκτρονικές Υπηρεσίες και Εφαρμογές στη Ναυτιλία: Ισχύουσα Κατάσταση και προοπτικές», στο Κ. Παμπούκης & Β. Τουντόπουλος (επιμέλεια), *Ναυτιλία και Νέες Τεχνολογίες*, Εκδόσεις Σάκκουλα, Αθήνα-Θεσσαλονίκη, 2008, σελ. 15-6.
29. Π. Σιούσιουρας & Δ. Δαλακλής, *Πειρατεία και Σύγχρονες Θαλάσσιες Μεταφορές-Το Φαινόμενο της Πειρατείας στον Τρίτο Κόσμο και το Διεθνές Δίκαιο*, Εκδόσεις Ι. Σιδέρη, Αθήνα, 2010.
30. J. P. Rodrigue, C. Comtois & B. Slack, *The Geography of Transport Systems*, Routledge, New York, 2009, με επεξεργασία και συμπλήρωση από το συγγραφέα του παρόντος άρθρου.
31. Δ. Δαλακλής, «Αρκτική: Οι Πάγοι Λειώνουν, οι Σχέσεις Ψυχραίνονται», *Ελληνική Άμυνα και Ασφάλεια*, τευχ. 45, Νοέμβριος 2009, σελ. 104-10.
32. <http://exandas.ert.gr/old/anametrisi-sti-stegi-tou-kosmou/oi-thalassioi-dromoi-tou-21ou-aiona-/index.php>, Ιούνιος 2010.
33. United Nations Conference on Trade and Development, *Review of Maritime Transport 2008*, στο http://www.unctad.org/en/docs/rmt2008_en.pdf, Αύγουστος 2009, σελ. 24.

34. Δ. Δαλακλής, *Θαλάσσιες Μεταφορές, Πειρατεία και Διεθνές Δίκαιο: Γεωπολιτική Διάσταση*, ό.π., σελ. 120-1.
35. Π. Σιούσιουρας & Δ. Δαλακλής, «Η Συγκρουσιακή Σχέση Πειρατείας και Θαλασσίων Μεταφορών στη Σομαλία», ό.π., σελ. 102-3.
36. Δ. Δαλακλής & Α. Κατσίκης, ό.π., σελ. 100.
37. M. V. Notten, (ed. S. H. MacCallum), *The Law of the Somalis: A Stable Foundation for Economic Development in the Horn of Africa*, Red Sea Press, Lawrenceville-New Jersey, 2005, σελ. 10.
38. Δ. Δαλακλής, *Θαλάσσιες Μεταφορές, Πειρατεία και Διεθνές Δίκαιο: Γεωπολιτική Διάσταση*, ό.π., σελ. 118.
39. www.Session%207%20Finn%20Brodersen%20Piracy.pdf, Δεκέμβριος 2009.
40. Χ. Μιχάλης, «Οι Πειρατές Ξανάρχονται», ένθετο Οικονομία της εφημερίδας *Τα Νέα*, 29^η Μαΐου 2005, σελ. 10.
41. Από την παρουσίαση της εισήγησης του Δ. Δαλακλή, *Θαλάσσιες Μεταφορές, Πειρατεία και Διεθνές Δίκαιο: Γεωπολιτική Διάσταση*, ό.π.
42. Π. Σιούσιουρας & Δ. Δαλακλής, «Η Συγκρουσιακή Σχέση Πειρατείας και Θαλασσίων Μεταφορών στη Σομαλία», ό.π., σελ. 104.
43. Από την παρουσίαση της εισήγησης του Δ. Δαλακλή, *Θαλάσσιες Μεταφορές, Πειρατεία και Διεθνές Δίκαιο: Γεωπολιτική Διάσταση*, ό.π.
44. Π. Σέργγης, *Νομική και Επιχειρησιακή Διάσταση Επιχείρησης «ΑΤΑΛΑΝΤΑ» - Ελληνική Συμμετοχή*, από τα πρακτικά της διημερίδας στην Ανώτατη Διακλαδική Σχολή Πολέμου «Λαθρομετανάστευση και Σύγχρονη Πειρατεία ως Απειλές της Διεθνούς και Περιφερειακής Ασφάλειας», Θεσσαλονίκη, 25-26 Νοεμβρίου 2009, σελ. 148.
45. Στο ίδιο, σελ. 149.
46. Από την παρουσίαση της εισήγησης του Δ. Δαλακλή, *Θαλάσσιες Μεταφορές, Πειρατεία και Διεθνές Δίκαιο: Γεωπολιτική Διάσταση*, ό.π.
47. United Nations, Report of the Monitoring Group on Somalia (pursuant to Security Council resolution 1811, 10th of December 2008, στο <http://daccessdds.un.org/doc/UNDOC/GEN/N08/604/73/PDF/N0860473.pdf?OpenElement>, Ιούνιος 2009.
48. International Chambers of Commerce – International Maritime Bureau, *Piracy and Armed Robbery against Ships Report – Annual Report 2009*, σε συνδυασμό με τα επίσημα στατιστικά στοιχεία που ανακοινώθηκαν από την EUNAVFOR.
49. Δ. Δαλακλής, *Θαλάσσιες Μεταφορές, Πειρατεία και Διεθνές Δίκαιο: Γεωπολιτική Διάσταση*, ό.π., σελ. 119.

Βελτιωμένες Μέθοδοι Επίλυσης Θεμελιωδών Προβλημάτων Ναυσιπλοΐας

Αθανάσιος Ηλ. Παλληκάρης

*Σχολή Ναυτικών Δοκίμων. Εργαστήριο Ναυτιλίας και Θαλάσσιων Επιστημών
Λεωφόρος Χατζηκυριακού, Χατζηκυριάκειο, Πειραιάς, ΤΚ 18539. palikaris@snd.edu.gr.*

Περίληψη. Στην παρούσα μελέτη παρουσιάζονται και αξιολογούνται οι παραδοσιακές μέθοδοι επίλυσης των θεμελιωδών προβλημάτων ναυσιπλοΐας (ευθύ και αντίστροφο πρόβλημα πλου), οι οποίες προτείνονται στα κλασικά συγγράμματα ναυσιπλοΐας, καθώς και νεότερες μέθοδοι ακριβέστερης επίλυσης στο σφαιροειδές. Προτείνονται νέες μέθοδοι ακριβέστερης και ευχερέστερης επίλυσης των προβλημάτων του λοξοδρομικού πλου και του πλου στη μέγιστη έλλειψη, οι οποίες είναι κατάλληλες τόσο για την ανάπτυξη ναυτιλιακού λογισμικού, όσο και για χρήση με προγραμματιζόμενους υπολογιστές χειρός. Η αξιοπιστία και η ακρίβεια των προτεινόμενων μεθόδων τεκμηριώθηκε με την εκτέλεση συγκριτικής αξιολόγησης των αριθμητικών αποτελεσμάτων επίλυσης των προβλημάτων λοξοδρομικού και ορθοδρομικού πλου της παραδοσιακής ναυτιλίας, λοξοδρομικού πλου στη σφαίρα και στο σφαιροειδές, πλου στη γεωδαισιακή γραμμή και πλου στη μέγιστη έλλειψη. Κατά τη συγκριτική αυτή αξιολόγηση διαπιστώθηκε ότι οι μέθοδοι που προτείνονται στα συγγράμματα, τα οποία χρησιμοποιούνται στη ναυτική εκπαίδευση παρέχουν αποτελέσματα, τα οποία για πλόες πολύ μεγάλων αποστάσεων, εμπεριέχουν σφάλματα της τάξης των δεκάδων ναυτικών μιλίων. Εκτός από την ευχερέστερη και ακριβέστερη επίλυση των προβλημάτων του λοξοδρομικού πλου στο σφαιροειδές και του πλου ελάχιστης απόστασης στο μέγιστο ελλειπτικό τόξο, με τις προτεινόμενες μεθόδους και αλγόριθμους επιτυγχάνεται και ο υπολογισμός των γεωγραφικών συντεταγμένων μεγάλου αριθμού ενδιάμεσων σημείων πλου για την ακριβή υποτύπωση των δρομολογίων μεγάλων αποστάσεων στην οθόνη των σύγχρονων ηλεκτρονικών συστημάτων πλοήγησης.

Λέξεις - Κλειδιά: ναυτιλία, λοξοδρομία, ορθοδρομία, μέγιστη έλλειψη, μέγιστο ελλειπτικό τόξο, ναυτικοί υπολογισμοί, γεωδαισία

Abstract. The aim of this study is to investigate the methods of sailing calculations used in traditional navigation and in contemporary maritime navigational systems and propose new improved methods for precise calculation on the ellipsoid. New formulas have been derived for both Rhumb Line Sailing (RLS) on the ellipsoid and Great Elliptic Sailing (GES). The proposed improved methods and algorithms for Rhumb Line Sailing (RLS) on the ellipsoid and the Great Elliptic Sailing (GES) are straightforward and can be easily implemented in navigational software as well as in programmable pocket calculators. The results of numerical tests and comparisons showed that they provide the same and in some cases, higher accuracy than other methods and formulas for sailing calculations on the ellipsoid. The proposed algorithms calculate also the geodetic coordinates of any finite number of intermediate points along the rhumbline (loxodrome) and the great elliptic arc for the precise depiction on long navigational paths on the screen of the Electronic Chart Systems.

I. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

A. ΤΟ ΕΥΘΥ ΚΑΙ ΤΟ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΠΛΟΥ

Η σχεδίαση και η εκτέλεση του πλου στηρίζεται στην επίλυση των δύο θεμελιωδών προβλημάτων της ναυσιπλοΐας. Τα θεμελιώδη αυτά προβλήματα είναι το ευθύ και το αντίστροφο, τα οποία χρησιμοποιούνται με διαφορετική μορφή σε όλες τις κατηγορίες πλου (λοξοδρομικός πλους, ορθοδρομικός πλους κλπ.), καθώς και σε αρκετές άλλες εφαρμογές της παραδοσιακής ναυτιλίας και των σύγχρονων αυτόματων συστημάτων πλοήγησης.

Στο ευθύ πρόβλημα είναι γνωστές οι γεωγραφικές συντεταγμένες (φ_A, λ_A) του σημείου αναχώρησης A, η απόσταση D του πλου από το σημείο αναχώρησης A στο σημείο προορισμού B καθώς και η διεύθυνση (αζιμούθιο) ζ του σημείου προορισμού B από το σημείο αναχώρησης A, και υπολογίζονται οι γεωγραφικές συντεταγμένες (φ_B, λ_B) του σημείου προορισμού B.

Στο αντίστροφο πρόβλημα είναι γνωστές οι γεωγραφικές συντεταγμένες (φ_A, λ_A) του σημείου αναχώρησης A, καθώς και οι γεωγραφικές συντεταγμένες (φ_B, λ_B) του σημείου προορισμού B και υπολογίζονται η διεύθυνση ζ του σημείου προορισμού B από το σημείο αναχώρησης A και η απόσταση D του πλου από το σημείο A στο σημείο B.

B. ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΠΛΟΥ

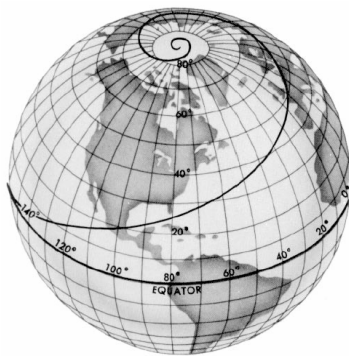
Στην παραδοσιακή ναυτιλία ο πλους από ένα σημείο αναχώρησης A προς ένα σημείο προορισμού B υλοποιείται είτε με τη μέθοδο του λοξοδρομικού πλου, είτε με τη μέθοδο του ορθοδρομικού πλου, είτε με το συνδυασμό των δύο αυτών βασικών μεθόδων (μικτός ή σύνθετος πλους).

Στο λοξοδρομικό πλου τηρείται σταθερή πορεία, αλλά δεν διανύεται η συντομότερη απόσταση. Το ίχνος του λοξοδρομικού πλου (πλους με σταθερή πορεία) στην επιφάνεια της σφαίρας ή του ελλειψοειδούς εκ περιστροφής (ΕΕΠ) ονομάζεται ρυμβοειδής γραμμή (Rhumbline)¹¹ ή λοξοδρομία (Loxodrome) [Σχ. 1]. Στην ελληνική βιβλιογραφία χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά ο όρος λοξοδρομία. Στην ξενόγλωσση βιβλιογραφία οι δύο όροι είναι συνώνυμοι, εν τούτοις η ονομασία ρυμβοειδής γραμμή (Rhumbline) χρησιμοποιείται κυρίως ως ναυτιλιακός όρος για το ίχνος του λοξοδρομικού πλου και η ονομασία λοξοδρομία (Loxodrome) χρησιμοποιείται κυρίως ως γεωμετρικός όρος για τον ορισμό και την περιγραφή της γραμμής αυτής (η μη επίπεδη γραμμή στην επιφάνεια της σφαίρας ή του σφαιροειδούς που τέμνει τους μεσημβρινούς με σταθερή γωνία) [Σχ. 1].

Στον ορθοδρομικό πλου διανύεται η συντομότερη απόσταση, αλλά δεν τηρείται σταθερή πορεία (πλους με μεταβαλλόμενη πορεία). Το ίχνος του ορθοδρομικού πλου μεταξύ δύο σημείων στην επιφάνεια της σφαίρας είναι το τόξο του μοναδικού μέγιστου κύκλου που διέρχεται από τα δύο αυτά σημεία (ορθοδρομικό τόξο) [Σχ. 2].

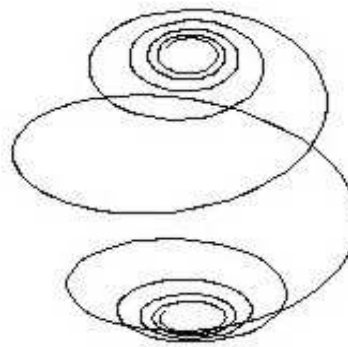
Η ρυμβοειδής γραμμή (λοξοδρομία) και το ορθοδρομικό τόξο (ορθοδρομία) είναι κατά κανόνα δύο διαφορετικά δρομολόγια πλου (Σχ. 3). Ανάλογα με τη σχετική θέση των σημείων αναχώρησης και προορισμού, τα δρομολόγια του λοξοδρομικού και του ορθοδρομικού πλου έχουν μεγαλύτερες ή μικρότερες αποκλίσεις. Στις ειδικές περιπτώσεις, κατά τις οποίες τα σημεία αυτά βρίσκονται επί του ισημερινού ή επί του ιδίου μεσημβρινού, η ορθοδρομία και η λοξοδρομία ταυτίζονται.

¹¹ Ο όρος ρυμβοειδής γραμμή (rhumbline) προέρχεται από την αρχαία ελληνική λέξη “ρύμβος” [1], η οποία σημαίνει σπείρα και χρησιμοποιήθηκε στη ναυσιπλοΐα για πρώτη φορά με την εκλατινισμένη ονομασία “Rumbo” κατά το έτος 1566 από τον “Pedro Nunes”, καθηγητή μαθηματικών του πανεπιστημίου Coimbra της Πορτογαλίας σε μονογραφία του για το λοξοδρομικό πλου [2], [3].

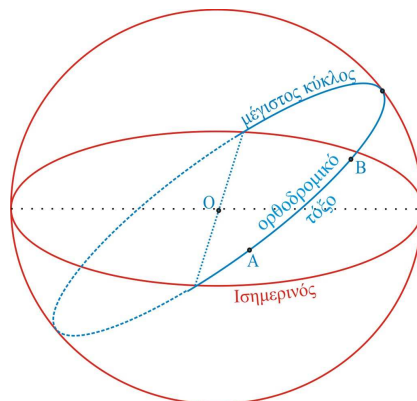


[4]

ΣΧΗΜΑ 1: Ρυμβοειδής γραμμή ή λοξοδρομία



[5]



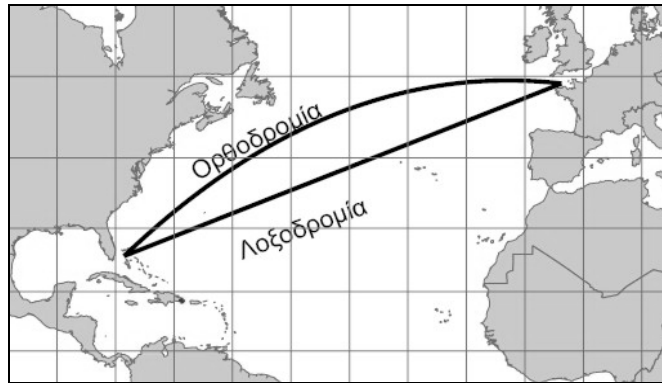
ΣΧΗΜΑ 2: Ορθοδρομικό τόξο (τόξο μέγιστου κύκλου)

Το πρόβλημα του σύνθετου ή μικτού πλου (Composite Sailing) αφορά τη σχεδίαση πλου ελάχιστης διαδρομής από ένα σημείο αναχώρησης A προς ένα σημείο προορισμού B, όταν υπάρχουν περιορισμοί στη σχεδίαση του ορθοδρομικού πλου, όπως π.χ. χερσαίες περιοχές που παρεμβάλλονται στο ίχνος του ορθοδρομικού πλου, αποφυγή πλου σε περιοχές μεγάλου γεωγραφικού πλάτους κλπ. Στις περιπτώσεις αυτές ο πλους εκτελείται σε ορισμένα τμήματά του ως ορθοδρομικός πλους και στα υπόλοιπα ως λοξοδρομικός πλους.

Η συνηθέστερη μορφή του σύνθετου πλου της παραδοσιακής ναυτιλίας, αφορά τη σχεδίαση πλου ελάχιστης διαδρομής από ένα σημείο αναχώρησης A προς ένα σημείο προορισμού B με τον περιορισμό το δρομολόγιο του πλου να μην υπερβεί ένα παράλληλο πλάτους φ_{σ} , ο οποίος λέγεται παράλληλος ασφαλείας [6], [7]. Ο περιορισμός αυτός δεν επιτρέπει την υλοποίηση του ορθοδρομικού πλου επί του ορθοδρομικού τόξου AKB (Σχ. 4). Σε αυτή την περίπτωση σύνθετου πλου συνδυάζεται ο ορθοδρομικός πλους με την ειδική περίπτωση λοξοδρομικού πλου επί παραλλήλου (πορεία 090° ή 270°) και η πλεύση από το σημείο αναχώρησης A προς το σημείο προορισμού B (Σχ. 4) εκτελείται με:

- Ορθοδρομικό πλου από το σημείο αναχώρησης A μέχρι το σημείο Σ_1 του παραλλήλου ασφαλείας φ_{σ} . Το (ορθοδρομικό) τόξο A Σ_1 εφάπτεται στον παράλληλο ασφαλείας στο σημείο Σ_1 .
- Λοξοδρομικό πλου επί του παραλλήλου ασφαλείας φ_{σ} με πορεία 090° ή 270° , (από το σημείο Σ_1 μέχρι το σημείο Σ_2). Το (ορθοδρομικό) τόξο B Σ_2 εφάπτεται στον παράλληλο ασφαλείας στο σημείο Σ_2 .
- Ορθοδρομικό πλου από το σημείο Σ_2 του παραλλήλου ασφαλείας φ_{σ} μέχρι το σημείο προορισμού B (τόξο Σ_2 B).

Η σχεδίαση και εκτέλεση πλου στηρίζεται στην επίλυση του ευθέος και του αντίστροφου προβλήματος πλου.



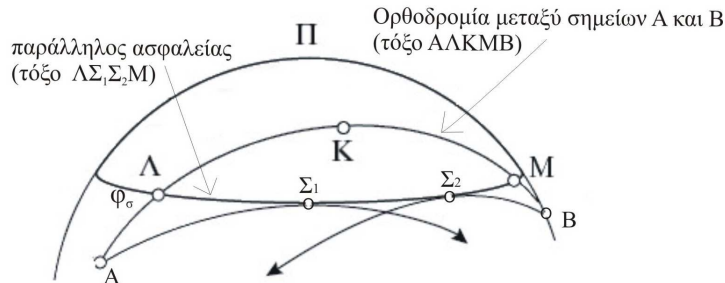
α. Απεικόνιση ορθοδρομίας και λοξοδρομίας στη σφαίρα

β. Απεικόνιση ορθοδρομίας και λοξοδρομίας στο μερκατορικό χάρτη

ΣΧΗΜΑ.3: Λοξοδρομία και Ορθοδρομία στη σφαίρα και στο μερκατορικό χάρτη

Στο ευθύ λοξοδρομικό πρόβλημα (Σχ. 5) είναι γνωστές οι γεωγραφικές συντεταγμένες (φ_A, λ_A) του σημείου αναχώρησης A, η απόσταση D_λ του λοξοδρομικού πλου από το σημείο A στο σημείο B καθώς και η σταθερή πορεία πλεύσης ζ_λ , και υπολογίζονται οι γεωγραφικές συντεταγμένες (φ_B, λ_B) του σημείου προορισμού B.

Στο αντίστροφο λοξοδρομικό πρόβλημα (Σχ. 5) είναι γνωστές οι γεωγραφικές συντεταγμένες (φ_A, λ_A) του σημείου αναχώρησης A, καθώς και οι γεωγραφικές συντεταγμένες (φ_B, λ_B) του σημείου προορισμού B και υπολογίζονται η σταθερή πορεία ζ_λ που πρέπει τηρηθεί κατά τον πλου από το σημείο A στο σημείο B και η απόσταση D_λ του λοξοδρομικού πλου από το σημείο A στο σημείο B.

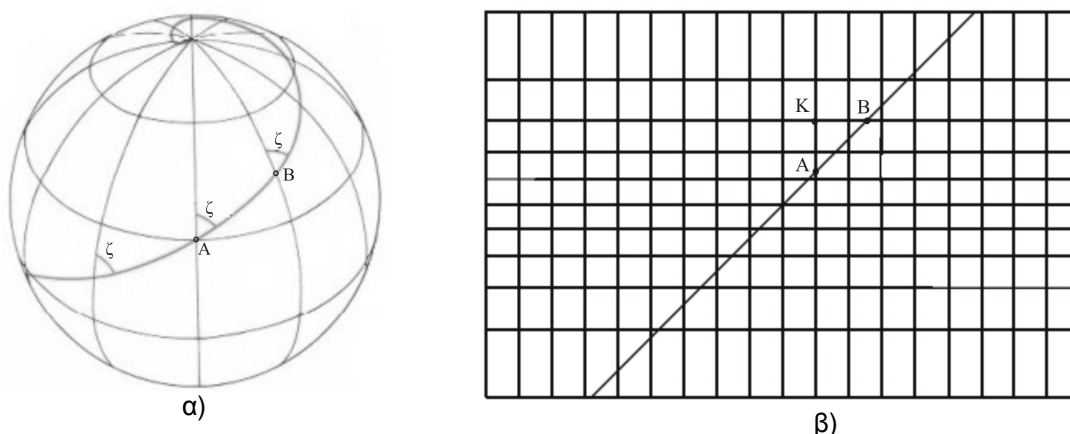


Ο πλους αποτελείται από δύο σκέλη ορθοδρομίας (τόξα $A\Sigma_1$ και Σ_2B) και ένα σκέλος λοξοδρομίας (τόξο $\Sigma_1\Sigma_2$ στον παράλληλο ασφαλείας φ_σ)
 Το τόξο $A\Sigma_1$ εφάπτεται στον παράλληλο ασφαλείας στο σημείο Σ_1
 Το τόξο Σ_2B εφάπτεται στον παράλληλο ασφαλείας στο σημείο Σ_2

ΣΧΗΜΑ 4: Το πρόβλημα του μικτού πλου με παράλληλο ασφαλείας

Στο ευθύ ορθοδρομικό πρόβλημα είναι γνωστές οι γεωγραφικές συντεταγμένες (φ_A, λ_A) του σημείου αναχώρησης A, η απόσταση D_o του ορθοδρομικού πλου από το σημείο A στο σημείο B (τόξο AKB σχήματος 4), και η αρχική πορεία ζ_A του ορθοδρομικού πλου στο σημείο αναχώρησης A και υπολογίζονται οι γεωγραφικές συντεταγμένες (φ_B, λ_B) του σημείου προορισμού B.

Στο αντίστροφο ορθοδρομικό πρόβλημα είναι γνωστές οι γεωγραφικές συντεταγμένες (φ_A, λ_A) του σημείου αναχώρησης A, καθώς και οι γεωγραφικές συντεταγμένες (φ_B, λ_B) του σημείου προορισμού B (Σχ. 4), και υπολογίζονται η απόσταση D_o του ορθοδρομικού πλου από το σημείο A στο σημείο B (τόξο AKB), και η αρχική πορεία ζ_A του ορθοδρομικού πλου στο σημείο αναχώρησης A (ο ορθοδρομικός πλους είναι πλους με συνεχώς μεταβαλλόμενη πορεία).



ΣΧΗΜΑ 5: Απεικόνιση λοξοδρομίας στη σφαίρα και στο μερκατορικό χάρτη

Γ. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΘΕΜΕΛΙΩΔΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΠΑΡΑΔΟΣΙΑΚΗΣ ΝΑΥΣΙΠΛΟΪΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΚΡΙΒΕΣΤΕΡΗΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

Στην παραδοσιακή ναυσιπλοΐα η σχεδίαση και η εκτέλεση του πλου στηρίζεται κυρίως στη γραφική επίλυση του ευθέος και του αντίστροφου προβλήματος στους ναυτικούς χάρτες, όπως αυτές παρουσιάζονται συνοπτικά στην ενότητα II. Εν τούτοις, για πλόες πολύ μεγάλων αποστάσεων χρησιμοποιούνται και αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης, οι οποίες παρουσιάζονται συνοπτικά στην § III.

Στα σύγχρονα ηλεκτρονικά συστήματα πλοήγησης εκτελείται μόνο αριθμητική επίλυση και τα αποτελέσματα αποδίδονται γραφικά στον ηλεκτρονικό χάρτη με τα αντίστοιχα δρομολόγια πλου με το ναυτιλιακό λογισμικό του συστήματος.

Στην παραδοσιακή ναυτιλία οι αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης των ναυτιλιακών προβλημάτων στηρίζονται στη χρήση σφαιρικού μοντέλου προσέγγισης της επιφάνειας της γης αντί της ακριβέστερης προσέγγισης με την επιφάνεια του σφαιροειδούς. Οι μέθοδοι επίλυσης στην επιφάνεια της σφαίρας έχουν το πλεονέκτημα της απλούστευσης των υπολογισμών εις βάρος της ακρίβειας των αποτελεσμάτων. Οι γραφικές μέθοδοι επίλυσης στους ναυτικούς χάρτες προσφέρουν γρήγορη, εύκολη και αξιόπιστη επίλυση για πλόες μικρών αποστάσεων, αλλά για πλόες πολύ μεγάλων αποστάσεων παρέχουν αρκετά μειωμένη ακρίβεια ως προς τις μεθόδους επίλυσης στο σφαιροειδές.

Οι αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης στο ελλειψοειδές παρέχουν μεν υψηλότερη ακρίβεια, αλλά οι υπολογισμοί είναι πολυπλοκότεροι. Οι απλοποιήσεις των υπολογισμών της παραδοσιακής ναυτιλίας ήταν κατά το παρελθόν αποδεκτές και αναπόφευκτες, λόγω των περιορισμών τόσο των διατιθέμενων υπολογιστικών εργαλείων όσο και της ακρίβειας των παλαιότερων μεθόδων προσδιορισμού θέσης και πλοήγησης. Εν τούτοις, οι σημερινές δυνατότητες των Δορυφορικών Συστημάτων Προσδιορισμού Θέσης και των Συστημάτων Ηλεκτρονικού Χάρτη τόσο για τον εντοπισμό όσο και για την απεικόνιση της θέσης του πλοίου με αδιανόητες για την παραδοσιακή ναυτιλία ακρίβειες, σε συνδυασμό με τις σημερινές δυνατότητες των ηλεκτρονικών υπολογιστών, επιβάλλουν την εκτέλεση των ναυτιλιακών υπολογισμών με μεγαλύτερη ακρίβεια στην επιφάνεια του σφαιροειδούς.

Με την επίλυση των προβλημάτων ναυσιπλοΐας στο ελλειψοειδές είναι θεωρητικά δυνατό να επιτευχθεί γεωδαιτική ακρίβεια λίγων εκατοστών ή ακόμη και χιλιοστών του μέτρου. Εν τούτοις, η επιδίωξη τόσο υψηλής ακρίβειας για τον υπολογισμό των στοιχείων πλου δεν έχει καμμία πρακτική σημασία.

Η επίλυση των προβλημάτων ναυσιπλοΐας στην επιφάνεια του σφαιροειδούς πρέπει να υλοποιείται με κατάλληλη προσαρμογή των μεθόδων της γεωδαισίας για την ορθολογική βελτίωση της ακρίβειας των παραδοσιακών μεθόδων της ναυτιλίας. Εν τούτοις, έχει παρατηρηθεί ότι από την περίοδο της αρχικής δημιουργίας ναυτιλιακού λογισμικού για ενσωμάτωση σε δέκτες δορυφορικών συστημάτων εντοπισμού θέσης, τόσο για λόγους απλοποίησης όσο και για άλλους λόγους, το λογισμικό αυτό αρκετές φορές βασίζεται σε υπολογιστικές μεθόδους περιορισμένης ακρίβειας [8]. Ακόμη και στο πρόσφατο παρελθόν έχει παρατηρηθεί ότι σε ορισμένες περιπτώσεις η επίλυση των θεμελιωδών προβλημάτων της ναυσιπλοΐας στηρίζεται σε απλοποιημένες μεθόδους και παραδοχές της κλασικής ναυτιλίας, όπως η προσέγγιση της μορφής της επιφάνειας της γης, σύμφωνα με την οποία η γη θεωρείται εν μέρει σφαίρα και εν μέρει ελλειψοειδές εκ περιστροφής [9].

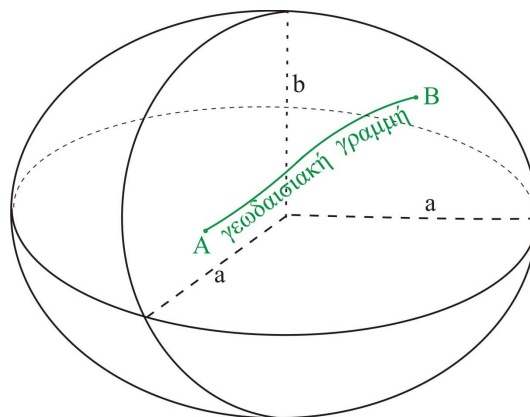
Για πλόες πολύ μεγάλων αποστάσεων (> 5.000 ν.μ.) υπολογισμός της απόστασης πλου στη σφαίρα ενδέχεται να εμπεριέχει σφάλματα της τάξης των $10 - 20$ ν.μ. (40 km περίπου) ως προς τα αποτελέσματα των υπολογισμών στην επιφάνεια του σφαιροειδούς [10].

Προβλήματα λοξοδρομικού πλου

Οι αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης των προβλημάτων λοξοδρομικού πλου στην παραδοσιακή ναυτιλία στηρίζονται σε παραδοχές και απλοποιήσεις, οι οποίες δημιουργούν αποκλίσεις της υπολογιζόμενης απόστασης του λοξοδρομικού πλου από την πραγματική τιμή της. Οι αποκλίσεις αυτές ήταν αποδεκτές για τις ανάγκες της κλασικής ναυτιλίας (σχεδίαση και εκτέλεση πλου σε έντυπους ναυτικούς χάρτες), όχι όμως για τις σύγχρονες μεθόδους ναυσιπλοΐας (σχεδίαση και εκτέλεση πλου με τα συστήματα ηλεκτρονικού χάρτη). Επιπροσθέτως, ορισμένες από τις παραδοχές και απλοποιήσεις της παραδοσιακής ναυσιπλοΐας, χρησιμοποιούνται με λανθασμένο τρόπο προκαλώντας περαιτέρω υποβάθμιση της ακρίβειας, αλλά και σύγχυση, χωρίς να συμβάλλουν ουσιαστικά στην απλοποίηση των υπολογισμών [9].

Προβλήματα ορθοδρομικού πλου και πλου ελάχιστης απόστασης στο σφαιροειδές

Ο ορθοδρομικός πλους της παραδοσιακής ναυσιπλοΐας αντιστοιχεί σε δρομολόγιο ελάχιστης απόστασης μεταξύ δύο σημείων της επιφάνειας της σφαίρας. Για τον ακριβέστερο υπολογισμό της ελάχιστης απόστασης πλου μεταξύ δύο σημείων της επιφάνειας της γης πρέπει να χρησιμοποιηθεί η ακριβέστερη προσέγγιση της επιφάνειάς της με την επιφάνεια ενός ελλειψοειδούς εκ περιστροφής (ΕΕΠ). Το ΕΕΠ, το οποίο χρησιμοποιείται για την προσέγγιση της επιφάνειας της γης προσεγγίζει το σχήμα της σφαίρας και ονομάζεται σφαιροειδές.

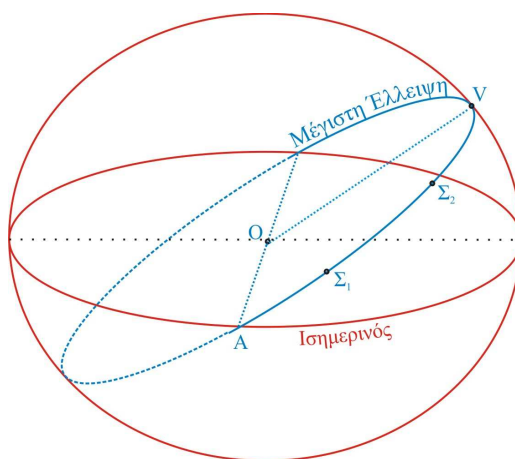


ΣΧΗΜΑ 6: Γεωδαισιακή γραμμή στην επιφάνεια του σφαιροειδούς

Στην επιφάνεια του ΕΕΠ η συντομότερη απόσταση μεταξύ δύο σημείων είναι η γεωδαισιακή γραμμή. Η γεωδαισιακή γραμμή που διέρχεται από δύο σημεία της επιφάνειας του ΕΕΠ είναι μία

μη επίπεδη γραμμή με διπλή καμπυλότητα και στρέψη, η οποία αντιστοιχεί στην ελάχιστη απόσταση μεταξύ των σημείων αυτών (Σχ. 6). Από δύο σημεία της επιφάνειας του ΕΕΠ είναι δυνατό να διέρχονται περισσότερες από μία γεωδαισιακές γραμμές. Στην επιφάνεια της σφαίρας η γεωδαισιακή γραμμή που διέρχεται από δύο σημεία είναι το τόξο του μοναδικού μέγιστου κύκλου που διέρχεται από τα σημεία αυτά.

Ο υπολογισμός της απόστασης μεταξύ δύο σημείων της γεωδαισιακής γραμμής του σφαιροειδούς είναι αρκετά πολύπλοκος. Εν τούτοις, για τις πρακτικές ανάγκες της ναυσιπλοΐας τα στοιχεία του πλου επί της γεωδαισιακής γραμμής του σφαιροειδούς πρακτικά ταυτίζονται με τα στοιχεία πλου στη μέγιστη έλλειψη [11]. Η μέγιστη έλλειψη ορίζεται ως η τομή της επιφάνειας του σφαιροειδούς με το επίπεδο που διέρχεται από το κέντρο του σφαιροειδούς, το σημείο αναχώρησης Σ_1 και το σημείο προορισμού Σ_2 (Σχ. 7).



ΣΧΗΜΑ 7: Μέγιστη έλλειψη του σφαιροειδούς

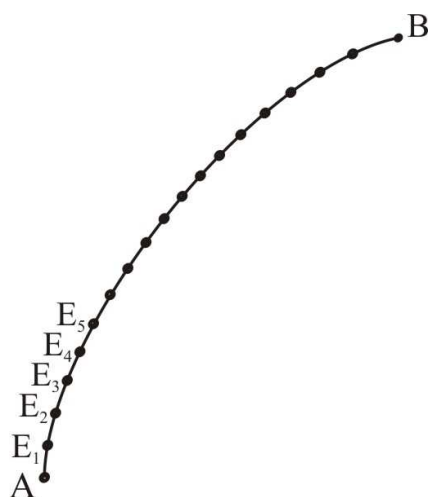
Για την ακριβή σχεδίαση και απεικόνιση των δρομολογίων πλου μεγάλων αποστάσεων στους ναυτικούς χάρτες, ιδιαίτερα δε στους ηλεκτρονικούς ναυτιλιακούς χάρτες των σύγχρονων ηλεκτρονικών συστημάτων πλοήγησης, απαιτείται ο υπολογισμός των γεωγραφικών συντεταγμένων των ενδιάμεσων σημείων $E_1, E_2, E_3 \dots$ των δρομολογίων πλου, ανεξάρτητα αν πρόκειται για ενδιάμεσα σημεία της λοξοδρομίας, της ορθοδρομίας, του τόξου της μέγιστης έλλειψης, ή της γεωδαισιακής (Σχ. 8). Ο υπολογισμός αυτός υλοποιείται με διαδοχικές επιλύσεις του ευθέως προβλήματος. Στις επιλύσεις αυτές οι γνωστές παράμετροι για την επίλυση του ευθέως προβλήματος είναι: οι γεωδαισιακές συντεταγμένες του σημείου αναχώρησης A , το υπολογιζόμενο με το αντίστροφο πρόβλημα αζιμούθιο (στο σημείο αναχώρησης A) και οι επιθυμητές αποστάσεις των ενδιάμεσων σημείων από το αρχικό. Οι αποστάσεις αυτές καθορίζονται είτε με το επιθυμητό βήμα, π.χ. κάθε 100 ν.μ., είτε με τον επιθυμητό αριθμό των ενδιάμεσων σημείων του εξεταζόμενου δρομολογίου πλου (λοξοδρομία, τόξο μέγιστης έλλειψης κλπ.).

Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται:

- Οι γραφικές μέθοδοι επίλυσης προβλημάτων λοξοδρομικού, ορθοδρομικού και σύνθετου πλου της παραδοσιακής πλου ναυσιπλοΐας (§ II),
- Οι αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης προβλημάτων λοξοδρομικού πλου της παραδοσιακής ναυσιπλοΐας (§ III)
- Οι προτεινόμενες μέθοδοι και αλγόριθμοι επίλυσης προβλημάτων λοξοδρομικού πλου στο σφαιροειδές (§ IV)
- Οι μέθοδοι επίλυσης προβλημάτων ορθοδρομικού και σύνθετου πλου με μεθόδους της σφαιρικής τριγωνομετρίας που χρησιμοποιούνται στην παραδοσιακή ναυσιπλοΐα (§ V),

- Οι μέθοδοι επίλυσης προβλημάτων ορθοδρομικού και σύνθετου πλου με μεθόδους της διανυσματικής ανάλυσης που χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη ναυτιλιακού λογισμικού (§ VI),
- Η προτεινόμενη μέθοδος και αλγόριθμος επίλυσης του ευθέος και του αντίστροφου προβλήματος πλου στη μέγιστη έλλειψη (§ VIII)

Τα αποτελέσματα της συγκριτικής αξιολόγησης των προτεινόμενων μεθόδων με μεθόδους της παραδοσιακής ναυσιπλοΐας και άλλες μεθόδους επίλυσης στο σφαιροειδές (§ IX).



Η γραμμή AB αντιπροσωπεύει δρομολόγιο: λοξοδρομικού πλου, ή ορθοδρομικού πλου, ή πλου στη μέγιστη έλλειψη, ή πλου στη γεωδαισιακή γραμμή του σφαιροειδούς.

Για τον προσδιορισμό των συντεταγμένων των ενδιάμεσων σημείων E_1, E_2, E_3, \dots επιλύεται το ευθύ πρόβλημα με γνωστά στοιχεία τις συντεταγμένες του αρχικού σημείου A, το αζιμούθιο και τις επιθυμητές αποστάσεις $S_1=AE_1, S_2=AE_2, S_3=AE_3, \dots$ των ενδιάμεσων σημείων από το αρχικό.

ΣΧΗΜΑ 8: Υπολογισμός συντεταγμένων ενδιάμεσων σημείων πλου

II. ΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΠΛΟΥ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΔΟΣΙΑΚΗ ΝΑΥΣΙΠΛΟΪΑ

A. Γραφική επίλυση προβλημάτων λοξοδρομικού και ορθοδρομικού πλου

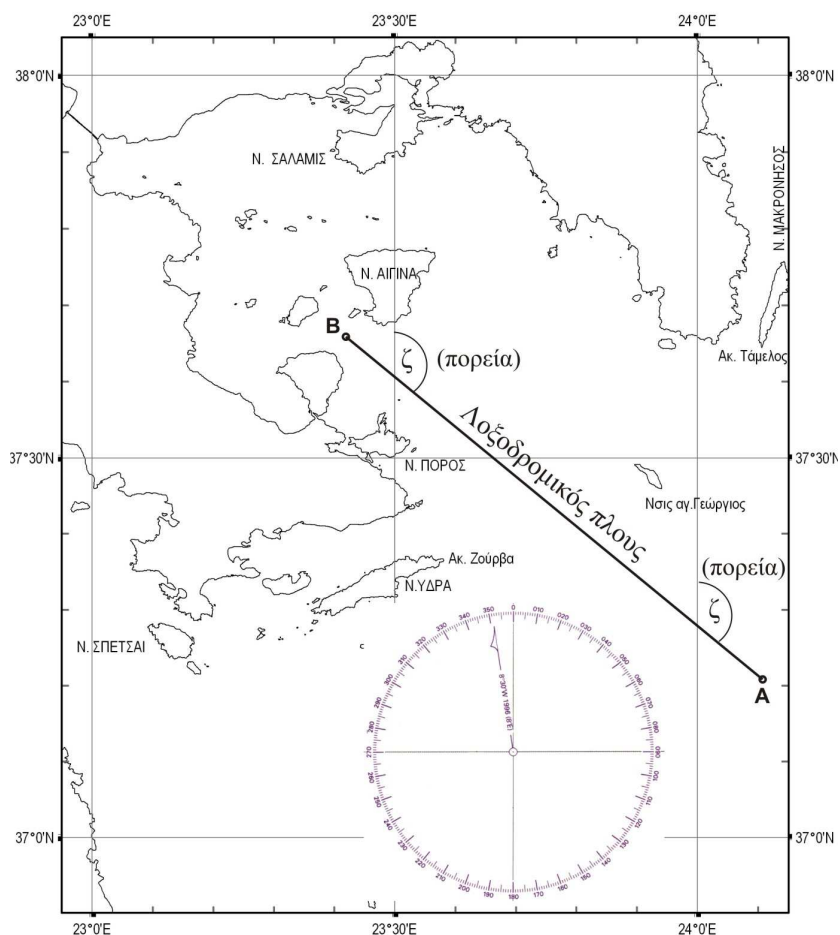
Στις παραδοσιακές μεθόδους ναυσιπλοΐας η επίλυση των θεμελιωδών προβλημάτων για τη σχεδίαση και την υλοποίηση του πλου γίνεται συνήθως με γραφικές μεθόδους στον παραδοσιακό έντυπο ναυτικό χάρτη, η κατασκευή του οποίου στηρίζεται στην ορθή μερκατορική απεικόνιση και για το λόγο αυτό είναι γνωστός με το όνομα «ναυτικός μερκατορικός χάρτης», καθώς και στο γνωμονικό χάρτη, η κατασκευή του οποίου στηρίζεται στη γνωμονική απεικόνιση.

Οι δύο βασικές ιδιότητες της ορθής μερκατορικής απεικόνισης:

- να διατηρεί τις διευθύνσεις που μετρώνται στην επιφάνεια της γης αναλλοίωτες στο χάρτη (σύμμορφη απεικόνιση) και
- να απεικονίζει τους μεσημβρινούς ως παράλληλες και ισαπέχουσες ευθείες,

παρέχουν τα επόμενα βασικά για τη ναυσιπλοΐα πλεονεκτήματα:

- Άμεση σχεδίαση του πλου σταθερής πορείας από ένα σημείο αναχώρησης A προς ένα σημείο προορισμού B (λοξοδρομικός πλους) με τη χάραξη στο μερκατορικό χάρτη του ευθυγράμμου τμήματος που ορίζεται από τα σημεία αυτά (Σχ. 5β και Σχ. 9).
- Άμεσος προσδιορισμός της πορείας ζ του λοξοδρομικού πλου με τη μέτρηση στο χάρτη της γωνίας που σχηματίζει το ευθύγραμμο τμήμα που ορίζεται από τα σημεία αναχώρησης και προορισμού, με οποιαδήποτε από τις παράλληλες ευθείες, οι οποίες αναπαριστούν τους μεσημβρινούς (Σχ. 9).



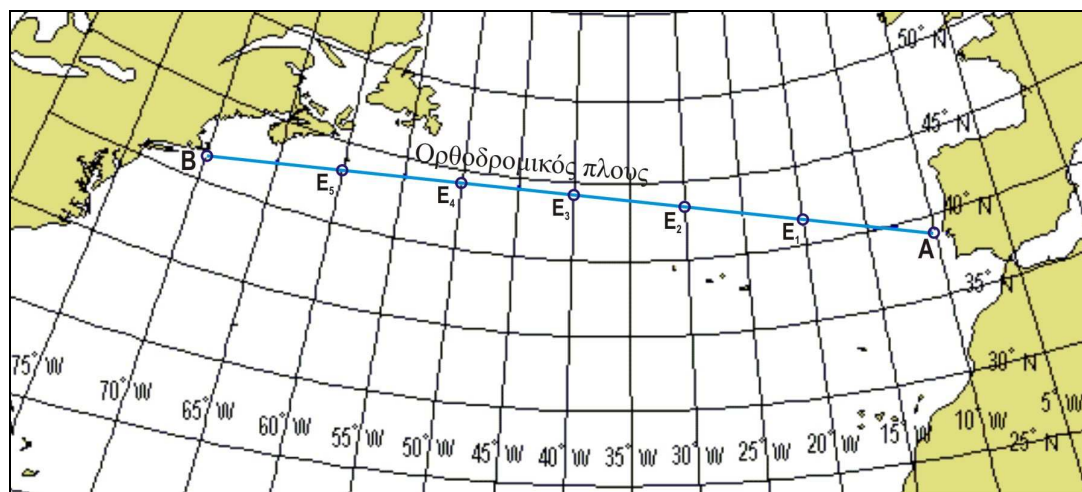
ΣΧΗΜΑ 9: Σχεδίαση λοξοδρομικού πλου στο ναυτικό μερκατορικό χάρτη

Η βασική ιδιότητα του γνωμονικού χάρτη να απεικονίζει τα δρομολόγια του ορθοδρομικού πλου ως ευθύγραμμα τμήματα παρέχει το βασικό για τη ναυσιπλοΐα πλεονέκτημα της άμεσης σχεδίασης των δρομολογίων του ορθοδρομικού πλου από ένα σημείο αναχώρησης Α προς ένα σημείο προορισμού Β με τη χάραξη στο γνωμονικό χάρτη του ευθύγραμμου τμήματος που ορίζεται από τα σημεία αυτά (Σχ. 10α).

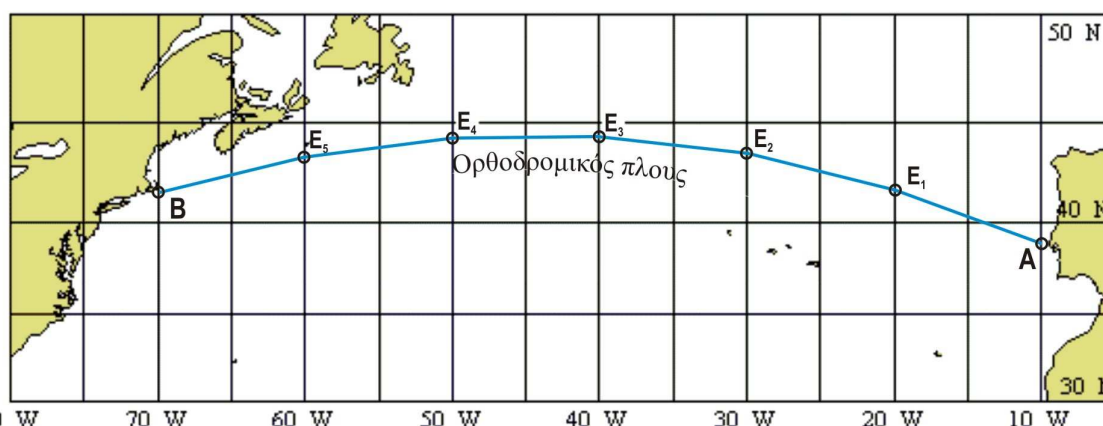
Για την υλοποίηση του ορθοδρομικού πλου απαιτείται η σχεδίαση του δρομολογίου και στο μερκατορικό χάρτη και για το λόγο αυτό στην παραδοσιακή ναυτιλία ο γνωμονικός χάρτης χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με το «μερκατορικό ναυτικό χάρτη» ως εξής:

- Σχεδιάζεται στο γνωμονικό χάρτη το δρομολόγιο του ορθοδρομικού πλου με το ευθύγραμμο τμήμα που συνδέει το σημείο αναχώρησης Α με το σημείο προορισμού Β (Σχ. 10α).
- Προσδιορίζονται επί του γνωμονικού χάρτη οι γεωγραφικές συντεταγμένες ορισμένων ενδιάμεσων σημείων του ορθοδρομικού πλου, συνήθως στα σημεία τομής του ευθύγραμμου τμήματος του ορθοδρομικού πλου με επιλεγμένους μεσημβρινούς.
- Γίνεται μεταφορά του δρομολογίου του ορθοδρομικού πλου από το γνωμονικό στο μερκατορικό χάρτη. Η μεταφορά αυτή πραγματοποιείται με τη μέτρηση επί του γνωμονικού χάρτη των συντεταγμένων ορισμένων σημείων τομής E_1, E_2, E_3, \dots του δρομολογίου του ορθοδρομικού πλου (Σχ. 9α) με επιλεγμένους μεσημβρινούς, ή/και παραλλήλους πλάτους και στη συνέχεια με την υποτύπωση των σημείων αυτών στο μερκατορικό χάρτη (Σχ. 10β).
- Τα σημεία που υποτυπώνονται στο μερκατορικό χάρτη συνδέονται με ευθύγραμμο τμήματα, τα οποία αντιπροσωπεύουν λοξοδρομικούς πλούς, και με τον τρόπο αυτό ο ορθο-

δρομικός πλους προσεγγίζεται ικανοποιητικά με μία σειρά διαδοχικών λοξοδρομικών πλεύσεων στο μερκατορικό χάρτη (Σχ. 9β). Η προσέγγιση αυτή είναι πολύ ικανοποιητική, όταν οι αποστάσεις των ενδιάμεσων σημείων δεν είναι μεγαλύτερες από 150 ν.μ.



α) Στο γνωμονικό χάρτη το δρομολόγιο του ορθοδρομικού πλου σχεδιάζεται με ευθεία γραμμή



β) Στο μερκατορικό χάρτη το δρομολόγιο του ορθοδρομικού πλου προσεγγίζεται ικανοποιητικά με διαδοχικές λοξοδρομικές πλεύσεις (τεθλασμένη γραμμή)

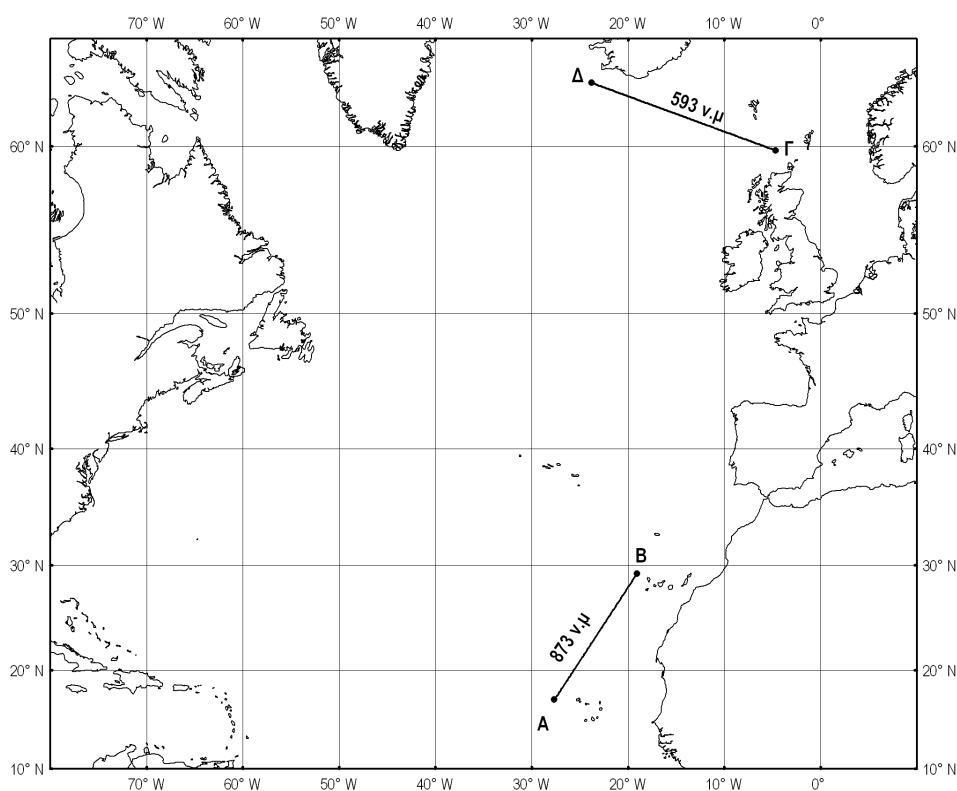
ΣΧΗΜΑ 10: Σχεδίαση ορθοδρομικού πλου στο γνωμονικό και στο μερκατορικό χάρτη

Λόγω των ιδιοτήτων της μερκατορικής και της γνωμονικής απεικόνισης να απεικονίζουν τον λοξοδρομικό και τον ορθοδρομικό πλου αντίστοιχα, με την απλούστερη δυνατή μορφή, δηλαδή με το ευθύγραμμο τμήμα που συνδέει το σημείο αναχώρησης και το σημείο προορισμού, οι δύο αυτές χαρτογραφικές απεικονίσεις έχουν καθιερωθεί για χρήση στη ναυσιπλοΐα, παρά τις σημαντικές παραμορφώσεις που παρουσιάζουν.

Οι παραμορφώσεις της μερκατορικής και γνωμονικής απεικόνισης δεν επηρεάζουν την ακρίβεια των εργασιών σχεδίασης και υλοποίησης του πλου στην παραδοσιακή ναυτιλία, διότι:

- α) Στο χάρτη γνωμονικής απεικόνισης δεν γίνονται μετρήσεις διευθύνσεων ή αποστάσεων, αλλά μόνον ανάγνωση των γεωγραφικών συντεταγμένων ορισμένων ενδιάμεσων σημείων του ορθοδρομικού πλου, με αποδεκτή για τις ανάγκες της παραδοσιακής ναυτιλίας ακρίβεια, για την υποτύπωση στη συνέχεια των σημείων αυτών στο μερκατορικό χάρτη.

- β) Η μέτρηση των διευθύνσεων στο μερκατορικό χάρτη δεν εμπεριέχει σφάλματα, γιατί η μερκατορική απεικόνιση δεν παρουσιάζει γωνιακές παραμορφώσεις, αλλά μόνο γραμμικές και επιφανειακές.
- γ) Παρά τις γραμμικές παραμορφώσεις της μερκατορικής απεικόνισης η μέτρηση των αποστάσεων στο μερκατορικό χάρτη δίνει πολύ ικανοποιητικά για τις ανάγκες της κλασικής ναυσιπλοΐας αποτελέσματα, γιατί η μέτρηση αυτή πραγματοποιείται με τις ενδείξεις γεωγραφικού πλάτους στο πλαίσιο του χάρτη και την παραδοχή ότι ένα πρώτο λεπτό της μοίρας αντιστοιχεί σε ένα ναυτικό μίλι. Στη μερκατορική απεικόνιση το γραμμικό μήκος μεταξύ διαδοχικών ενδείξεων του γεωγραφικού πλάτους που αντιστοιχούν σε ίσες διαφορές γεωγραφικού πλάτους δεν είναι σταθερό (Σχ. 11), αλλά προσδιορίζεται από το συντελεστή γραμμικής παραμόρφωσης στη διεύθυνση των μεσημβρινών για το γεωγραφικό πλάτος του αντίστοιχου παράλληλου πλάτους.



Η πραγματική απόσταση του λοξοδρομικού πλου AB (873 ν.μ) είναι 47% μεγαλύτερη από την απόσταση του λοξοδρομικού πλου ΓΔ (593 ν.μ.). Λόγω των γραμμικών παραμορφώσεων η γραμμή AB στο μερκατορικό χάρτη έχει εμφανώς μικρότερο μήκος από τη γραμμή ΓΔ.

ΣΧΗΜΑ 11: Παράδειγμα γραμμικών παραμορφώσεων μερκατορικής απεικόνισης

Για τους παραπάνω λόγους οι γραμμικές και οι επιφανειακές παραμορφώσεις της μερκατορικής απεικόνισης δεν επηρεάζουν την ακρίβεια των εκτελούμενων στο χάρτη μετρήσεων αποστάσεων, αλλά μόνο την οπτική αντίληψη των γεωγραφικών περιοχών και των δρομολογίων πλου.

Λόγω των γραμμικών παραμορφώσεων της μερκατορικής απεικόνισης η οπτική εικόνα των απεικονιζόμενων στο χάρτη δρομολογίων πλου δεν αντιπροσωπεύει ικανοποιητικά την πραγματική κατάσταση στην επιφάνεια της γης με κίνδυνο δημιουργίας εσφαλμένων εντυπώσεων, όπως π.χ.:

- Η απεικόνιση του δρομολογίου του ορθοδρομικού πλου από ένα σημείο αναχώρησης προς ένα σημείο προορισμού, με γραμμή σημαντικά μεγαλύτερου μήκους από τη γραμμή που απεικονίζει το δρομολόγιο του λοξοδρομικού πλου μεταξύ των ίδιων σημείων (σχήμα 9β), παρά το γεγονός ότι το δρομολόγιο ελάχιστης διαδρομής είναι αυτό του ορθοδρομικού πλου.
- Η απεικόνιση διαφορετικών δρομολογίων λοξοδρομικού πλου με γραμμές, οι οποίες αντιστοιχούν: η μεν γραμμή μεγαλύτερου μήκους στο δρομολόγιο μικρότερης διαδρομής, η δε γραμμή μικρότερου μήκους στο δρομολόγιο μεγαλύτερης διαδρομής (Σχ.11).

Παρά τις προαναφερθείσες οπτικές παραμορφώσεις της πραγματικότητας που προκαλούνται στη μερκατορική απεικόνιση, με κίνδυνο εξαγωγής εσφαλμένων εντυπώσεων για την απόσταση του πλου, ο ναυτικός μερκατορικός χάρτης αποτελεί βασικό, πολύτιμο και αναντικατάστατο εργαλείο των μεθόδων της παραδοσιακής ναυτιλίας λόγω της σημαντικής ιδιότητάς του να απεικονίζει τα δρομολόγια του λοξοδρομικού πλου με την απλούστερη δυνατή μορφή, η οποία είναι το ευθύγραμμο τμήμα που συνδέει το σημείο αναχώρησης και το σημείο προορισμού. Με τον τρόπο αυτό υπεραπλουστεύεται τόσο η επίλυση των λοξοδρομικών προβλημάτων (με απλές γραφικές μεθόδους) όσο και η υλοποίησή τους με τη χρησιμοποίηση της πυξίδας και των κλασικών μεθόδων προσδιορισμού θέσης (στίγματος).

Στην παραδοσιακή ναυτιλία η δυνατότητα του χάρτη μερκατορικής απεικόνισης για την εύκολη σχεδίαση και υλοποίηση του λοξοδρομικού πλου αξιοποιείται και για τη σχεδίαση και υλοποίηση του ορθοδρομικού πλου, η οποία εκτελείται με την προσέγγιση του δρομολογίου του ορθοδρομικού πλου με μία σειρά διαδοχικών λοξοδρομικών πλεύσεων στο μερκατορικό χάρτη (Σχ.10β).

B. Γραφική επίλυση προβλημάτων σύνθετου πλου

Η γραφική επίλυση των προβλημάτων του σύνθετου πλου υλοποιείται με μεθόδους ανάλογες αυτών που χρησιμοποιούνται για τη γραφική επίλυση των προβλημάτων του ορθοδρομικού πλου, με την εκμετάλλευση της βασικής ιδιότητας της γνωμονικής απεικόνισης να απεικονίζει το ορθοδρομικό τόξο με ευθεία. Ως παράδειγμα αναφέρεται η γραφική επίλυση του μικτού πλου του σχήματος 4. Η επίλυση αυτή στις περισσότερες περιπτώσεις υλοποιείται ευχερέστερα με τη χρήση χάρτη πολικής γνωμονικής απεικόνισης, στον οποίο οι μεν μεσημβρινοί απεικονίζονται ως ευθείες συγκλίνουσες στον πόλο οι δε παράλληλοι πλάτους ως ομόκεντροι κύκλοι (Σχ.12α).

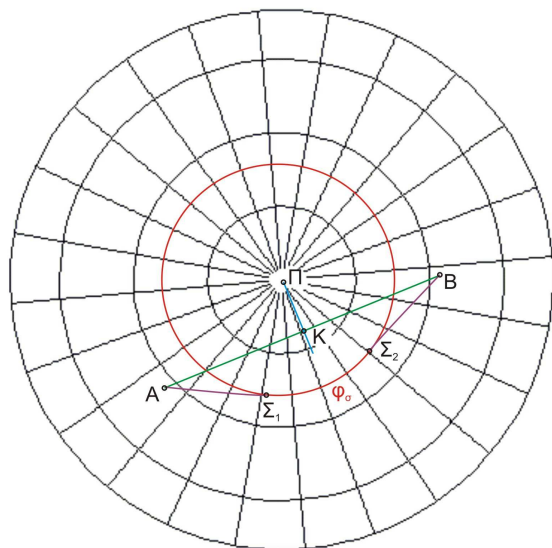
Η γραφική εργασία στο γνωμονικό χάρτη συνοψίζεται στα εξής:

- Υποτυπώνεται η θέση των σημείων αναχώρησης και προορισμού στο γνωμονικό χάρτη (σημεία A και B του σχήματος 12) και χαράσσεται το ευθύγραμμο τμήμα AB, το οποίο απεικονίζει το δρομολόγιο του ορθοδρομικού πλου (το ευθύγραμμο τμήμα AB του σχήματος 12α απεικονίζει το τόξο ΑΛΚΜΒ του σχήματος 4).
- Προσδιορίζεται η θέση του κορυφαίου σημείου Κ στο σημείο τομής του ευθύγραμμου τμήματος AB του σχήματος 12 με την κάθετη σε αυτό ευθεία γραμμή ΠΚ που διέρχεται από τον πόλο.
- Σχεδιάζεται ο παράλληλος ασφαλείας ως ομόκεντρος κύκλος με ακτίνα που προσδιορίζεται ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος φ_{σ} .
- Υποτυπώνονται οι θέσεις των σημείων Σ_1 και Σ_2 του παραλλήλου ασφαλείας του σχήματος 4 στις αντίστοιχες θέσεις Σ_1 και Σ_2 του γνωμονικού χάρτη του σχήματος 12α. Η υποτύπωση της θέσης των σημείων αυτών γίνεται με τη σχεδίαση των εφαπτόμενων στον παράλληλο ασφαλείας ευθειών ΑΣ₁ και ΒΣ₂ του σχήματος 12α.

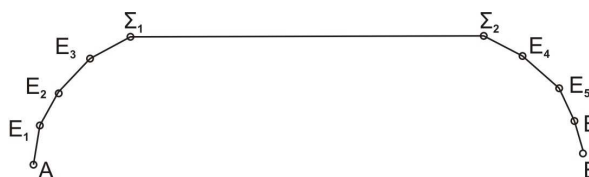
Με την περαιτέρω αξιοποίηση της παραπάνω γραφικής εργασίας επιτυγχάνεται:

- Ο γραφικός προσδιορισμός των γεωγραφικών συντεταγμένων του κορυφαίου σημείου Κ και των σημείων Σ_1 και Σ_2 του παραλλήλου ασφαλείας στο γνωμονικό χάρτη.
- Η μεταφορά του ίχνους του σύνθετου πλου στο μερκατορικό χάρτη (Σχ. 12β) ως εξής:

- Τα δύο σκέλη του μικτού πλου που αντιστοιχούν στα ορθοδρομικά τόξα $A\Sigma_1$ και $B\Sigma_2$ απεικονίζονται στο μερκατορικό χάρτη με διαδοχικές λοξοδρομικές πλεύσεις όπως στην περίπτωση του ορθοδρομικού πλου του σχήματος 10.
- Το σκέλος του μικτού πλου που αντιστοιχεί στο λοξοδρομικό πλου επί του τόξου $\Sigma_1\Sigma_2$ του παραλλήλου ασφαλείας φ_σ απεικονίζεται στο μερκατορικό χάρτη με το ευθύγραμμο τμήμα που διέρχεται από τα σημεία Σ_1 και Σ_2 .



α. Σχεδίαση σύνθετου πλου σε γνωμονικό χάρτη



β. Μεταφορά ίχνους σύνθετου πλου στο μερκατορικό χάρτη

ΣΧΗΜΑ 12: Σχεδίαση σύνθετου πλου στο γνωμονικό και στο μερκατορικό χάρτη

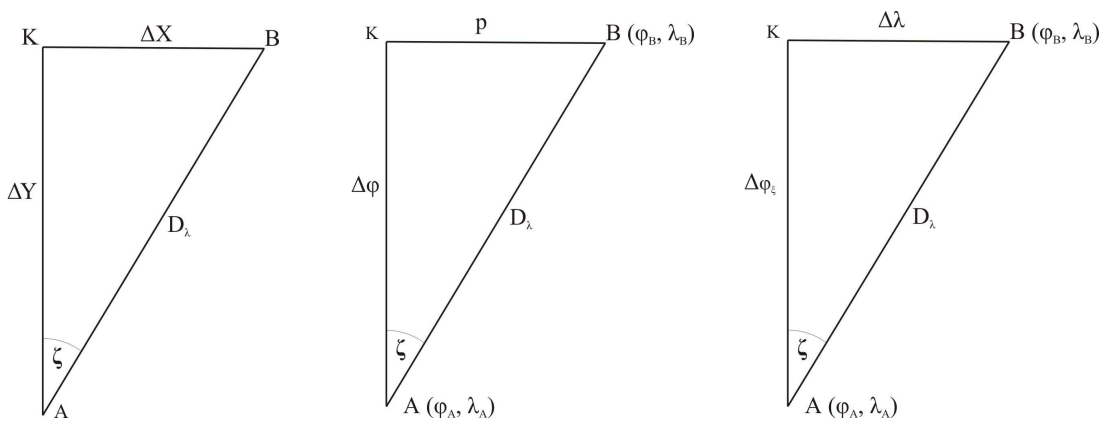
III. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΛΟΞΟΔΡΟΜΙΚΟΥ ΠΛΟΥ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΔΟΣΙΑΚΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑ

Στην παραδοσιακή ναυτιλία, εκτός από τις γραφικές μεθόδους που παρουσιάστηκαν στην ενότητα II, η επίλυση των προβλημάτων του λοξοδρομικού πλου υλοποιείται και με αριθμητικές μεθόδους, οι οποίες ανάγονται στην επίλυση απλών ορθογώνιων τριγώνων με μεθόδους της επίπεδης τριγωνομετρίας¹².

Τα βασικά χαρακτηριστικά των ορθογώνιων τριγώνων του λοξοδρομικού πλου (Σχ. 13) είναι:

- Η υποτείνουσα D_λ απεικονίζει το δρομολόγιο του λοξοδρομικού πλου από το σημείο αναχώρησης A προς το σημείο προορισμού B.
- Οι κάθετες πλευρές σχεδιάζονται η μεν μία (ΔY) στο μεσημβρινό του σημείου αναχώρησης A, η δε άλλη (ΔX) στον παράλληλο πλάτους του σημείου προορισμού B.
- Η απόσταση του λοξοδρομικού πλου ισούται με το μήκος της υποτείνουσας D_λ και η πορεία του λοξοδρομικού πλου είναι ίση με την γωνία ζ στο σημείο αναχώρησης A.
- Ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο επίλυσης, οι δύο κάθετες πλευρές του επίπεδου τριγώνου του λοξοδρομικού πλου (ΔY και ΔX) αντιπροσωπεύουν διάφορες παραμέτρους (Σχ. 13β, και Σχ.13γ).

¹² Εξάιρεση αποτελούν οι δύο ειδικές περιπτώσεις του λοξοδρομικού πλου στη διεύθυνση του μεσημβρινού και του λοξοδρομικού πλου στη διεύθυνση του παραλλήλου.



α. Γενική μορφή β. Με αποχώρηση (ρ) και διαφορά πλάτους ($\Delta\phi$) γ. Με διαφορά αυξομερών $\Delta\phi_\xi$ και διαφορά μήκους $\Delta\lambda$

ΣΧΗΜΑ 13: Μορφές του τριγώνου του λοξοδρομικού πλου της παραδοσιακής ναυτιλίας

Για πλόες μικρών αποστάσεων, η μεν πλευρά ΔY είναι ίση με τη διαφορά γεωγραφικού πλάτους $\Delta\phi$ σε πρώτα λεπτά της μοίρας, η δε πλευρά ΔX είναι ίση με την τιμή της αποχώρησης ρ σε ναυτικά μίλια (Σχ. 13β). Η **αποχώρηση (departure)** ορίζεται ως η απόσταση που μετατοπίζεται ένα πλωτό κατά τη διεύθυνση Ανατολή-Δύση, όταν πλέει λοξοδρομικώς από ένα σημείο αναχώρησης A προς ένα σημείο προορισμού B [6]. Για τις περισσότερες περιπτώσεις η τιμή της αποχώρησης σε ναυτικά μίλια προσεγγίζεται με το γραμμικό μέγεθος του παραλλήλου μέσου πλάτους των δύο σημείων που περιέχεται μεταξύ των μεσημβρινών των σημείων αυτών. Η προσέγγιση αυτή δεν είναι απόλυτα σωστή, αλλά για πλόες μικρών αποστάσεων δεν δημιουργεί αξιοσημείωτα για τις ανάγκες της ναυτιλίας σφάλματα.

Για πλόες μεγάλων αποστάσεων, η μεν πλευρά ΔY είναι ίση με τη διαφορά των αυξομερών πλάτων $\Delta\phi_\xi$ (meridional difference), η δε πλευρά ΔX είναι ίση με τη διαφορά γεωγραφικού μήκους $\Delta\lambda$ σε πρώτα λεπτά της μοίρας (Σχ. 13γ). Το **αυξομερές πλάτος ϕ_ξ** (meridional parts m) ενός παραλλήλου πλάτους είναι το - επί του ναυτικού μερκατορικού χάρτη - μήκος του τόξου του μεσημβρινού μεταξύ του ισημερινού και του παραλλήλου μετρούμενο σε μονάδες πρώτου λεπτού του ισημερινού. Στους υπολογισμούς της παραδοσιακής ναυτιλίας οι τιμές της διαφοράς αυξομερών πλάτων δεν υπολογίζονται, αλλά λαμβάνονται από διάφορους ναυτιλιακούς πίνακες, όπως οι πίνακες Norie's [12] και οι πίνακες Bowditch [4].

Οι μέθοδοι επίλυσης των προβλημάτων λοξοδρομικού πλου της παραδοσιακής ναυτιλίας είναι δυνατό να δώσουν αποτελέσματα υπολογισμών πολύ μεγάλης ακρίβειας, ανάλογα με τη μέθοδο προσδιορισμού των τιμών των κάθετων πλευρών ΔX και ΔY του τριγώνου του λοξοδρομικού πλου (Σχ. 13α). Εν τούτοις, προκειμένου να επιτευχθεί απλοποίηση των εκτελούμενων υπολογισμών, η επίλυση των προβλημάτων του λοξοδρομικού πλου στηρίζεται στον προσδιορισμό του μήκους των κάθετων πλευρών ΔX και ΔY του επίπεδου τριγώνου του λοξοδρομικού πλου (Σχ. 13) με παραδοχές που μειώνουν την ακρίβεια των υπολογισμών. Οι κυριότερες από τις παραδοχές της κλασικής ναυτιλίας, που υποβαθμίζουν την ακρίβεια των υπολογισμών του λοξοδρομικού προβλήματος, είναι:

- Η παραδοχή ότι το γραμμικό μήκος τόξου ενός πρώτου λεπτού στο μεσημβρινό είναι ένα ναυτικό μίλι (1.852 μέτρα), ανεξάρτητα αν οι υπολογισμοί αυτοί πραγματοποιούνται στην επιφάνεια της σφαίρας, ή του σφαιροειδούς. Το γραμμικό μήκος ενός πρώτου λεπτού της μοίρας στη μεσημβρινή έλλειψη δεν ισούται με 1.852 μέτρα, αλλά μεταβάλλεται με το γεωγραφικό πλάτος και επίσης εξαρτάται από το γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς (WGS-84, ED-50 κλπ.).
- Χρήση μικτής προσέγγισης της μορφής της επιφάνειας της γης σύμφωνα με την οποία, η γη θεωρείται εν μέρει σφαίρα και εν μέρει ελλειψοειδές εκ περιστροφής. Πιο συγκεκριμένα, η μεν πλευρά ΔY του τριγώνου του λοξοδρομικού πλου (Σχ. 13 β), προσδιορίζεται

ως διαφορά αυξομερών πλατών Δφξ του σφαιροειδούς, ενώ η πλευρά ΔΧ (αποχώρηση - departure), για λόγους περαιτέρω απλοποίησης των υπολογισμών προσδιορίζεται στη σφαίρα με την παραδοχή ότι προσεγγίζεται ικανοποιητικά με το μήκος σε ναυτικά μίλια του τόξου του παραλλήλου μέσου πλάτους που ορίζεται από τους μεσημβρινούς των σημείων Α και Β.

Για την ακριβέστερη επίλυση των προβλημάτων λοξοδρομικού πλου οι τιμές των δύο κάθετων πλευρών Δy και Δx του ορθογώνιου τριγώνου του λοξοδρομικού πλου πρέπει να προσδιορίζονται από τους τύπους που προκύπτουν από τη μαθηματική ανάλυση του προβλήματος του λοξοδρομικού πλου στο σφαιροειδές, χωρίς τις παραδοχές της παραδοσιακής ναυτιλίας που υποβαθμίζουν την ακρίβεια των υπολογισμών.

Ο καθορισμός των κατάλληλων τιμών των δύο κάθετων πλευρών Δy και Δx του ορθογώνιου τριγώνου του λοξοδρομικού πλου (Σχ. 11), για τη συνεχή βελτίωση των μεθόδων επίλυσης των προβλημάτων του λοξοδρομικού έχει αποτελέσει θέμα συνεχούς μελέτης και έρευνας τουλάχιστον κατά τα τελευταία πενήντα και πλέον έτη ανάλογα με τα διατιθέμενα ανά χρονική περίοδο υπολογιστικά εργαλεία [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [8] και [20].

IV. ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΛΟΞΟΔΡΟΜΙΚΟΥ ΠΛΟΥ ΣΤΟ ΣΦΑΙΡΟΕΙΔΕΣ

A. Κυριότερες μέθοδοι επίλυσης προβλημάτων λοξοδρομικού πλου στο σφαιροειδές

Οι σημαντικότερες μέθοδοι επίλυσης των προβλημάτων του λοξοδρομικού πλου στο ελλειψοειδές, που είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν άμεσα για την ανάπτυξη ναυτιλιακού λογισμικού, ανεξάρτητα αν η επίλυση εκτελείται σε κάποια παραμετροποιημένη επιφάνεια, ή απευθείας στην επιφάνεια του σφαιροειδούς, είναι:

- η μέθοδος του Bowring [17],
- η μέθοδος του Snyder [19]
- η μέθοδος του Bennet [8] και
- η προτεινόμενη μέθοδος, η οποία δημιουργήθηκε από τη βελτίωση, τη συμπλήρωση και τη σύνθεση των παραπάνω μεθόδων επίλυσης στο σφαιροειδές.

B. Προτεινόμενη μέθοδος επίλυσης προβλημάτων λοξοδρομικού πλου στο σφαιροειδές

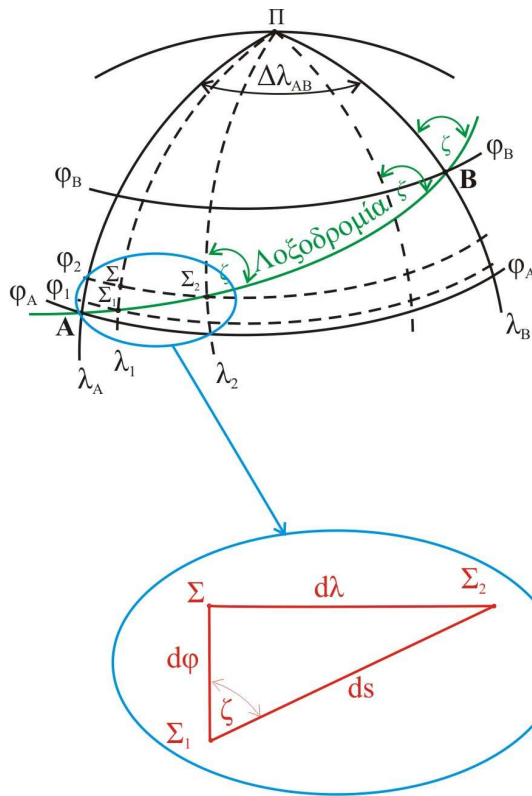
1. Αντίστροφο λοξοδρομικό πρόβλημα

Η μέθοδος στηρίζεται στην ανάλυση της γεωμετρίας της λοξοδρομίας στο σφαιροειδές (Σχ.14) από την οποία προκύπτουν οι σχέσεις (1) και (2) για τον υπολογισμό της πορείας ζ και της απόστασης D_λ του λοξοδρομικού πλου [21]. Η (2) μπορεί να θεωρηθεί ότι αντιστοιχεί στην επίλυση του επίπεδου ορθογώνιου τριγώνου του λοξοδρομικού πλου της παραδοσιακής ναυτιλίας του σχήματος 13α, στο οποίο η κάθετη πλευρά ΔΧ είναι ίση με το μήκος του τόξου του μεσημβρινού, το οποίο περιέχεται μεταξύ των παραλλήλων πλάτους των σημείων αναχώρησης και προορισμού (Σ_1 και Σ_2).

$$\tan \zeta = \frac{\Delta \lambda}{\ln \left[\tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \left(\frac{1 - e \sin \varphi}{1 + e \sin \varphi} \right)^{\frac{e}{2}} \right]_{\varphi_1}^{\varphi_2}} \quad (1)$$

$$D_\lambda = M_1^2 \sec \zeta \quad (2)$$

Όπου: M_1^2 είναι το μήκος του τόξου του μεσημβρινού, το οποίο περιέχεται μεταξύ των παραλλήλων πλάτους των σημείων αναχώρησης και προορισμού (Σ_1 και Σ_2).



$$\frac{d\lambda}{d\varphi} = \tan\zeta \frac{(1-e^2)}{(1-e^2\sin^2\varphi)^{3/2}} \cos\varphi$$

$$\frac{ds}{d\varphi} = \frac{a(1-e^2)}{(1-e^2\sin^2\varphi)^{3/2}} \sec\zeta$$

ΣΧΗΜΑ 14: Γεωμετρία λοξοδρομίας στο σφαιροειδές [21]

Η ακριβέστερη και ταχύτερη μέθοδος υπολογισμού του μήκους M_1^2 του τόξου του μεσημβρινού παρέχεται από την σειρά της (3). Το μήκος του τόξου του μεσημβρινού M_1^2 , το οποίο περιέχεται μεταξύ των παραλλήλων πλάτους των σημείων αναχώρησης και προορισμού (Σ_1 και Σ_2) προσδιορίζεται από την (4), στην οποία οι τιμές M_1 και M_2 υπολογίζονται από την (3). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα αναλυτικής αξιολόγησης [22] με τη χρήση της (3) με όρους μέχρι τάξης M_2 επιτυγχάνεται ακρίβεια της τάξης των 16 μέτρων, η οποία υπερκαλύπτει τις ανάγκες της ναυσιπλοΐας.

$$M = a(1-e^2)(M_0\varphi - M_2\sin 2\varphi + M_4\sin 4\varphi - M_6\sin 6\varphi + M_8\sin 8\varphi + \dots) \quad (3)$$

$$M_0 = 1 + \frac{3}{4}e^2 + \frac{45}{64}e^4 + \frac{175}{256}e^6 + \frac{11025}{16384}e^8 + \dots$$

$$M_2 = \frac{3}{8}e^2 + \frac{15}{32}e^4 + \frac{525}{1024}e^6 + \frac{2205}{4096}e^8$$

$$M_4 = \frac{15}{256}e^4 + \frac{105}{1024}e^6 + \frac{2205}{8820}e^8 + \dots$$

$$M_6 = \frac{35}{3072}e^6 + \frac{315}{12288}e^8 + \dots$$

$$M_8 = \frac{315}{130784}e^8 + \dots$$

$$M_1^2 = M_2 - M_1 \quad (4)$$

Όπου: Οι τιμές M_1 και M_2 υπολογίζονται με την (3) για τα γεωγραφικά πλάτη φ_1 και φ_2 .

Εκτός από τις (3) και (4) για τον υπολογισμό του μήκους του τόξου του μεσημβρινού στο ελλειψοειδές WGS-84, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οι (5) και (6), στις οποίες οι τιμές των φ_1 και φ_2 είναι σε μοίρες και η τιμή M_1^2 σε μέτρα και ναυτικά μίλια αντίστοιχα.

$$M_1^2 = 111132,95251\Delta\varphi - 16038,50861 \left(\sin\left(\frac{\varphi_2\pi}{90}\right) - \sin\left(\frac{\varphi_1\pi}{90}\right) \right) \quad (5)$$

$$M_1^2 = 60.006994 - 8.660102 \left(\sin\left(\frac{\varphi_2\pi}{90}\right) - \sin\left(\frac{\varphi_1\pi}{90}\right) \right) \quad (6)$$

Στην ειδική περίπτωση πλου επάνω, ή κοντά σε έναν μεσημβρινό ($\lambda_1 \approx \lambda_2 \approx \varphi$), δεν εκτελείται επίλυση του επίπεδου τριγώνου του λοξοδρομικού πλου, αλλά:

- Η πορεία ζ του λοξοδρομικού πλου είναι ίση με 000° ή 180° , ανάλογα αν το πλοίο κατευθύνεται βόρεια ή νότια.
- Η απόσταση D_λ του λοξοδρομικού πλου υπολογίζεται από οποιαδήποτε από τις σχέσεις (4) (5) και (6), που δίνουν το μήκος του τόξου του μεσημβρινού στο σφαιροειδές.

Στην ειδική περίπτωση πλου επάνω, ή κοντά σε έναν παράλληλο πλάτους ($\varphi_1 \approx \varphi_2 \approx \varphi$), δεν εκτελείται επίλυση του επίπεδου τριγώνου του λοξοδρομικού πλου, αλλά:

- Η πορεία ζ του λοξοδρομικού πλου είναι ίση με 090° ή 270° , ανάλογα αν το πλοίο κατευθύνεται ανατολικά ή δυτικά.
- ο υπολογισμός της απόστασης D_λ του λοξοδρομικού πλου πραγματοποιείται με την (7).

$$D_\lambda = \frac{a \Delta\lambda \cos\varphi}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2\varphi}} \quad (7)$$

2. Ευθύ λοξοδρομικό πρόβλημα

Για τον υπολογισμό των συντεταγμένων φ_2 και λ_2 του σημείου προορισμού χρησιμοποιούνται οι (8) και (9).

$$\varphi_2 = \varphi_1 + \Delta\varphi \quad (8)$$

$$\lambda_2 = \lambda_1 + \Delta\lambda \quad (9)$$

Για τον υπολογισμό του φ_2 στη (8) η διαφορά γεωγραφικού πλάτους $\Delta\varphi$ προσδιορίζεται από τη (3), που δίνει το μήκος του τόξου του μεσημβρινού με διαδοχικές προσεγγίσεις ως εξής:

Βήμα 1^ο: Υπολογίζεται το μήκος M_1 του τόξου του μεσημβρινού, από τον ισημερινό μέχρι τον παράλληλο πλάτους φ_1 με την (3).

Βήμα 2^ο: Υπολογίζεται το μήκος M_1^2 του τόξου του μεσημβρινού μεταξύ των παραλλήλων πλάτους φ_1 και φ_2 με τη (10).

Βήμα 3^ο: Υπολογίζεται το μήκος M_2 του τόξου του μεσημβρινού, από τον ισημερινό μέχρι τον παράλληλο πλάτους φ_2 με την (11).

Βήμα 4^ο: Υπολογίζεται η τιμή του τόξου M_2 , από τον ισημερινό μέχρι τον παράλληλο πλάτους φ_2 , αυτήν τη φορά με την (3) και με μία πρώτη προσέγγιση της τιμής φ_2 σε μοίρες ίση με $M_2/60$.

Βήμα 5^ο: Υπολογίζεται η δεύτερη (ακριβέστερη) προσέγγιση της τιμής του φ_2 ίση με $M_2/60$, αλλά αυτήν τη φορά με την τιμή του M_2 που υπολογίστηκε στο 4^ο βήμα.

Βήμα 6^ο: Επαναλαμβάνεται το 5^ο βήμα για τον υπολογισμό της τρίτης ακριβέστερης προσέγγισης της τιμής του φ_2 .

Συνήθως δύο έως τρεις προσεγγίσεις είναι αρκετές για τον ακριβή προσδιορισμό του φ_2 .

$$M_1^2 = D_\lambda \cos\zeta \quad (10)$$

$$M^{(2)} = M^{(1)} + M_1^2 \quad (11)$$

Για τον υπολογισμό του λ_2 στην (8), η διαφορά γεωγραφικού μήκους $\Delta\lambda$ προσδιορίζεται από τη (12), στην οποία το μήκος του τόξου του μεσημβρινού $M_1^2 = M^{(2)} - M^{(1)}$ προσδιορίζεται από τη (4) με τιμές των $M^{(1)}$ και $M^{(2)}$ που υπολογίζονται από την (3).

$$\Delta\lambda = M_1^2 \tan \zeta \quad (12)$$

Εκτός από την παραπάνω μέθοδο των διαδοχικών προσεγγίσεων, υπάρχει η δυνατότητα εναλλακτικού υπολογισμού του γεωγραφικού πλάτους φ_2 του σημείου προορισμού (ευθύ πρόβλημα) χωρίς τη χρήση της μεθόδου των διαδοχικών προσεγγίσεων⁵, αλλά με τη (13) του αντίστροφου μετασχηματισμού του μήκους του τόξου του μεσημβρινού M από τον ισημερινό μέχρι ένα σημείο γεωγραφικού πλάτους φ [8]. Με τη μέθοδο αυτή το γεωγραφικό πλάτος φ_2 του σημείου προορισμού προσδιορίζεται από τη (13) με τιμή του μήκους του τόξου μεσημβρινού M_2 , η οποία προσδιορίζεται από τη (14). Στη (14) η παράμετρος M_1 προσδιορίζεται από την (3).

$$\varphi = \frac{1852 M^2}{a A_o} + \frac{A_2}{A_o} \sin 2T + \frac{7 A_4}{5 A_o} \sin 4T + \frac{11 A_6}{5 A_o} \sin 6T + \quad (13)$$

Όπου: T είναι ο πρώτος όρος του
αθροίσματος $\left(\frac{1852 M_2}{a A_o} \right)$

$$M_2 = M_1 + D_\lambda \cos \zeta \quad (14)$$

V. ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΟΡΘΟΔΡΟΜΙΚΟΥ ΚΑΙ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΠΛΟΥ ΜΕ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΤΗΣ ΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΤΡΙΓΩΝΟΜΕΤΡΙΑΣ

A. Πρόβλημα ορθοδρομικού πλου

Στην παραδοσιακή ναυτιλία η επίλυση των προβλημάτων του ορθοδρομικού πλου υλοποιείται με την επίλυση σφαιρικών τριγώνων σε σφαίρα μοναδιαίας ακτίνας και την παραδοχή ότι ένα πρώτο λεπτό της μοίρας οποιουδήποτε μέγιστου κύκλου αντιστοιχεί σε ένα ναυτικό μίλι. Τα σταδια επίλυσης του προβλήματος του ορθοδρομικού πλου και οι σχέσεις για την τυποποίηση των υπολογισμών είναι τα εξής:

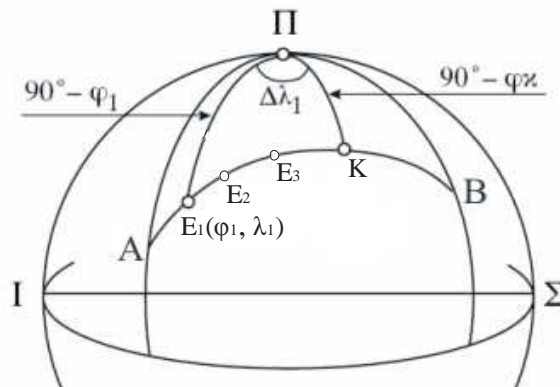
Στάδιο I (υπολογισμός της απόστασης και της αρχικής πορείας του ορθοδρομικού πλου)

Στο στάδιο αυτό εκτελείται επίλυση του σφαιρικού τριγώνου ΑΠΒ του ορθοδρομικού πλου με κορυφές το σημείο αναχωρήσεως Α, το σημείο προορισμού Β και τον πλησιέστερο στο σημείο αναχωρήσεως πόλο Π (Σχ. 15) για τον υπολογισμό της απόστασης και της αρχικής πορείας ορθοδρομικού πλου. Η απόσταση D_o του ορθοδρομικού πλου σε ναυτικά μίλια προκύπτει από την υπολογιζόμενη τιμή της πλευράς ΑΒ του σφαιρικού τριγώνου ΑΠΒ σε πρώτα λεπτά της μοίρας και δίνεται από τη (15).

$$D_o = \arccos[(\sin \varphi_A \sin \varphi_B + \cos \varphi_A \cos \varphi_B \cos \Delta\lambda)] \quad (15)$$

Η αρχική πορεία ζ_A του ορθοδρομικού πλου στο σημείο αναχώρησης Α προκύπτει από την υπολογιζόμενη τιμή της γωνίας στη κορυφή Α του σφαιρικού τριγώνου ΑΠΒ σε μοίρες και δίνεται από τη (16).

$$\zeta_A = \arctan \left[\frac{\sin \Delta\lambda}{(\cos \varphi_A \tan \varphi_B) - (\sin \varphi_A \cos \Delta\lambda)} \right] \quad (16)$$



- α. Επίλυση του σφαιρικού τριγώνου ΑΠΒ για τον υπολογισμό της απόστασης του ορθοδρομικού πλου (τόξο ΑΒ).
- β. Επίλυση του ορθογώνιου σφαιρικού τριγώνου ΑΠΚ για τον υπολογισμό της θέσης κορυφαίου σημείου Κ.
- γ. Διαδοχική επίλυση των ορθογώνιων σφαιρικών τριγώνων ΠΚΕ₁, ΠΚΕ₂, ΠΚΕ₃, .. για τον υπολογισμό της θέσης των ενδιάμεσων σημείων Ε₁, Ε₂, Ε₃, ...

ΣΧΗΜΑ 15: Επίλυση προβλήματος ορθοδρομικού πλου με σφαιρική τριγωνομετρία

Στάδιο II (υπολογισμός της θέσεως του κορυφαίου σημείου)

Στο στάδιο αυτό εκτελείται επίλυση του ορθογώνιου σφαιρικού τριγώνου ΑΠΚ (Σχ. 1.9) με κορυφές το σημείο αναχώρησης Α, το κορυφαίο σημείο Κ του ορθοδρομικού τόξου και τον πλησιέστερο πόλο Π, για τον υπολογισμό της θέσης του κορυφαίου σημείου Κ. Το γεωγραφικό μήκος λ_K του κορυφαίου σημείου Κ προκύπτει από την υπολογιζόμενη τιμή της γωνίας ΑΠΚ, η οποία ισούται με τη διαφορά γεωγραφικού μήκους $\Delta\lambda_K$ του κορυφαίου σημείου Κ από το σημείο αναχώρησης Α ($\Delta\lambda_K = \lambda_K - \lambda_A$) και δίνεται από τη (17).

$$\Delta\lambda_K = \arcsin\left(\frac{\cos \zeta_A}{\sin \varphi_K}\right) \quad (17)$$

$$\lambda_K = \Delta\lambda_K - \lambda_A$$

($\Delta\lambda_K = \text{ΑΠΚ}$)

Το γεωγραφικό πλάτος φ_K του κορυφαίου σημείου Κ του μέγιστου κύκλου προκύπτει από την υπολογιζόμενη τιμή της πλευράς ΠΚ του ορθογώνιου σφαιρικού τριγώνου ΑΠΚ, η οποία ισούται με το σύμπλατος του σημείου Κ ($90^\circ - \varphi_K$) και δίνεται από τη (18).

$$\varphi_K = \arccos(\cos\varphi_A \sin\zeta_A) \quad (18)$$

Στάδιο III (υπολογισμός θέσης ενδιάμεσων σημείων και προσέγγιση ορθοδρομικού πλου με διαδοχικές λοξοδρομικές πλεύσεις)

Στο στάδιο αυτό εκτελείται επίλυση των ορθογώνιων σφαιρικών τριγώνων ΠΚΕ₁, ΠΚΕ₂,... για τον υπολογισμό της θέσης των ενδιάμεσων σημείων (Ε₁, Ε₂, Ε₃, ...) του ορθοδρομικού τόξου, τα οποία αντιστοιχούν σε προκαθορισμένη διαφορά μήκους $\Delta\lambda_i$ ($i = 1, 2, 3, \dots$) από το κορυφαίο σημείο Κ.

Το γεωγραφικό πλάτος φ_i των ενδιάμεσων σημείων Ε_i ($i = 1, 2, 3, \dots$), τα οποία προσδιορίζονται στα σημεία τομής του ορθοδρομικού τόξου με προεπιλεγμένους μεσημβρινούς και συνεπώς αντιστοιχούν σε προκαθορισμένη διαφορά μήκους $\Delta\lambda_i$ εκατέρωθεν του κορυφαίου σημείου Κ, δίνεται από τη (19).

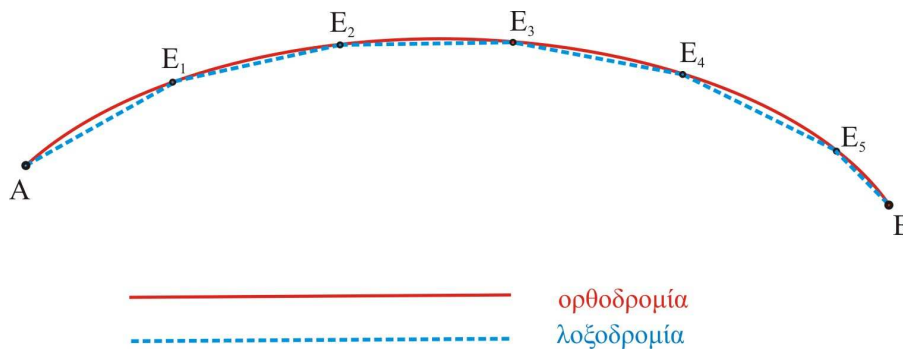
$$\varphi_i = \arctan(\cos\Delta\lambda_i \tan\varphi_i) \quad (19)$$

Το γεωγραφικό μήκος λ_i των ενδιάμεσων σημείων E_i ($i = 1, 2, 3, \dots$) προκύπτει από την προκαθορισμένη τιμή της διαφοράς γεωγραφικού μήκους $\Delta\lambda_i$ (γωνία ΚΠΕ_i, σχήματος 15) και δίνεται από την (20).

$$\lambda_i = \lambda_K - \Delta\lambda_i \quad (20)$$

Τα ενδιάμεσα σημεία (E_1, E_2, E_3, \dots) του ορθοδρομικού τόξου AB (Σχ. 15) χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της συνεχώς μεταβαλλόμενης πορείας του ορθοδρομικού πλου (γωνίας των μεσημβρινών και του ορθοδρομικού τόξου). Ο προσδιορισμός της συνεχώς μεταβαλλόμενης πορείας γίνεται με την προσέγγιση του ορθοδρομικού πλου με μια σειρά διαδοχικών λοξοδρομικών πλεύσεων (πλεύσεις με σταθερή πορεία) για τα τμήματα πλου, τα οποία ορίζονται από το σημείο αναχώρησης A προς το σημείο E_1 , από το E_1 προς το E_2 κλπ. Με τον τρόπο αυτό, μετά τον υπολογισμό των συντεταγμένων των ενδιάμεσων σημείων E_1, E_2, E_3, \dots η επίλυση του προβλήματος του ορθοδρομικού πλου ανάγεται στην επίλυση των διαδοχικών λοξοδρομικών προβλημάτων για τα τμήματα του πλου, τα οποία ορίζονται από το σημείο αναχώρησης A προς το σημείο E_1 , από το E_1 προς το E_2 κλπ. (Σχ. 16). Με την επίλυση αυτή υπολογίζονται:

- οι διαφορετικές πορείες, που πρέπει να ληφθούν στα ενδιάμεσα σημεία E_1, E_2, E_3 , κλπ. και
- η συνολική απόσταση του πλου (άθροισμα αποστάσεων των διαδοχικών λοξοδρομικών πλεύσεων). Η απόσταση αυτή προσεγγίζει καλύτερα το μήκος του ορθοδρομικού τόξου AB, όταν λαμβάνεται μεγαλύτερος αριθμός ενδιάμεσων σημείων.



(απεικόνιση στην επίπεδη επιφάνεια πλοήγησης του ναυτικού μερκατορικού χάρτη)

ΣΧΗΜΑ 16: Προσέγγιση ορθοδρομικού πλου με διαδοχικές λοξοδρομικές πλεύσεις

B. Πρόβλημα σύνθετου πλου

Η αριθμητική επίλυση των προβλημάτων του σύνθετου πλου στην παραδοσιακή ναυτιλία βασίζεται στην επίλυση σφαιρικών τριγώνων με μεθόδους ανάλογες αυτών που χρησιμοποιούνται για την επίλυση των προβλημάτων του ορθοδρομικού πλου (§ V/A). Ως παράδειγμα αναφέρεται η αριθμητική επίλυση του μικτού πλου του σχήματος 4. Στο παράδειγμα αυτό επιλύονται τα ορθογώνια σφαιρικά τρίγωνα $A\Sigma_1\Pi$ και $B\Sigma_2\Pi$ (Σχ.17) για τον υπολογισμό:

- Των αποστάσεων θ_1 και θ_3 των δύο σκελών του μικτού πλου που αντιστοιχούν στα ορθοδρομικά τόξα $A\Sigma_1$ και $B\Sigma_2$ από την (21).
- Των διαφορών γεωγραφικού μήκους $\Delta\lambda_1$ και $\Delta\lambda_2$ και των γεωγραφικών συντεταγμένων των σημείων Σ_1 και Σ_2 από τα σημεία A και B αντίστοιχα (Σχ. 4 και Σχ. 17). Οι τιμές των $\Delta\lambda_1$ και $\Delta\lambda_2$ υπολογίζονται από τις (22) και (24).

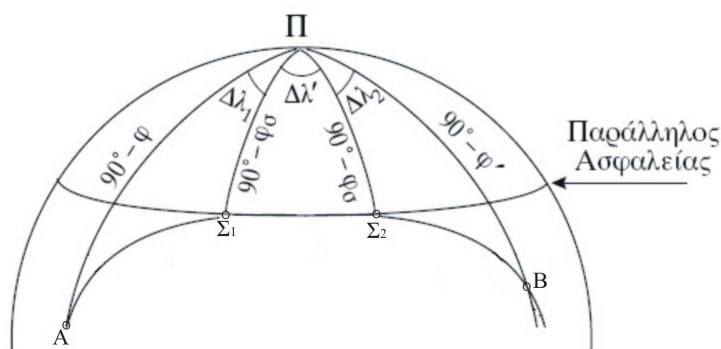
Η απόσταση θ_2 του σκέλους του μικτού πλου που αντιστοιχεί στον πλου επί του παραλλήλου ασφαλείας φ_σ , ισούται με το μήκος του τόξου $\Sigma_1\Sigma_2$, το οποίο υπολογίζεται από την (24).

$$\theta_i = \sin \varphi_i \cos \varphi_\sigma \quad (i=1,2) \quad (21)$$

$$\Delta \lambda_1 = \sin \theta_1 \cos \varphi_\sigma \quad (22)$$

$$\Delta \lambda_2 = \sin \theta_3 \cos \varphi_\sigma \quad (23)$$

$$\theta_2 = \Delta \lambda \cos \varphi_\sigma \quad (24)$$



ΣΧΗΜΑ 17: Αριθμητική επίλυση σύνθετου πλου

Η συνολική απόσταση D του μικτού πλου είναι ίση με:

$$D = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \quad (25)$$

Τα στοιχεία του ορθοδρομικού πλου στα τόξα $A\Sigma_1$ και $B\Sigma_2$ υπολογίζονται με τη μέθοδο που παρουσιάστηκε στην ενότητα (§ V/A).

VI. ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΟΡΘΟΔΡΟΜΙΚΟΥ ΚΑΙ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΠΛΟΥ ΜΕ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΤΗΣ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Εκτός από τις μεθόδους της σφαιρικής τριγωνομετρίας, για την ανάπτυξη ναυτιλιακού λογισμικού επίλυσης των προβλημάτων πλου ελάχιστης απόστασης στη σφαίρα, χρησιμοποιούνται μέθοδοι της αναλυτικής γεωμετρίας και διανυσματικής ανάλυσης. Στις μεθόδους της γραμμικής άλγεβρας και διανυσματικής ανάλυσης γίνεται χρήση των καρτεσιανών συντεταγμένων (x, y, z) ενός επίγειου γεωκεντρικού συστήματος αναφοράς, το οποίο παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα για την ανάπτυξη λογισμικού επίλυσης προβλημάτων εντοπισμού θέσης τόσο στη γεωδαισία όσο και στη ναυσιπλοΐα.

Σε ένα επίγειο γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς (Σχ. 18) η αρχή των αξόνων βρίσκεται στο κέντρο της γης, ο άξονας Z έχει διεύθυνση προς το βόρειο πόλο, ο άξονας X διέρχεται από το σημείο τομής του ισημερινού με τον πρώτο μεσημβρινό και ο άξονας Y συμπληρώνει το δεξιόστροφο ορθοκανονικό σύστημα. Οι καρτεσιανές συντεταγμένες (x, y, z) ενός σημείου P στην επιφάνεια της σφαίρας ή του σφαιροειδούς αποτελούν τις συνιστώσες του διανύσματος θέσης V του σημείου αυτού.

Για την περίπτωση του χρησιμοποιούμενου στην παραδοσιακή ναυτιλία σφαιρικού μοντέλου της γης με ακτίνα R ίση με τη μονάδα, οι καρτεσιανές συντεταγμένες (x, y, z) ενός σημείου P στην επιφάνεια της σφαίρας και οι αντίστοιχες γεωγραφικές συντεταγμένες (φ, λ) συνδέονται με τους τύπους (26) έως (30).

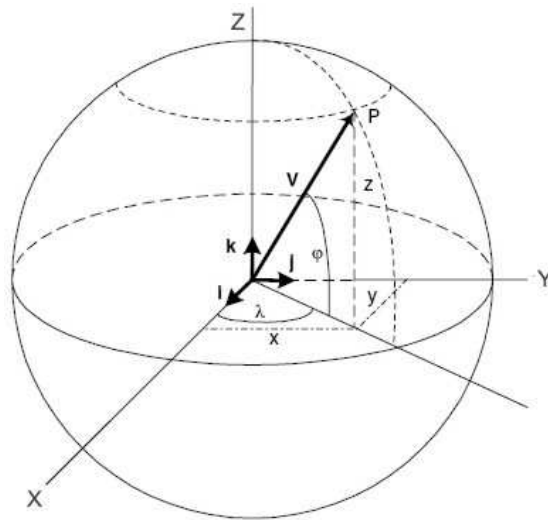
$$x = \cos \varphi \cdot \cos \lambda \quad (26)$$

$$y = \cos \varphi \cdot \sin \lambda \quad (27)$$

$$z = \sin \varphi \quad (28)$$

$$\varphi = \sin^{-1} z \quad (29)$$

$$\lambda = \begin{cases} \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right), & x > 0, y > 0 \\ \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) + \pi, & x < 0 \\ \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right), & x > 0, y < 0 \end{cases} \quad (30)$$



ΣΧΗΜΑ 17: Μετασχηματισμός σφαιρικών γεωγραφικών συντεταγμένων (ϕ, λ) σε καρτεσιανές (x, y, z)

Για την επίλυση του προβλήματος του ορθοδρομικού πλου με τη χρήση των καρτεσιανών συντεταγμένων (x, y, z) γίνεται ανάλυση της γεωμετρίας των διανυσμάτων θέσης διάφορων σημείων του ορθοδρομικού τόξου (Σχ. 19), όπως:

- το διάνυσμα θέσης V_A του σημείου αναχώρησης A.,
- το διάνυσμα θέσης V_B του σημείου προορισμού B και
- τα διανύσματα θέσης V_1, V_2, V_3, \dots των ενδιάμεσων σημείων E_1, E_2, E_3, \dots

Υπολογισμός της απόστασης του ορθοδρομικού πλου

Η απόσταση D_o του ορθοδρομικού πλου υπολογίζεται από την τιμή του ορθοδρομικού τόξου AB που προκύπτει από τον υπολογισμό του εσωτερικού γινομένου των διανυσμάτων θέσης των σημείων αναχώρησης και προορισμού V_A και V_B .

Το εσωτερικό γινόμενο των διανυσμάτων V_A και V_B δίνεται από την (31).

$$V_A \cdot V_B = |V_A| \cdot |V_B| \cdot \cos D_o \quad (31)$$

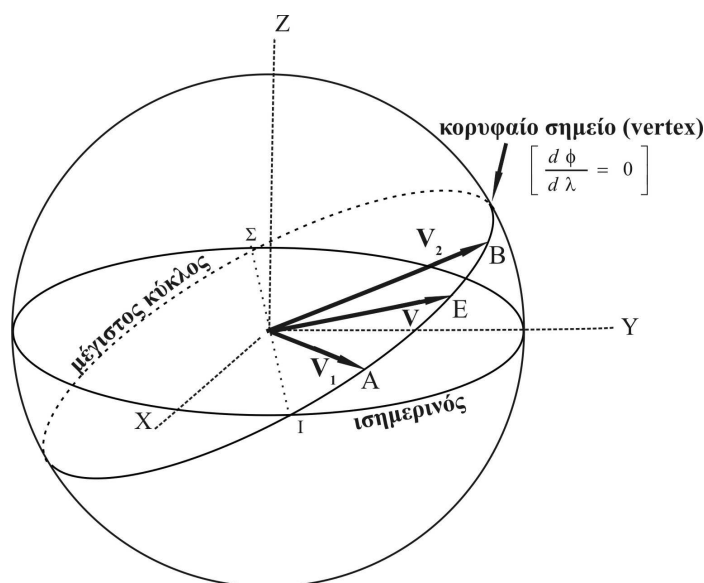
Επειδή τα σημεία A και B βρίσκονται στην επιφάνεια σφαίρας μοναδιαίας ακτίνας, οι τιμές $|V_A|$ και $|V_B|$ είναι ίσες με τη μονάδα και από την (31) προκύπτει:

$$D_o = \arccos(V_A \cdot V_B) \quad (32)$$

Επειδή $V_A \cdot V_B = x_1x_2 + y_1y_2 + z_1z_2$ [23], από την (32) προκύπτει:

$$D_o = \arccos(x_1x_2 + y_1y_2 + z_1z_2) \quad (33)$$

Αν στη (33) τεθούν οι τιμές των x, y, z από τις (26), (27) και (28), προκύπτει η (15). Οι (33) και (15) είναι ισοδύναμες (ουσιαστικά ταυτίζονται).



ΣΧΗΜΑ 19: Επίλυση προβλημάτων ορθοδρομικού πλου στη σφαίρα με μεθόδους διανυσματικής ανάλυσης

Υπολογισμός της θέσης των ενδιάμεσων σημείων του ορθοδρομικού πλου

Ο υπολογισμός της θέσης των ενδιάμεσων σημείων E_1, E_2, E_3, \dots του ορθοδρομικού πλου βασίζεται στη συνθήκη συνεπιπεδότητας των διανυσμάτων θέσης V_A, V_B, V_i ($i = 1, 2, 3 \dots$), τα οποία αντιστοιχούν: στο σημείο αναχώρησης A, στο σημείο προορισμού B και σε ένα ενδιάμεσο σημείο V_i . Η συνθήκη συνεπιπεδότητας τριών διανυσμάτων είναι να έχουν μικτό γινόμενο ίσο με μηδέν [23]. Για τα διανύσματα V_A, V_B και V_i η συνθήκη συνεπιπεδότητας δίνεται από τη (34).

$$V_A \cdot (V_B \times V_i) = 0 \quad (34)$$

Τόσο από την κατάλληλη επεξεργασία της (34) όσο και από περαιτέρω ανάλυση και εφαρμογή μεθόδων γραμμικής άλγεβρας και διανυσματικής ανάλυσης προκύπτουν διάφορες εξισώσεις, για την αποτελεσματικότερη επίλυση των προβλημάτων του ορθοδρομικού πλου, όπως για τον υπολογισμό θέσης ενδιάμεσων σημείων, χωρίς να απαιτείται προηγούμενος καθορισμός της θέσης του κορυφαίου σημείου. Οι εξισώσεις αυτές ονομάζονται εξισώσεις μέγιστου κύκλου.

Οι σημαντικότερες εξισώσεις μέγιστου κύκλου, που είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν άμεσα για την ανάπτυξη ναυτιλιακού λογισμικού, είναι οι εξισώσεις των Chi Li Chen [24], Earle [25] και Wei-Kuo Tseng [26]. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα αριθμητικών δοκιμών [24] [26] οι εξισώσεις μέγιστου κύκλου παρέχουν τα ίδια αριθμητικά αποτελέσματα με τις μεθόδους της σφαιρικής τριγωνομετρίας.

VII. ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΠΛΟΥ ΣΤΗ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑΚΗ ΓΡΑΜΜΗ

Για τα προβλήματα πλου ελάχιστης απόστασης από ένα σημείο Σ_1 προς ένα σημείο Σ_2 , μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι μέθοδοι επίλυσης των θεμελιωδών προβλημάτων της γεωδαισίας (ευθύ και αντίστροφο) για πολύ μεγάλες αποστάσεις, με τις οποίες επιτυγχάνεται σημαντικά μεγαλύτερη ακρίβεια από τις μεθόδους επίλυσης των προβλημάτων του ορθοδρομικού πλου στη σφαίρα.

Οι μέθοδοι επίλυσης των θεμελιωδών προβλημάτων της γεωδαισίας πολύ μεγάλων αποστάσεων διακρίνονται στις επόμενες δύο κατηγορίες:

- Μέθοδοι επαναληπτικών επιλύσεων (iterative solutions) για επίτευξη της κατά περίπτωση επιδιωκόμενης υψηλής ακρίβειας. Με τις μεθόδους αυτές επιτυγχάνεται ακρίβεια εκατοστού ή χιλιοστού κατά τον υπολογισμό του μήκους της γεωδαισιακής μεγάλων αποστάσεων (έως 19.000 km) και ακρίβεια υπολογισμού αζιμουθίων της τάξης κλάσματος του δεύτερου λεπτού της μοίρας. Η πλέον διαδεδομένη μέθοδος της κατηγορίας αυτής είναι η μέθοδος Vincenty [27].
- Μέθοδοι μη επαναληπτικών επιλύσεων (non iterative solutions), με τις οποίες επιτυγχάνεται ακρίβεια, η οποία είναι μικρότερη από τη χιλιοστομετρική και εκατοστομετρική ακρίβεια των μεθόδων των επαναληπτικών επιλύσεων. Παραδείγματα μεθόδων μη επαναληπτικών επιλύσεων είναι και οι μέθοδοι των Sodano [28] και Rainsford [29] καθώς και η μέθοδος Adnoyer-Lambert, η οποία προτείνεται στο κλασσικό σύγγραμμα ναυτιλίας: “Admiralty Manual of Navigation” [6]. Η μέθοδος Adnoyer-Lambert δίνει ακρίβεια υπολογισμού απόστασης της τάξης των 7 μέτρων για αποστάσεις 6.000 ναυτικών μιλίων και ακρίβεια υπολογισμού αζιμουθίων της τάξης του ενός δεύτερου λεπτού της μοίρας [6].

Στη μέθοδο Adnoyer – Lambert ο υπολογισμός του μήκους της γεωδαισιακής γραμμής δεν γίνεται επάνω στην επιφάνεια του σφαιροειδούς, αλλά επάνω στην επιφάνεια της βοηθητικής γεωδαιτικής σφαίρας με ακτίνα ίση με τον μεγάλο ημιάξονα του σφαιροειδούς a και τη χρησιμοποίηση του ανηγμένου πλάτους θ , το οποίο συσχετίζεται με το γεωδαιτικό πλάτος με τις σχέσεις 35 και 36. Με τον τρόπο αυτό η γεωδαισιακή γραμμή ανάγεται σε τόξο μέγιστου κύκλου στη σφαίρα και οι υπολογισμοί εκτελούνται με μεθόδους της σφαιρικής τριγωνομετρίας. Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα των υπολογισμών αυτών διορθώνονται για την αναγωγή τους στην επιφάνεια του σφαιροειδούς. Πιο αναλυτικά, στη μέθοδο Adnoyer – Lambert ο υπολογισμός του μήκους της γεωδαισιακής γραμμής μεγάλης απόστασης γίνεται ως εξής [30]:

Τα γεωδαιτικά πλάτη φ_i αντικαθίστανται από τα ανηγμένα πλάτη θ_i , σύμφωνα με την (35).

$$\tan\theta = (1 - e^2)^{1/2} \tan\varphi = \frac{b}{a} \tan\varphi \quad (35)$$

$$\tan\varphi = \frac{\tan\theta}{(1 - e^2)^{1/2}} = \frac{a}{b} \tan\theta \quad (36)$$

Το αζιμούθιο της γεωδαισιακής γραμμής στο σημείο Σ_1 δίνεται από την (37):

$$\tan\alpha = \frac{\sin\Delta\lambda}{\cos\theta_1 \cdot \tan\theta_2 - \sin\theta_1 \cdot \cos\Delta\lambda} \quad (37)$$

Η απόσταση της γεωδαισιακής γραμμής υπολογίζεται ως το τόξο σ μέγιστου κύκλου σε σφαίρα με ακτίνα ίση με τον μεγάλο ημιάξονα a του σφαιροειδούς. Η τιμή του ορθοδρομικού τόξου σ (τόξο μέγιστου κύκλου) υπολογίζεται από την (38).

$$\cos\sigma = \sin\theta_1 \cdot \sin\theta_2 + \cos\theta_1 \cdot \cos\theta_2 \cdot \cos\Delta\lambda \quad (38)$$

Η τιμή του ορθοδρομικού τόξου σ που προκύπτει από τη (2.4.4) μετατρέπεται σε ακτίνια και όχι σε πρώτα λεπτά, όπως στους υπολογισμούς της κλασσικής ναυτιλίας.

Στη συνέχεια, με τις (39), (40), (41) και (42) υπολογίζονται οι διορθώσεις M , N , U και V για την αναγωγή της τιμής σ στην επιφάνεια του σφαιροειδούς και υπολογισμό του μήκους S της γεωδαισιακής γραμμής από τις (43) και (44).

$$M = (\sin\theta_1 + \sin\theta_2)^2 \quad (39)$$

$$N = (\sin\theta_1 - \sin\theta_2)^2 \quad (40)$$

$$U = \frac{\sigma - \sin\sigma}{1 + \cos\sigma} \quad (41)$$

$$V = \frac{\sigma + \sin\sigma}{1 - \cos\sigma} \quad (42)$$

$$S = \sigma - \frac{f}{4}(MU + NV) \text{ (σε ακτίνια)} \quad (43)$$

$$S = a \left[\sigma - \frac{f}{4}(MU + NV) \right] \text{ (σε ναυτικά μίλια)} \quad (44)$$

Όπου:

- a είναι η τιμή του μεγάλου ημιάξονα του σφαιροειδούς σε ναυτικά μίλια,
- f είναι η επιπλάτυνση του σφαιροειδούς.

Η μέθοδος Adnoyer – Lambert χρησιμοποιείται και με άλλες παραλλαγές ως προς τον τρόπο υπολογισμού των διορθώσεων αναγωγής της απόστασης του ορθοδρομικού τόξου της βοηθητικής σφαίρας στην απόσταση επί της γεωδαισιακής γραμμής [31], [18].

Για τον υπολογισμό της απόστασης πλου στη γεωδαισιακή, εκτός από τις διάφορες παραλλαγές της μεθόδου Adnoyer – Lambert είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν και νεότερες μέθοδοι αριθμητικής ανάλυσης, όπως η μέθοδος των Williams και Plythian, η οποία χρησιμοποιεί την μέθοδο αριθμητικής ολοκλήρωσης “Cubic Spline Approximation of an Integral” [32].

VIII. ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΠΛΟΥ ΣΤΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΕΛΛΕΙΨΗ

Για την επίλυση των προβλημάτων πλου ελάχιστης απόστασης με την απαιτούμενη για τις σύγχρονες ανάγκες της ναυσιπλοΐας ακρίβεια, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν και μέθοδοι επίλυσης στο τόξο της μέγιστης έλλειψης του σφαιροειδούς [11]. Με τον τρόπο αυτό, αντί του υπολογισμού του ορθοδρομικού τόξου της σφαίρας ή του μήκους της γεωδαισιακής, εκτελείται υπολογισμός του μήκους του τόξου της μέγιστης έλλειψης που ορίζεται από το αρχικό σημείο αναχώρησης Σ_1 και το τελικό σημείο προορισμού Σ_2 (Σχ. 6).

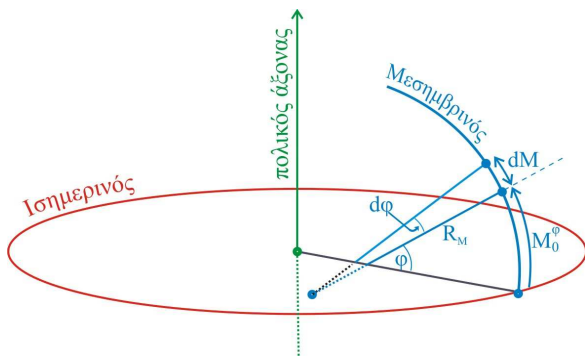
Οι μέθοδοι υπολογισμού των στοιχείων πλου στη μέγιστη έλλειψη στηρίζονται στην αρχή ότι ο υπολογισμός του μήκους του τόξου της μέγιστης έλλειψης μπορεί να υλοποιηθεί με τις (3) και (4), που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του μήκους του τόξου του μεσημβρινού με την αντικατάσταση των βασικών παραμέτρων της μεσημβρινής έλλειψης με τις αντίστοιχες της μέγιστης έλλειψης. Η διαδικασία αυτή είναι πιο κατανοητή, αν η μέγιστη έλλειψη θεωρηθεί ως κεκλιμένη μορφή της μεσημβρινής έλλειψης (Σχ. 20).

Οι δύο βασικές παράμετροι της μέγιστης έλλειψης που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του μήκους του ελλειπτικού τόξου με την αξιοποίηση της (3) και της (4) είναι:

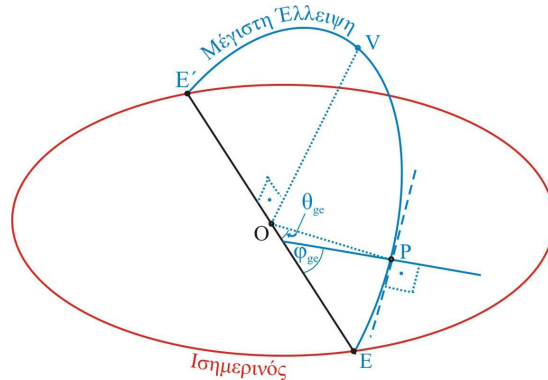
- Η **εκκεντρότητα της μέγιστης έλλειψης** e_{ge} . Η παράμετρος αυτή ισοδυναμεί με την εκκεντρότητα e του ελλειψοειδούς αναφοράς που χρησιμοποιείται στον υπολογισμό του τόξου του μεσημβρινού με τις (3) και (4).
- Η **γεωδαιτική γωνία** φ_{ge} ενός σημείου της μέγιστης έλλειψης. Η γωνία αυτή (Σχ. 20β) είναι ισοδύναμη με το γεωδαιτικό γεωγραφικό πλάτος φ που χρησιμοποιείται στους γνωστούς τύπους υπολογισμού του τόξου του μεσημβρινού (Σχ. 20α).

Μία άλλη βασική παράμετρος της μέγιστης έλλειψης είναι η **γεωκεντρική γωνία** θ_{ge} . Η γωνία αυτή (Σχ. 20β) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της γεωδαιτικής γωνίας φ_{ge} .

Για τον υπολογισμό των παραπάνω βασικών παραμέτρων της μέγιστης έλλειψης και για την αριθμητική επίλυση των στοιχείων πλου στη μέγιστη έλλειψη, έχουν κατά καιρούς προταθεί διάφορες σχέσεις και μέθοδοι υπολογισμού. Οι μέθοδοι αυτές [33], [34], [35], [36] αποτέλεσαν τη βάση για τη δημιουργία της προτεινόμενης νέας μεθόδου επίλυσης, η οποία παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το έτος 2009 [11] και αναβαθμίστηκε πρόσφατα, όπως αναφέρεται αναλυτικά στη συνέχεια.



α. μεσημβρινή έλλειψη



β. μέγιστη έλλειψη

ΣΧΗΜΑ 20: Μεσημβρινή έλλειψη και μέγιστη έλλειψη του σφαιροειδούς

Με την αντικατάσταση των τιμών των παραμέτρων e και φ της (3) με την εκκεντρότητα e_{ge} της μέγιστης έλλειψης και τη γεωδαιτική γωνία φ_{ge} (Σχ. 20β), σε συνδυασμό με την (4) προκύπτει η (45) για τον υπολογισμό του μήκους M_{12} του τόξου της μέγιστης έλλειψης μεταξύ δύο σημείων Σ_1 και Σ_2 (Σχ. 7).

$$M_{12} \approx a(1-e^2) \left(\left(1 + \frac{3}{4}e^2 + \dots \right) \varphi_{ge} - \left(\frac{3}{8}e^2 + \frac{15}{32}e^4 + \dots \right) \sin 2\varphi_{ge} + \dots \right)_{\varphi_{ge1}}^{\varphi_{ge2}} \quad (45)$$

Η προτεινόμενη μέθοδος/αλγόριθμος υπολογισμού όλων των στοιχείων του πλου στη μέγιστη έλλειψη αποτελείται από τα επόμενα τέσσερα μέρη.

- Μέρος 1^ο: Υπολογισμός ορισμένων βασικών παραμέτρων, όπως η εκκεντρότητα της μέγιστης έλλειψης e_{ge} , η γεωκεντρική γωνία θ_{ge} , η γεωδαιτική γωνία φ_{ge} κ.α. που απαιτούνται για τα επόμενα μέρη των υπολογισμών. Στο τμήμα αυτό του αλγόριθμου χρησιμοποιείται η μεθοδολογία του Williams [34].
- Μέρος 2^ο: Υπολογισμός του μήκους του τόξου της μέγιστης έλλειψης. Χρησιμοποιείται η (45).
- Μέρος 3^ο: Υπολογισμός των αζιμουθίων (πορείας στο αρχικό και στο τελικό σημείο του ελλειπτικού τόξου, καθώς και στα ενδιάμεσα σημεία). Χρησιμοποιείται η μεθοδολογία του Bowring. Αρχικά υπολογίζονται τα σφαιρικά αζιμούθια με τη χρήση των τύπων για το ορθοδρομικό τόξο σε βοηθητική σφαίρα και στη συνέχεια γίνεται αναγωγή των σφαιρικών αζιμουθίων σε ελλειπτικά.
- Μέρος 4^ο: Υπολογισμός των γεωγραφικών συντεταγμένων μεγάλου αριθμού ενδιάμεσων σημείων του τόξου της μέγιστης έλλειψης. Ο υπολογισμός αυτός υλοποιείται με διαδοχικές επιλύσεις του ευθέος προβλήματος με τη μεθοδολογία του Bowring [33]. Στις επιλύσεις αυτές οι γνωστές παράμετροι είναι οι γεωδαιτικές συντεταγμένες του σημείου αναχώρησης, το υπολογισθέν στο τρίτο μέρος του αλγόριθμου αζιμούθιο στο σημείο αναχώρησης και η επιθυμητή απόσταση του ενδιάμεσου σημείου από το αρχικό. Η απόσταση αυτή καθορίζεται είτε με το επιθυμητό βήμα, π.χ. κάθε 100 ν.μ., είτε με τον επιθυμητό αριθμό των ενδιάμεσων σημείων του ελλειπτικού τόξου. Προκειμένου να αποφευχθεί η διάδοση σφαλμάτων στις διαδοχικές επιλύσεις του ευθέος προβλήματος, το αρχικό σημείο είναι πάντα το σημείο αναχώρησης και το σημείο προορισμού είναι το ενδιάμεσο σημείο.

Πιο αναλυτικά, τα τμήματα του προτεινόμενου αλγόριθμου είναι:

Μέρος 1^ο: Υπολογισμός βασικών παραμέτρων

Γεωκεντρικό πλάτος αρχικού και τελικού σημείου θ_1, θ_2 :

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left((1 - e^2) \tan(\varphi_1)\right) \quad (46)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1}\left((1 - e^2) \tan(\varphi_2)\right) \quad (47)$$

όπου:

– φ_1 και φ_2 είναι τα γεωδαιτικά πλάτη των σημείων αναχώρησης και προορισμού Σ_1 και Σ_2

– θ_1 και θ_2 είναι τα αντίστοιχα γεωκεντρικά πλάτη.

Μετασχηματισμός γεωδαιτικών συντεταγμένων σε καρτεσιανές

$$x_1 = R_1 \cos(\varphi_1) \cos(\lambda_1) \quad (48)$$

$$y_1 = R_1 \cos(\varphi_1) \sin(\lambda_1) \quad (49)$$

$$z_1 = R_1(1 - e^2) \sin(\varphi_1) \quad (50)$$

$$x_2 = R_2 \cos(\varphi_2) \cos(\lambda_2) \quad (51)$$

$$y_2 = R_2 \cos(\varphi_2) \sin(\lambda_2) \quad (52)$$

$$z_2 = R_2(1 - e^2) \sin(\varphi_2) \quad (53)$$

Όπου:

$$R_1 = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2(\varphi_1)}} \quad (54)$$

$$R_2 = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2(\varphi_2)}} \quad (55)$$

Συντελεστές λ_w, μ_w της εξίσωσης $z = \lambda_w x + \mu_w y$ του επιπέδου της μέγιστης έλλειψης που διέρχεται από τα σημεία O, Σ_1 και Σ_2 :

$$\lambda_w = \frac{y_1 z_2 - y_2 z_1}{x_2 y_1 - x_1 y_2} \quad (56)$$

$$\mu_w = \frac{x_1 z_2 - x_2 z_1}{x_1 y_2 - x_2 y_1} \quad (57)$$

Γεωκεντρικές συντεταγμένες κορυφαίου σημείου V :

$$\lambda_v = \tan^{-1}\left(\frac{\mu_w}{\lambda_w}\right) \quad (58)$$

$$\beta_v = \tan^{-1}\left(\sqrt{\frac{(\lambda_w^2 + \mu_w^2)}{1 - e^2}}\right) \quad (59)$$

$$\theta_v = \cos^{-1}\left(\frac{\cos(\beta_v)}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2(\beta_v)}}\right) \quad (60)$$

Εκκεντρότητα της μέγιστης έλλειψης e_{ge} :

$$e_{ge} = \frac{e \sin(\theta_v)}{\sqrt{1 - e^2 \cos^2(\theta_v)}} \quad (61)$$

Γεωγραφικό πλάτος του σημείου E , στο οποίο η μέγιστη έλλειψη τέμνει τον ισημερινό (Σχ. 20β):

$$\lambda_E = \lambda_v - \frac{\pi}{2} \quad (62)$$

Γεωκεντρικές γωνίες των σημείων αναχώρησης και προορισμού θ_{ge1} και θ_{ge2} :

$$\theta_{ge1} = \cos^{-1}(\cos(\theta_1)\cos(\lambda_1 - \lambda_E)) \quad (63)$$

$$\theta_{ge2} = \cos^{-1}(\cos(\theta_2)\cos(\lambda_2 - \lambda_E)) \quad (64)$$

Γεωδαιτικές γωνίες φ_{ge1} και φ_{ge2} των σημείων αναχώρησης και προορισμού:

$$\varphi_{ge1} = \tan^{-1}\left(\frac{\tan(\theta_{ge1})}{1 - e_{ge}^2}\right) \quad (65)$$

$$\varphi_{ge2} = \tan^{-1}\left(\frac{\tan(\theta_{ge2})}{1 - e_{ge}^2}\right) \quad (66)$$

Μέρος 2^ο: Υπολογισμός μήκους του τόξου της μέγιστης έλλειψης

Μήκος S_{12} του τόξου της μέγιστης έλλειψης:

$$S_{12} \approx a(1 - e^2) \left(\left(1 + \frac{3}{4}e^2 + \dots\right) \varphi_{ge} - \left(\frac{3}{8}e^2 + \frac{15}{32}e^4 + \dots\right) \sin 2\varphi_{ge} + \dots \right)_{\varphi_{ge1}}^{\varphi_{ge2}} \quad (67)$$

με όρους μέχρι $\sin(6\varphi)$

Μέρος 3^ο: Υπολογισμός αζιμουθίων στο αρχικό και στο τελικό σημείο

Σφαιρικά αζιμούθια:

$$A_{0(1-2)} = \tan^{-1}\left(\frac{\sin(\Delta\lambda)}{\cos(\theta_1)\tan(\theta_2) - \sin(\theta_1)\cos(\Delta\lambda)}\right) \quad (68)$$

$$A_{0(2-1)} = \tan^{-1}\left(\frac{-\sin(\Delta\lambda)}{\cos(\theta_2)\tan(\theta_1) - \sin(\theta_2)\cos(\Delta\lambda)}\right) \quad (69)$$

Όπου: $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$

Αναγωγή σφαιρικών αζιμουθίων σε ελλειπτικά:

$$A_{1-2} = \tan^{-1}(\tan(A_{0(1-2)})\cos(\varphi_1 - \theta_1)) \quad (70)$$

$$A_{2-1} = \tan^{-1}(\tan(A_{0(2-1)})\cos(\varphi_2 - \theta_2)) \quad (71)$$

Μέρος 4^ο: Υπολογισμός γεωγραφικών συντεταγμένων ενδιάμεσων σημείων

Πλήθος ενδιάμεσων σημείων:

$$([x]: \text{ακέραιο μέρος του } x) \quad N = [S_{12}/\Delta S] \quad (72)$$

Υπολογισμός νέων καρτεσιανών συντεταγμένων αρχικού σημείου:

$$x_1 = R_1 \cos(\varphi_1) \quad (73)$$

$$z_1 = R_1(1 - e^2)\sin(\varphi_1) \quad (74)$$

Βοηθητικές παράμετροι της μέγιστης έλλειψης:

$$\varepsilon_0 = e_{ge} \left(\sin^2(\theta_1) + \cos^2(\theta_1)\cos^2(A_{0(1-2)}) \right) \quad (75)$$

$$b_0 = \frac{a}{\sqrt{1 + \varepsilon_0}} \quad (76)$$

$$n_0 = \frac{a - b_0}{a + b_0} \quad (77)$$

$$A = \frac{a \left(1 + \frac{1}{8} n_0^2\right)^2}{1 + n_0} \quad (78)$$

Παραμετρικό πλάτος του σημείου αναχώρησης Σ_1 :

$$u_1 = \tan^{-1} \left(\frac{a}{b_0} \frac{z_1}{x_1 \cos(A_{0(1-2)})} \right) \quad (79)$$

Βοηθητική γωνία Θ :

$$\Theta_1 = u_1 - \left(1 - \frac{3}{8} n_0^2\right) r_1^{2/3} \sin\left(\frac{2}{3} \psi_1\right) \quad (80)$$

Όπου:

$$r_1 = 1 - \frac{3}{4} n_0 \cos(2u_1) \quad (81)$$

(πολικές συντεταγμένες)

$$\psi_1 = \frac{3}{4} n_0 \sin(2u_1) \quad (82)$$

Απόσταση του σημείου αναχώρησης από το μεγάλο άξονα της μέγιστης έλλειψης:

$$M_1 = \Theta_1 A \quad (83)$$

Για το n-οστό ενδιάμεσο σημείο ($n=1, 2, \dots, N$):

Υπολογισμός απόστασης από το αρχικό σημείο του τόξου της μέγιστης έλλειψης:

$$S_{1n} = n \Delta S$$

Απόσταση M_n από το μεγάλο άξονα και βοηθητική γωνία Θ_n :

$$M_n = M_1 + S_{1n} \quad (84)$$

$$\Theta_n = \frac{M_n}{A} \quad (85)$$

Παραμετρικό πλάτος του n-οστού ενδιάμεσου σημείου:

$$u_n = \Theta_n + \frac{5}{4} \left(1 - \frac{9}{16} n_0^2\right) r_n^{8/33} \sin\left(\frac{8}{33} \psi_n\right) \quad (86)$$

Όπου:

$$r_n = 1 - \frac{33}{20} n_0 \cos(2\Theta_n) \quad (87)$$

(πολικές συντεταγμένες)

$$\psi_n = \frac{33}{20} n_0 \sin(2\Theta_n) \quad (88)$$

Γωνία του μεγάλου ημιάξονα της μέγιστης έλλειψης με τον άξονα X:

$$\mu_B = \tan^{-1} \left(\frac{\sin(A_{0(1-2)}) \sin(\theta_1)}{\cos(A_{0(1-2)})} \right) \quad (89)$$

Καρτεσιανές συντεταγμένες του n-οστού ενδιάμεσου σημείου:

$$x_n = a \cos(u_n) \cos(\mu_B) + b_0 \sin(u_n) \sin(\mu_B) \cos(\theta_1) \sin(A_{0(1-2)}) \quad (90)$$

$$y_n = -a \cos(u_n) \sin(\mu_B) + b_0 \sin(u_n) \cos(\mu_B) \cos(\theta_1) \sin(A_{0(1-2)}) \quad (91)$$

$$z_n = b_0 \sin(u_n) \sqrt{\sin^2(\theta_1) + \cos^2(\theta_1) \cos^2(A_{0(1-2)})} \quad (92)$$

Γεωδαιτικές συντεταγμένες του n-οστού ενδιάμεσου σημείου:

$$\varphi_n = \tan^{-1} \left(\frac{z_n}{(1 - e^2) \sqrt{x_n^2 + y_n^2}} \right) \quad (93)$$

$$\lambda_n = \lambda_1 + \tan^{-1} \left(\frac{y_n}{x_n} \right) \quad (94)$$

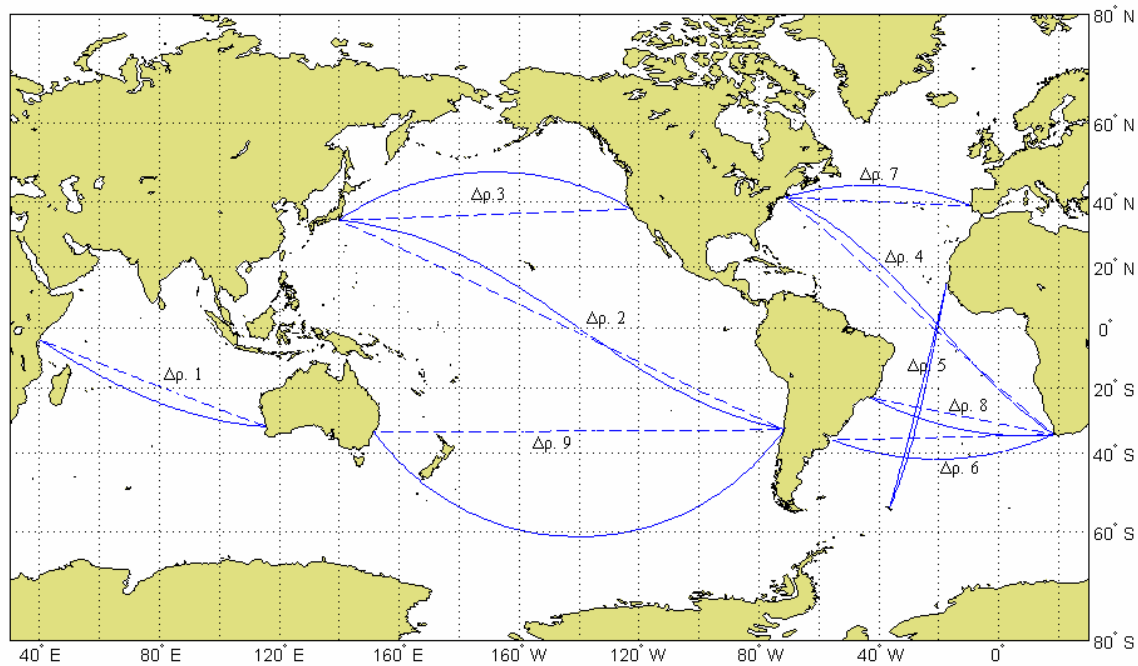
Η αναλυτική επεξήγηση των σχέσεων του παραπάνω αλγόριθμου παρουσιάζεται στις εργασίες [33], [34], [11] και [22]. Αριθμητικά παραδείγματα υπολογισμών και συγκριτικής αξιολόγησης της παραπάνω μεθόδου με άλλες παρουσιάζονται στην § ΙΧ.

ΙΧ. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

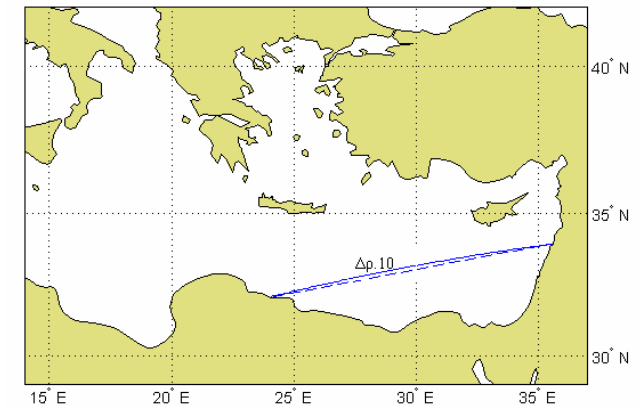
Για την αξιολόγηση των προτεινόμενων μεθόδων επίλυσης των θεμελιωδών προβλημάτων ναυσιπλοΐας εκτελέστηκαν αριθμητικές δοκιμές επίλυσης σε δέκα (10) επιλεγμένα δρομολόγια πλου, τα οποία καλύπτουν αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις πλόων αποστάσεων από 300 ν.μ. μέχρι 9.000 ν.μ. περίπου σε όλες τις θαλάσσιες περιοχές της υδρογείου (Σχ. 21). Τα σημεία αναχώρησης και προορισμού των δρομολογίων αυτών αντιστοιχούν στα σημεία εισόδου διάφορων λιμένων ή χαρακτηριστικών για τη ναυσιπλοΐα μεγάλων αποστάσεων γεωγραφικών σημείων πλου (Πίνακας 1).

ΠΙΝΑΚΑΣ (1) Σημεία πλου για καθορισμό δρομολογίων εκτέλεσης αριθμητικών δοκιμών (γεωγραφικές συντεταγμένες στο WGS-84)

| Name | Γεωγραφικό πλάτος | | | Γεωγραφικό μήκος | | |
|----------------------------|-------------------|---------|-----|------------------|---------|-----|
| | ° | ' | | ° | ' | |
| 1. NewPort-Boston | 41 | 6,3380 | Βορ | 71 | 23,4670 | Δυτ |
| 2. Leath Harbour | 54 | 7,9030 | Νοτ | 36 | 32,3000 | Δυτ |
| 3. Buenos Ayres Approaches | 36 | 3,7610 | Νοτ | 55 | 30,2290 | Δυτ |
| 4. Dakar | 14 | 22,1480 | Βορ | 17 | 27,2260 | Δυτ |
| 5. Perth, Australia | 32 | 6,2180 | Νοτ | 115 | 34,1040 | Αν |
| 6. Mombassa | 4 | 5,9230 | Νοτ | 39 | 42,6320 | Αν |
| 7. San Francisco | 37 | 45,0470 | Βορ | 122 | 42,0230 | Αν |
| 8. Yokohama, Japan | 34 | 26,1780 | Βορ | 139 | 51,1390 | Δυτ |
| 9. Valparaiso, Chile | 32 | 59,9980 | Νοτ | 71 | 36,6750 | Δυτ |
| 10. Sydney | 33 | 46,2100 | Νοτ | 151 | 31,9640 | Αν |
| 11. Cape of Good Hope | 34 | 25,6100 | Νοτ | 18 | 25,9090 | Αν |
| 12. Rio de Janeiro | 23 | 1,9160 | Νοτ | 43 | 7,2010 | Δυτ |
| 13. Beirut | 33 | 56,0180 | Βορ | 35 | 30,3290 | Αν |
| 14. Tobruk | 32 | 3,8460 | Βορ | 24 | 0,6620 | Αν |
| 15. Lisbon | 38 | 37,204 | Βορ | 9 | 13,3940 | Αν |



| Δρομολόγιο | |
|------------|------------------------------------|
| 1. | Mombassa - Perth |
| 2. | Valparaiso -Yokohama |
| 3. | San Francisco - Yokohama |
| 4. | NewPort-Boston – Cape of Good Hope |
| 5. | Dakar - Leath Harbour |
| 6. | Buenos Ayres - Cape of Good Hope |
| 7. | NewPort-Boston -Lisbon |
| 8. | Rio de Janeiro – Cape of Good Hope |
| 9. | Sydney – Valparaiso |
| 10. | Beirut - Tobruk |



Τα δρομολόγια του λοξοδρομικού πλου απεκονίζονται με διακεκομμένη γραμμή και τα δρομολόγια του ορθοδρομικού πλου με συνεχή

ΣΧΗΜΑ 21: Δρομολόγια εκτέλεσης συγκριτικών αριθμητικών δοκιμών θεμελιωδών προβλημάτων ναυσιπλοΐα

Κατά την αξιολόγηση των μεθόδων επίλυσης προβλημάτων λοξοδρομίας για τα δέκα (10) επιλεγμένα δρομολόγια του σχήματος 21, εξετάστηκαν οι παρακάτω μέθοδοι/αλγόριθμοι:

- i.) Η προτεινόμενη για χρήση σε Συστήματα Ηλεκτρονικού Χάρτη μέθοδος/αλγόριθμος επίλυσης προβλημάτων λοξοδρομικού πλου στην επιφάνεια του σφαιροειδούς (§ IV/B).
- ii.) Το ναυτιλιακό λογισμικό Navpack, το οποίο αναπτύχθηκε από κοινού από το βρετανικό αστεροσκοπείο και το ναυτικό παρατηρητήριο των ΗΠΑ [37], στο οποίο η επίλυση του λοξοδρομικού προβλήματος βασίζεται στη μέθοδο του Bennett [8].
- iii.) Αντιπροσωπευτικό λογισμικό για Συστήματα Ηλεκτρονικού Χάρτη (ECDIS Kernel).
- iv.) Τύποι επίλυσης που προκύπτουν από την ανάλυση της γεωμετρίας της λοξοδρομίας στην επιφάνεια της σφαίρας [38].

Τα αποτελέσματα των προαναφερθέντων συγκριτικών αριθμητικών δοκιμών επίλυσης προβλημάτων λοξοδρομικού πλου για τα δέκα δρομολόγια του σχήματος 21 παρουσιάζονται στον πίνακα 2.

ΠΙΝΑΚΑΣ (2) Αποτελέσματα συγκριτικών δοκιμών μεθόδων/αλγορίθμων επίλυσης προβλημάτων λοξοδρομικού πλου

| Δρομολόγιο | Λογισμικό εμπορικού ΣΗΝΧ (ECDIS SW) [επίλυση στο ελλειψοειδές] | Ναυτιλιακό λογισμικό NAVPACK [επίλυση στο ελλειψοειδές] | Επίλυση στη σφαίρα | Προτεινόμενος αλγόριθμος [επίλυση στο ΕΕΠ] |
|---------------------------------------|---|--|------------------------|---|
| | Τιμές που υπολογίστηκαν (απόσταση/πορεία) | | | |
| 1. Mombassa - Perth | 4598,2 v.μ. 111,3° | 4598,7 v.μ. 111,4° | 4591,95 v.μ. 111,5° | 4598.15 v.μ. 111.3° |
| 2. Valparaiso - Yokohama | 9315,84 v.μ. 295,6 | 9315,8 v.μ. 295,6 | 9306,55 v.μ. 295,8° | 9315,85 v.μ. 295,6° |
| 3. San Francisco - Yokohama | 4741,36 v.μ. 267,6° | 4741,4 v.μ. 267,6° | 4727,43 v.μ. 276,6° | 4741,39 v.μ. 267,6° |
| 4. NewPort-Boston – Cape of Good Hope | 6724,67 v.μ. 132,2° | 6724,7 v.μ. 132,2° | 6727,46 v.μ. 132,4° | 6724,67 v.μ. 132,2° |
| 5. Dakar - Leath Harbour | 4216,77 v.μ. 193,6° | 4216,7 v.μ. 193,6° | 4227,81 v.μ. 193,6° | 4216,76 v.μ. 193,6° |
| 6. Buenos Ayres - Cape of Good Hope | 3634,6 v.μ. 88,5° | 3634,6 v.μ. 88,5° | 3624,07 v.μ. 88,5° | 3634,62 v.μ. 88,5° |
| 7. NewPort-Boston - Lisbon | 2875,55 v.μ. 93° | 2875,6 v.μ. 93° | 2866,48 v.μ. 93° | 2875,55 v.μ. 92,9 |
| 8. Rio de Janeiro – Cape of Good Hope | 3309,24 v.μ. 101,9° | 3309,2 v.μ. 101,9° | 3301,5 v.μ. 102° | 3309,25 v.μ. 101,9 |
| 9. Sydney - Valparaiso | 6875,63 89,6° | 6875,7 v.μ. 89,6° | 6856,47 v.μ. 89,6° | 6875,75 v.μ. 89,6 |
| 10. Beirut - Tobruk | 590,68 v.μ. 259,1° | 590,6 v.μ. 259,1° | 589,024 v.μ. 259° | 590,7 v.μ. 259,1° |

ΠΙΝΑΚΑΣ (3)

Αξιολόγηση μεθόδων επίλυσης προβλημάτων λοξοδρομικού πλου που προτείνονται σε συγγράμματα και εγχειρίδια ναυτιλίας

| Σύγγραμμα/Εγχειρίδιο και εξεταζόμενο πρόβλημα λοξοδρομικού πλου | Τιμές που υπολογίστηκαν (απόσταση/πορεία) | | | |
|--|---|-----------------------|------------------------|---|
| | Μέθοδος εξεταζόμενου εγχειριδίου | Λογισμικό NAVPACK | Επίλυση στη σφαίρα | Προτεινόμενη μέθοδος επίλυσης στο σφαιροειδές |
| Admiralty Manual of Navigation, έκδοση 1987: $\varphi_1 = 45^\circ$ Βορ $\lambda_1 = 140^\circ$ Αβ $\varphi_2 = 65^\circ$ Βορ $\lambda_2 = 110^\circ$ Δυτ Ζητούνται: η απόσταση και η πορεία του λοξοδρομικού πλου | 3876.09 v.μ. 072° | 3890,6 v.μ. 072° | 3876.09 v.μ. 072° | 3890,63 v.μ. 072° |
| American Practical Navigator, έκδοση 2002: $\varphi_1 = 33^\circ 53,3'$ Νοτ $\lambda_1 = 18^\circ 23,1'$ Αβ $\varphi_2 = 40^\circ 27,1'$ Βορ $\lambda_2 = 73^\circ 49,4'$ Δυτ Ζητούνται: η απόσταση και η πορεία του λοξοδρομικού πλου | 6811,5 v.μ. και 68128 v.μ. (με δύο διαφορετικές μεθόδους υπολογισμού) 310,9° | 6786.8 v.μ. 310,9° | 6788.94 v.μ. 311,1° | 6786.82 v.μ. 310,9° |
| Εγχειρίδιο Ναυτιλίας Ιδρύματος Ευγενίδου, έκδοση 1987: $\varphi_1 = 23^\circ 15'$ Βορ $\lambda_1 = 17^\circ 10'$ Αβ $\varphi_2 = 41^\circ 20'$ Βορ $\lambda_2 = 25^\circ 48'$ Αβ Ζητούνται: η απόσταση και η πορεία του λοξοδρομικού πλου | 1169 v.μ. 21°55' | 1167,2 v.μ. 021,9° | 1168,8 v.μ. 21,82° | 1167,22 v.μ. 21,9° |
| Εγχειρίδιο Ναυτιλίας Ι.Οικονομόπουλου, έκδοση 2004: $\varphi_1 = 16^\circ 00'$ Βορ $\lambda_1 = 05^\circ 55'$ Δυτ $\varphi_2 = 40^\circ 00'$ Βορ $\lambda_2 = 74^\circ 00'$ Δυτ Ζητούνται: η απόσταση και η πορεία του λοξοδρομικού πλου | 5115,5 v.μ. 311,5° | 5096,4 v.μ. 311,5° | 5098,84 v.μ. 311,6° | 5096,41 v.μ. 311,47° |

Μετά την ολοκλήρωση της αξιολόγησης για τα δέκα δρομολόγια (πίνακας 2), πραγματοποιήθηκε συμπληρωματική αξιολόγηση των πρακτικών αριθμητικών μεθόδων επίλυσης λοξοδρομικού πλου που προτείνονται στα συγγράμματα ναυτιλίας που χρησιμοποιούνται στη ναυτική εκπαίδευση [6], [4], [39], [7]. Η αξιολόγηση αυτή πραγματοποιήθηκε με την επίλυση των παρουσιάζομενων στα παραπάνω συγγράμματα παραδειγμάτων επίλυσης τόσο με την προτεινόμενη μέθοδο, όσο και με τους τύπους της λοξοδρομίας στη σφαίρα [38]. Τα αποτελέσματα της συμπληρωματικής αυτής αξιολόγησης φαίνονται στον πίνακα 3.

Πίνακας 4: Υπολογισμός απόστασης πλου και αρχικής πορείας (αζιμούθιου) στη γεωδαισιακή, στο μέγιστο ελλειπτικό τόξο και στο τόξο του μέγιστο κύκλου

| Δρομολόγιο | απόσταση στη γεωδαισιακή [Αλγόριθμος Vincenty] | Απόσταση και αρχική πορεία (αζιμούθιο) | | |
|---------------------------------------|---|--|----------------------|------------------------------|
| | | Λογισμικό ΣΗΝΧ | Προτεινόμενη μέθοδος | Ναυτιλιακό λογισμικό Navpack |
| 1. Mombassa - Perth | 4556,71 | 4557,23 122 | 4557.19 122 | 4551,2 122,1 |
| 2. Valparaiso - Yokohama | 9241,92 | 9242,78 281,8 | 9242.8 281,9 | 9233,7 282 |
| 3. San Francisco USA- Yokohama | 4502,34927 | 4502,86 302 | 4502.89 302 | 4489,7 302 |
| 4. NewPort-Boston - Cape of Good Hope | 6698,4952 | 6699,26 117,2 | 6699.26 117,3 | 6702,1 117,4 |
| 5. Dakar - Leath harbour | 4213,046 | 4213,54 191,8 | 4213.53 191,8 | 4224,5 191,7 |
| 6. Buenos Ayres - Cape of Good Hope | 3540,6917 | 3541,08 112,2 | 3541.1 112,1 | 3530,8 112,1 |
| 7. NewPort-Boston - Lisbon | 2813,4257 | 2813,74 71,5 | 2813.75 71,6 | 2804,9 71,6 |
| 8. Rio de Janeiro - Cape of Good Hope | 3269,2027 | 3268,78 116,8 | 3268.79 116,7 | 3261,1 116,8 |
| 9. Sydney - Valparaiso | 6128,41 | 6128,95 144,2 | 6129.12 144 | 6113 144,1 |
| 10. Beirut - Tobruk | 590,3244 | 590,39 262,2 | 590.37 262,2 | 589 262,1 |

Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των εκτελεσθεισών συγκριτικών αριθμητικών δοκιμών επίλυσης προβλημάτων λοξοδρομικού πλου, τα σημαντικότερα από τα οποία παρουσιάζονται στους πίνακες 2 και 3, προκύπτουν οι παρακάτω διαπιστώσεις:

- Η προτεινόμενη μέθοδος/αλγόριθμος (§ IV/B), το ναυτιλιακό λογισμικό Navpack και το αντιπροσωπευτικό λογισμικό για συστήματα ηλεκτρονικού χάρτη (ECDIS Kernel), παρέχουν αποτελέσματα με πρακτικά αμελητέες για τη ναυσιπλοΐα αποκλίσεις.
- Για πλόες πολύ μεγάλων αποστάσεων οι υπολογισμοί της απόστασης του λοξοδρομικού πλου στη σφαίρα [38] παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις από τους αντίστοιχους υπολογισμούς στο σφαιροειδές. Οι αποκλίσεις αυτές για πλόες πολύ μεγάλων αποστάσεων παρουσιάζουν αποκλίσεις της τάξης των 19 ν.μ. Για τον υπολογισμό της πορείας οι αποκλίσεις είναι πρακτικά αμελητέες (<0,3°).
- Για πλόες πολύ μεγάλων αποστάσεων οι μέθοδοι επίλυσης, που παρουσιάζονται στα συγγράμματα ναυτιλίας [6], [4], [39] και [7], παρέχουν μειωμένη ακρίβεια ως προς τις μεθόδους επίλυσης στο σφαιροειδές.

- Οι μέθοδοι των εγχειριδίων “Admiralty Manual of Navigation”, “American Practical Navigator” και του Εγχειριδίου Ναυτιλίας του Ιδρύματος Ευγενίδου παρέχουν αποτελέσματα τα οποία ταυτίζονται με αυτά που προκύπτουν από την επίλυση στη σφαίρα, ενώ η μέθοδος του εγχειριδίου Ναυτιλίας του Ι. Οικονομόπουλου παρέχει διαφορετικά αποτελέσματα.
- Για πλόες μικρών αποστάσεων όλες οι μέθοδοι επίλυσης παρέχουν πρακτικά αμελητέες για τη ναυσιπλοΐα αποκλίσεις.

Για την αξιολόγηση των προβλημάτων πλου ελάχιστης απόστασης χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια δρομολόγια πλου, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν και στην αξιολόγηση των μεθόδων επίλυσης προβλημάτων λοξοδρομικού πλου (Σχ. 21). Για την αξιολόγηση αυτή υπολογίστηκαν τα στοιχεία πλου ελάχιστης απόστασης με τις επόμενες μεθόδους:

- i.) Τη μέθοδο Vincenty [27] για τον υπολογισμό της απόστασης πλου και των αζιμουθίων στη γεωδαισιακή γραμμή με ακρίβεια εκατοστού του μέτρου, προκειμένου να αποτελέσει βάση αναφοράς για τη σύγκριση των άλλων μεθόδων.
- ii.) Την προτεινόμενη μέθοδο/αλγόριθμο επίλυσης στο μέγιστο ελλειπτικό τόξο (§ V/III).
- iii.) Το ναυτιλιακό λογισμικό Navpack, το οποίο αναπτύχθηκε από κοινού από το βρετανικό αστεροσκοπείο και το ναυτικό παρατηρητήριο των ΗΠΑ [37].
- iv.) Αντιπροσωπευτικό λογισμικό που χρησιμοποιείται σε Συστήματα Ηλεκτρονικού Χάρτη (ECDIS Kernel).
- v.) Τύποι υπολογισμού των στοιχείων του ορθοδρομικού τόξου (απόσταση και αζιμούθια) στη σφαίρα (§ V).

Τα αποτελέσματα παραπάνω υπολογισμών παρουσιάζονται συνοπτικά στον πίνακα 4. Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων αυτών προκύπτουν οι παρακάτω διαπιστώσεις:

- Οι διαφορές των αποστάσεων στο μέγιστο ελλειπτικό τόξο, που υπολογίζονται με την προτεινόμενη μέθοδο, από τις αποστάσεις που υπολογίζονται με τη μέθοδο Vincenty είναι πρακτικά αμελητέες για τις ανάγκες της ναυσιπλοΐας.
- Οι μέγιστες αποκλίσεις μεταξύ της απόστασης στη γεωδαισιακή και στο μέγιστο ελλειπτικό τόξο παρατηρούνται σε δρομολόγια πολύ μεγάλης απόστασης και με διαφορά γεωγραφικού πλάτους των σημείων αναχώρησης και προορισμού μεγαλύτερη από 120° περίπου. Εν τούτοις, ακόμα και στις περιπτώσεις αυτές οι αποκλίσεις είναι πρακτικά αμελητέες για τη ναυσιπλοΐα¹³.
- Όλες οι μέθοδοι υπολογισμού της απόστασης σε μέγιστο κύκλο της σφαίρας παρέχουν την ίδια ακριβώς ακρίβεια.
- Οι αποκλίσεις μεταξύ της απόστασης στη γεωδαισιακή και στο μέγιστο κύκλο της σφαίρας σε ορισμένα δρομολόγια πλου υπερβαίνουν τα 15 ν.μ. (~28.5 km).
- Οι μέγιστες αποκλίσεις μεταξύ της απόστασης στη γεωδαισιακή και στο μέγιστο κύκλο της σφαίρας παρατηρούνται σε γεωγραφικά πλάτη 30° περίπου, όπως στο παράδειγμα του δρομολογίου “Sydney – Valparaiso” (πίνακας 2)¹⁴.
- Το λογισμικό Navpack υπολογίζει την ελάχιστη απόσταση πλου σε μέγιστο κύκλο της σφαίρας.

¹³ Ως παράδειγμα αναφέρονται τα δρομολόγια “Sydney – Valparaiso” και “Valparaiso – Yokohama” με διαφορά γεωγραφικού πλάτους των σημείων αναχώρησης και προορισμού μεγαλύτερες από 130°, οι αποκλίσεις μεταξύ της απόστασης στη γεωδαισιακή και στο μέγιστο ελλειπτικό τόξο είναι μικρότερες του ενός ναυτικού μιλίου.

¹⁴ Στο δρομολόγιο “Sydney – Valparaiso” (πίνακας 2) η απόσταση πλου στη γεωδαισιακή είναι 6.128,41 ν.μ και η απόσταση στο μέγιστο κύκλο της σφαίρας είναι 6.113 ν.μ. (διαφορά 15,41 ν.μ. ή 28,5 km περίπου). Στο δρομολόγιο πολύ μεγαλύτερης απόστασης “Valparaiso – Yokohama” η απόσταση πλου στη γεωδαισιακή είναι 9.241,92 ν.μ. και η απόσταση στο μέγιστο κύκλο της σφαίρας είναι 9.233,7 ν.μ. (διαφορά 8,22 ν.μ.)

- Το αντιπροσωπευτικό λογισμικό, που χρησιμοποιείται σε Συστήματα Ηλεκτρονικού Χάρτη, υπολογίζει την ελάχιστη απόσταση πλου στο ΕΕΠ, χωρίς να είναι γνωστή η μέθοδος που χρησιμοποιείται¹⁵.

Χ. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της διεξαχθείσας συγκριτικής αξιολόγησης, οι προτεινόμενες στην παρούσα μελέτη μέθοδοι επίλυσης των προβλημάτων λοξοδρομικού πλου στο σφαιροειδές και του πλου στο μέγιστο ελλειπτικό τόξο, παρέχουν σημαντικά μεγαλύτερη ακρίβεια από τις κλασικές μεθόδους επίλυσης των προβλημάτων λοξοδρομικού και ορθοδρομικού πλου, που προτείνονται στα χρησιμοποιούμενα στη ναυτική εκπαίδευση συγγράμματα ναυτιλίας και ελαφρώς μεγαλύτερη ακρίβεια από άλλες μεθόδους επίλυσης των θεμελιωδών προβλημάτων ναυσιπλοΐας στο σφαιροειδές.

Επιπροσθέτως, οι προτεινόμενες μέθοδοι παρέχουν τη δυνατότητα υπολογισμού των γεωδαιτικών συντεταγμένων μεγάλου αριθμού ενδιάμεσων σημείων των δρομολογίων λοξοδρομικού πλου και του πλου στο μέγιστο ελλειπτικό τόξο για την ευχερέστερη και ακριβέστερη απεικόνιση δρομολογίων πλου μεγάλων αποστάσεων στην οθόνη των Συστημάτων Ηλεκτρονικού Χάρτη (συστήματα ECS, ECDIS) σε οποιαδήποτε χαρτογραφική απεικόνιση.

Η αξιοποίηση των προτεινόμενων μεθόδων για την ευχερέστερη και ακριβέστερη σχεδίαση πλου μεγάλων αποστάσεων μπορεί να υλοποιηθεί τόσο με την ανάπτυξη ναυτιλιακού λογισμικού, όπως αυτό που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Ναυτιλίας και Θαλάσσιων Επιστημών της ΣΝΔ, όσο και με προγραμματιζόμενους υπολογιστές χειρός.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- 1 Williams, R. 1998. *Middle Latitude Sailing Revisited*. Journal of Navigation, Vol. 51, no. 1.
- 2 Randles, W. 1997. *Pedro Nune' Discovery of the Loxodromic Curve 1537*. Journal of Navigation, Vol. 50, no. 1.
- 3 Alexander, J. 2004. *Loxodromes. A Rhumb Way to Go*. Mathematics Magazine, Vol. 77, no. 5.
- 4 APN [American Practical Navigator (The)] Bowditch, N. 2002. NIMA Pub. no. 9.
- 5 Weisstein, E. W. "Spherical Spiral." From MathWorld--A Wolfram Web Resource. <http://mathworld.wolfram.com/SphericalSpiral.html>
- 6 AMN [Admiralty Manual of Navigation] 1987. Vol. I. TSO [The Stationary Office]. London.
- 7 Οικονομόπουλος, Ι. 2004. *Γενική Ναυτιλία Ακτοπλοΐα Πλοήγηση*. Αθήνα.
- 8 Bennet, G. 1996. *Practical Rhumb Line Calculations on the Spheroid*. Journal of Navigation, Vol. 49 no. 1, 112-119.
- 9 Earle, M. 2006. *Sphere to Spheroid Comparisons*. Journal of Navigation, Vol. 59, no. 03, 491-496.
- 10 Pallikaris, A. Tsoulos, L. Paradissis, D. 2009a. *New calculation algorithms for for GIS navigational systems and receivers*. Proceedings of the European Navigational Conference ENC-GNSS 2009. Naples Italy.

¹⁵ Η πρακτική των κατασκευαστών Συστημάτων Ηλεκτρονικού Χάρτη να διαθέτουν το λογισμικό που αναπτύσσουν «κλειστό» για λόγους προστασίας της πνευματικής τους ιδιοκτησίας, έχει σαν αποτέλεσμα τα διατιθέμενα Συστήματα Ηλεκτρονικού Χάρτη για τη ναυσιπλοΐα να λειτουργούν σαν "μαύρα κουτιά", τα οποία εκτελούν διάφορους υπολογισμούς και διαδικασίες, χωρίς να είναι γνωστές οι αναλυτικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στο ναυτιλιακό λογισμικό τους.

- 11 Pallikaris, A. Latsas, G. 2009. *New algorithm for Great Elliptic Sailing (GES)*. Journal of Navigation, Vol. 62, no. 3. 493-507.
- 12 Blance A.G. 1994. *Norie's Nautical Tables*. Imray Lorie Norie and Wilson.
- 13 Smart, W. M. 1946. *On a problem in navigation*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 106, no 2, 124-127.
- 14 Williams, J. E. D. 1950. *Loxodromic Distances on the Spheroid*. Journal of Navigation, Vol. 3.
- 15 Sadler, D. H. 1956. *Spheroidal Sailing and the middle latitude*. Journal of Navigation, Vol. 9, 371.
- 16 Williams, R. 1981. *A table of latitude parts*. Journal of Navigation, Vol. 34.
- 17 Bowring, B. 1985. *The geometry of Loxodrome on the Ellipsoid*. The Canadian Surveyor, Vol. 39, no. 3.
- 18 Hiraiwa, T. 1987. *Proposal on the modification of sailing calculations*. Journal of Navigation, Vol. 40.
- 19 Snyder, J. P. 1987. *Map Projections: A Working Manual*. U. S. Geological Survey Professional Paper 1395, Washington.
- 20 Pallikaris, A. Tsoulos, L. Paradissis, D. 2010. *Improved algorithms for sailing calculations in navigational systems*. Coordinates Vol. VI, Issue 5, 15-19.
- 21 Παλληκάρης, Α. 2010. Διερεύνηση και Επίλυση Προβλημάτων Ναυσιπλοΐας και Οπτικοποίηση Δρομολογιών Πλου Μεγάλων Αποστάσεων σε Συστήματα Ηλεκτρονικού Χάρτη. Διδακτορική Διατριβή. ΕΜΠ.
- 22 Pallikaris, A. Tsoulos, L. Paradissis, D. 2009b. *New meridian arc formulas for sailing calculations in GIS*, International Hydrographic Review, no. 1, 24-34.
- 23 Davis, H. Snider, A. D. 1979. *Introduction to Vector Analysis*. Allyn and Bacon Inc.
- 24 Chih-Li Chen, Tien-Pen Hsu, Jiang-Ren Chang. 2004. *A Novel Approach to Great Circle Sailings: The Great Circle Equation*. Journal of Navigation, Vol. 57, no. 2.
- 25 Earle, M. 2005. *Vector Solutions for Great Circle Navigation*. Journal of Navigation, Vol. 58, no. 03.
- 26 Wei-Kuo Tseng. Hsuan-Shih Lee. 2007. *The Vector Function for Distance Travelled in Great Circle Navigation*. Journal of Navigation Vol. 60 no. 1.
- 27 Vincenty, T. 1975. *Direct and Inverse Solutions of Geodesics on the Ellipsoid with Application of Nested Equations*. Survey Review, Vol. XXII no. 176. 88-93.
- 28 Sodano, E. M. 1965. *General Non-Iterative Solution of the Inverse and Direct Geodetic Problems*, Bulletin Geodesique. no. 75, 69-89.
- 29 Rainsford, H. F. 1955. *Long Geodesics on the Ellipsoid*. Bulletin Geodesique, no. 37 12-21.
- 30 Παλληκάρης, Α. 2007. *Γεωδαιτικά Συστήματα Αναφοράς και Εφαρμογές στη Ναυτιλία*. ΣΝΔ.
- 31 Bourbon, R. 1990. *Geodesic Line on the Surface of a Spheroid*. Journal of Navigation, Vol. 43, no. 1.
- 32 Williams, R. Plythian, J. E. 1989. *Navigating along geodesic paths on the surface of a spheroid*. Journal of Navigation, Vol. 42.
- 33 Bowring, B. R. 1984. *The Direct and Inverse Solutions for the Great Elliptic Line on the Reference Ellipsoid*. Bulletin Geodesique 58, 101-108.
- 34 Williams, R. 1996. *The Great Ellipse on the surface of the spheroid*. Journal of Navigation, Vol. 49, no. 2, 229-234.
- 35 Earle, M. 2000. *A Vector Solution for Navigation on a Great Ellipse*. Journal of Navigation, Vol. 53, no. 03.
- 36 Earle, M. 2008. *Vector Solutions for Azimuth*. Journal of Navigation, Vol. 61, 537-545.
- 37 Hohenkerk, C.Y. Yallop, B. D. 2004. *NavPac and Compact Data 2006 – 2010 Astro-Navigation Methods and Software for the PC*. TSO, London.
- 38 Kos, Sergio. Duško Vranic. Damir Zec. 1999. *Differential Equation of a Loxodrome on a Sphere*. Journal of Navigation, Vol. 52, no. 3.
- 39 Ντούνης, Χ. Δημαράκης, Α. 2001. *Ναυτιλία*. Ίδρυμα Ευγενίδου.

Section B: ELECTRICAL ENGINEERING AND APPLICATIONS

Scattering of TE Waves from a Cylindrical Scatterer Buried Inside a Two Layer Lossy Earth with Sinusoidal Air-Earth Interface

C. N. Vazouras^a, P. G. Cottis^b and J. D. Kanellopoulos^b

a Hellenic Naval Academy, Hatzikyriakou Ave., Piraeus 18539, Greece.

b School of Electrical and Computer Engineering, National Technical University of Athens, Iroon Polytechniou 9, Athens 15773, Greece.

Abstract. Scattering from metallic and penetrable objects buried inside the ground is of interest for remote sensing applications. In this work, a cylindrical scatterer buried inside a two-layer lossy ground with a sinusoidal air-earth interface is considered, with an incident field impinging from the air region. Thus, a realistic ground model, with a surface layer of increased conductivity, is incorporated. The sinusoidal profile adopted to model the surface roughness is amenable to a semi-analytic (moment method) treatment of the scattered field. An integral equation approach combined with the extended boundary condition method has been employed for the formulation of the boundary value scattering problem. The Green function of the problem and the electric field in the absence of the scatterer are expressed in terms of Floquet spatial harmonics. The electric field inside the scatterer is expanded in terms of circular cylindrical wavefunctions and the expansion coefficients are computed by means of a moment method procedure. Subsequently, the far-zone scattered field is evaluated asymptotically by means of the steepest descent technique. Numerical results obtained show that the main factors affecting the scattered field are the conductivity of the ground and the horizontal position of the scatterer with respect to dips and lifts of the sinusoidal surface.

Keywords: electromagnetic scattering; underground cylinders; sinusoidal surface; surface layer.

PACS: 41.20.Jb

INTRODUCTION

Scattering from metallic or penetrable objects buried inside a lossy dielectric half-space, and the interaction between the scatterers and the surrounding media, has applications to remote sensing and geoscience [1 – 4] and various other fields as medical physics [5]. A considerable number of work has been carried out based on the assumption of a flat interface, while some recent studies incorporate a random

rough surface profile (see e.g. [5, 6] and references therein) which may be addressed by analytical models (e.g. small perturbation approach) or numerical solutions combined with Mont Carlo averaging. In the present study, the assumption of a sinusoidal profile for the air-ground interface is combined with a two-layer model for the structure of the ground. This approach incorporates a more realistic model for the ground (as compared with the simple homogeneous halfspace model used in previous literature), while taking into account both the surface roughness and the surface layer in a way that allows derivation of good qualitative results for various roughness scales at low numerical cost.

The geometry of the problem is depicted in Fig. 1, where the sinusoidal profile $\zeta(x)$ is characterized by the height h and the spatial period d as follows

$$\zeta(x) = -h \cos\left(2\pi \frac{x}{d}\right) \quad (1)$$

The distances of the axis of the cylindrical scatterer from the xz - and the xy -plane are denoted by A and D , respectively, α is the cylinder radius and n_1, n_2, n_3 are the complex refractive indices of the two-layer ground and the scatterer, respectively. The surface layer has a thickness b with reference to the xy -plane. A TE plane incident wave impinges on the surface of the ground with its direction perpendicular to the axis of the cylinder, making an angle θ_i with respect to the vertical direction. The whole space is assumed magnetically homogeneous ($\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m). A harmonic $\exp(-j\omega t)$ time dependence is assumed and suppressed throughout the analysis.

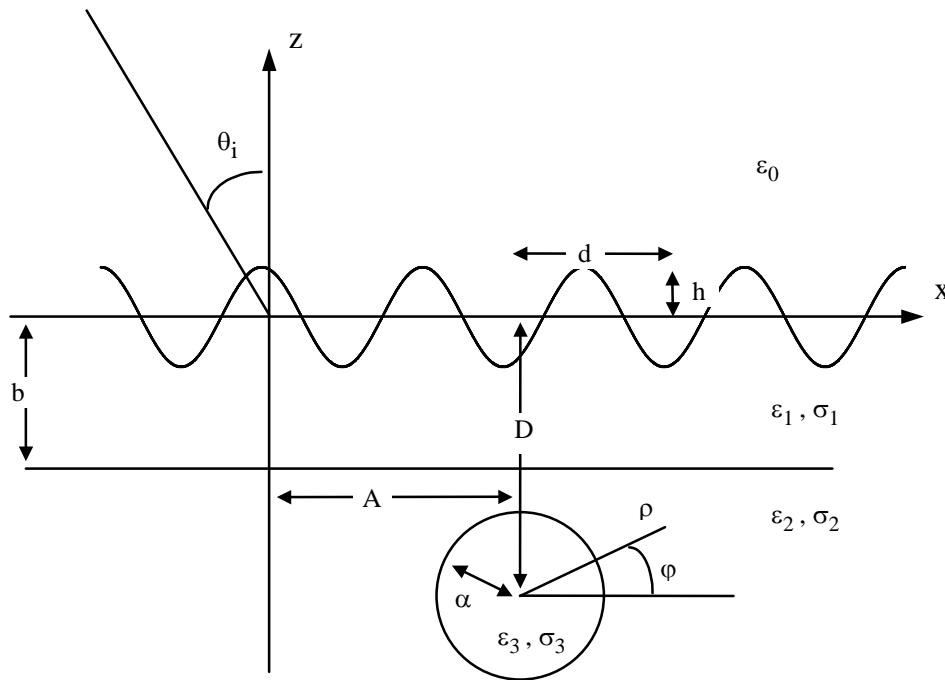


FIGURE 1. Geometry of the scattering problem.

An integral equation approach is adopted for the formulation of the boundary value problem in conjunction with the Extended Boundary Condition (EBC) method. Green's theorem is applied to formulate the integral equation for the unknown electric field inside the scatterer. The Green function of the problem and the electric field in the absence of the scatterer are appropriately expanded in terms of Floquet spatial harmonics using the EBC method [7, 8]. The electric field inside the scatterer is expanded in terms of circular cylindrical wavefunctions and the integral equation is

transformed to an infinite system of algebraic equations, which is truncated and solved for the unknown expansion coefficients of the internal electric field. Evaluation of the scattered far field in the air region is accomplished asymptotically by the steepest descent method. Finally, numerical results are obtained to estimate the impact of various parameters of the problem and to investigate possible applications to remote sensing and underground mapping.

FORMULATION OF THE BOUNDARY VALUE PROBLEM

We assume a y-polarized unitary incident electric field $\vec{E}_i(\vec{r}) = \psi_i(\vec{r}) \hat{y}$, with

$$\psi_i(\vec{r}) = \exp[j(k_0 \sin \theta_i x - k_0 \cos \theta_i z)] \quad (2)$$

where k_0 is the free-space wavenumber.

We denote by $\psi_0(\vec{r})$ and $\psi(\vec{r})$ the electric field in the absence of the scatterer and the total electric field, respectively, and by $G(\vec{r}; \vec{r}')$ the electric type Green function of the problem. The Green function $G(\vec{r}; \vec{r}')$ is also y-polarized and is determined as the response to a unit excitation parallel to the y-axis located inside the second layer (i.e., $z' < -b$), which satisfies the wave equation in two dimensions

$$[\nabla^2 + k^2(\vec{r})] G(\vec{r}; \vec{r}') = -\delta(\vec{r} - \vec{r}') \quad (3)$$

where

$$\vec{r} = x \hat{x} + z \hat{z} \quad , \quad \vec{r}' = x' \hat{x} + z' \hat{z} \quad (4)$$

and

$$k(\vec{r}) = \begin{cases} k_0 = \omega(\mu_0 \varepsilon_0)^{1/2} & , \quad z > \zeta(x) \\ k_1 = k_0(\varepsilon_1 + j\sigma_1/\omega\varepsilon_0)^{1/2} & , \quad -b < z < \zeta(x) \\ k_2 = k_0(\varepsilon_2 + j\sigma_2/\omega\varepsilon_0)^{1/2} & , \quad z < -b \end{cases} \quad (5)$$

is the wavenumber in each of the three layers shown in Fig. 1, while the wavenumber k_3 corresponding to the scatterer is defined analogously. The Green function $G(\vec{r}; \vec{r}')$ must also satisfy the boundary conditions, i.e. continuity at the two interfaces $z = -b$ and $z = \zeta(x)$.

Applying Green's theorem, the following compact integral expression in two dimensions for the total field $\psi(\vec{r})$ in the presence of the scatterer is obtained

$$\psi(\vec{r}) = \psi_0(\vec{r}) + (k_3^2 - k_2^2) \iint_{S_t} G(\vec{r}; \vec{r}') \psi(\vec{r}') dS' \quad (6)$$

where S_t is the cross-section of the cylindrical scatterer and the observation point \vec{r} can be in any region. If \vec{r} is considered inside the region S_t , eq. (6) becomes an integral equation for the total electric field inside the scatterer. After solving the integral equation for the internal electric field, one can subsequently evaluate the total electric field via (6) by taking \vec{r} in the region of interest.

The first step of the above procedure is to determine the total field $\psi_0(\vec{r})$ in the absence of the scatterer applying the EBC method. To this end, we assume a y-polarized plane wave, as given by (2), impinging from the air on the sinusoidal surface as shown in Fig. 1. Then, the total electric field can be written [7, 8] as an appropriate superposition of Floquet modes

$$\psi_0(\vec{r}) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{C_n^{(m)}}{\sqrt{k_{mzn}}} \exp[j\vec{k}_{mn}^{(-)} \cdot \vec{r}] + \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{D_n^{(m)}}{\sqrt{k_{mzn}}} \exp[j\vec{k}_{mn}^{(+)} \cdot \vec{r}] \quad (7)$$

where the upward or downward directed (corresponding to the superscripts \pm , respectively) wavevectors are given by

$$\vec{k}_{mn}^{(\pm)} = k_{xn} \hat{x} \pm k_{mzn} \hat{z} \quad , \quad m = 0, 1, 2 \quad (8)$$

and

$$k_{xn} = k_0 \sin \theta_i + \frac{2n\pi}{d} \quad , \quad k_{mzn} = \left(k_m^2 - k_{xn}^2 \right)^{1/2} \quad (9)$$

The indices $m = 0, 1, 2$ correspond to the regions $z > h$, $-b < z < h$ and $z < -b$, respectively, while the selvedge region $-h < z < h$, where a different situation arises, does not need to be considered in the present analysis. The square roots of k_{mzn} are defined with the appropriate branch cuts so that the radiation conditions hold

$$\text{Re}(k_{mzn}) \geq 0 \quad , \quad \text{Im}(k_{mzn}) \geq 0$$

The incident field from the air region, according to (2), corresponds to

$$C_n^{(0)} = \delta_{n0} \sqrt{k_{0zn}} \quad (10)$$

where δ_{n0} is the Kronecker delta coefficient. Due to the outgoing wave condition for the field in the lower region $z < -b$, the corresponding upward wave coefficients are identically zero

$$D_n^{(2)} = 0 \quad \forall n \in \{-\infty, \dots, -1, 0, 1, \dots, +\infty\} \quad (11)$$

Applying the extended boundary conditions on the sinusoidal interface $z = \zeta(x)$, the following matrix equations [7, 8] are obtained

$$\tilde{C}^{(m)} = -[R_{Dm}^-] \tilde{\beta}^s - [R_{Nm}^-] \tilde{\alpha}^s \quad (12)$$

$$\tilde{D}^{(m)} = -[R_{Dm}^+] \tilde{\beta}^s - [R_{Nm}^+] \tilde{\alpha}^s \quad (13)$$

where the tilde (\sim) denotes a column matrix as follows

$$\tilde{C}^{(m)} = \begin{bmatrix} \dots \\ C_{-1}^{(m)} \\ C_0^{(m)} \\ C_1^{(m)} \\ \dots \end{bmatrix} \quad , \quad \tilde{D}^{(m)} = \begin{bmatrix} \dots \\ D_{-1}^{(m)} \\ D_0^{(m)} \\ D_1^{(m)} \\ \dots \end{bmatrix} \quad , \quad \tilde{\alpha}^s = \begin{bmatrix} \dots \\ \alpha_{-1}^s \\ \alpha_0^s \\ \alpha_1^s \\ \dots \end{bmatrix} \quad , \quad \tilde{\beta}^s = \begin{bmatrix} \dots \\ \beta_{-1}^s \\ \beta_0^s \\ \beta_1^s \\ \dots \end{bmatrix}$$

The elements of the square matrices $[R]$ involved in (12) and (13) are given in the Appendix and α_n^s, β_n^s are the Fourier expansion coefficients adopted for the field boundary values of ψ and $\partial\psi/\partial n$ on the sinusoidal interface. Imposing the boundary conditions at $z = -b$ and taking (11) into account, the following equations are obtained

$$\tilde{D}^{(1)} = [L_C] \tilde{C}^{(1)} \quad (14)$$

$$\tilde{C}^{(2)} = [M] \tilde{C}^{(1)} \quad (15)$$

where $[L_C]$ and $[M]$ are diagonal matrices (corresponding to reflection and diffraction of Floquet waves on the $z = -b$ plane) with elements given by

$$[L_C]_{nn} = R_n \exp(j2k_{1zn}b) \quad (16)$$

$$[M]_{nn} = T_n \exp\{j(k_{1zn} - k_{2zn})b\} \quad (17)$$

where

$$R_n = \frac{k_{1zn} - k_{2zn}}{k_{1zn} + k_{2zn}} \quad (18)$$

$$T_n = \frac{2\sqrt{k_{1zn} k_{2zn}}}{k_{1zn} + k_{2zn}} \quad (19)$$

Combining now (14) with (12)-(13), one obtains

$$\tilde{\beta}^s = -[S] \tilde{\alpha}^s \quad (20)$$

where

$$[S] = \left([R_{D1}^+] - [L_C][R_{D1}^-] \right)^{-1} \left([R_{N1}^+] - [L_C][R_{N1}^-] \right) \quad (21)$$

Substituting (20) into (12), α_n^s are obtained as

$$\tilde{\alpha}^s = \left([R_{D0}^-][S] - [R_{N0}^-] \right)^{-1} \tilde{C}^{(0)} \quad (22)$$

The determination of α_n^s , β_n^s from (20)-(22) leads to the calculation of the column matrices $\tilde{C}^{(m)}$, $\tilde{D}^{(m)}$. The coefficients of interest for the present study are $C_n^{(2)}$ which, combining (12), (15), (20) and (22) are found to be

$$\tilde{C}^{(2)} = [M] \left([R_{D1}^-][S] - [R_{N1}^-] \right) \left([R_{D0}^-][S] - [R_{N0}^-] \right)^{-1} \tilde{C}^{(0)} \quad (23)$$

The Green function $G(\vec{r}; \vec{r}')$ in the regions $z > h$ and $z < -b$ may be determined in a similar way. Since, for application of the integral equation (6), the source point is located in the lower layer, i.e. $z' < -b$, one may write

$$G(\vec{r}; \vec{r}') = \begin{cases} G_{s,0}(\vec{r}; \vec{r}') & , \quad z > h \\ G_{fs}(\vec{r}; \vec{r}') + G_{s,2}(\vec{r}; \vec{r}') & , \quad z < -b \end{cases} \quad (24)$$

where $G_{fs}(\vec{r}; \vec{r}')$ is the "free space" Green function (corresponding to a homogeneous space with wavenumber k_2) and $G_{s,0}(\vec{r}; \vec{r}')$, $G_{s,2}(\vec{r}; \vec{r}')$ are the secondary fields induced in the corresponding regions. To apply the boundary conditions at $z = -b$ and $z = \zeta(x)$ we note that in both cases the relation $z > z'$ holds, and hence $G_{fs}(\vec{r}; \vec{r}')$ may be written, according to the well known Weyl plane wave expansion, as

$$G_{fs}(\vec{r}; \vec{r}') = T \left\{ \frac{\exp[j\lambda x + jv_2(\lambda)z]}{\sqrt{v_2(\lambda)}} \right\} \quad (25)$$

where the operator T is defined as

$$T = \int_{-\infty}^{+\infty} d\lambda \frac{\exp[-j\lambda x' - jv_2(\lambda)z']}{\sqrt{v_2(\lambda)}} \quad (26)$$

and

$$v_2(\lambda) = (k_2^2 - \lambda^2)^{1/2} \quad , \quad \text{Im}(v_2) \geq 0 \quad (27)$$

Since the operator T is linear and independent of x and z , the problem is simply reduced to that of determining the reflected field in the lower region $z < -b$ and the diffracted field in the upper region $z > h$ due to a plane wave

$$\psi_{\lambda,i}(\vec{r}) = \frac{\exp[j\lambda x + jv_2(\lambda)z]}{\sqrt{v_2(\lambda)}} \quad (28)$$

impinging from the lower region $z < -b$ on the plane interface $z = -b$. Then, the operator T is imposed to derive the full expressions for $G_{s,2}(\vec{r}; \vec{r}')$ and $G_{s,0}(\vec{r}; \vec{r}')$ which correspond to the reflected and diffracted fields, respectively. The problem is strictly analogous to that of finding the field $\psi_0(\vec{r})$ in the absence of the scatterer and can be treated in the same way by substituting

$$k_0 \sin \theta_i \leftrightarrow \lambda \quad (29)$$

Thus, the waves associated with the incident field $\psi_{\lambda,i}(\vec{r})$ are expressed in a way analogous to (7)

$$\psi_{\lambda}(\vec{r}) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{A_n^{(m)}(\lambda)}{\sqrt{v_{mzn}}} \exp[j\vec{v}_{mn}^{(-)} \cdot \vec{r}] + \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{B_n^{(m)}(\lambda)}{\sqrt{v_{mzn}}} \exp[j\vec{v}_{mn}^{(+)} \cdot \vec{r}] \quad (30)$$

where

$$\vec{v}_{mn}^{(\pm)} = v_{xn} \hat{x} \pm v_{mzn} \hat{z} \quad , \quad m = 0, 1, 2 \quad (31)$$

with

$$v_{xn} = \lambda + \frac{2n\pi}{d} \quad , \quad v_{mzn} = (k_m^2 - v_{xn}^2)^{1/2} \quad , \quad \text{Im}(v_{mzn}) \geq 0 \quad (32)$$

The symbol v is used instead of k to emphasize the dependence of the corresponding wavenumbers on λ . The difference from the previous evaluation of $\psi_0(\vec{r})$ is that in the present case the incident wave comes from the lower region $z < -b$ instead of the upper region $z > h$. Thus, it should be set

$$B_n^{(2)}(\lambda) = B_n^{(2)} = \delta_{n0} \quad (33)$$

$$A_n^{(0)}(\lambda) = A_n^{(0)} = 0 \quad (34)$$

Application of the extended boundary condition for the sinusoidal profile $z = \zeta(x)$ yields the following matrix equations

$$\tilde{A}^{(m)}(\lambda) = -[Q_{Dm}^-] \tilde{\beta}_{\lambda}^s - [Q_{Nm}^-] \tilde{\alpha}_{\lambda}^s \quad (35)$$

$$\tilde{B}^{(m)}(\lambda) = -[Q_{Dm}^+] \tilde{\beta}_{\lambda}^s - [Q_{Nm}^+] \tilde{\alpha}_{\lambda}^s \quad (36)$$

where the coefficients $\alpha_{n,\lambda}^s, \beta_{n,\lambda}^s$ are directly analogous to α_n^s, β_n^s involved in the determination of the field $\psi_0(\vec{r})$. The matrices $[Q]$ are obtained from the expressions of the corresponding matrices $[R]$ (see the Appendix) by means of the substitution (29). On the other hand, application of the boundary conditions at $z = -b$ yields

$$\tilde{B}^{(1)}(\lambda) = [L_{A,\lambda}] \tilde{A}^{(1)}(\lambda) + [M_{\lambda}] \tilde{B}^{(2)}(\lambda) \quad (37)$$

$$\tilde{A}^{(2)}(\lambda) = [M_{\lambda}] \tilde{A}^{(1)}(\lambda) - [L_{B,\lambda}] \tilde{B}^{(2)}(\lambda) \quad (38)$$

where the matrices $[L_{A,\lambda}]$ and $[M_{\lambda}]$ are determined from $[L_c]$ and $[M]$, respectively, by the substitution (29), and $[L_{B,\lambda}]$ is diagonal with elements

$$[L_{B,\lambda}]_{nn} = R_{n,\lambda} \exp(-j2v_{2zn}b) \quad (39)$$

where

$$R_{n,\lambda} = \frac{v_{1zn} - v_{2zn}}{v_{1zn} + v_{2zn}} \quad (40)$$

Eliminating $\tilde{\alpha}_{\lambda}^s$ and $\tilde{\beta}_{\lambda}^s$, one finally obtains the following expressions for the coefficients of interest $A_n^{(2)}(\lambda)$ and $B_n^{(0)}(\lambda)$

$$\tilde{A}^{(2)}(\lambda) = [M_{\lambda}] [S_A] ([S_B] - [L_{A,\lambda}] [S_A])^{-1} [M_{\lambda}] \tilde{B}^{(2)}(\lambda) - [L_{B,\lambda}] \tilde{B}^{(2)}(\lambda) \quad (41)$$

$$\tilde{B}^{(0)}(\lambda) = [S_0] ([S_B] - [L_{A,\lambda}] [S_A])^{-1} [M_{\lambda}] \tilde{B}^{(2)}(\lambda) \quad (42)$$

where

$$[S_A] = [Q_{D1}^-] [Q_{D0}^-]^{-1} [Q_{N0}^-] - [Q_{N1}^-] \quad (43)$$

$$[S_B] = [Q_{D1}^+][Q_{D0}^-]^{-1}[Q_{N0}^-] - [Q_{N1}^+] \quad (44)$$

$$[S_0] = [Q_{D0}^+][Q_{D0}^-]^{-1}[Q_{N0}^-] - [Q_{N0}^+] \quad (45)$$

Having evaluated $A_n^{(2)}(\lambda)$ and $B_n^{(0)}(\lambda)$, one may impose the operator T to obtain the final expressions for $G_{s,2}(\vec{r}; \vec{r}')$ and $G_{s,0}(\vec{r}; \vec{r}')$

$$G_{s,2}(\vec{r}; \vec{r}') = \int_{-\infty}^{+\infty} d\lambda \frac{\exp[-j\lambda x' - jv_2(\lambda)z']}{\sqrt{v_2(\lambda)}} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{A_n^{(2)}(\lambda)}{\sqrt{v_{2zn}}} \exp[jv_{xn}x - jv_{2zn}z] \quad (46)$$

and

$$G_{s,0}(\vec{r}; \vec{r}') = \int_{-\infty}^{+\infty} d\lambda \frac{\exp[-j\lambda x' - jv_2(\lambda)z']}{\sqrt{v_2(\lambda)}} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{B_n^{(0)}(\lambda)}{\sqrt{v_{0zn}}} \exp[jv_{xn}x + jv_{0zn}z] \quad (47)$$

EVALUATION OF THE FAR FIELD IN THE AIR REGION

In the presence of a scatterer inside the second layer of the ground, the incident field is distorted due to the secondary field excited inside the scatterer. This field may be evaluated by properly expressing it as a superposition of scalar cylindrical wavefunctions

$$\psi(\vec{r}) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} E_m J_m(k_3\rho) e^{jm\varphi} \quad , \quad \vec{r} \in S_t \quad (48)$$

where the local polar coordinates (ρ, φ) are related to the initial coordinate system through

$$x = A + \rho \cos \varphi \quad , \quad z = -D + \rho \sin \varphi$$

At this point, one substitutes into the integral equation (6) the expressions (7) with $m = 2$ for the incident field, (46) for the secondary part of the Green function along with the well known eigenfunction expansion for the primary (free-space) part of the Green function, i.e.

$$G_{fs}(\vec{r}; \vec{r}') = \frac{j}{4} H_0(k_2|\vec{r} - \vec{r}'|) = \frac{j}{4} \sum_{p=-\infty}^{+\infty} J_p(k_2\rho_<) H_p(k_2\rho_>) e^{jp(\varphi - \varphi')}$$

where

$$\rho_< = \min\{\rho, \rho'\} \quad , \quad \rho_> = \max\{\rho, \rho'\}$$

The standard procedure of multiplying by $\exp(-js\varphi)$ (s is any integer), integrating over the cross-section of the cylindrical scatterer and making use of the orthogonal properties of the cylindrical basis functions over a period of 2π is then applied. Letting s vary over the whole set of integers, the following set of linear algebraic equations is obtained, whence the unknown expansion coefficients E_m may be evaluated.

$$\begin{aligned} j\pi K_s(k_2\alpha, k_3\alpha) E_s - j \sum_{m=-\infty}^{+\infty} K_{sm} L_m(k_2\alpha, k_3\alpha) E_m = \\ = 2(-1)^s \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{C_n^{(2)}}{\sqrt{k_{2zn}}} \exp[-j\tau_n + jk_{xn}A + jk_{2zn}D] \end{aligned} \quad (49)$$

where

$$K_s(X, Y) = X H_{s+1}(X) J_s(Y) - Y J_{s+1}(Y) H_s(X) \quad (50)$$

$$L_m(X, Y) = Y J_{m+1}(Y) J_m(X) - X J_{m+1}(X) J_m(Y) \quad (51)$$

$$K_{sm} = j^{s-m} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} e^{j2\pi n A/d} \int_{-\infty}^{+\infty} d\lambda \frac{A_n^{(2)}(\lambda)}{\sqrt{\mu_2} \nu_{2zn}} \exp[j\nu_2(\lambda)D + j\nu_{2zn}(\lambda)D + js\Phi_n(\lambda) + jm\vartheta(\lambda)] \quad (52)$$

with

$$\tau_n = \sin^{-1} \left(\frac{k_{xn}}{k_2} \right) \quad (53)$$

$$\Phi_n(\lambda) = \tan^{-1} \left[\frac{\nu_{2zn}(\lambda)}{\nu_{xn}(\lambda)} \right] \quad (54)$$

$$\vartheta(\lambda) = \tan^{-1} \left[\frac{\nu_2(\lambda)}{\lambda} \right] \quad (55)$$

The matrix equation (49) can be truncated and solved numerically. In general, the truncation size concerning the series expansion of the Green function and the expansion of the incident field in terms of Floquet modes depends on the parameters $k_1, k_2, h/d, k_0d$; the truncation size concerning the expansion of the internal electric field depends mainly on $k_3\alpha$ and σ_3 . As far as the convergence of the integrals K_{sm} is concerned, one may easily verify that it is quite fast, due to the factor $\exp[j\nu_2(\lambda)D + j\nu_{2zn}(\lambda)D]$ which decays exponentially with λ , while the rest of the integrand behaves as a power of λ , for large λ .

Having evaluated the expansion coefficients E_m , the scattered far field in the air region is determined through (6). To this end, the observation point \vec{r} is taken in the region $z > h$ and all known quantities are inserted in (6). Employing the expression (47) for $G_{s,0}(\vec{r}; \vec{r}')$, the following expression for the electric field in the air region is obtained

$$\psi(\vec{r}) - \psi_0(\vec{r}) = \frac{j}{2} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} E_m (-j)^m L_m(k_2\alpha, k_3\alpha) \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \exp \left[j \frac{2\pi n}{d} A \right] I_n \quad (56)$$

where

$$I_n = \int_{-\infty}^{+\infty} d\lambda \frac{B_n^{(0)}(\lambda)}{\sqrt{\mu_2} \nu_{0zn}} \exp[j\nu_2(\lambda)D - j\nu_{0zn}(\lambda)D + jm\vartheta(\lambda) + j\rho(\nu_{xn} \cos \varphi + \nu_{0zn} \sin \varphi)] \quad (57)$$

To evaluate the integrals I_n when $\rho \rightarrow +\infty$, the steepest descent method is applied. The final result for the scattered far field in the air region is obtained in the same way as in [2]

$$\psi(\vec{r}) - \psi_0(\vec{r}) = j e^{-j\pi/4} \sqrt{\frac{\pi}{2k_0\rho}} e^{jk_0\rho} U(\varphi) \quad (58)$$

where

$$U(\varphi) = e^{-jk_0D \sin \varphi} \sqrt{k_0 \sin \varphi} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} E_m (-j)^m L_m(k_2\alpha, k_3\alpha) \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \exp \left[j \frac{2\pi n}{d} A \right] \cdot \frac{B_n^{(0)}(k_n(\varphi))}{(k_2^2 - k_n^2(\varphi))^{1/4}} \exp \left[jD(k_2^2 - k_n^2(\varphi))^{1/2} + jm\vartheta(k_n(\varphi)) \right] \quad (59)$$

and

$$k_n(\varphi) = k_0 \cos \varphi - \frac{2\pi n}{d} \quad (60)$$

As far as the truncation of the infinite series appearing in (59) is concerned, similar arguments as for the truncation of the matrix equation (49) hold.

NUMERICAL RESULTS AND DISCUSSION

Based on the preceding analysis, numerical results for the scattering amplitude $|U(\varphi)|$ (plotted against the observation angle φ) have been obtained to examine the dependence of the scattered field on various parameters of the problem. The parameters varied are the roughness parameter h/d (surface height) and k_0d (spatial period), the thickness of the upper layer k_0b , the normalized horizontal position of the scatterer A/d , the angle of incidence θ_i and the electric parameters of the ground and the scatterer. The frequency has been taken at 50 MHz and the normalized depth of the scatterer has been assumed to be $k_0D = 8$, corresponding to a realistic depth (about 7 m) of possible buried scatterers.

First, the convergence of the solution has been verified by varying the truncation size N for the expansion of the incident field and the Green function in terms of Floquet waves, as well as the truncation size M for the eigenfunction expansion of the internal electric field. In most cases, values of N and M up to 5 and 10, respectively, have been found sufficient to achieve convergence. It has also been verified that M depends mainly on the characteristics of the scatterer, while N depends mainly on the characteristics of the profile, namely h/d and k_0d . For large conductivities of the ground layers and / or large h/d values, a truncation size N up to 15 may be required. For the values of k_0d considered, the convergence region of the solution with respect to h/d is narrower than that encountered in the corresponding case of a one-layer ground [2]. This is due to the ill-conditioning of the method employed to treat scattering by the sinusoidal interface in combination with the existence of possible guided leaky waves even for shallower corrugations than in the one-layer case. Further on, the validity of the solution has been tested in the limit $h \rightarrow 0$, where the numerical results compare very well to those for the corresponding problem with a planar ground surface [9].

From the numerical results obtained, it seems that the factors influencing most the scattered field pattern are the conductivities of the two ground layers and the position of the cylindrical scatterer with respect to the dips and lifts of the sinusoidal surface. It has been observed that the scattered wave tends to emerge following the shortest path inside the ground, a quite reasonable effect which appears more clearly when the conductivity of the crust is large. Numerical results obtained for various values of the electric parameters of the scatterer, relatively close to those of the ground, (e.g. $\varepsilon_3 = 4$, $\sigma_3 = 0,01$) have been found to yield scattering patterns identical in shape to those of the hollow scatterer, though of somewhat smaller magnitude. The situation is different when the parameters of the scatterer differ by orders of magnitude from those of the ground, as in the case of underground water streams ($\varepsilon_3 = 80$, $\sigma_3 = 4$). In this case, the scattering pattern also closely resembles that of a hollow scatterer (though it appears somewhat suppressed for large observation angles, i.e. above 130° or so) but the scattering amplitude is about 2,5 times larger. This could be useful in detecting underground water pipes or streams in desert areas.

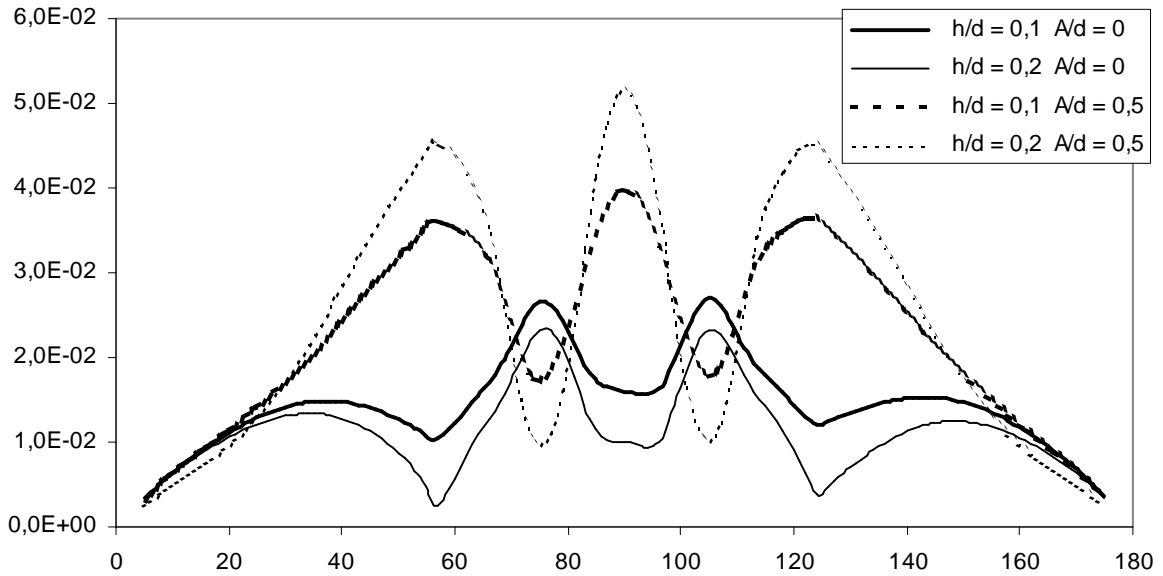


FIGURE 2. Variation of $|U(\varphi)|$ with h/d and A/d . The other parameters of the problem are $\theta_i = 40^\circ$, $\varepsilon_1 = 4$, $\sigma_1 = 0,0001$, $\varepsilon_2 = 4$, $\sigma_2 = 0,001$, $\varepsilon_3 = 1$, $\sigma_3 = 0$, $k_0b = 2$, $k_0\alpha = 0,5$, $k_0d = 4$.

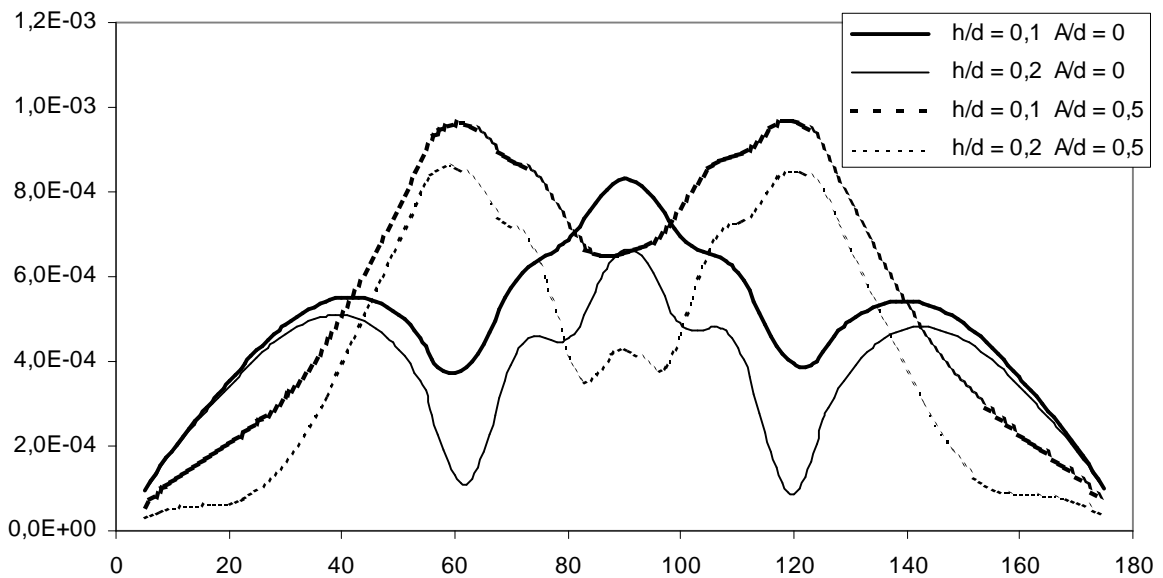


FIGURE 3. Same as in Fig. 2 but for $\sigma_1 = 0,01$.

The magnitude and shape of the scattered field are mainly determined by the effective depth of the scatterer, which depends on k_0D , but also on k_0b , σ_1 and σ_2 and its normalized horizontal position A/d . This is shown in Figs 2 to 5. Effective depth here means the degree of attenuation undergone by the incident field on its way to the scatterer; in this sense, the effective depth of the scatterer tends to increase as σ_1 and/or k_0b increases (since the upper layer conductivity σ_1 in all practical cases is larger than σ_2).

When σ_1 is small (see Fig. 2), many lobes are observed, while the main part of the scattered energy is concentrated around the $\varphi = 90^\circ$ direction. For larger values of σ_1 (see Figs 3 and 4), less lobes are observed. For comparable values of k_0b and k_0d corresponding to realistic situations, the direction of the main scattered lobes depends on whether the scatterer is located below a lift or a dip of the sinusoidal interface. When the scatterer is located right below ($A/d = 0$) or near ($A/d = 0,8$) a

dip, the shortest path of emergence from the ground is along the $\varphi = 90^\circ$ direction. When the scatterer is located right below ($A/d = 0,5$) or near ($A/d = 0,4$) a lift, two paths of emergence are favored, and therefore two lobes symmetrical with respect to $\varphi = 90^\circ$ are observed.

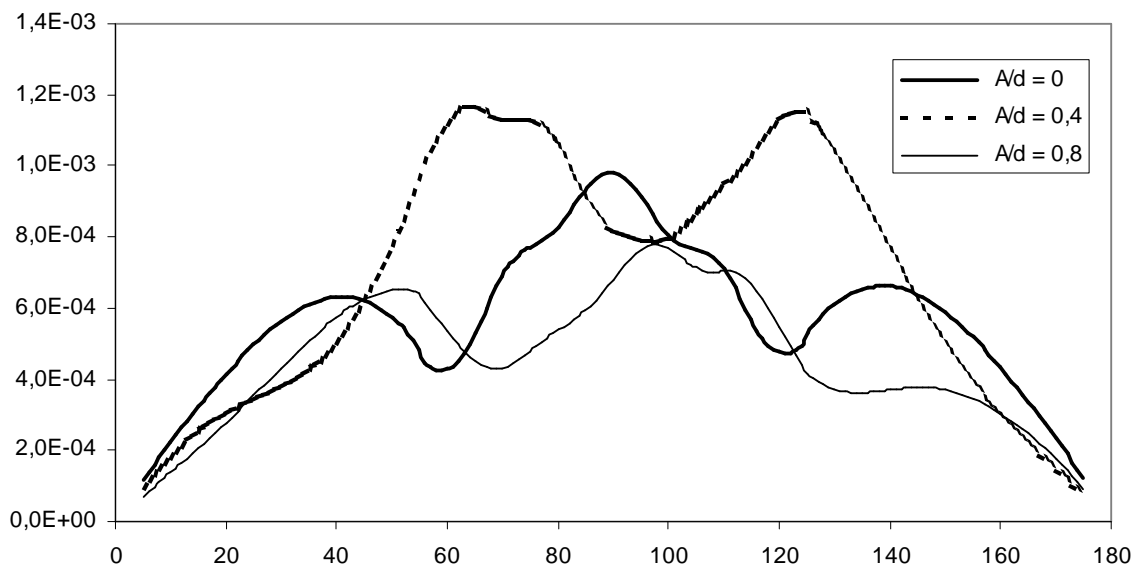


FIGURE 4. Variation of $|U(\varphi)|$ with A/d , where $h/d = 0,1$, $\theta_i = 20^\circ$, $\varepsilon_1 = 4$, $\sigma_1 = 0,0001$, $\varepsilon_2 = 4$, $\sigma_2 = 0,001$, $\varepsilon_3 = 1$, $\sigma_3 = 0$, $k_0b = 2$, $k_0\alpha = 0,5$, $k_0d = 4$.

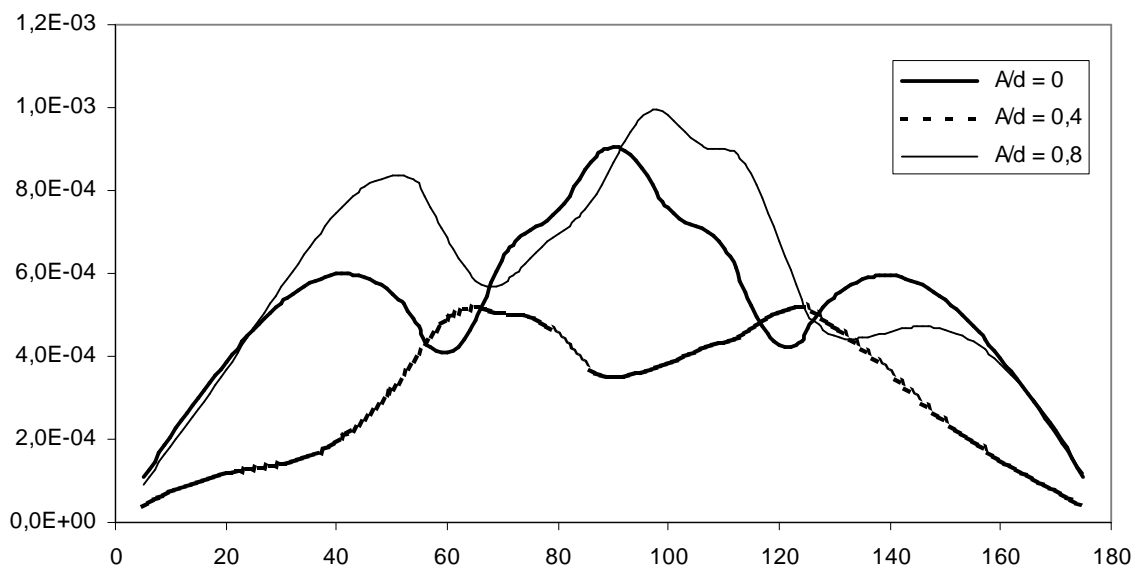


FIGURE 5. Same as in Fig. 4 but for $\theta_i = 50^\circ$.

The dependence of the scattered field on k_0b , i.e. the surface layer thickness, is shown in Fig. 6. Larger values of k_0b result in a severe decrease of the scattering amplitude, with the shape of the radiation pattern remaining more or less unchanged; this, of course, is to be attributed to the attenuation of the incident as well the scattered wave by the lossy layer.

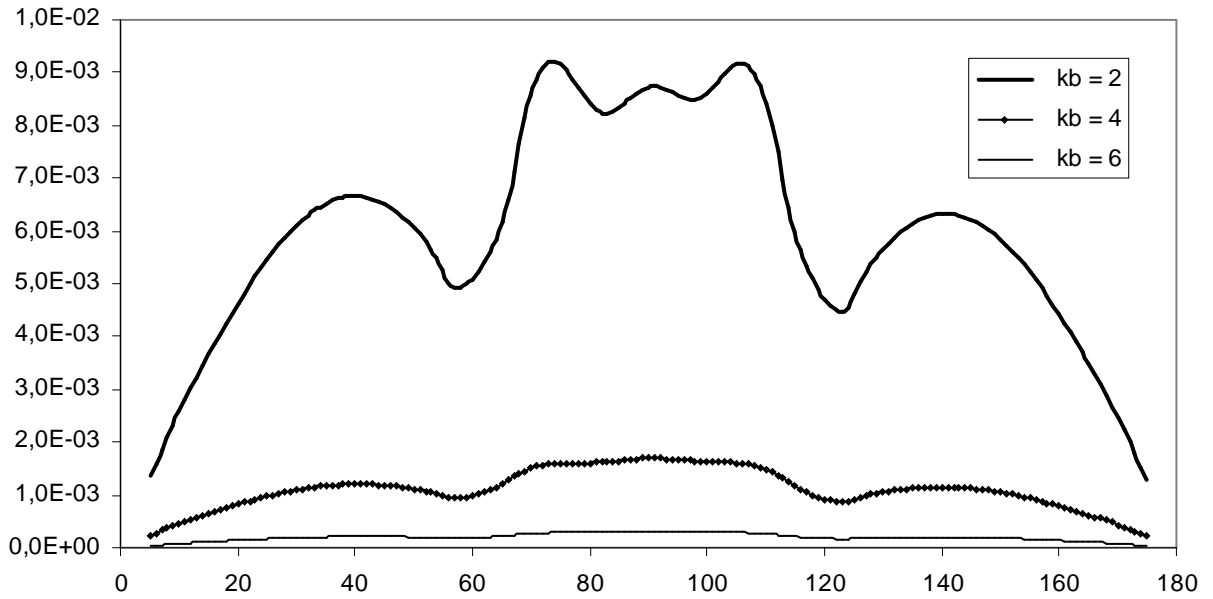


FIGURE 6. Variation of $|U(\varphi)|$ with k_0b , where $h/d = 0,2$, $A/d = 0$, $\theta_i = 20^\circ$, $\varepsilon_1 = 4$, $\sigma_1 = 0,01$, $\varepsilon_2 = 4$, $\sigma_2 = 0,001$, $\varepsilon_3 = 4$, $\sigma_3 = 0$, $k_0\alpha = 1$, $k_0d = 4$.

In Figs 7 and 8, the scattering amplitude is plotted for a large surface roughness parameter h/d and various values of θ_i . Upon comparison of the two figures, it seems that the main factor affecting the scattering pattern is not the incidence angle but the horizontal position of the scatterer; two or three dominant lobes are observed, corresponding to the scatterer's location below a lift ($A/d = 0,5$) or a dip ($A/d = 0$), while the angles of maximum (about 60° and 120°) in the first case become angles of minimum in the second one.

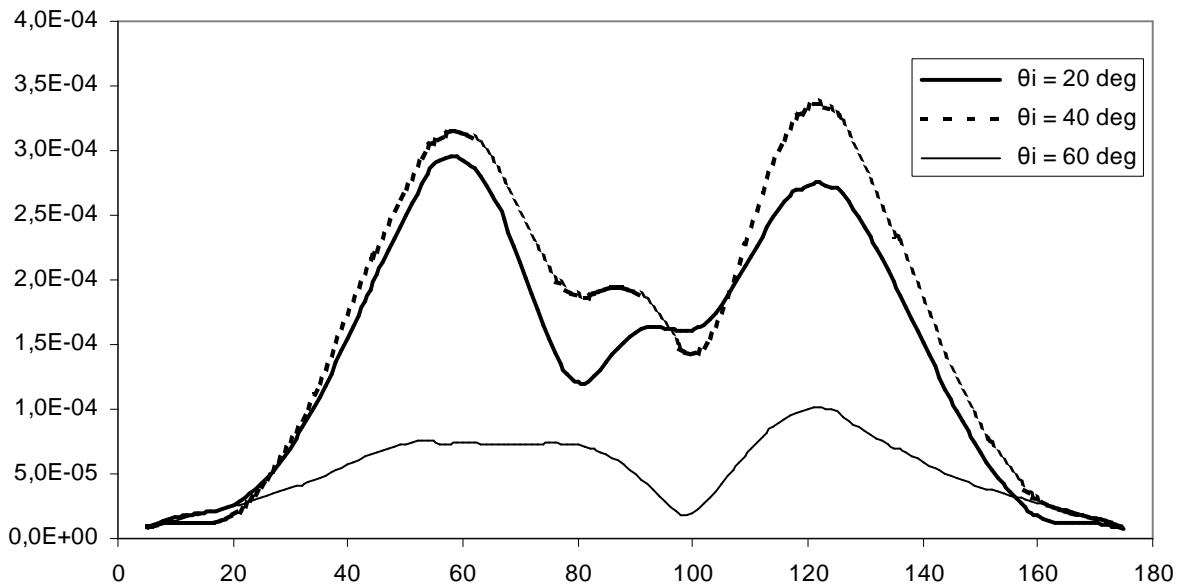


FIGURE 7. Variation of $|U(\varphi)|$ with θ_i , where $h/d = 0,3$, $A/d = 0,5$, $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 4$, $\sigma_1 = \sigma_2 = 0,01$, $\sigma_3 = 1$, $k_0b = 2$, $k_0\alpha = 1$, $k_0d = 4$.

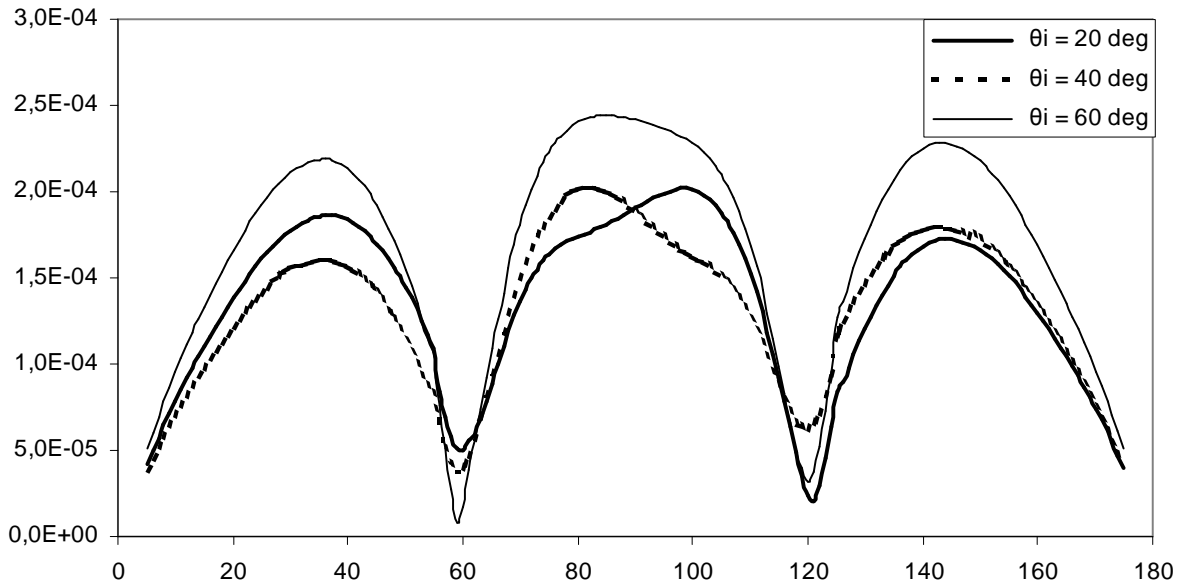


FIGURE 8. Same as in Fig. 7 but for $A/d = 0$.

Variation of the electrical radius $k_0\alpha$ of the scatterer leads to the results plotted in Fig. 9. As expected, increase of $k_0\alpha$ tends to significantly increase the scattered power and to narrow the main lobe of the scattering pattern.

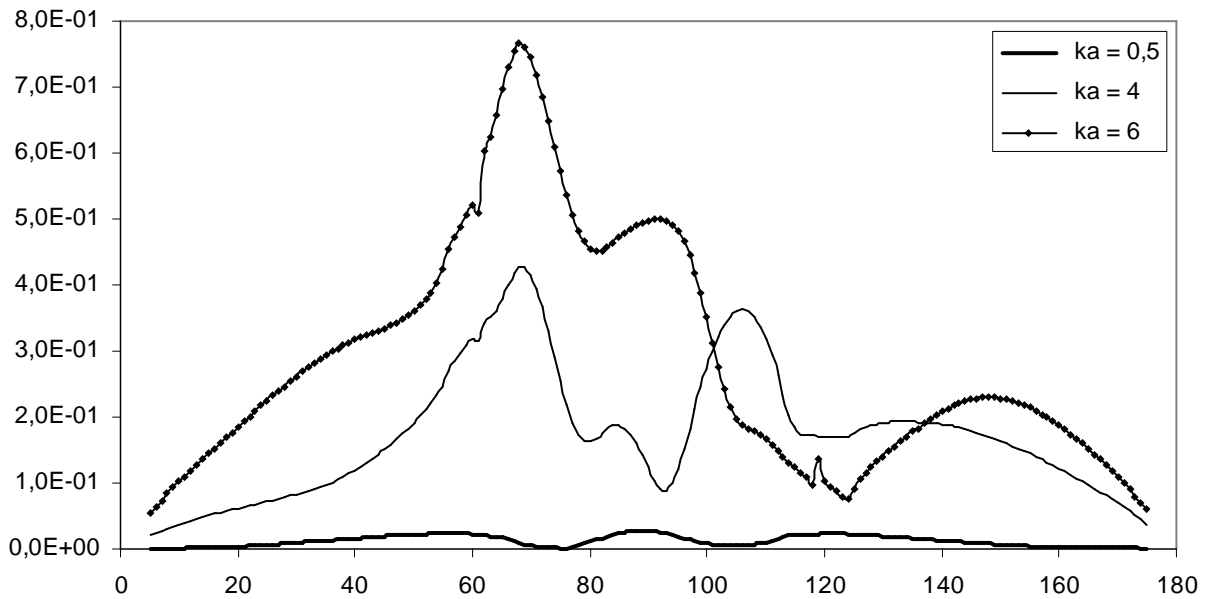


FIGURE 9. Variation of $|U(\varphi)|$ with $k_0\alpha$, where $h/d = 0,3$, $A/d = 0,5$, $\theta_i = 20^\circ$, $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 4$, $\sigma_1 = \sigma_2 = 0,001$, $\varepsilon_3 = 1$, $\sigma_3 = 0$, $k_0b = 2$, $k_0d = 4$.

In Figs 10 – 12, the influence of the surface roughness parameter h/d on the scattering amplitude is further examined for a relatively low conducting surface layer and various angles of incidence. It is seen that an increase of the corrugation depth affects to some extent the amplitude of the scattered field, but with a substantially unchanged shape of the scattering pattern; to state it in other words, it appears that the main difference is between plane and corrugated ground and not between grounds with different degrees of corrugation. This might be attributed to the effect of the preferred shortest path inside the ground, along with the small number of nonevanescant Floquet modes (namely 2) corresponding to the value of k_0d under consideration. It is also seen that, for either relatively small or large incidence angles (20° , 60°) an increase in the roughness parameter tends to increase the scattering

amplitude, while for an intermediate incidence angle (40°) the opposite trend is observed.

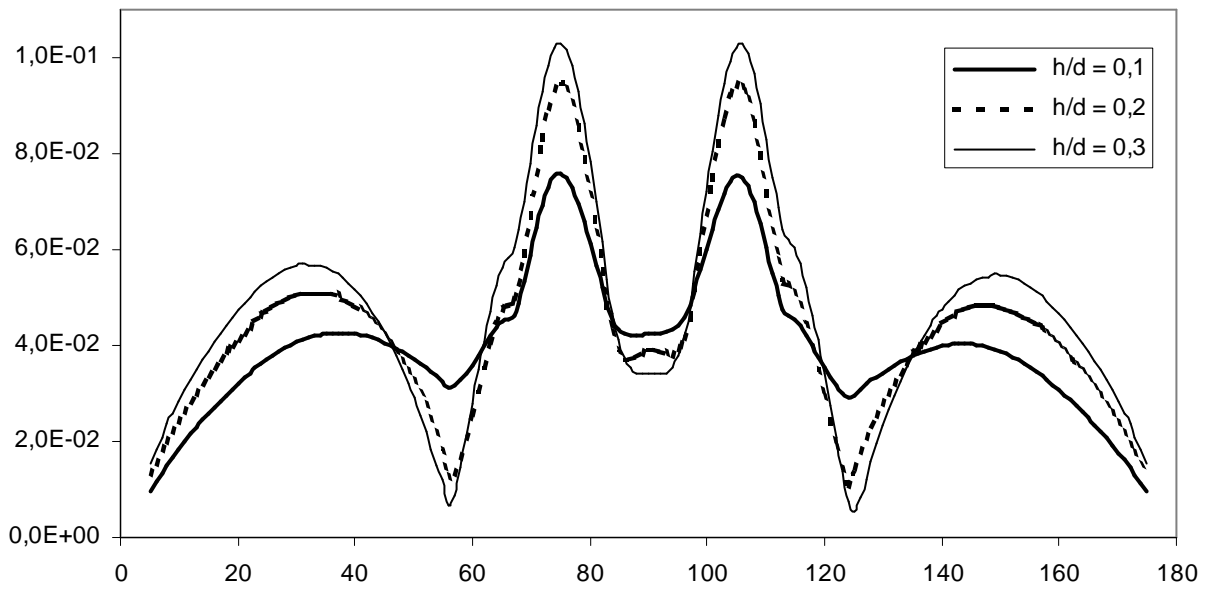


FIGURE 10. Variation of $|U(\varphi)|$ with h/d , where $A/d = 0$, $\theta_i = 20^\circ$, $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 4$, $\sigma_1 = 0,0005$, $\sigma_2 = 0,001$, $\varepsilon_3 = 1$, $\sigma_3 = 0$, $k_0b = 2$, $k_0\alpha = 0,5$, $k_0d = 4$.

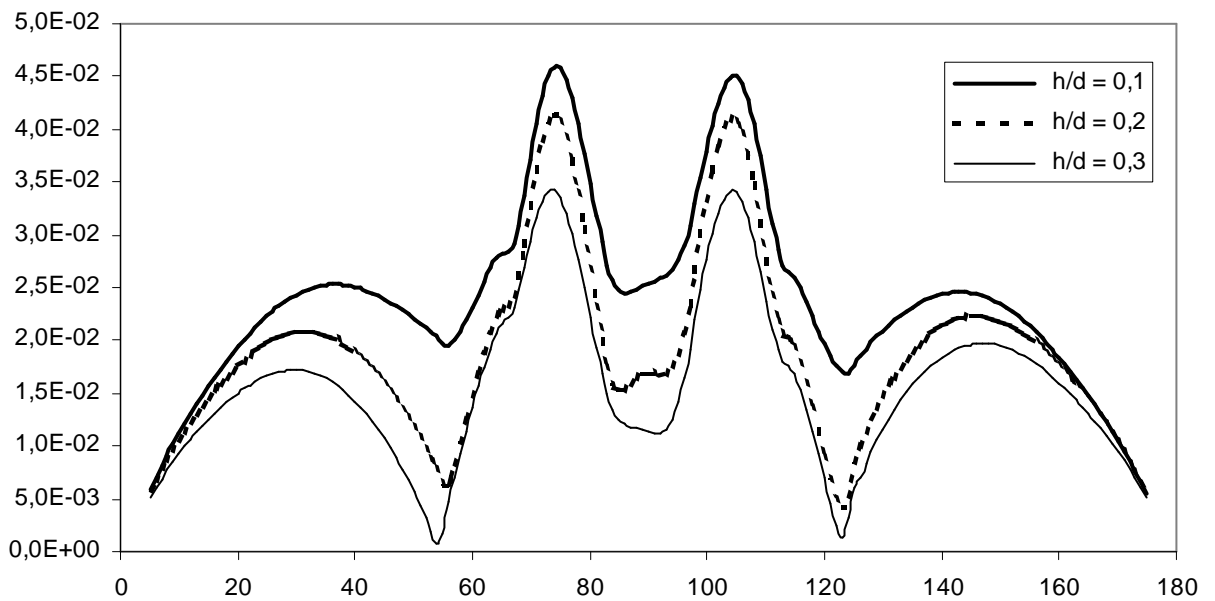


FIGURE 11. Same as in Fig. 10 but for $\theta_i = 40^\circ$.

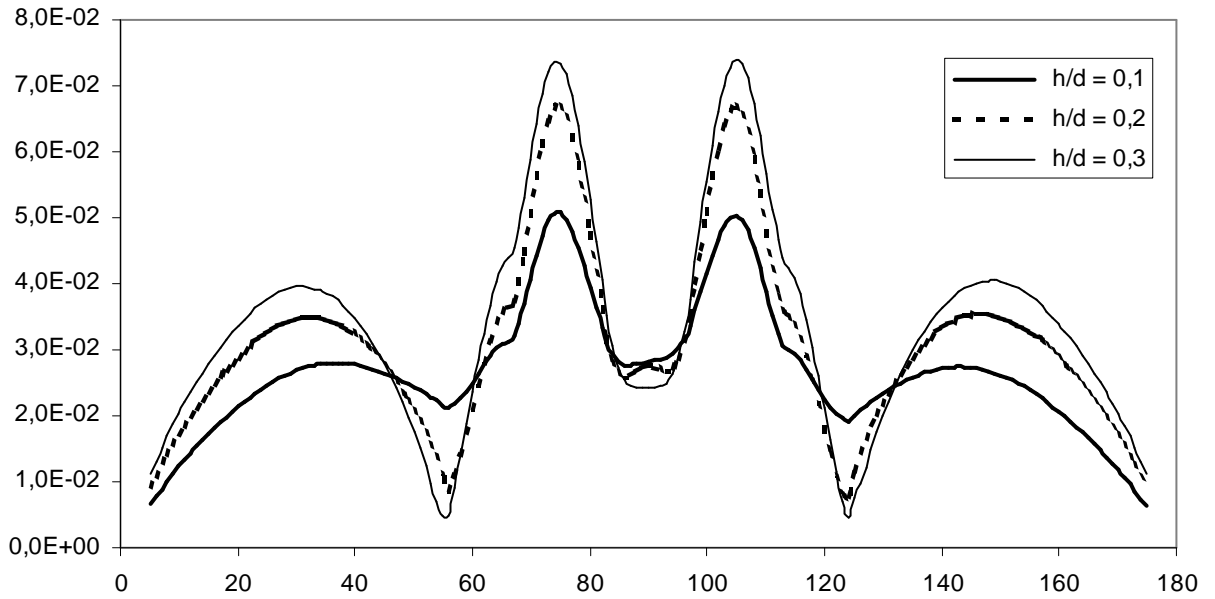


FIGURE 12. Same as in Fig. 10 but for $\theta_i = 60^\circ$.

Figs 13-14 present analogous results, varying the surface roughness parameter h/d , for a surface layer of higher conductivity and two cases of spatial period k_0d . The higher conductivity of the surface layer tends to decrease the scattering amplitude and the number of lobes. It also seems that a larger value of k_0d , especially when combined with a large h/d parameter (i.e. for a large overall surface roughness), results in quite larger fluctuations in the scattering pattern.

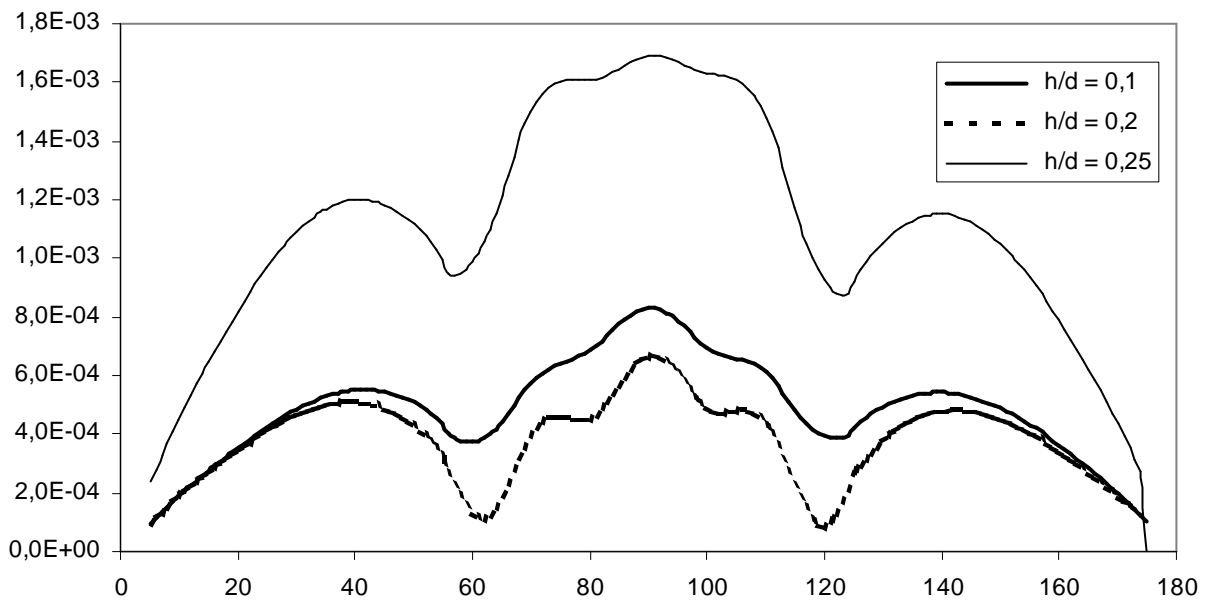


FIGURE 13. Variation of $|U(\varphi)|$ with h/d , where $A/d = 0$, $\theta_i = 60^\circ$, $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 4$, $\sigma_1 = 0,01$, $\sigma_2 = 0,001$, $\varepsilon_3 = 1$, $\sigma_3 = 0$, $k_0b = 2$, $k_0\alpha = 0,5$, $k_0d = 4$.

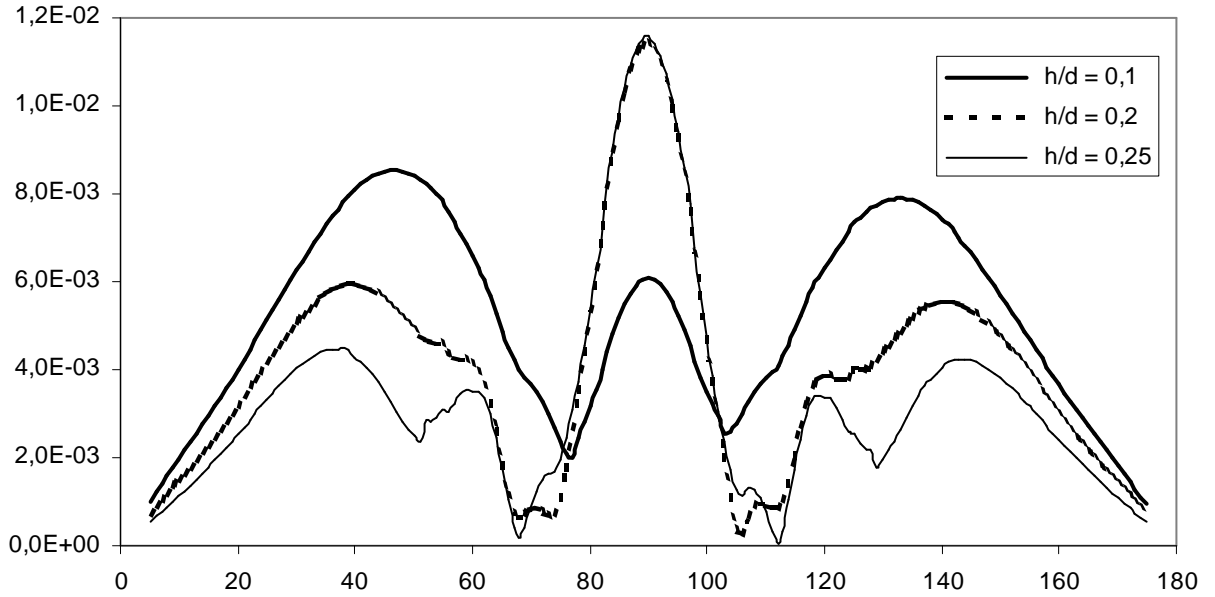


FIGURE 14. Same as in Fig. 13 but for $k_0d = 8$.

We note that in the opposite case of a small spatial period ($k_0d = 2$), the corresponding results (not shown here) are very similar to those of [9] for the planar ground surface, with only one lobe; this may be explained based on the fact that the only significant Floquet mode reaching the scatterer (i.e. the only nonevanescient Floquet mode diffracted by the grating surface) is the zeroth-order one, easily verified to be along the direction given by Snell's law (as for a planar surface).

Finally, in Fig.15 results concerning underground water pipes are shown, which compared to the corresponding ones for a hollow scatterer (e.g. as in Fig. 13) are seen to yield patterns of similar shape, but significantly larger in magnitude.

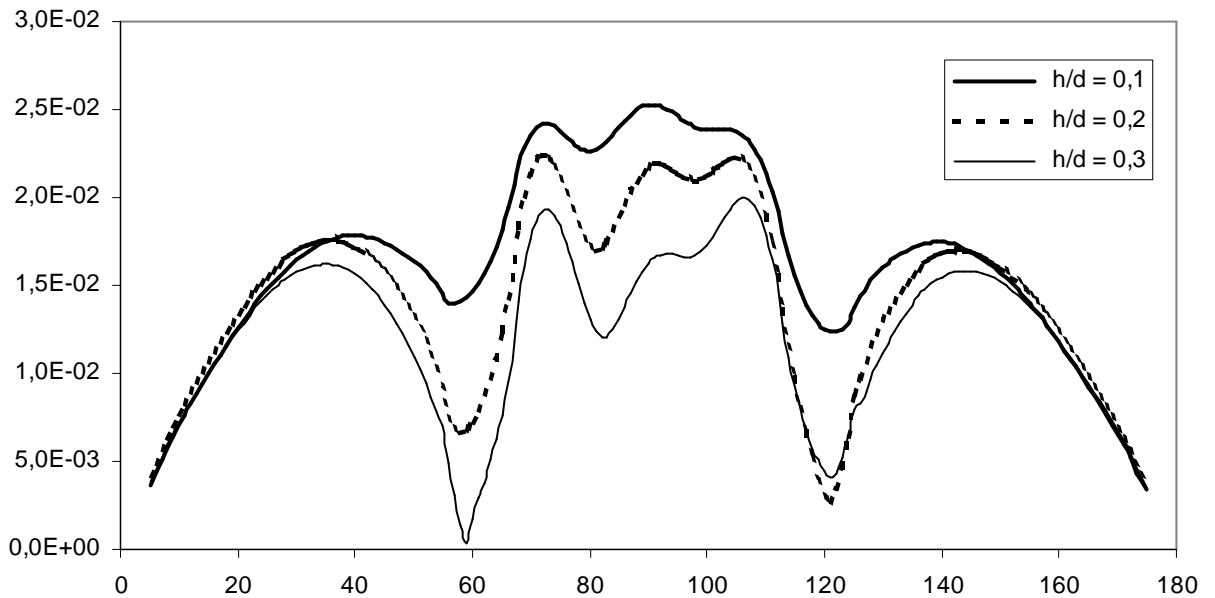


FIGURE 15. Variation of $|U(\varphi)|$ with h/d , where $A/d = 0$, $\theta_i = 20^\circ$, $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 4$, $\sigma_1 = 0,01$, $\sigma_2 = 0,001$, $\varepsilon_3 = 80$, $\sigma_3 = 4$, $k_0b = 2$, $k_0\alpha = 0,5$, $k_0d = 4$.

CONCLUSIONS

The extended boundary condition approach has been employed to treat scattering of TE waves from a cylindrical scatterer buried inside a two-layer lossy ground with

sinusoidal air-earth interface, allowing investigation for roughness depths substantially larger than perturbatively treated random roughness models. The numerical results obtained for the far-zone scattered field show that the factors mainly affecting the scattering amplitude are the conductivities of the ground layers, the horizontal position of the scatterer and its electric parameters.

REFERENCES

2. N. K. Uzunoglu and J. D. Kanellopoulos, "Scattering from underground tunnels", *J. Phys. A*, **15**, pp. 25-30 (1982).
3. P. G. Cottis and J. D. Kanellopoulos, "Scattering of electromagnetic waves from cylindrical inhomogeneities embedded inside a lossy medium with sinusoidal surface", *J. Electr. Waves Appl.* **6**, 445-458 (1992).
4. Y. Leviatan and Y. Meyouhas, "Analysis of electromagnetic scattering from buried cylinders using a multifilament current model", *Radio Sci.* **25**, 1231-1244 (1990).
5. K. Hongo and A. Hamamura, "Asymptotic solutions for the scattered field of a plane wave by a cylindrical obstacle buried in a dielectric half-space", *IEEE Trans. Antennas Propagat.* **AP-34**, 1306-1312 (1986).
6. A. Madrazo, J. R. Arias-Gonzalez and M. Nieto-Vesperinas, "Polarization effects in the scattering of electromagnetic waves by an object beneath a random rough surface", *Opt. Commun.* **162**, 91-98 (1999).
7. D. E. Lawrence and K. Sarabandi, "Electromagnetic scattering from a dielectric cylinder buried beneath a slightly rough surface", *IEEE Trans. Antennas Propagat.* **AP-50**, 1368-1376 (2002).
8. S. L. Chuang and J. A. Kong, "Scattering of waves from periodic surfaces", *Proc. IEEE* **69**, 1132-1144 (1981).
9. S. L. Chuang and J. A. Kong, "Wave scattering and guidance by dielectric waveguides with periodic surfaces", *J. Opt. Soc. Am.* **73**, 669-679 (1983).
10. J. D. Kanellopoulos, P. G. Cottis and P. G. Daniel, "Scattering of vertically polarized electromagnetic waves from infinite dielectric cylinders embedded in a lossy medium", *Int. J. Electronics* **59**, 423-433 (1985).

Switched Photonic Delay Lines for True Time Delay Antenna Beam Steering: Technologies and Challenges

Nicholas Madamopoulos

*Department of Electrical Engineering, City College of New York,
140th Str and Convent Av., New York, NY 10031, USA,
nmadamopoulos@ccny.cuny.edu*

Abstract. In military applications, conventional antenna systems are typically designed to operate in either transmit or receive mode, and are typically fed electronically with a coaxial cable from the processing station. Such electronic feeds entail high loss, are heavy, and significantly degrade the size, weight and power (SWAP) efficiencies of the link. Photonic technologies on the other hand are very attractive for application in antenna systems due to their low loss, lightweight flexible cabling, immunity to electromagnetic interference, broad bandwidth, and overall ability to antenna remoting over distances not possible with conventional electronic approaches. One critical system in military applications is the photonic based beam-steering and in particular photonic delay lines (PDL). PDLs are powerful alternative and important technology for implementation of wideband PAA controllers since they solve many of the above mentioned limitations of electronic controllers. PDLs are key components to develop a future, wide bandwidth, compact, lightweight and small size, PAA controller. Furthermore, PDL provides parallel processing capabilities that can lead to compact and lightweight processing modules, which is of high importance to military applications. A variety of photonic switching approaches have been proposed to implement PDLs. Different photonic technologies include laser switching, acousto-optics, liquid-crystal devices, micro-electro-mechanical-systems, semiconductor optical amplifiers etc. In this paper we review and evaluate how the different photonic technologies can address the phased array antenna needs. Emphasis is given to photonic switching with semiconductor optical amplifiers, as well as photonic delay elements based on fiber optic circuits that required to satisfy the phased array antenna requirements, as well as the challenges ahead.

Keywords: Photonic delay lines, optical beamformer, photonic control of phased array antennas, photonic switching, sensor arrays.

INTRODUCTION

Unlike large mechanically steered antennas, such as dish or parabolic antennas, active phased array antennas (PAAs) offer many advantages, including beam steering without physical movement, highly accurate beam pointing, and increased beam scan flexibility in three dimensions (3-D). Presently, most PAAs are used for military applications as electronically controlled PAAs are extremely expensive for large scale commercial use (Fig. 1).

To detect small objects using a phased array radar, very short microwave frequency pulses are used, and thus wideband antenna control is required. At present, this is a difficult task for electronic based controllers. In addition, broadband phased array radars require long time delays. Nevertheless, long time delays cannot be implemented using electronics due to the frequency sensitive, heavy, lossy, and power consuming nature of microwave waveguide-type delay lines.

Photonic processing can offer significant advantages at high frequencies (e.g., microwave and millimeter-wave bands), such as (a) large instantaneous and tunable signal processing bandwidths (several GHz), (b) immunity to electromagnetic interference (EMI) and electromagnetic pulses (EMP), (c) lower module weight, (d) lower power consumption, (e) less frequency sensitivity and lower energy. Photonics also provides parallel processing capabilities that can lead to compact and lightweight processing modules. In a photonic approach, remote control of the PAA can be accomplished using the low loss optical fibers to transmit the signal from the controller site to the antenna site. Hence, PDLs are key components to develop future, wide bandwidth, compact, lightweight and small size, PAA controllers. This becomes even more important as broadband PAA systems start moving from sea borne to air borne applications as well (Fig 1(c)).

PAAs have features that are highly desirable for many emerging commercial applications such as cellular communications, satellite communications, air traffic control radars, and other mobile platform antenna systems [3-6].

In this paper, we present different photonic technology approaches for the implementation of photonic controllers for phased array antennas and we comment on the limitations and the strong points. At the same time we offer an alternative approach that uses semiconductor optical amplifier and Optiflex technology to simultaneously overcome propagation loss, fast switching response, and accurate differential delay control.

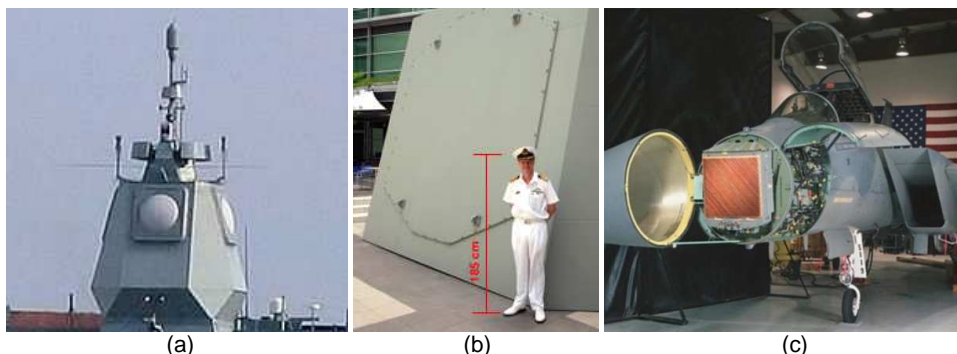


FIGURE 1: (a) Active Phased Array Radar mounted on top of Sachsen class frigate F220 Hamburg's superstructure manufactured by Thales Nederland [1]. (b) Aegis combat system in the US Pinckney (DDG 91) [2].

PHASED ARRAY ANTENNA CONTROL SCHEMES

The PAA has an aperture that is assembled from a great many similar radiating elements, such as slots, dipoles or printed circuit “patches” [7, 8]. Each element is controlled individually in phase and amplitude. Accurately predictable radiation patterns and beam directions can be achieved by varying the relative phase difference and the amplitude of the signal that drives the radiators (antenna elements). Phased arrays have the potential of operating over very wide bandwidths. The high end of the frequency band is limited by the physical size of the elements, which must be placed close enough in the array to avoid the generation of grating lobes [7]. A radar system that has the ability to change frequency over a wide band can adapt its transmission to take into account frequency-dependent multipath characteristics, target response, environmental conditions, interference and jamming [7]. Moreover, wideband processing can give fine range resolution. Phased array antennas break the conventional nexus between the aperture size and the spatial resolution [8] and thus have been used for military applications as well as for radio astronomy. Smaller overall size systems allow the fine spatial resolution required in advanced radar applications that would be impossible to be obtained using conventional radar systems where the required aperture size would be limiting. In addition, phased array antennas can track many targets simultaneously on a time-sharing basis. Thus, phased array antennas can be used for air traffic control applications. Mechanically steered antennas/radars waste time to point the beam from target to target. On the contrary, the inertia-less beam of a phased array antenna can “jump” from one point in space to another in microsecond (μs) speeds, and it may widened or narrowed at microsecond (ms) speeds, thus providing a great amount of agility [9].

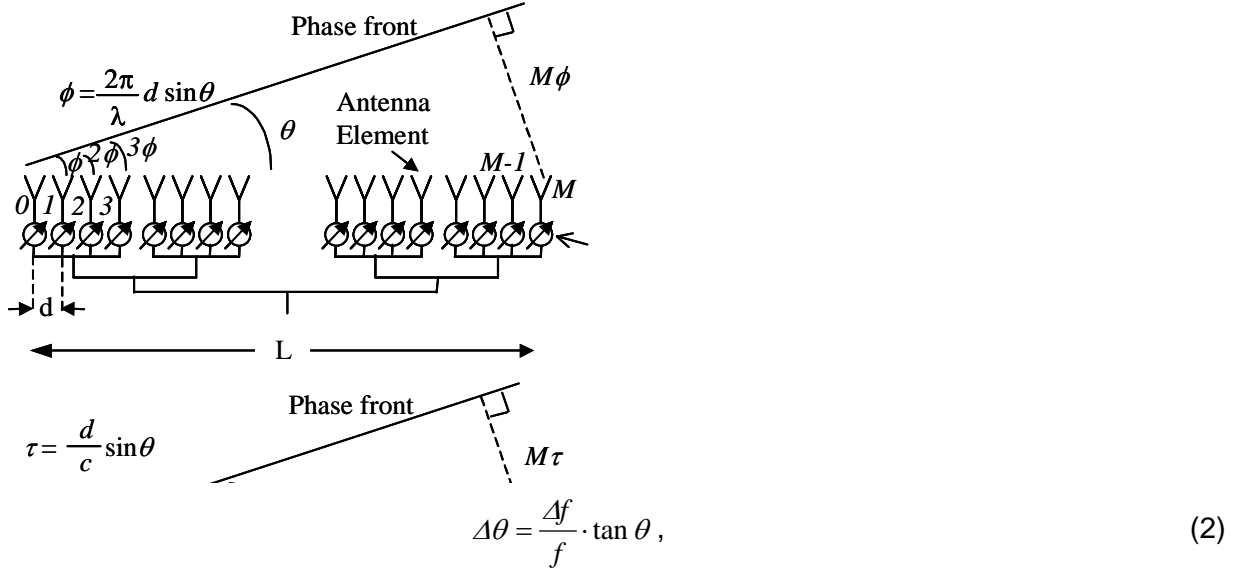
The phenomenon of steering a phased array beam is the result of the energy from each element adding in phase at some desired point. Thus, the desired scan direction can be obtained by selecting a relative phase difference between the antenna elements. If the phases of all antenna elements are equal, the resulting beam points in the direction of the aperture’s boresight axis. Different beam directions can be obtained by applying the appropriate phase sets to the antenna elements. Since the phases can be changed electronically, and in our case photonically, an inertia-less beam is formed that can be directed at any direction within the field of view of the array aperture. PAAs can employ two types of control techniques for scanning an antenna beam. The first technique is called phase-based scanning and uses modulo- 2π phase shifters to set the phase of the microwave signal that drives the antenna elements. This technique is frequency sensitive, and causes beam squinting when the instantaneous bandwidth of the signal exceeds a certain value while using a fixed phase setting [7]. The second technique is called true-time delay steering and is frequency independent. In this technique, delay lines are used to give different time delays to the signals and allow wideband signals to be radiated from the antenna elements without beam squinting [7]. Array lengths of several hundreds of λ or higher is quite common in many practical applications. Because of the requirement that $d \leq \lambda_{\min}/2$, a large number of array elements are necessary in those large arrays. Unequally spaced linear array is developed mainly to reduce the number of array elements while keeping a comparable performance [10-12].

Phase-based Steering

When energy is incident at a phased array at an angle θ (Fig. 2a), the incremental phase shift ϕ required between adjacent antenna elements for a scan angle θ is given by [7]

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda_{RF}} \cdot d \cdot \sin \theta, \quad (1)$$

where λ_{RF} is the wavelength of the emitted RF signal, and d is the inter-antenna spacing. This indicates that the required phase is frequency dependent. If the microwave frequency is changed and the phase setting of the phase shifters is not changed the beam will move. Thus, any change in frequency (instantaneous or tunable) will cause the beam to deviate from the desired scan positions. This is called beam squinting and can be described [7] by



where $\Delta \theta$ (in rad) is the change in the scan direction, f is the frequency of operation, Δf is the change in frequency and θ is the desired scan angle.

True Time Delay Steering

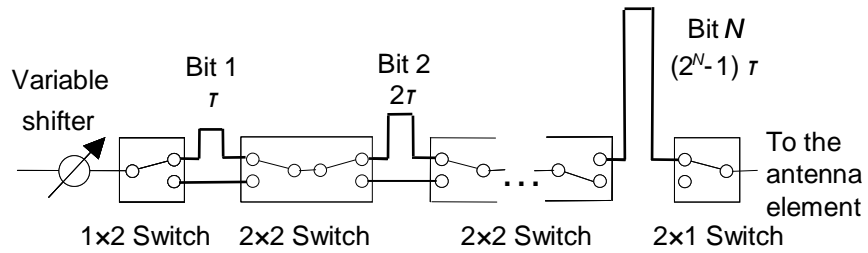


FIGURE 3: A typical N -bit switched time delay line network that requires $N-1$ 2×2 switches to implement the 2^N different time delay settings. Signal in each bit can follow either the delay or non-delay path; a microwave phase shifter provides the fine modulo- 2π phase control.

To prevent beam squinting, while maintaining large instantaneous bandwidths, the modulo- 2π phase shifters must be replaced by time delay networks (Fig. 2(b)). The total delay path length that has to be provided amounts to $L \cdot \sin \theta_{\max}$, where θ_{\max} is the maximum scan angle for the aperture L . The incremental time delay is

$$\tau = \frac{d}{c} \sin \theta, \quad (3)$$

where d is the inter-antenna spacing, c is the velocity of the electromagnetic radiation in air, and θ is the incremental scanning angle. A typical schematic diagram of an electronic time delay network is shown in Fig. 3. The signal is routed via electronic switches through the N -delay paths whose length, and thus time of propagation, increase successively by a power of 2. Since each switch allows the signal to either follow the delay path or the non-delay path, a total delay T can be inserted. This delay T can take any value from 0 to $(2N - 1) \cdot \tau$, in increments of τ . Note that binary algebra can be followed to calculate the obtained delays. In general a time delay can be described by

$$T_i = (b_{0i} \cdot 2^0 + b_{1i} \cdot 2^1 + \dots + b_{Mi} \cdot 2^M) \cdot \tau, \quad (4)$$

where $b_{0i}, b_{1i}, \dots, b_{Mi}$ are switching factors that take the value of 0 or 1, depending on whether or not the signal follows the non-delay (for “0”) or delay (for “1”) path respectively.

Beam Shaping

Although steering capability is the most common function, a PAA can also provide beam-shaping capability by appropriate arrangement of the feed signals. A radar system with variable beam-width can produce a wide beam for the acquisition of targets and a narrow beam for subsequent high-precision tracking. Additionally, a broadcast satellite antenna with variable beam-width can achieve efficient coverage of irregularly shaped geographical service areas based on the environment or traffic conditions, which is an important feature for communication systems. The major objectives of beam shaping are to minimize pattern ripples, to reduce sidelobe levels, change null positions, or control output power levels, etc. Again this important feature can be controlled through the use of phase or time delay based controllers.

CRITICAL FEATURES OF PDL

Of critical importance to high precision military applications and systems such as high time-bandwidth product analog optical signal processors and delay lines for wideband RF systems is the ability to generate *long delays* with *low intrinsic loss*. As mentioned these two features are hardly accomplished with electronic approaches. One of the most successful techniques for obtaining long delay lines is the use of commercially available, single-mode (SM), low-loss, optical-fiber based technologies due to the large time-bandwidth product attainable with glass optical fibers. However, compactness, environmental robustness, manufacturing scalability and time delay precision are important, in particular for airborne applications where weight and size are very important.

To date, low loss optical fiber is the only guided-wave delay medium capable of providing these long delays with acceptable unamplified transmission loss. Nevertheless, size constraints, precise differential time delay control requirements and on-chip/off-chip optical signal routing complexity and management are some of the factors that have precluded fiber delay line processors from being more pervasive in military systems. Lithographically generated chip-scale, planar lightwave circuits (PLC) technologies offer the scalability and precision needed for implementing complex optical delay applications but they have limited optical delay performance due to the large propagation loss in optical waveguides. The best reported loss achieved to date in integrated photonic waveguides is on the order of 1 dB/m (compared to 0.3 dB/km for SM fiber), which translates to a delay/loss ratio of ~ 0.2 dB/ns (~ 200 dB/ μ s). These best integrated waveguide transmission losses are more

than three orders of magnitude worse than optical fiber transmission, leading to insertion loss values that are unacceptable in most analog applications where signal-to-noise ratio (SNR) and dynamic range (DR) are critical. In general, optical amplification to overcome losses comes at a severe on-chip power, as well as SNR and optical bandwidth penalty.

The ability to realize “fiber-like” losses in a compact chip-scale, integrated photonic platform that can be readily integrated with passive optical, nonlinear optical, and active opto-electronic components is one of the real needs for the development of compact PDL systems. Today, these capabilities do not exist due primarily to the lack of an adequate integrated optical waveguide technology. The optical losses in state-of-the-art planar waveguides range from 0.1-1 dB/cm for semiconductor materials, less than 0.1 dB/cm for hollow-core waveguides, and as low as 0.005 dB/cm for flame hydrolysis deposited silica waveguides. While these losses have proved adequate for many commercial digital telecommunications applications, they do not support high spectral resolution optical signal processing simultaneous with high dynamic range signal detection. Since photonic links are lossy, the loss must be controlled and compensated so that the array amplitude taper is not unacceptably distorted. Note also that a 1 dB optical nonuniformity throughout the operation band produces a 2 dB RF nonuniformity.

In terms of time delay requirements, the longest time delay needed to scan an array of length L to θ_0 is $L \sin\theta_0$. For example, a 100λ array scanned to 60° needs a longest delay of 87λ . With binary steps there would be 7 bits of time delay. Maintaining delays of 64λ , 32λ , and 16λ , to a small part of the least significant bit, is a challenging task. If the allowable error is 2, the time delay must be maintained to better than one part in 10,000.

RF performance and in particular linearity also plays a significant factor in microwave applications. Since photonic links are lossy, amplifiers must be used. The 3rd order Intercept Point (IP3), noise figure (NF) and spur-free dynamic range (SFDR) are a function of both the passive optical losses from the delay line structure as well as the electro-optic and optoelectronic conversion at the optical modulator and the optical detection module. Nevertheless, the RF performance of these components can be handled separately and we can focus on the optimization of the PDL in terms of optical insertion loss, time delay accuracy, inter-channel and intra-channel crosstalk, switching speed. Table 1 shows the typical requirements for an X band PAA as set by the RF engineers of the Lockheed Martin Corp (USA).

TABLE 1: PDL RF requirements

| Parameter | Requirements |
|------------------------------------|--------------|
| Number of Bits | 7 |
| LSB | 0.1 ns |
| MSB | 6.4 ns |
| RF Loss/bit | 2.86 dB |
| Maximum time delay error | 0.05 ns |
| Transmit to receive switching time | 0.5 μ s |
| Time delay setting switching time | 0.5 μ s |
| Frequency Range | X band |
| Interchannel crosstalk | <-60 dB |
| Intrachannel crosstalk | <-60 dB |

PHOTONIC DELAY LINES

From the discussion in the previous sections, we can conclude that implementation of photonic signal processing and distribution techniques can

significantly benefit PAAs. In this regard, PDLs provide a unique solution to implementing true time delay lines (TTDL) and hence overcome problems associated with beam squinting. It is the broadband nature of optical delay lines that enables beam steering independent of the RF frequency. Over the past two decades years, several optoelectronic technologies have been proposed for making variable PDLs. These techniques vary in their approaches and the optical technologies as depicted in Fig. 4.

The first to propose a passive multichannel fiber-optic delay line based on photodetector switching to select the desired time delay signal was Levine [13]. Instead of switching the detectors, Ng et. al. used electrically switched semiconductor lasers to implement the time delays [14]. The key limitation of this technique is the very large number of lasers, detectors, and associated hardware resulting in a relatively high cost, hardware-intensive system. An optical waveguide based switching network using integrated electro-optic switches for routing the optical signal into external single mode fibers was proposed by Soref [15]. A single channel 6-bit waveguide switching network was later implemented [16]. Other integrated optic approaches include electro-statically actuated metal membrane optical waveguide switches [17], and micro-machined meander-line thin-film piezoelectric micro-actuators for switching the light in different fibers [18]. Arrayed optical waveguides [19, 20], have also been used to form a wavelength dependant PDL.

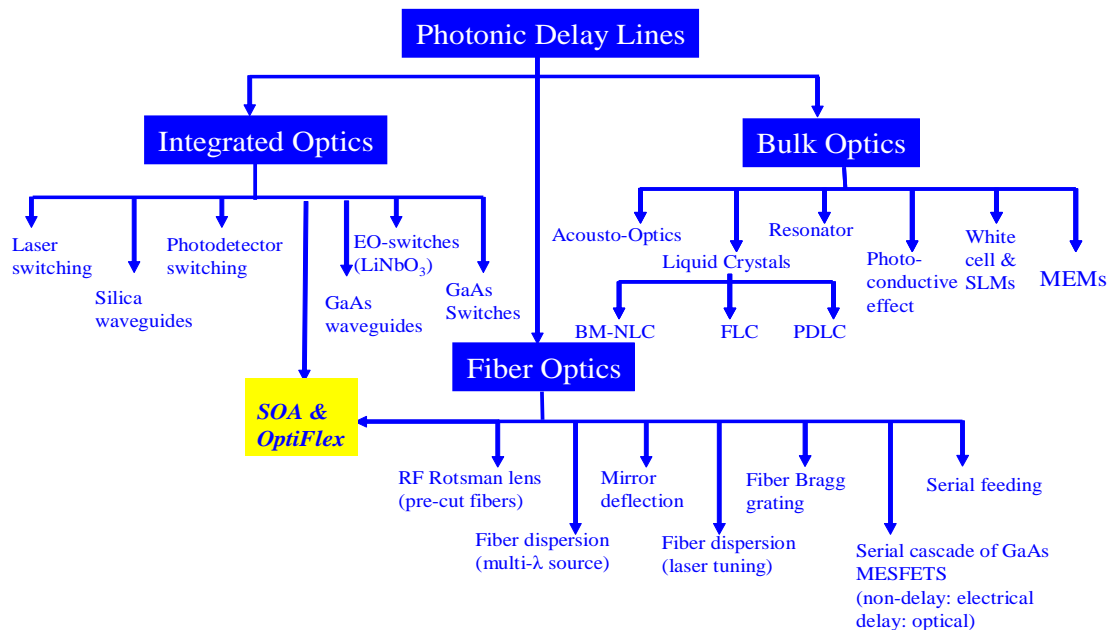


FIGURE 4. Classification of the different PDL approaches.

Fiber delays have also been used to form non-switched photonic time delay networks. In this approach light is directed to predefined fixed length fibers to obtain the desired time delay [21]. A programmable binary fiber-optic (FO) delay line architecture was proposed by Goutzoulis [22] based on GaAs MESFETs for electrically switching paths between a non-delay electrical path and a delay FO path. The use of switched FO delay lines [23], where 2x2 cross bar electro-optic (EO) switches were used to switch paths of the optically modulated microwave signal was proposed. High interchannel crosstalk (leakage of signal through the switching fabrics to the undesired path) level was the key limitation of this approach. The use of independent (e.g., multichannel prism geometry) dispersive fibers with a single high power tunable laser source was proposed for making continuously variable (non-binary switching) PDLs [24, 25]. A similar approach has also been proposed, where instead of the fiber prism, a fiber with multiple Bragg gratings is used [26].

The above systems were limited only to transmit operation. In addition, the use of wavelength multiplexing has been proposed to reduce hardware in a photonic controlled phased array antenna that uses fiber delays [27].

Non-fiber based techniques have also been proposed for the implementation of time delay lines. A two dimensional (2-D) coherent optical architecture for time-delay-based PAA beamforming using free space delay lines was proposed independently by Dolfi [28] and Riza [29]. This interferometric architecture was based on polarization switching by two dimensional (2-D) spatial light modulators (SLMs) based on nematic liquid crystal (NLC) technology and free space propagation based delay lines using polarizing beamsplitters (PBSs) and prisms. The key limitation of this approach is the transmit only operation. Transmit and receive operation was demonstrated using multichannel PDL architectures based on 2-D SLMs that act as optical polarization switching elements. This approach is an incoherent reversible optical architecture that uses 2-D polarization switching arrays. A single bit, 25-channel incoherent beamformer was demonstrated using NLC polarization switching devices at visible wavelength [30]. NLC devices are also limited in their switching speed (e.g., 10 ms). Finally, Ferroelectric liquid crystal (FLC) SLMs were used to built one of the most advanced PDL systems with 7-bit resolution and 32 channels, operating at 35 μ s response times and low insertion loss (e.g <1.2 dB/delay bit) [31].

Other optoelectronic technologies proposed for making variable photonic delay lines include polymer dispersed liquid crystal SLMs [32], thermo-optic switches [33], non-linear optical materials [34], acousto-optics [35], serial feeding and optical gating [36] and coherent detection methods [37]. Recently the use of the White cell in combination with SLM and or MEMS has been proposed for PDL applications [38].

LIMITATIONS OF EXISTING PDL APPROACHES

The PDL approaches presented in the previous section do solve some of the electronic controller imitations. Nevertheless, they do not fully satisfy all PDL performance requirements for wideband PAA control. Most optical switch fabrics can not provide the fast switching speeds (<0.5 μ s) required in PAA control. Liquid crystal and MEMS based approaches are limited to milliseconds and at best several microsecond (e.g., Ferroelectric liquid crystals at 10 μ s to 30 μ s, [32-33]) speeds. Thermo-optic switches have been demonstrated at 45 μ s switching speeds [39]. On the other hand, acousto-optic and non-linear optic approaches can provide higher switching speeds (e.g., <0.5 μ s). Nevertheless, they have high insertion loss (e.g., LiNbO₃ ~5 dB, AO at ~1.5 dB). In addition, interferometric (i.e., Michelson interferometer) approaches using LiNbO₃ or Silica waveguides have poor on/off isolation performance, that directly affects the RF performance of the system. Besides the speed and loss issues, some of the aforementioned PDL approaches (e.g., AO) are rather bulky and can not be scaled down in size and weight as well as require high electrical power requirements undesirable for future PAA applications [40]. These features are increasingly becoming more and more relevant with the shift towards the use of PAAs in mobile platforms (e.g., aircrafts, satellites) where space and weight is of critical importance.

In order to accomplish high switching speeds and low insertion loss the use of SOAs as on/off switching elements in PDLs was proposed for PAA control [41] and later used to form a single channel PDL [42]. Optoelectronic integration techniques allow for the integration of multiple SOA elements on a single chip along with other passive optical components (i.e., passive optical splitters, filters, taps) and photodetectors. Real estate of the switching functionality can be minimized through this opto-electronic integration.

In many broadband applications long time delays (e.g., several ns) are required. To accomplish such delays long length fibers, high refractive index optical paths, or

recirculating waveguide loops can be used. To this day, long fiber delays often exhibit the problem of accurately controlling the length and in particular when multiple channels are used. For given fabrication technology, optical waveguides with high index contrast materials exhibit high scattering loss and require very low roughness to achieve low loss waveguide which is a very difficult task [43]. Recirculating waveguide loops also exhibit high overall insertion loss due to the long propagation length in the high index material.

Recently the use of photonic crystals [44, 45] or photonic crystal fiber [46, 47] approaches have been investigated for the implementation of short physical length but long time delay PDLs through the high index of refraction capabilities of these material structures. Nevertheless these structures still perform with high insertion losses and maximum time delay at the picosecond (ps) or a few nanoseconds (ns).

SEMICONDUCTOR OPTICAL AMPLIFIER BASED SWITCHED PDL WITH OPTIFLEX CIRCUITS

In order to accomplish fast switching speed, low loss PDLs, with the required time delay bit accuracy the most promising technology is the one that is based on semiconductor optical amplifiers (SOAs). SOAs can perform two functions:

- (a) optical switching and
- (b) signal gain.

At the same time the physical implementation of the time delays is performed through the low loss glass fiber (0.3dB/mk) in an Optiflex circuit. Before we describe the architecture of the PDL we will provide some background information for the SOA and Optiflex technologies.

Semiconductor Optical Amplifiers

A SOA is a semiconductor diode chip in which indium phosphide (InP) is used as substrate material and indium gallium arsenide phosphide (InGaAsP) is the active material [48]. Electron-hole pairs are injected into the active layer, then recombine, emitting light. SOAs are fabricated using the same processing technology as that used for semiconductor lasers. This process has been used for many years and with high-volume production, so it is now well understood and highly reliable.

An SOA is essentially a laser that is operating under threshold. Whereas the laser requires some internal or external reflection for feedback, the SOA is a single-pass device. The input signal is usually coupled via a lens to the chip waveguide and the amplified signal exits the chip through another lens and into the fiber. Because of the high single-pass gain (>30 dB) of the active layer, reflections at the facets of the device are minimized ($<10^{-4}$). This eliminates optical feedback, which causes gain ripple. Optical isolators are often used to reject back-reflected light from the system.

The gain wavelength can be tailored from approximately 1.0 to 1.7 μm by varying the composition of the active InGaAsP material. This results in amplification of light in a wavelength region ranging from 1.28 up to 1.65 μm . It should be noted that the wavelength at the maximum gain and the optical bandwidth of the SOA are design parameters offering flexibility in applications. By changing the bias current of the SOA, the device can be either absorbing (low current) or amplifying (high current). This particular property of the SOA can be exploited in a PDL network to provide the required ultrafast switching response for high end PAA applications. The SOA can be operated as optical blocker, for example in the absorbing (or blocking) state it blocks the optical signal for propagating further down the network through the desired path, while in the amplifying (or non-blocking) state, it allows for the signal to go through the next PDL bit through the desired path. The high extinction ratio of up to 50 dB and the fast response time (ns) allows the SOA to be used as an optical gate

in routing and/or packet switching [49, 50]. Operating SOAs as optical blocker in a PDL network can also provide the ultra-fast switching response required in high end phased array antennas applications.

Optiflex circuit technology

As mentioned earlier, a variety of approaches have been used to implement photonic delay lines. Free space, bulk (glass) optics, waveguides and/or fibers have been used as a medium for acquiring the required delay. High index materials in PLC configuration as well as optical fibers are of particular interest in long time delays. Nevertheless, although PLC techniques provide excellent differential control of the delay line accuracy, it is rather difficult to accomplish low loss long delay (e.g., a few ns) lines as those required for wideband PAA. On the other hand, most fiber approaches have not adequately address the limitation of accurate control of the length of individual fibers to a precision of a few millimeters (mm), and in particular over a large number of fibers, as required in fiber arrays. This can have implications of increased assembly time and rework until the required relative delay between the non-delay and the delay path is obtained. Furthermore, fiber management of complex fiber runs present challenges in the physical design and packaging and can be particularly labor-intensive and time consuming.

A technique of accurately forming these fiber based delays that can provide the low insertion loss and the long time delay is the OptiFlex circuit technology [41, 51, 52]. In conjunction with SOA as switches, Optiflex-based PDL is a unique technology that can adequately address the stringent time delay requirements of PDLs. The concept of the OptiFlex technology was invented and developed to form arbitrarily complex fiber-optic fabrics capable of transporting optical signals between termination points in optical network equipment with almost negligible loss [53].

The OptiFlex technology can be used to lay multiple fibers on a piece of plastic laminate sheet, providing low loss distribution, compact, flexible overlays. The process is very accurately controlled, via automated equipment, and is used to design, construct and terminate a flexible optical fiber fabric that is used as a board, backplane or other interconnection assembly [54]. The technology uses sequential layering of planar processes to allow the application of successive operations to build a circuit of optical fibers along the vertical axis [55]. Note that the manufacturing automation can lead to cost effective manufacturing and assembly efficiency similar to the ones in semiconductor and PCB industry. Optiflex was developed to address problems associated with the manufacturing and assembly of dense optical networks and particularly the interconnection of optical backplanes. Hence, it provides sets of fibers with a designed relative path length difference to allow time delays from the ps range to μs or more. Fig 5 shows a typical OptiFlex circuit previously used for optical back-planes.

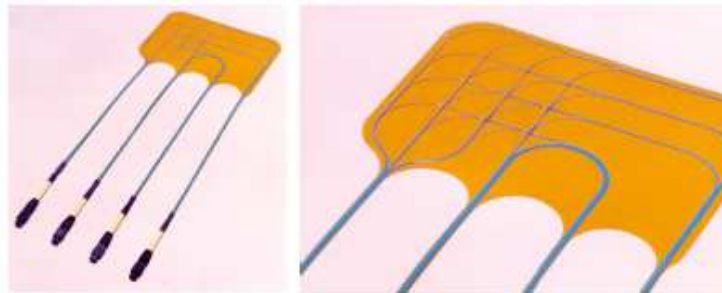


FIGURE 5: The OptiFlex technology previously used for optical back-planes in optical networks. (Courtesy of W. R. Holland, OFS Fitel, Somerset, NJ.)

The great advantage of this technique is that it can provide all the required PDLs on a single fiber circuit at small size and in a very compact and well organized configuration. Note that fiber pigtailed coming out of the sheet can be ribbon type fiber, and ribbon fiber splicing can be used to interconnect to the SOA based photonic switch fabric and thus guaranty accurate relative optical path lengths. Note that potential deleterious effects such as crossover that can cause micro-bending losses are minimized in the Optiflex circuits by the use of special laminating techniques used to distribute the applied pressure on the thermoplastic encapsulant without concentration at the crossovers. Optical loss tests have shown no significant attenuation due to micro-bends [56]. Note also that new fibers developed for fiber-to-the-home (FTTH) access networks, designed for sharper bends with low loss can be used to accomplish more compact designs [57].

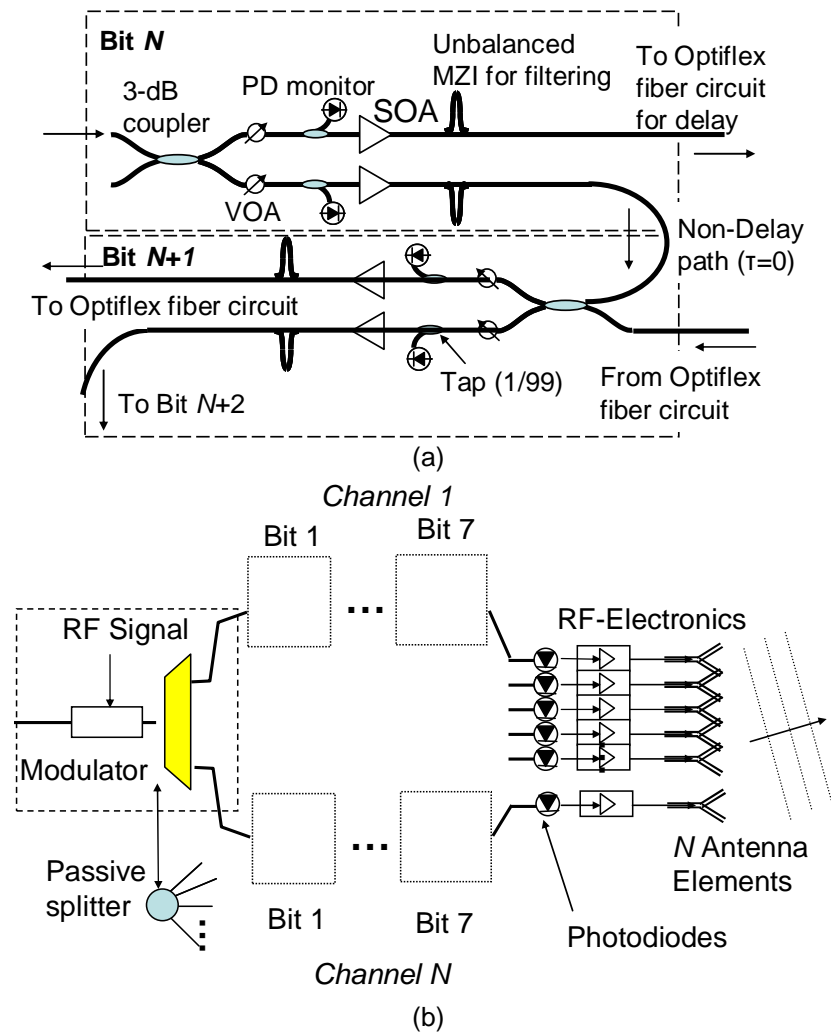


FIGURE 6. (a) Physical design of the elemental PDL, (b) The PDL system consisting of N 7-bit Delays addressing N antenna elements.

SOA/Optiflex-based Switched PDL Architecture

The basic schematic of the low-loss, high switching speed, SOA-switched PDL is shown in Fig. 6. A network of elemental PDL bits (Fig. 6a) will be used to implement the PDL system (Fig. 6b) for PAA control. Two PDL bits are shown for simplicity in Fig. 6a. Signal coming into Bit N is split into two replicas. One follows the top optical path that is connected to the Optiflex delay, while the other one can follow the lower

part that follows the integrated waveguide path, which defines the non-delay path. The SOAs in each path can either be in their ON (transmissive) or OFF (blocking) state. The two SOAs always work out of phase, that is, when one is ON the other is OFF. Hence, each replica signal can be routed through the PDL bits independently of each other. Unbalanced Mach-Zehnder interferometers (MZI) are used as optical filters to suppress ASE from the SOAs operating in the on state. In addition, variable optical attenuators (VOAs) are used to control/adjust the optical powers in each arm so that the signal optical powers are balanced when they enter the next stage.

Fig. 6(b) shows a 7-bit PDL network for a PAA consisting of N antenna elements. Wavelength division multiplexing (WDM) techniques are used to combine and/or separate optical signals at different wavelengths so that hardware compression can be accomplished. Signals from individual lasers (or multiwavelength laser-MWL) are demultiplexed through a WDM demultiplexer (DEMUX) after passing through an electro-optic modulator, which modulates the signal at the required RF frequency. Note that the RF BW of the system is limited by the BW of the modulator and the photodetector and not by the PDL system (e.g., the individual optical components that comprise the PDL). Fig. 6(b) also shows an alternative approach using a single high power laser and a star coupler that splits the signal in many replicas. This approach can provide cost savings since a single laser source is required; nevertheless, higher insertion losses due to splitter can reduce the SNR of the system.

Firstly, SOA technology can provide very small packages for arrays of SOA elements. Optical integration techniques such as monolithic integration can be used to house several SOAs (e.g., 10-15) on a single package (5 cm × 2 cm). An alternative approach is to use hybrid integration with passive assembly that reduces cost and time of manufacturing [58]. Note that using silica on silicon based hybrid approaches additional optical elements, such as optical filters, can be integrated on the optical circuit. Integration of optical filters at the waveguide paths can be used to reduce ASE power traveling through the delay line network and saturating the SOAs. The SOA technology in combination with the small size of the OptiFlex-based fiber delay lines can lead to a small overall PDL network. Note that for small delay lines (e.g., ps, ns) the PDL design can be implemented all on the chip level and for cases where longer delay lines (e.g., μ s) are required, and are not feasible on the chip level, OptiFlex technology can be used. A miniaturized 7 bit PDL or one individual channel is shown in Fig. 7. All active switching, optical splitting/combining, filtering and reference delays are performed on a PLC. Multifiber fiber pigtailed bring the signal to/from fiber delays based on Optiflex technology. Note that spiral fiber routing can be implemented to allow for maximum reduction in real estate area. Note also, although not shown in Fig. 7, fibers can overlap and cross over without any signal degradation or loss.

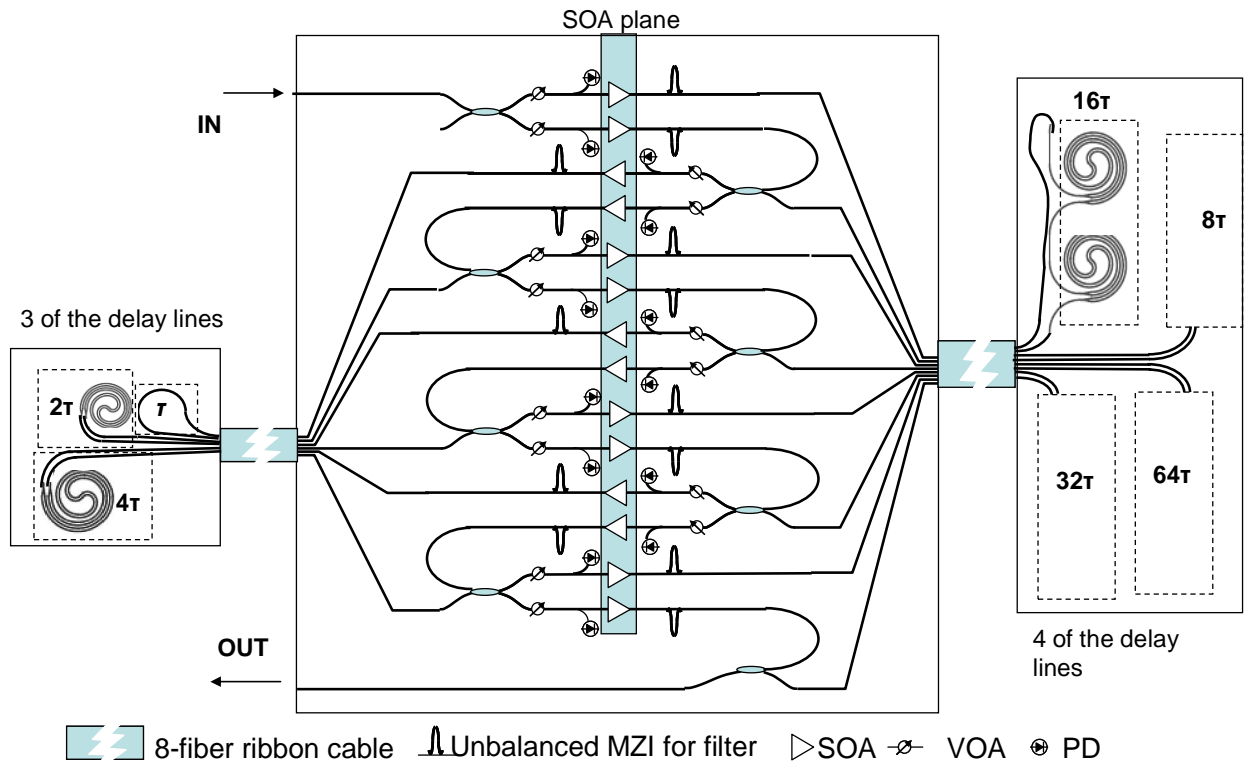


FIGURE 7. PDL architecture based on SOA switching circuits and OptiFlex fiber circuits.

Table 2: Required fiber length difference between the non-delay and delay paths of the PDL bit to achieve typical desired time delays.

| Bit # | Delay (ns) | Fiber length difference (m) |
|-------|------------|-----------------------------|
| 1 | 0.1 | 0.02 |
| 2 | 0.2 | 0.04 |
| 3 | 0.4 | 0.08 |
| 4 | 0.8 | 0.16 |
| 5 | 1.6 | 0.32 |
| 6 | 3.2 | 0.64 |
| 7 | 6.4 | 1.28 |

Note that the required lengths of the optical fiber are not very long. For example for a typical PDL for PAA applications the time delay requirements are 0.1 ns to 6.4 ns (Table 1). Hence a relative path difference between the non-delay and the delay path from 2 cm to 1.28 m, respectively. Table 2 shows the required fiber length difference to achieve the desired time delays. That means that the fiber delays can be implemented in small Optiflex circuits. Note that Optiflex technology is transparent to the fiber used. These fibers can be high dispersion fiber, high bend radius fiber or any other fiber that can be designed to address a specific time delay requirement.

SYSTEM PERFORMANCE

In order to fully characterize the PDL optical but most importantly RF performance several studies are implemented. The study presented in this paper is focused on the

- (1) Design of the physical dimension of the integrated SOA-switched PDL,
- (2) Simulation of the performance of the proposed PDL, and

(3) Initial estimate of fiber length to meet the required delay lines, insertion loss (IL)

(4) Calculation of the PDL module, crosstalk and RF leakage noise.

The SOA response can be as fast as nanoseconds, and hence, it can provide the required switching speed with the minimum insertion loss and maximum on/off isolation. Insertion loss (IL) is a very important parameter for the design of a PDL, because it can directly affect the DR and the SFDR of the overall system. An additional advantage of using SOA elements in the PDL design is the potential to operate as optical amplifiers. Since optical components can introduce optical loss, individual SOA elements can operate at optimized gain in their transparent state (non-blocking state). Thus, SOAs compensate for the possible elemental losses. Moreover, using SOAs in the network the insertion loss budget can be optimized. This allows the use of the optimum optical power impinging on the photodetector, which leads to optimized performance in terms of DR and SFDR, parameters that are important for the health of the PDL network.

Another important parameter for the performance of the PDL network is the crosstalk. There are two types of crosstalk that can impact the PDL network performance. The first one is the optical interchannel crosstalk or leakage noise (that leads to RF leakage noise). The other one is the optical intrachannel crosstalk.

The PAA requirement for the RF leakage noise is < -60 dB, hence an optical leakage noise of < -30 dB is required. As optical leakage noise or interchannel crosstalk we define the leakage of adjacent channels to the channel of interest. In our design, each channel, which drives an antenna element, is physically isolated from the adjacent ones. Thus each channel goes entirely through its own delay line and the system's interchannel crosstalk is non-existent. For the case of the PDL system of Fig. 6(b), where a WDM DEMUX is used to separate the wavelength channels, the isolation of the system depends on the filter characteristics, and in particular the isolation, of the WDM DEMUX. 40 to 50 dB isolation is typical in today's WDM DEMUX's. Furthermore, an additional optical filter at the output ports of the WDM DEMUX can further increase the interchannel isolation.

RF intrachannel crosstalk of < -60 dB is required for PAA control, hence an optical crosstalk of < -30 dB is required. As intrachannel crosstalk we define the crosstalk due to optical leakage of the signal of interest through unwanted paths that eventually recombine with the signal of interest. This crosstalk is generated due to the non-ideal isolation of the switching elements. This crosstalk can eventually recombine and beat with the signal on the photodetector causing deleterious effects. The high isolation of the SOA between its ON and OFF states can provide extinction ratios of up to 50 dB. Hence, the necessary isolation between the two possible paths of each delay element can be accomplished. Fig. 8 shows the number of crosstalk terms of a 7-bit PDL system similar to the one shown in Fig. 7. We assume signal optical power of 0 dBm at the input of the system and -3 dBm at the output. Note that the most significant terms are 6 terms at -53 dBm, which is 50 dB lower than the signal. Looking at the worst case scenario of incoherent addition or accumulation of optical power of all crosstalk terms at the output a total power of -47.55 dBm is estimated that leads to an optical signal to noise ratio of 44.5 dB.

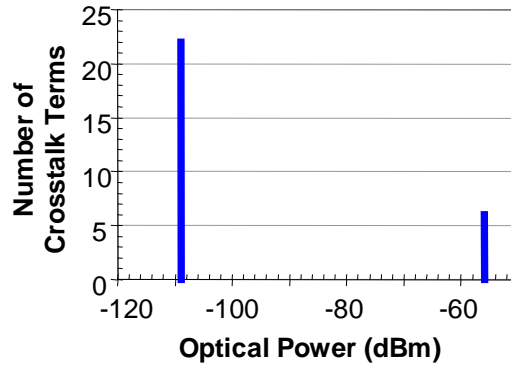


FIGURE 8. Optical power of the intrachannel crosstalk terms for the proposed 7 bit PDL. Maximum power of 6 terms is at -53 dBm.

The Optiflex technology allows for very accurate control of the fiber lengths. In particular the important issue is to accomplish accurate control of the differential delay between the non-delay and the delay paths, as well as among the PDL bits. If we assume a fiber index of refraction of 1.47, for an error of 1 mm in the relative difference of the optical paths the delay error is 0.0049 ns. This is much smaller than the required delay accuracy. Note that with the current Optiflex technology, accuracy of 0.5 mm or better can be accomplished and hence a delay error of 0.0025 ns or smaller is expected.

As was described earlier the SOA operation will have as an effect the generation of ASE noise. We will use optical filters to reduce ASE noise beyond the band of the transmitted optical wavelength and the associated spectral broadening due to the RF frequency of operation. Nevertheless, some of the ASE, passing through the optical filter may affect the noise level and hence the dynamic range (DR) of the system. This is one of the most critical issues that needs further investigation through experiments. Proper selection of component loss, SOA gain and SOA noise figure is required in order to optimize the systems dynamic range. Note that fiber optic links that make use of EDFAs have been demonstrated and perform with very low relative intensity noise and are the preferred approach for high end analog fiber-optic link applications [59]. Note also that integrated versions of PDLs with low count of bits and/or channels and small time delays (in the ps), with the integration of EDFA [60] as well as cascaded SOAs [61] have been demonstrated.

CONCLUSION

We have shown that PDLs technology is a powerful and important technology for implementation of wideband PAA controllers. They solve many of the limitations of electronic controllers and can provide the future, wide bandwidth, compact, lightweight and small size, PAA controller. The emphasis of this paper was on a solution that makes use of commercially available components developed for WDM application, namely the SOA and Optiflex technologies. SOA provide the fast switching speed and high On/Off isolation required, while the Optiflex technology provides the required time delays and time delay accuracy. Excellent interchannel and intrachannel isolation is accomplished and the SOA gain can combat the insertion loss of the optical components. Additional optical filter are required to minimize the effect of ASE noise in the dynamic range performance of the PDLs and further optimization can be accomplished by selecting the proper SOA gain set points and noise figure. Future work relates to the experimental demonstration of this PDL architecture.

REFERENCES

1. <http://www.naval-technology.com/projects/f124/>
2. Pacific Maritime Conference 2006,
<http://www.defence.gov.au/dmo/news/ontarget/feb06/hl2.cfm>.
3. M. Ludwig, C. H. Buck, F. Coromina, M. Suess, "Status and Trends for Space-borne Phased Array Radar," in *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2005*, pp. 4, 12-17 June 2005.
4. Y-Q. Zhao, Z. Peng, "Three-dimensional phased array antenna analysis and simulation," in *2009 3rd IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications*, pp.538-542, 27-29 Oct. 2009.
5. H. Schippers, J. Verpoorte, P. Jorna, A. Hulzinga, A. Meijerink, C. Roeloffzen, R. G. Heideman, A. Leinse, M. Wintels, "Conformal phased array with beam forming for airborne satellite communication," in *International ITG Workshop on Smart Antennas, WSA 2008*, pp.343-350, 26-27 Feb. 2008.
6. E. Loew, W. C. Lee, J. Vivekenandan, J. Moore, J. S. Herd, and S. Duffy, "An airborne phased array radar concept for atmospheric research," in *33rd Conference on Radar Meteorology*, Session 8B, Advanced Radar Technologies and Signal Processing II, Cairns, Australia, 6-10 Aug. 2007.
7. T. C. Cheston and J. Frank, "Phased array radar antennas," in *Radar Handbook, 2nd Ed.*, Chapter 7, Edited by M. I. Scholnik, (New York: McGraw-Hill, 1990).
8. N. Fourikis, *Phased Array Based Systems and Applications*, (New York: John Wiley and Sons, 1997).
9. L. Stark, "Theory of phased arrays," in *Proc. IEEE*, **62**, 1661, 1974.
10. H. Unz, "Linear arrays with arbitrary distributed elements," in *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, **8**, 222-223, Mar. 1960.
11. M. G. Andreasan, "Linear arrays with variable interelement spacings," in *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, **10**, 137-143, Mar. 1962.
12. B. P. Kumar and G. R. Branner, "Design of unequally spaced arrays for performance improvement," in *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, **47**, pp. 511-523, Mar. 1999.
13. A. M. Levine, "Use of fiber optic frequency and phase determining elements in radar," in *Proceedings of the 33rd Annual Symposium on Frequency Control*, 436-443, 1979.
14. W. Ng, et.al., "The first demonstration of an optically steered microwave antenna using true-time-delay," in *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, **9**, 1124-1131, 1991.
15. R. A. Soref, "Programmable time-delay devices," in *Applied Optics*, **23**, 3736-3737, 1984.
16. E. Ackerman, et.al., "Integrated 6-bit photonic true-time-delay unit for lightweight 3-6 GHz radar beamformer," in *IEEE International Microwave Symposium Digest*, **2**, 681-684, 1992.
17. G. A. Magel, et.al., "Integrated optic switches for phased-array applications based on electrostatic actuation on metallic membranes," in *Proc. SPIE Optoelectronic Signal Processing for Phased Array Antennas IV*, B. M. Hendrickson, Ed., **2155**, pp. 107-113, 1994.
18. N. A. Riza and D. L. Polla, "Micromechanical fiber-optic switches for optical networks," in *Proc. SPIE Integrated Optics and Microstructures*, M. Tabib-Azar; D. L. Polla, Eds., **1973**, pp. 108-126, 1992.
19. S. Yegnanarayanan, P. D. Trinh, and B. Jalali, "Recirculating photonic filter: a wavelength-selective time delay for phased-array antennas and wavelength code-division multiple access," in *Optics Letters*, **21**, 740-742, 1996.
20. B. Vidal, D. Madrid, J. Luis Corral, J. Marti, Novel Photonic True-Time-Delay Beamformer Based on the Free-Spectral-Range Periodicity of Arrayed Waveguide Gratings and Fiber Dispersion," in *IEEE Photonics Technology Letters*, **14**, 1614- 1616, November 2002.
21. E. N. Toughlian and H. Zmuda, "Variable time-delay system for broadband phased array and other transversal filtering applications," in *Optical Engineering*, **32**, 613-617, 1993.
22. A. P. Goutzoulis, D. K. Davies, J. M. Zomp, "Prototype fiber optic delay line," in *Optical Engineering*, **28**, 1193- 1202, 1989.
23. J. J. Pan, "Fiber optics for wideband extra high frequency (EHF) phased array," in *Proc. SPIE Optoelectronic signal processing for phased-array antennas*, **886**, 60-69, 1988.
24. R. Soref, "Optical dispersion technique for time-delay beam steering," in *Applied Optics*, **31**, 7395-7397, 1992.

25. M. Y. Frankel and R. D. Esman, "True time-delay fiber-optic control for ultrawideband array transmitter/receiver with multibeam capability," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **43**, 2387 – 2394, 1995.
26. L. J. Lembo, et.al., "Low loss fiber optic time-delay element for phased-array antennas," in *Proc. SPIE Optoelectronic Signal Processing for Phased-Array Antennas IV*, Brian M. Hendrickson; Ed., **2551**, 13-23, 1994.
27. A. P. Goutzoulis and D. K. Davies, "Hardware-compressive 2-D fiber optic delay line architecture for time steering of phased-array antennas," in *Applied Optics*, **29**, 5353-5359, 1990.
28. D. Dolfi, et.al., "Experimental demonstration of a phased-array antenna optically controlled with phase and time technology," in *Applied Optics*, **35**, 5293-5300, 1996.
29. N. A. Riza, "Liquid crystal-based optical control of phased array antennas," in *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, **10**, 1974-1984, 1992.
30. N. A. Riza, "25-Channel nematic liquid crystal optical time-delay unit characterization," in *IEEE Photonics Technology Letters*, **7**, 1285-1287, 1995.
31. N. Madamopoulos and N. A. Riza, "Demonstration of an all-digital 7-bit 33-channel photonic delay line for phased array radars," in *Applied Optics*, **39**, 4168-4181, August 2000.
32. N. A. Riza and N. Madamopoulos, "Photonic delay line using electrically switched gratings in polymer dispersed liquid crystals," in *Optical Engineering*, **37**, 3061-3065, 1998.
33. S. Paquet, et.al., "Optical delay lines in high-silica (SiO₂/Si) waveguides," in *Applications of Photonic Technology*, G. A. Lambropoulos, J. Chrostowski, and R. M. Measures, editors, 1995.
34. W. Wang, et.al., "Waveguide binary photonic true-time-delay lines using polymer integrated switches and waveguide delays," in *Photonics and Radio frequency*, B. M. Hendrickson, editor, 1996.
35. E. N. Toughlian and H. Zmuda, "A photonic variable RF delay line for phased array antennas," in *Journal of Lightwave Technology*, **8**, 1824-1828, 1990.
36. P. A. Cohen, et.al., "Optically controlled serially fed phased array sensor," in *IEEE Photonic Technology Letters*, **8**, 1683-1685 (1996).
37. P. M. Freitag and S. R. Forrest, "A coherent optically controlled phased array antenna system," in *IEEE Microwave & Guided Wave Letters*, **3**, 293-295 (1993).
38. A. Rader, B. L. Anderson, "Demonstration of a linear optical true-time delay device by use of a microelectromechanical mirror array," in *Applied Optics*, **42**, 1409-1416 (2003).
39. J. Song, Q. Fang, S. H. Tao, T. Y. Liow, M. B. Yu, G. Q. Lo, and D. L. Kwong, "Fast and low power Michelson interferometer thermo-optical switch on SOI," in *Opt. Express* **16**, 15304-15311 (2008)
40. S. A. Pappert and B. Krantz, "RF Photonics for Radar Front-Ends," in *Proc. 2007 IEEE Radar Conf.*, pp. 965-970, April 2007.
41. N. Madamopoulos, "Semiconductor optical amplifier-based switched photonic delay lines for microwave photonic applications," in *Proc. SPIE Optical Transmission Systems and Equipment for WDM Networking IV*, Editor: K. I. Sato, **6012**, paper No 33, Boston, October 2005.
42. J. Tong, J. K. Wade, D. L. MacFarlane, S. Hanxing, S. McWilliams, G. A. Evans, M. P. Christensen, "Active Integrated Photonic True Time Delay Device," in *IEEE Phot. Techn. Lett.*, **18**, pp. 1720-1722 (2006).
43. S. P. Muraka, M. Eizenberg, A. K. Sinha, *Interlayer Dielectrics for Semiconductor Technologies*, Academic Press Series in Engineering, Chapter 11, Academic Press, 2003.
44. J. Liu, B. Shi, D. Zhao, and X. Wang, "Optical delay in defective photonic bandgap structures," in *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, **4**, pp. 636–639 (2002).
45. M. Fakhrazadeh, O.M. Ramahi, S. Safavi-Naeini, S.K. Chaudhuri, "Application of the Reflective Spiral Photonic Crystal Delay Line in Beamforming for Phased Array Antennas," in *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium 2006*, pp. 2279 – 2282, 9-14 July 2006.
46. Y. Jiang, B. Howley, Z. Shi, Q. Zhou, R. Chen, M. Chen, G. Brost, and C. Lee, "Dispersion-enhanced photonic crystal fiber array for a true time delay structured X-band phased array antenna," in *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **17**, 187–189 (2005).

47. M. Y. Chen, H. Subbaraman, and R. T. Chen, "Photonic Crystal Fiber Beamformer for Multiple X-Band Phased-Array Antenna Transmissions," in *IEEE Photon. Techn. Lett.*, **20**, pp. 375-377, (2008)
48. Michael J. Connelly in *Semiconductor Optical Amplifiers*, Kluwer Academic Press (2002).
49. A. Poustie, R. J. Manning, R. P. Webb, J. A. Harrison, "All-optical signal processing circuits," in *Proc IEEE/LEOS Summer Topical Meetings 2002 - Fast Optical Signal Processing in Optical Transmission*, pp.3 (2002).
50. R. J. Manning, A. J. Poustie, "40 GHz all-optical shift register with semiconductor optical amplifiers for switching and feedback," in *Proc. Optical Fiber Communication Conference*, **1**, pp. MB1 -MB3 (2001).
51. N. Madamopoulos, "Photonic delay lines using wavelength selective optical network elements and Optiflex technology," in *Proc. SPIE Optical Transmission Systems and Equipment for WDM Networking II*, **5247**, Paper No. 61, Orlando (2003).
52. W. R. Holland, et.al., "Optical fiber circuits," in *43rd Electronic Components & Technology Conference*, pp. 711-717, Orlando (1993)
53. M. A. Shahid, R. A. Roll and G. J. Shevchuk, "Connectorized optical fiber circuits," in *Proc. 44th Electron. Components Technology Conference*, pp. 981 – 985, Washington, DC (1994)
54. W. Delbare, E. Lauwers, Q.Tan, J. Vandewege, J. Verbeke, "Packaging for fiber in board electro-optical interconnections," in *Proc. 6th Annual LEOS Conf.*, pp. 470-471, San Jose, CA (1993).
55. M. A. Shahid, N. R. Lampert, A. W. Carlisle, D.A. Hendrickson, D. M. Emmerich, T. E. McNeil, J. E. George, "Small and efficient connector system," in *Proc. 49th Electronic Components and Technology Conference*, San Diego CA, (1999).
56. R. A. Nordin, W. R. Holland, M. A. Shahid, "Advanced optical interconnection technology in switching equipment," in *J. of Lightw. Techn.*, **13**, 987-994, (1995).
57. M.-J. Li, "Bend-insensitive optical fibers for FTTH applications," in *Proc. SPIE-Broadband Access Communication Technologies III*, Eds:B. B. Dingel; R. Jain; K.Tsukamoto, **7234**, 72340B, (2009).
58. G. Maxwell, et al., "Very low coupling loss, hybrid-integrated all-optical regenerator with passive assembly", in *Proc European Conference on Optical Communications 2002*, Copenhagen, PD.3.5 (2002)
59. *PSI-3600 Series Ultra High Performance Link*, http://www.photonicsinc.com/photonic_links.html, Photonics Systems Inc, Billerica, Massachusetts.
60. M. A. Piqueras, et.al. "Optically beamformed beam-switched adaptive antennas for fixed and mobile broad-band wireless access networks," in *IEEE Trans. on Microw. Theory and Techniq.*, **54**, 887 – 899, (2006).
61. J. Tong, et.al., "Active Integrated Photonic True Time Delay Device," in *IEEE Photon. Techn. Lett.*, **18**, 1720-1722, (2006).

Transmission Lines Exposed to External Electromagnetic Fields in Low Frequencies

George P. Veropoulos^a and Panagiotis J. Papakanellos^b

^a*Division of Academic Studies, Hellenic Navy Petty Officers Academy, 12400 Skaramagkas, Athens, Greece*

^b*Hellenic Air Force Academy, 1010 Dekelia, Athens, Greece*

Abstract. This paper presents a complete review of the standard transmission-line model (STL) for two-wire transmission lines exposed to external electromagnetic fields. The validity of the STL model is limited to frequency ranges where the transverse characteristic dimension of the line is electrically short. This model is derived from Maxwell's equations in terms of voltage and current at the ends of the line. We examine terminated transmission lines, which are excited by nonuniform fields. Numerical results for the induced load voltages show notable deviations from those obtained under the assumption of plane-wave incidence.

Keywords: standard transmission-line model; nonuniform electromagnetic fields; two-wire transmission line; electromagnetic compatibility.

PACS: 41.20.-q

INTRODUCTION

The electromagnetic (EM) field coupling to transmission lines has a great practical interest for many electromagnetic compatibility (EMC) studies and applications (e.g. plethora of the cables associated with most of the audio/video interfaces and host bus adapters).

The analysis of the EM field coupling to transmission lines can be performed exactly via Maxwell's equations. These equations are transformed into integral equations, which may be solved numerically by applying standard numerical techniques (like the well-known moment methods [1]). However, a systematic use of such methods becomes cumbersome due to large storage and computer time requirements.

For sufficiently low frequencies, the problem can be solved using the transmission-line approximation or standard transmission-line model (STL) [2]. The main assumptions for this approach are as follows:

Propagation occurs along the line axis. If the cross-sectional dimensions of the line conductors are electrically small, propagation can indeed be assumed to occur essentially along the line axis only.

The sum of the line currents at any cross section of the line is zero. We are concerned with transmission-line mode currents and neglecting the so-called "antenna mode" ones. This is a good approximation if we wish to compute the load response of the line, because the antenna-mode current is small near the end of line.

The response of the line to the coupled EM fields is quasi-transverse electromagnetic (TEM). The condition that the response of the line is quasi-TEM is satisfied only up to the cutoff frequency, above which higher-order modes begin to appear [2]. In some cases, e.g. finite parallel plates or coaxial lines, it is possible to derive an exact expression for the cutoff frequency, below which only TEM mode exists [3].

For higher frequencies, where the STL model is not valid, many authors have proposed the extension of the STL theory to such frequency ranges through models that retain the simplicity of the STL model [4-6]. In this way, it is possible to overcome serious problems associated with full-wave numerical simulations (computational cost). In this paper, we apply the assumptions of the STL model in a two-wire transmission line. We will first derive the field-to-transmission line coupling equations following the analysis of [2, 7, 8].

DERIVATION OF THE GENERALIZED TELEGRAPHER'S EQUATIONS

We consider the case of a uniform two-wire transmission line, terminated in linear loads Z_1 and Z_2 . The transmission line is defined by the geometrical parameters shown in Figure 1 (namely the wire radius a , the distance between the conductors b and the length s). The line is immersed in a lossy dielectric medium and is illuminated by an external EM field with intensities \vec{E}^{inc} and \vec{H}^{inc} .

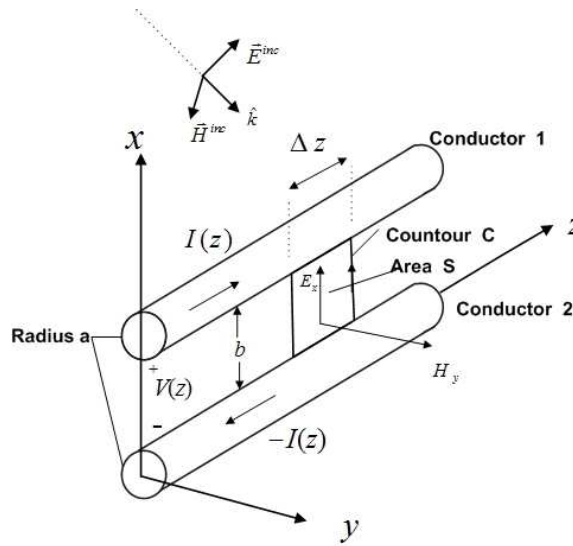


FIGURE 1. Geometry of a two-wire transmission line in an incident EM field.

The problem of interest is the calculation of the induced voltages at the terminations. The total fields \vec{E} and \vec{H} may be decomposed into two different components, the incident fields (\vec{E}^{inc} and \vec{H}^{inc}), which exist in the absence of the transmission line, and the scattered fields (\vec{E}^{sca} and \vec{H}^{sca}), which are generated by the currents and charges flowing on the conductors. To develop equations for the induced line currents in terms of the incident fields \vec{E}^{inc} and \vec{H}^{inc} , Stokes' theorem is used. The theorem states that any vector field \vec{F} satisfies

$$\int_C \vec{F} \cdot d\vec{l} = \iint_S \vec{\nabla} \times \vec{F} \cdot d\vec{S} \quad (61)$$

where C is a closed contour enclosing an area S, as shown in Figure 1. Letting \vec{F} represent the electric field \vec{E} and applying this expression to the pertinent Maxwell's equation for the time-harmonic variation of the form $e^{j\omega t}$, one obtains

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -j\omega\mu_0\vec{H} \quad (62)$$

or

$$\int_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -j\omega\mu_0 \iint_S \vec{H} \cdot d\vec{S} \quad (63)$$

Since the contour has a differential width Δz , (3) can be written as

$$\begin{aligned} & \int_0^b [E_x(x,0,z+\Delta z) - E_x(x,0,z)]dx - \int_z^{z+\Delta z} [E_z(b,0,z) - E_z(0,0,z)]dz \\ & = -j\omega\mu_0 \int_0^b \int_z^{z+\Delta z} H_y(x,0,z) dx dz \end{aligned} \quad (64)$$

The field quantities in (4) are the total fields. Since $b \ll \lambda$, the total line-to-line voltage can be defined in the quasi-static sense as

$$V(z) = -\int_0^b E_x(x,0,z) dx \quad (65)$$

On the perfectly conducting wires, the total tangential electric fields $E_z(b,0,z)$ and $E_z(0,0,z)$ must be zero. Dividing (4) by Δz and taking the limit as Δz approaches zero gives the following differential equation

$$\frac{dV(z)}{dz} = j\omega\mu_0 \int_0^b H_y(x,0,z) dx = j\omega\mu_0 \int_0^b H_y^{\text{inc}}(x,0,z) dx + j\omega\mu_0 \int_0^b H_y^{\text{sca}}(x,0,z) dx \quad (66)$$

where we have decomposed the total magnetic field in incident and scattering components. The last integral in (6) represents the magnetic flux produced by the current $I(z)$ flowing in each conductor. According to the assumptions (a) and (b) of the STL model, the magnetic flux density produced by this current can be calculated using Biot-Savart's law and the result is

$$\Phi(z) = -\mu_0 \int_0^b H_y^{\text{sca}}(x,0,z) dx = L'I(z) \quad (67)$$

The proportionality constant between $\Phi(z)$ and $I(z)$ is the per-unit-length inductance L' [9] of the transmission line. Inserting the inductance term into (6), we obtain the first generalized telegraph's equation

$$\frac{dV(z)}{dz} + j\omega L'I(z) = j\omega\mu_0 \int_0^b H_y^{\text{inc}}(x,0,z) dx \quad (68)$$

To derive the second telegraph's equation, we assume that the medium surrounding the line has permittivity constant $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$. We start from Maxwell's equation

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = j\omega\epsilon\vec{E} + \vec{J} \quad (69)$$

For a closed surface S, Stokes' theorem applied to a vector function \vec{F} gives

$$\oiint_S \vec{\nabla} \times \vec{F} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (70)$$

Letting \vec{F} represent the \vec{H} field of (9) with the closed surface surrounding one of the conductors as shown in Figure 2, we obtain

$$I(z + \Delta z) - I(z) + j\omega\epsilon \iint_{S_1} E_r r d\phi dz = 0 \quad (71)$$

where E_r is the total radial electric field in the vicinity of the wire surrounded by the partial cylindrical surface S1, as shown in Figure 2. The total field can be decomposed into incident and scattered components. Upon dividing by Δz and taking the limits as $r \rightarrow a$ and $\Delta z \rightarrow 0$, (11) it becomes

$$\frac{dI(z)}{dz} + j\omega\epsilon \int_0^{2\pi} E_r^{\text{sca}} a d\phi + j\omega\epsilon \int_0^{2\pi} E_r^{\text{inc}} a d\phi = 0 \quad (72)$$

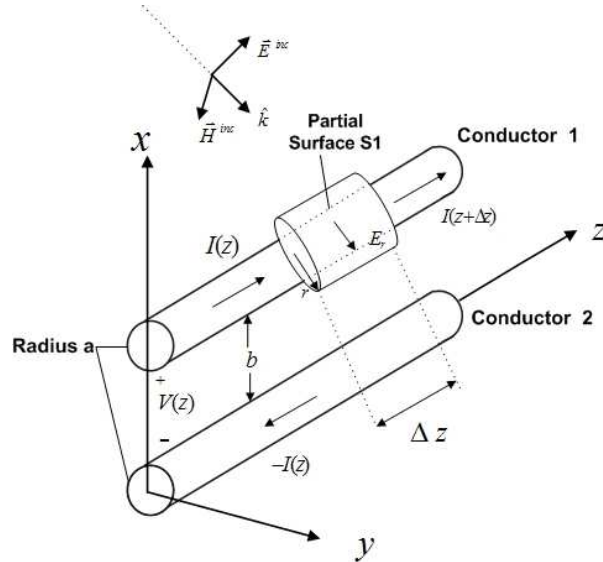


FIGURE 2. Closed surface surrounding one conductor.

According to the assumption (a) of the STL model, the electric field in the vicinity of the line wires can be assumed to be independent of the angle ϕ around the wire. Consequently, the first integral in (12) becomes

$$j\omega\epsilon\int_0^{2\pi} E_r^{\text{sca}} a d\phi = j\omega q'(z) \quad (73)$$

where $q'(z)$ is the linear charge density along conductor. The second integral in (12) involving the incident field is zero because there are no free charges in the vicinity of the wire. Thus, the second telegrapher's equation becomes

$$\frac{dI(z)}{dz} + j\omega q'(z) = 0 \quad (74)$$

We can express this equation in terms of a voltage by introducing a per-unit length capacitance C' [9], which relates the line charge to the scattered component of the line voltage as

$$q'(z) = C'V^{\text{sca}}(z) \quad (75)$$

The total line-to-line voltage is given as

$$V(z) = V^{\text{inc}}(z) + V^{\text{sca}}(z) = -\int_0^b E_x^{\text{inc}}(x,0,z) dx + V^{\text{sca}}(z) \quad (76)$$

Then, (14), (15) and (16) can be combined to give the second telegrapher's equation

$$\frac{dI(z)}{dz} + j\omega C'V(z) = -j\omega C'\int_0^b E_x^{\text{inc}}(x,0,z) dx \quad (77)$$

To obtain a unique solution for the equations (8) and (17), it is necessary to include appropriate boundary conditions relating $V(z)$ and $I(z)$ at the ends of the line. For a finite line of length s , which is terminated in load impedances Z_1 and Z_2 as shown in Figure 3, the following relationships must be included for a unique solution

$$V(0) = -Z_1 I(0), \quad V(s) = Z_2 I(s) \quad (78)$$

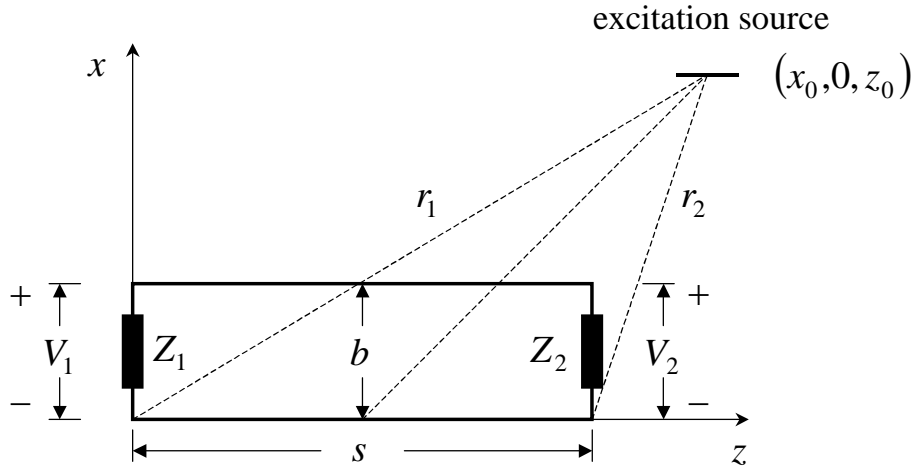


FIGURE 2. Terminated two-wire transmission line.

Note that the negative sign in the first end condition (18) arises from the definition of positive current flow. The coupled equations (8) and (17) can be solved analytically using a chain matrix approach. The result is [7, 8]

$$V_1 = \frac{Z_1}{D} \left\{ - \int_0^s K(z) [Z_c \cosh \gamma(z-s) - Z_2 \sinh \gamma(z-s)] dz + Z_c \int_0^b E_x^{\text{inc}}(x,0,s) dx - (Z_c \cosh \gamma s + Z_2 \sinh \gamma s) \int_0^b E_x^{\text{inc}}(x,0,0) dx \right\} \quad (79)$$

$$V_2 = \frac{Z_2}{D} \left\{ \int_0^s K(z) (Z_c \cosh \gamma z + Z_1 \sinh \gamma z) dz - (Z_c \cosh \gamma s + Z_1 \sinh \gamma s) \int_0^b E_x^{\text{inc}}(x,0,s) dx + Z_c \int_0^b E_x^{\text{inc}}(x,0,0) dx \right\} \quad (80)$$

where $K(z) = E_z^{\text{inc}}(b,0,z) - E_z^{\text{inc}}(0,0,z)$, $D = (Z_1 + Z_2)Z_c \cosh \gamma s + (Z_1 Z_2 + Z_c^2) \sinh \gamma s$ and γ is the complex propagation constant of the transmission line. In cases of a lossless transmission line in free space, the propagation constant is $\gamma = jk$, where $k = 2\pi/\lambda$. With Z_c we denote the characteristic impedance of the transmission line. For the lossless case, this is given by $Z_c = L'/C'$.

TRANSMISSION LINE EXCITATION BY NONUNIFORM FIELDS

In evaluating the response of transmission lines to external fields, it is customary to assume that the incident field is a plane wave. The plane wave can approximate the local behavior of actual fields in the far-field region of realizable emitters. However, this approximation is valid only when studying interactions with objects or devices that are electrically small within the frequency range of the incident fields. Under high-frequency excitation, it is highly likely that operating transmission lines are electrically long within the frequency range of the interfering fields often encountered in practice. On the other hand, only a few studies that take into account nonuniformities in the excitation fields can be found in the open literature [7, 8, 10].

Two different nonuniform excitation fields are examined in this work. The field generated by an elementary electric dipole parallel to the line conductors and the

field produced by an idealized spherical-wave source. The location of the dipole is taken to be at $(x_0, 0, z_0)$ and the far-field components of the excitation field involved in (19) and (20) are given by [11]

$$E_x^{\text{inc}}(x, 0, z) = A \frac{(x - x_0)(z - z_0)}{\left[\sqrt{(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2} \right]^3} e^{-jk\sqrt{(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2}} \quad (81)$$

$$E_z^{\text{inc}}(x, 0, z) = -A \frac{(x - x_0)^2}{\left[\sqrt{(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2} \right]^3} e^{-jk\sqrt{(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2}} \quad (82)$$

where A is a constant analogous to the dipole moment. The corresponding expressions for a linearly polarized spherical wave generated by a point source at $(x_0, 0, z_0)$ are:

$$E_x^{\text{inc}}(x, 0, z) = B \frac{z - z_0}{(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2} e^{-jk\sqrt{(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2}} \quad (83)$$

$$E_z^{\text{inc}}(x, 0, z) = -B \frac{x - x_0}{(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2} e^{-jk\sqrt{(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2}} \quad (84)$$

where B is a constant determining the strength of the spherical wave. Note especially that any choice of dipole or source position (x_0, y_0, z_0) with $y_0 \neq 0$ yields weaker excitation fields; therefore, only worst-case scenarios with $y_0 = 0$ are of interest herein.

A plane-wave excitation field is also considered, which may be expressed as:

$$E_x^{\text{inc}}(x, 0, z) = E_0 \cos \theta_0 e^{-jk(-x \sin \theta_0 + z \cos \theta_0)} \quad (85)$$

$$E_z^{\text{inc}}(x, 0, z) = E_0 \sin \theta_0 e^{-jk(-x \sin \theta_0 + z \cos \theta_0)} \quad (86)$$

where θ_0 is the angle between the z axis and the propagation vector $\vec{k} = k(-\hat{x} \sin \theta_0 + \hat{z} \cos \theta_0)$. The overall factor E_0 denotes the complex amplitude of the plane wave. For the purpose of direct comparison, all three excitation fields considered in this paper are properly normalized (see [12]) so as to be unitary at the center of the lower conductor $(0, 0, s/2)$. In any of the three excitation cases, the integrals in (19) and (20) can be evaluated numerically via standard quadrature routines. Approximate closed-form expressions can be obtained for the second and third integrals in (19) and (20) [12].

RESULTS AND CONCLUSIONS

In this section, we present numerical results for the real and imaginary parts of the induced load voltages V_1 and V_2 . We assume that the excitation source (dipole or spherical-wave source) is located at $(x_0, 0, z_0) = (d, 0, d + s/2)$, where d is a distance

parameter. The results are for a lossless transmission line with $b/\lambda = 1/20$ and $s/\lambda = 100/3$. The line is terminated in matched loads; that is $Z_1 = Z_2 = Z_c$. The position of the source varies with the parameter d , but the angle between the lower conductor axis and the displacement vector from its center $(0, 0, s/2)$ to the source remains unaltered and equal to 45 degrees. The real and imaginary parts of the load voltages V_1 and V_2 for the excitation field of (21) and (22) are shown in Figures 4 and 5, respectively, as functions of d/λ . The horizontal axis in these graphs is in logarithmic scale. As can be seen from Figures 4 and 5, the load responses exhibit rapid variations as d/λ increases from 10 to 100. For larger values of d/λ , the load voltages begin to stabilize slowly and reach their “final” values, which are virtually identical to those occurring for the excitation field of (25) and (26) with $\theta_0 = 3\pi/4$. A similar behavior is observed for the excitation field of (23) and (24) [12]. The relevant plots are not shown here.

Numerous checks have revealed that the oscillating behavior discussed above is representative of what should be expected for typical nonuniform excitation fields and not very short transmission lines. For a fixed position of the excitation source, the spatial frequency of these oscillations decays as s decreases with b unaltered. The oscillations finally disappear, but the load voltages may still deviate significantly from those predicted under the assumption of plane-wave incidence. As an example, results for a line with $s/\lambda = 10/3$ are depicted in Figure 6. All other parameters are the same as above. For brevity, only the left-end load voltage V_1 is shown. As can be seen, both the real and imaginary parts of V_1 still exhibit an evident dependence on d/λ .

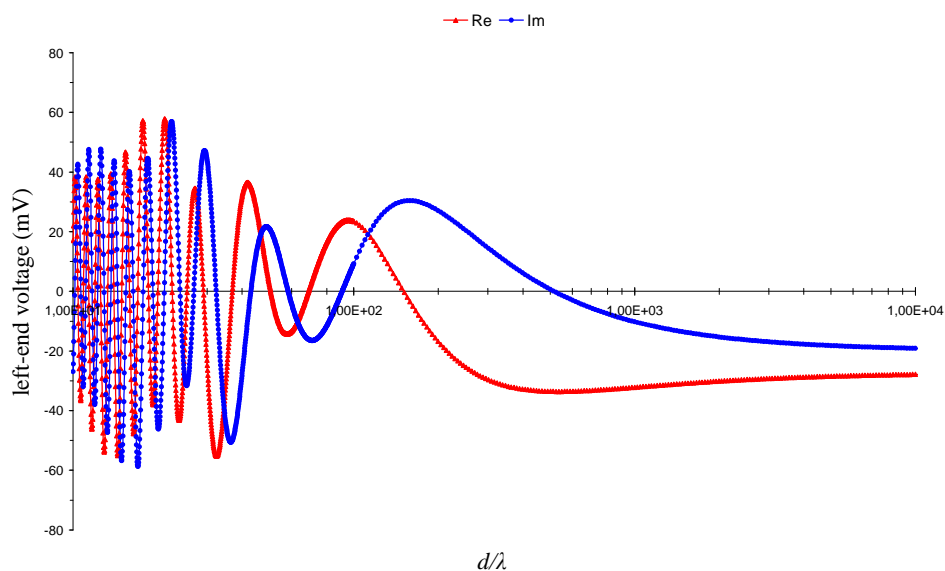


FIGURE 4. Plot of the load voltage V_1 as function of d/λ for the field generated by an elementary dipole and a transmission line with $b/\lambda = 1/20$ and $s/\lambda = 100/3$.

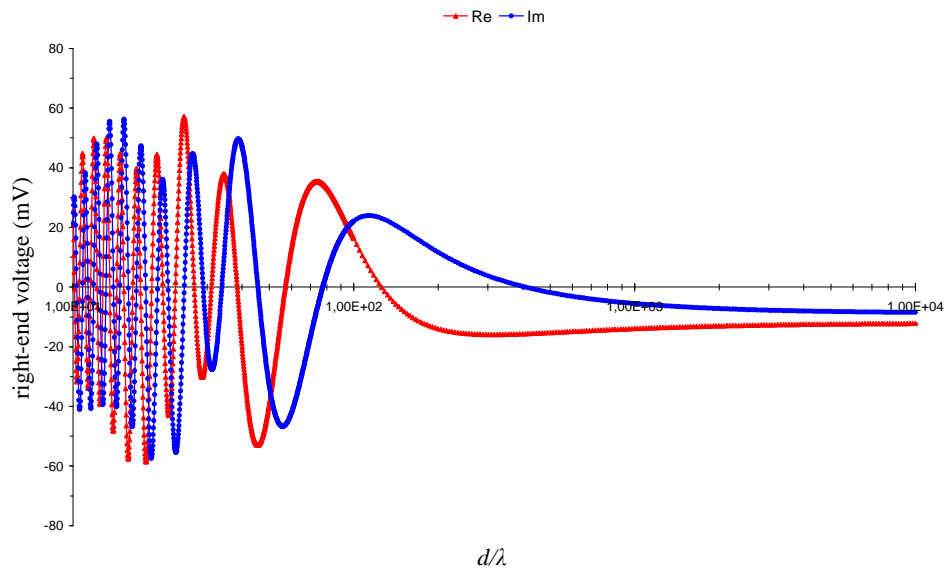


FIGURE 5. Plot of the load voltage V_2 as function of d/λ for the field generated by an elementary dipole and a transmission line with $b/\lambda = 1/20$ and $s/\lambda = 100/3$.

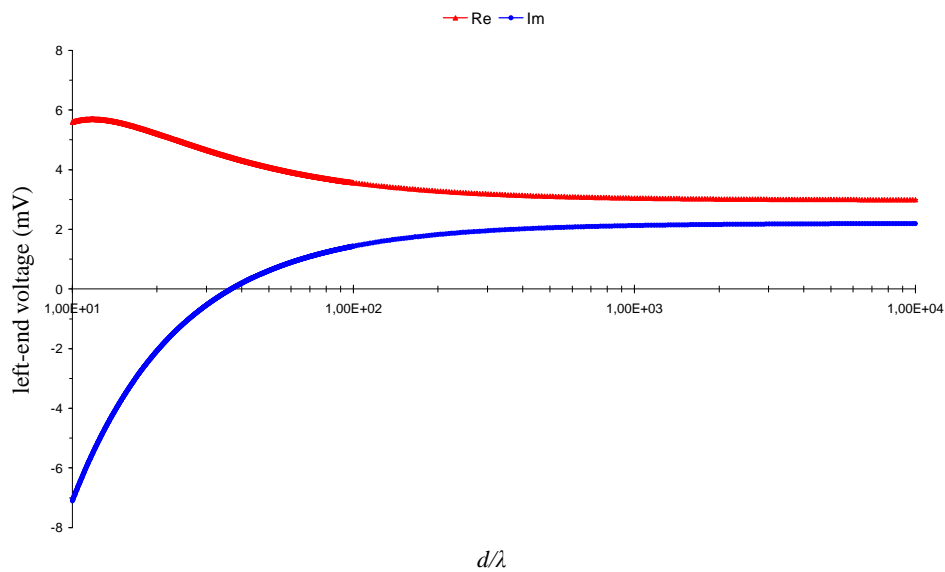


FIGURE 6. Plot of the load voltage V_1 as function of d/λ for the field generated by an elementary dipole and a transmission line with $b/\lambda = 1/20$ and $s/\lambda = 10/3$.

Numerical results presented here manifest that the load response of a two-wire transmission line excited by a nonuniform EM field may differ significantly from that excited by a plane wave arriving from the same direction. The discrepancies become more pronounced for electrically longer lines, a fact that is particularly important in view of the increasing use of microwave frequencies in numerous contemporary applications.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank Lt. Commander of Hellenic Navy D. Filinis for his help and encouragement during the preparation of this paper.

REFERENCES

1. R. F. Harrington, *Field Computation by Moments Methods*, IEEE Press, 1993.
2. F. M. Tesche, M. V. Ianoz, and T. Karlsson, *EMC Analysis Methods and Computational Models*, Wiley, 1997.
3. C. R. Paul, *Analysis of Multiconductor Transmission Lines*, Wiley, 1994.
4. S. Tkatchenko, F. Rachidi, and M. Ianoz, "Electromagnetic field coupling to a line of finite length: Theory and fast iterative solution in frequency and time domains," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, **37**, 509-518 (1995).
5. S. Tkatchenko, F. Rachidi, and M. Ianoz, "High-frequency electromagnetic field coupling to long terminated wires," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, **43**, 117-129 (2001).
6. T. J. Cui, W. C. Chew, "A full-wave model of wire structure with arbitrary cross sections," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, **45**, 626-635 (2003).
7. C. D. Taylor, R. S. Satterwhite, and C. W. Harrison, "The response of a terminated two-wire transmission line excited by a nonuniform electromagnetic field," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, **13**, 987-989 (1965).
8. A. A. Smith, "A more convenient form of the equations for the response of a transmission line excited by nonuniform fields," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, **15**, 151-152 (1973).
9. D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, Wiley, 1998.
10. A. A. Smith, "The response of a two-wire transmission line excited by the nonuniform electromagnetic fields of a nearby loop," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, **16**, 196-200 (1974).
11. C. A. Balanis, *Antenna Theory*, Wiley, 2005.
12. P. J. Papakanellos and G. V. Veropoulos, "On the load response of terminated transmission lines exposed to external electromagnetic fields," *IET Microw. Antennas Propagat.*, to be published.

STANAG 1008 Design Constraints for Pulsed Loads in the Frame of the All Electric Ship Concept

George J. Tsekouras^a, Fotis D. Kanellos^b, John M. Prousalidis^c and Ioannis K. Hatzilau^a

^a*Hellenic Naval Academy, Department of Electrical Engineering and Computer Science, Terma Hatzikiriaku, 18539, Piraeus, Greece*

^b*Hellenic Transmission System Operator, Kastoros 72, Piraeus, 18545, Greece*

^c*National Technical University of Athens, School of Naval Architecture and Marine Engineering, 9, Iroon Polytechniou Street, 157 80, Zografou Campus, Athens, Greece*

Abstract. A design issue of ship electric power systems, conventional or All Electric Ship (AES), is to moderate power quality problems caused by the so-called “pulsed loads”, i.e loads with periodic high power consumption in short time intervals, causing the relative power supply quality phenomenon referred to as “voltage/frequency modulation”. Voltage/frequency modulation may affect the operation of several sensitive electrical ship subsystems.

NATO standard, STANAG 1008, imposes certain design constraints for pulsed loads, so that in a Low Voltage (LV) ship service power supply system the voltage and frequency modulation do not exceed 2% and 0,5%, respectively. These constraints are related with two inequalities involving the power factor of the pulsed load and the ratio between the apparent power of the pulsed load and the full rated apparent power of the supply at the occurrence of the pulse. In a former work of the authors, it was shown that STANAG 1008 guideline for conventional ship electric systems seems to be a method leading to a rough estimation of pulsed loads limits, because it does not take into account certain parameters of the pulsed load and the power grid affecting the entire phenomenon, e.g. the periodicity, the duty cycle of the pulsed load etc.

In this paper, an effort is made to examine and validate the aforementioned STANAG 1008 design constraints in the frame of the All Electric Ship (AES) concept. The voltage and frequency modulation in the LV sub-networks of a AES is studied via simulations in Matlab / Simulink, taking into account various parameters affecting the entire phenomenon such as: pulsed load period, duty cycle and point connection, the technical characteristics of the generators (like subtransient reactance, inertia) and their associated frequency and voltage controllers (like governor and automatic voltage regulator (AVR) gains etc), the service load factor of the generator at the time of the pulsed load occurrence, the equivalent length of the cable between the pulsed load and the generator etc. The respective results are presented and the effects of the respective parameters on the pulsed load limit curve of STANAG 1008 are commented comparing three different cases of

power systems: conventional ship, AES with pulse load-connected to low voltage system, AES with pulse load connected to high voltage system. Finally, general conclusions are derived for the effect of the aforementioned parameters on voltage/frequency modulation and on maximum acceptable pulsed load installed power.

Keywords: All Electric Ship (AES), ship electric power system, STANAG 1008, pulsed loads, voltage and frequency modulation, modeling.

PACS: 84.70.+p

INTRODUCTION

Modern ship buildings are characterized by extensive electrification of the equipment installed onboard. This electrification has emerged a series of electric Power Supply Quality (PSQ) problems, which necessitate extent investigation and development-modification of relative standards. One of the most significant issues of Power Supply Quality (P.S.Q.) for continental and ship electric networks is the “Voltage and Frequency Modulation”. More specifically, “Modulation” is defined as, [7-9], “voltage and frequency periodic or quasi-periodic variations such as might be caused by regularly or randomly repeated loading with frequency less than nominal”. Electric loads causing “modulation” are loads, which require high power for a very short time interval (in the order of a few seconds or even up to some milliseconds) and are known as “*Pulsed Loads*” [4-9]. This operation is often repeated on a regular or almost regular basis introducing a periodicity on the entire phenomenon. Representative examples of pulsed loads are sonars, radars, controlled heaters, electromagnetic aircraft launch systems and electromagnetic guns (such as rail guns, coil guns, lasers, high energy microwaves).

Today, these systems will be among the dominating ones aboard the All Electric Ship (AES), where the most of the installed systems are electrified including propulsion. Pulsed loads of rather small power demand can be directly connected to the electric power grid. On the contrary pulsed loads of larger power demands are interfaced to the network via energy storage devices, pulse forming networks and power electronics, where the power system does not actually interact directly with the pulsed load itself, but with these intermediate systems. Experience from continental and ship power systems indicates that the primary effects of pulse loading are manifested in the areas of voltage flicker, dynamic and transient stability, excitation of torsional frequencies in generators etc [4]. Voltage and frequency modulation may affect the operation of several subsystems of the ship such as radarscopes, communication equipment, missile guidance systems, gear systems etc.

To quantify voltage and frequency modulation, the difference between maximum and minimum value is used as a percentage of the double of the nominal value as shown in (1):

$$M_V = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{2V_n} \quad (87)$$

$$M_f = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{2f_n} \quad (88)$$

Voltages in (1) may be used in rms, peak or mean values.

In Fig. 1, voltage and frequency modulation provoked by a rectangular pulsed load is shown.

Up to now, few standards, namely IEEE-45, STANAG-1008 (of NATO), and USA-MIL-1399 [7-9] have dealt with this issue to some extent, and have released relevant rules. Especially, in IEEE-45

the respective parameters have not been quantified, while USA-MIL-1399 is overlapped with STANAG-1008. The following analysis will be based on STANAG-1008, which is the NATO naval standard dealing with Power Supply Quality (P.S.Q.) issues.

STANAG 1008 (edition 9) [8] defines voltage and frequency modulation and sets the limits for the low voltage (LV) shipboard electrical power systems (440 V, 115 V, 60 Hz, 400 Hz), which are **2%** and **0.5%**, respectively. STANAG 1008 deals only with the *Ship Service Power Supply System* and explicitly excludes electric propulsion systems. However, up-to-now there is no a NATO standard or other navy standard for the All Electric Ship power system dealing with electric propulsion and high voltage (HV) shipboard electrical power systems (rms line to line voltages > 1000 V). Under these conditions STANAG 1008's rules can be used as a reference, especially taking into consideration that in AES networks there will be a LV service power system with equipment of more or less similar technology to that of the conventional ships, and therefore, with similar operating constraints concerning voltage and frequency modulation.

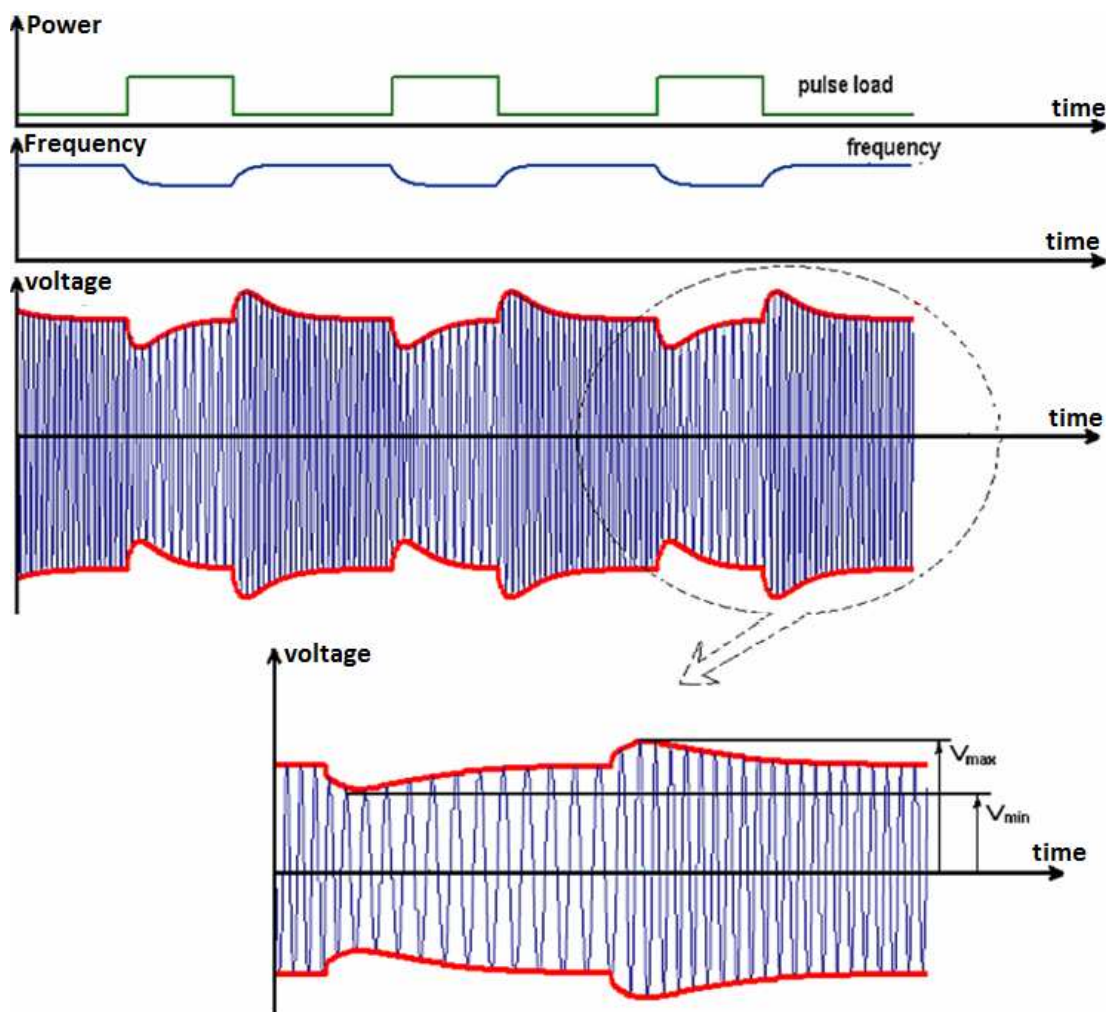


FIGURE 16. Frequency and voltage modulation provoked by a rectangular pulsed load.

Specifically, STANAG 1008 [8: Annex B § 9.d], design constraints are derived presuming that voltage/frequency modulation do not to exceed the above-mentioned limits if reactive and active power of the pulsed load satisfy the following inequalities:

$$\text{Voltage modulation: } \Delta Q < 0.065 \cdot S_S \quad (89)$$

$$\text{Frequency modulation: } \Delta P < 0.25 \cdot S_S \quad (90)$$

where ΔP and ΔQ are the active and the reactive power of the pulsed load respectively, S_S is the full rated apparent power of the supply at the occurrence of the pulsed load. Alternatively the inequalities (3) and (4) can be written as:

$$\text{Voltage modulation: } \cos \phi > \sqrt{1 - \left(a \cdot \frac{1}{\Delta S} \right)^2} : a = 0.065 \quad (91)$$

$$\text{Frequency modulation: } \Delta S \cdot \cos \phi < \beta : \beta = 0.25 \quad (92)$$

where ΔS is the apparent power of the pulsed load referred to the full rated apparent power of the supply at the occurrence of the pulsed load, thereafter called *pulsed load relative apparent power*, $\cos \phi$ is the power factor of the pulsed load, α and β are the two parameters affecting the dimension of acceptable and unacceptable areas of operation; for STANAG they are fixed at 0.25 and 0.065, respectively.

In Fig. 2 the graphical representation of inequalities is shown, where the acceptable and unacceptable range of pulsed load installed capacity is highlighted.

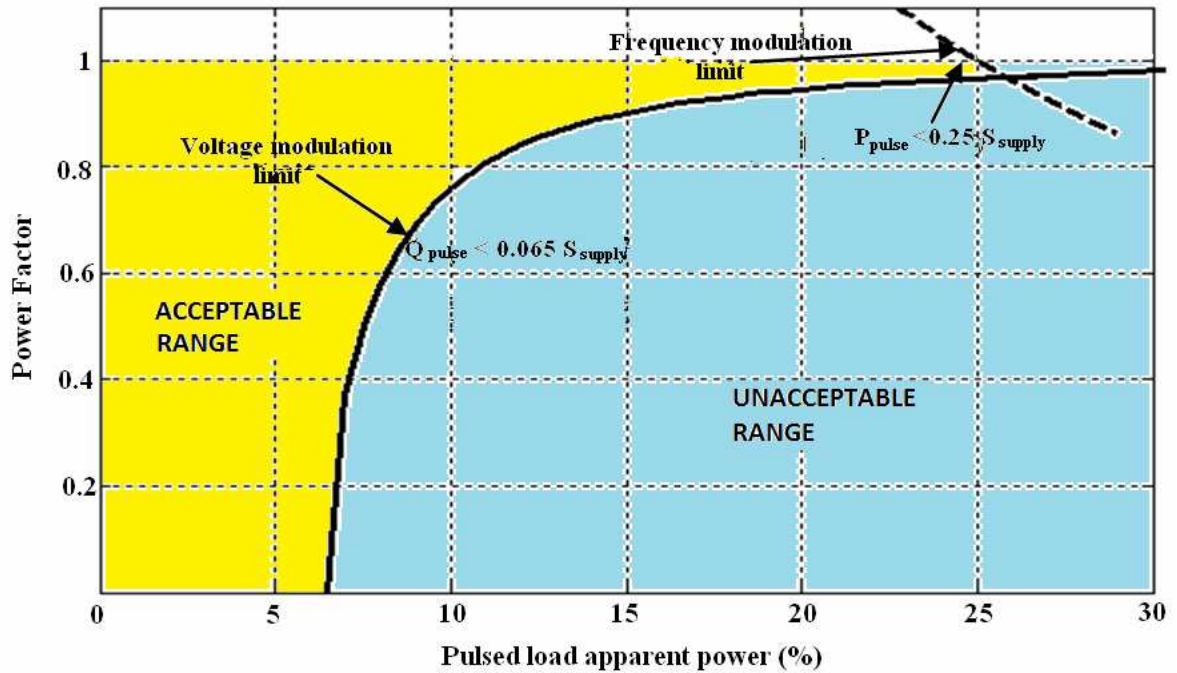


FIGURE 17. Limit curves for pulsed load operation according to inequalities (5) and (6).

In a former work of the authors [10], a conventional ship electric system, comprising only low voltage electric power generation without electric propulsion, it was shown that STANAG 1008 guideline seems to be a method leading to a rather rough estimation of pulsed loads limits, as it considers only the pulsed load relative apparent power ΔS and the power factor of the pulsed load

$\cos\phi$, but it does not take into account certain additional parameters affecting the entire phenomenon such as [2]:

- periodicity of modulation (pulse repetition frequency),
- duration of the pulsed load (duty cycle),
- profile of the pulsed load,
- point of connection of the pulsed load onto the electric grid,
- system impedance (such as cables equivalent impedance, generators sub-transient impedance etc.),
- operational characteristics of the generators and their associated frequency and voltage controllers,
- loading of the generator at the time of pulsed load occurrence.

In this paper, an effort is made to examine and validate the aforementioned STANAG 1008 design constraints in the frame of the All Electric Ship (AES) concept, where the AES includes high voltage (HV) electric power generation, low voltage (LV) ship service power supply system, HV electric propulsion, HV or LV pulsed loads. The voltage and frequency modulation in the LV sub-networks of an AES is studied via simulations in Matlab / Simulink [12], taking into account various parameters affecting the entire phenomenon such as: the periodicity, the duty cycle, the time-profile and the point of the connection of the pulsed load, the technical characteristics of the generators (like sub-transient reactance, inertia) and their associated frequency and voltage controllers (like governor and automatic voltage regulator (AVR) gains etc), the loading factor of the generator at the time of the pulsed load occurrence, the equivalent length of the cable between the pulsed load and the generator etc.

Thus, a simplified parametrical model of the electrical power system of a naval warship, comprising a pulsed load of rectangular profile (which is directly connected to the electric network), is developed, in order to study the phenomenon. Concerning the topology of the ship electric network, three different cases of power systems are considered:

- conventional, where the LV generator set supplies only a conventional service load and a pulsed load,
- AES with pulsed load in low voltage system, where the HV generator set supplies a HV propulsion load and a LV conventional service load along with a pulsed load,
- AES with pulsed load in high voltage system, where the HV generator set supplies a LV conventional service load and a HV propulsion load along with a pulsed load.

In all cases the pulsed load is directly connected to the electric network. Different simulations are run by varying several of the aforementioned parameters. The respective results are presented and the effects of the respective parameters on the pulsed load limit curve of STANAG 1008 are commented comparing the three different types of power systems examined.

Finally, general conclusions are derived for the effect of the aforementioned parameters on voltage/frequency modulation and on maximum acceptable pulsed load installed power. Moreover, suggestions are made for the improvement of the respective section of this standard.

TOPOLOGY OF THE SHIP ELECTRIC NETWORK

Next, the electric power systems of a conventional ship and an All Electric Ship are simplified as shown in Fig. 3, 4 and 5, without affecting the accuracy of the obtained results. In case of All Electric Ship pulse load is considered to be connected in low or high voltage systems as shown in Figs 4 and 5, respectively. The abbreviation “MP” represents the measurements points where voltage modulation is estimated.

The equivalent model of the conventional ship consists of:

- A generating set, which is aggregated in a 2 MVA, 440 V (low voltage) synchronous generator driven by diesel engine (equivalent to typical generating sets). The generator's parameters are summarized in Table 1.
- A low voltage network, which is aggregated in two three-phase sub-networks operating at 440 V and 115 V (the last one includes a 800 kVA, 440/115 V transformer of delta-star connection for its supply, where the transformer equivalent impedance is $0.008+j\cdot 0.04$ p.u.). The equivalent impedance of the cable of the first sub-network is equal to $0.03+j\cdot 0.07$ Ohm/km, while the respective one of the second sub-network is equal to $0.05 +j\cdot 0.175$ Ohm/km referred to 440 V system. The respective lengths are L_{440} and L_{115} , and they are considered as variables.
- A service load, which is divided into two parts: 440 V service load and 115 V service load using the factor n_{LV440} , which is the fraction between the apparent power of 440 V service load and the respective one of the total service load. The power factor equals to 0.80 for the base scenario.
- A pulsed load of rectangular profile, as it is shown in Fig. 6, which is connected to the 440 V network.

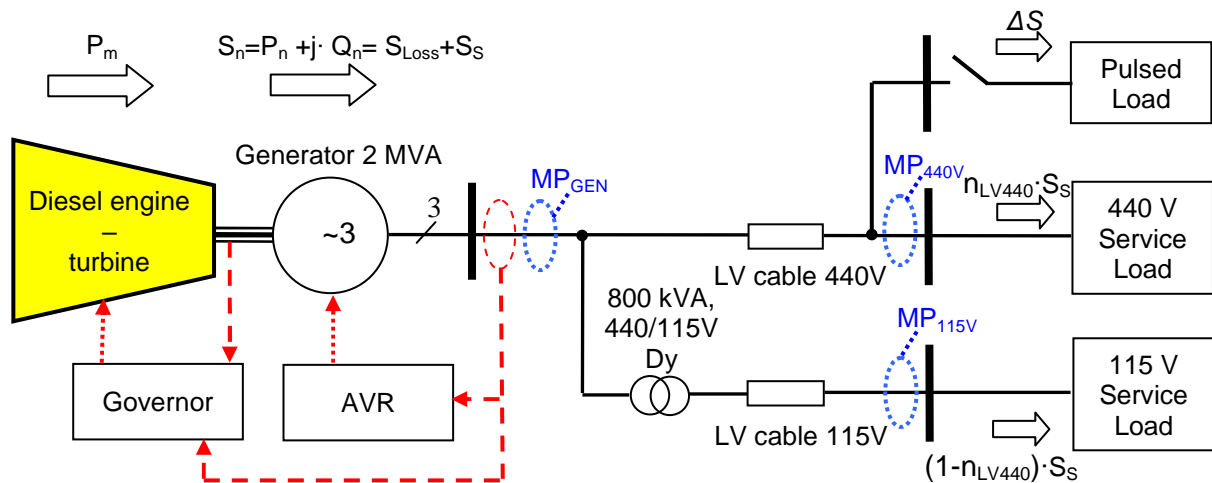


FIGURE 18. Equivalent topology of a conventional ship electric power system.

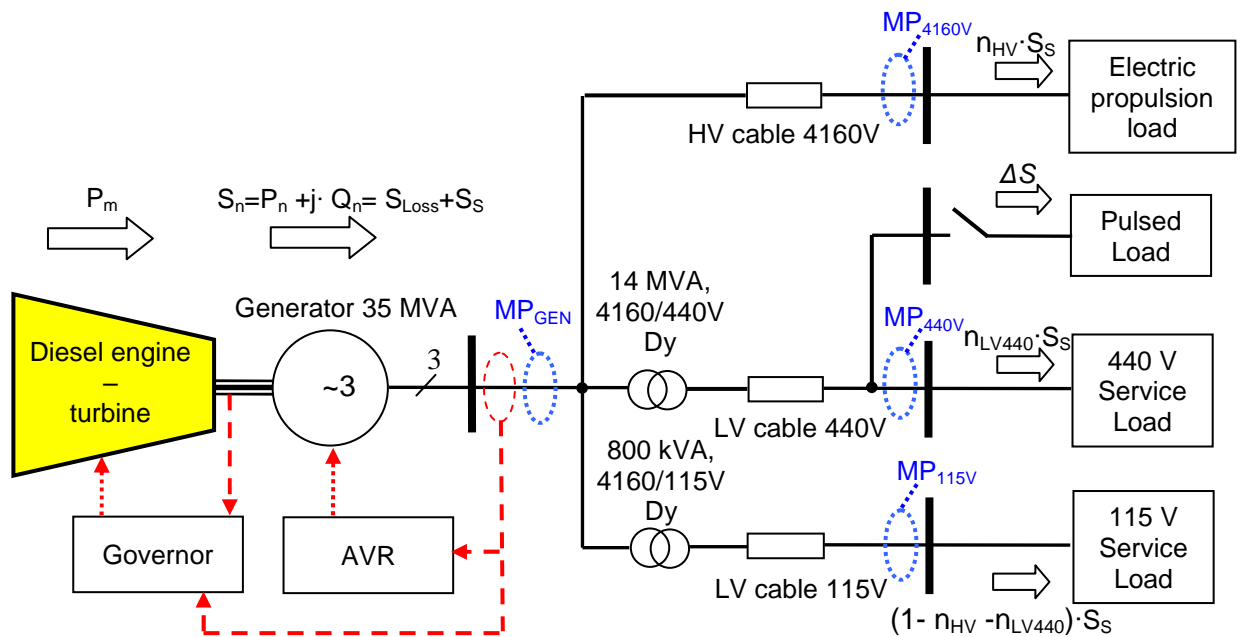


FIGURE 19. Equivalent topology of an AES electric power system with pulsed load in LV 440 V network.

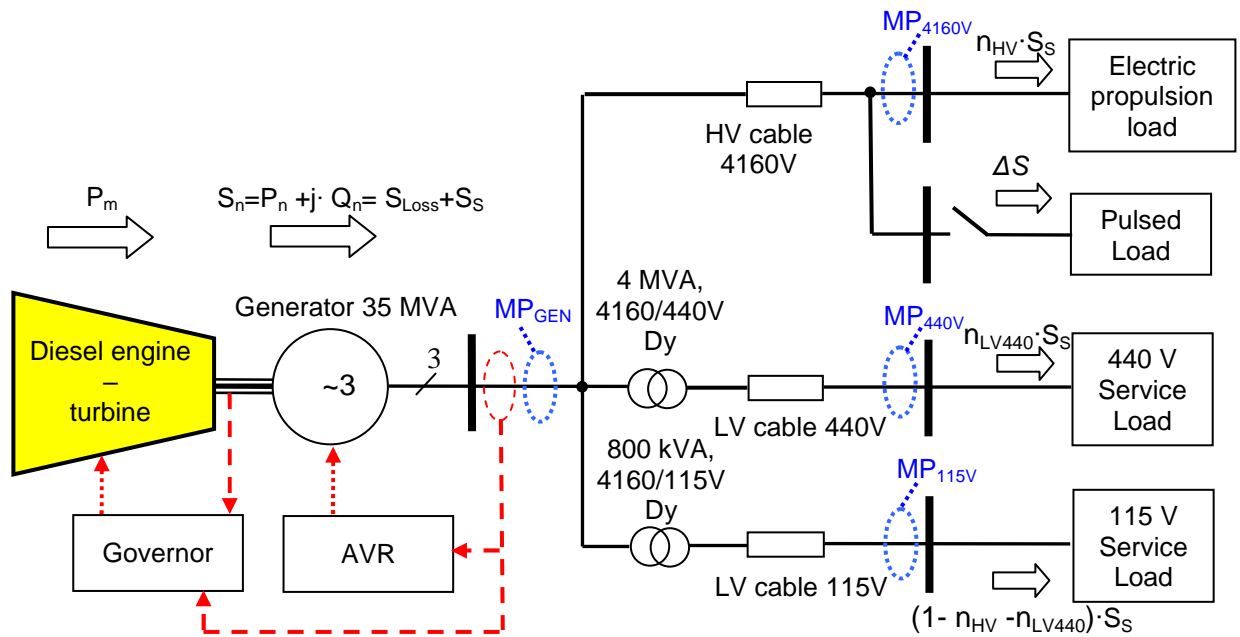


FIGURE 20. Equivalent topology of an AES electric power system with pulsed load in HV 4160 V network.

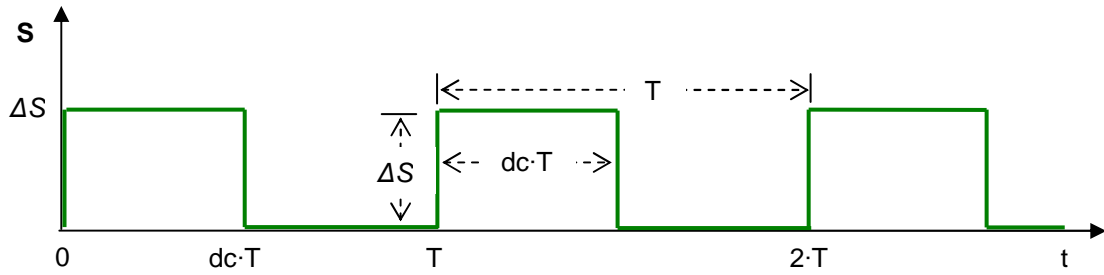


FIGURE 21. Pulsed load typical profile.

TABLE (1). Generator's typical technical data for different topologies.

| Ship power system | Conventional | AES with pulsed load in LV network | AES with pulsed load in HV network |
|-----------------------|--------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Parameter | | Values | |
| S_n (MVA) | 2 | 35 | 35 |
| V_n (V) | 440 | 4160 | 4160 |
| r_a (p.u.) | 0.0036 | 0.00285 | 0.00285 |
| X_d (p.u.) | 1.56 | 1.305 | 1.305 |
| X'_d (p.u.) | 0.296 | 0.296 | 0.296 |
| X''_d (p.u.) | 0.177 | 0.150 | 0.150 |
| X_q (p.u.) | 1.06 | 0.475 | 0.475 |
| X''_q (p.u.) | 0.177 | 0.150 | 0.150 |
| X_l (p.u.) | 0.052 | 0.180 | 0.180 |
| T'_{do} (sec) | 3.7 | 1.7 | 1.7 |
| T''_{do} (sec) | 0.05 | 0.05 | 0.05 |
| T''_{qo} (sec) | 0.05 | 0.1 | 0.1 |
| H (sec) | 1.07 | 1.5 | 1.5 |
| F (p.u.) | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| Pole pairs (-) | 4 | 4 | 4 |

The equivalent model of the AES with pulse load in low voltage system consists of:

- A generating set, which is aggregated in a 35 MVA, 4160 V (high voltage) synchronous generator driven by diesel engine (equivalent to typical generating sets). The generator's parameters are summarized in Table 1.
- A high voltage network of 4160 V, which supplies the electric propulsion. Cable impedance is equal to $0.0375+j \cdot 0.0875$ Ohm/km. The respective length is L_{HV} .
- A low voltage network, which is aggregated in two three-phase sub-networks of 440 V and 115 V. Each one uses a transformer of delta-star connection for its supply (14 MVA, 4160/440 V for the first one and 800 kVA, 4160/115 V for the second one, while the equivalent impedance for all cases is $0.01+j \cdot 0.05$ p.u. of each transformer). Cable impedance of the first sub-network is equal to $0.075+j \cdot 0.175$ Ohm/km, while the respective one of the second sub-network is equal to $0.15 +j \cdot 0.35$ Ohm/km, all referred to 4160 V system. The respective lengths are L_{LV440} and L_{LV115} , which are considered as variables.
- A service load, which is divided into three parts: 4160 V electric propulsion load, 440 V conventional service load and 115 V conventional service load. They are defined by the factors n_{HV} and n_{LV440} , which are the fractions between the apparent power of the propulsion load and the respective one of the total service load, and between the apparent power of 440 V service load and the respective one of the total service load. The power factor is constant and equal to 0.75.
- A pulsed load of rectangular profile, as it is shown in Fig. 6, which is connected to the 440 V network.

The equivalent model of the AES with pulse load in high voltage system consists of:

- A generating set, which is aggregated in a 35 MVA, 4160 V (high voltage) synchronous generator driven by diesel engine, similar to the respective one of AES with pulse load in low voltage system.
- A high voltage network of 4160 V, which supplies the electric propulsion. Cable impedance is equal to $0.0375+j\cdot 0.0875$ Ohm/km. The respective length is L_{HV} .
- A low voltage network, which is aggregated in two three-phase sub-networks of 440 V and 115 V, similar to the respective one in case of AES with pulse load in low voltage system, except the 4160/440 V transformer, with 4 MVA nominal apparent power instead of 14 MVA.
- A service load, which is similar to the respective one of AES with pulse load in low voltage system.
- A pulsed load of rectangular profile, as it is shown in Fig. 6, which is connected to the 4160 V network.

The generator control system consists of the governor system and the automatic voltage regulator (AVR) and is similar in the three electrical systems. The respective block diagrams are shown in Fig. 7 and 8, while the respective parameters are summarized in Table 2.

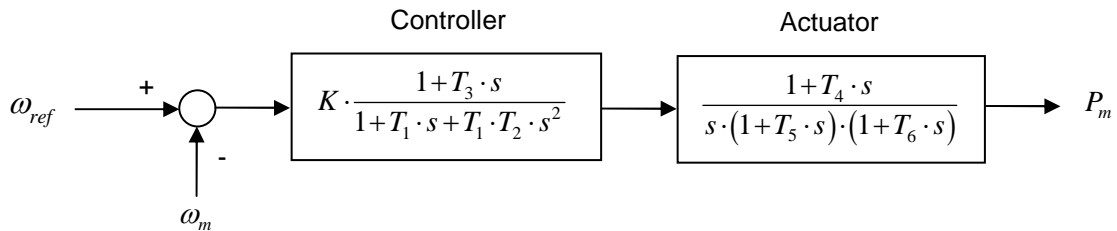


FIGURE 22. Governor block diagram, where ω_{ref} is the reference rotating speed, ω_m the measured rotating speed, P_m the mechanical power.

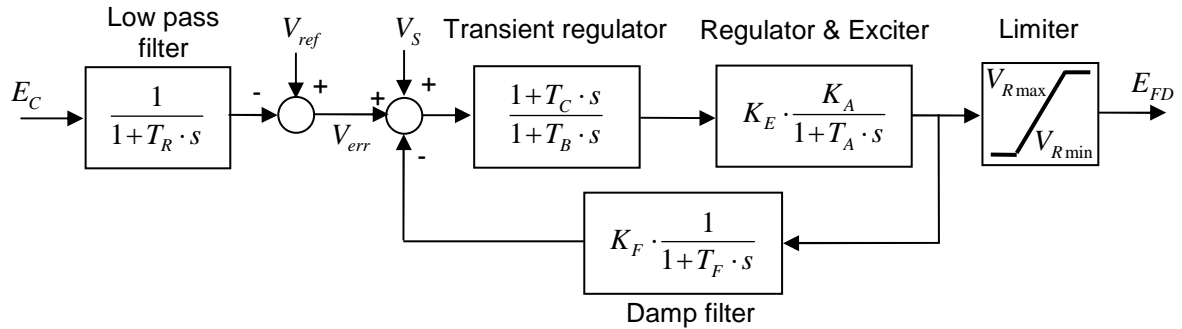


FIGURE 23. Automatic Voltage Regulator block diagram, where E_{FD} is the field voltage reference, V_{ref} the voltage reference, V_S the stabilization voltage signal, V_{err} the error voltage, E_C the measured voltage.

TABLE (2). Parameters of the governor and AVR according to the block diagrams of Fig. 7, 8.

| Governor | | AVR | |
|-------------|-------|-------------|-------|
| Parameter | Value | Parameter | Value |
| K | 40 | K_A | 200 |
| T_1 (sec) | 0.01 | K_E | 1 |
| T_2 (sec) | 0.02 | K_F | 0.001 |
| T_3 (sec) | 0.2 | T_A (sec) | 0.001 |
| T_4 (sec) | 0.25 | T_B (sec) | 0 |
| T_5 (sec) | 0.009 | T_C (sec) | 0 |

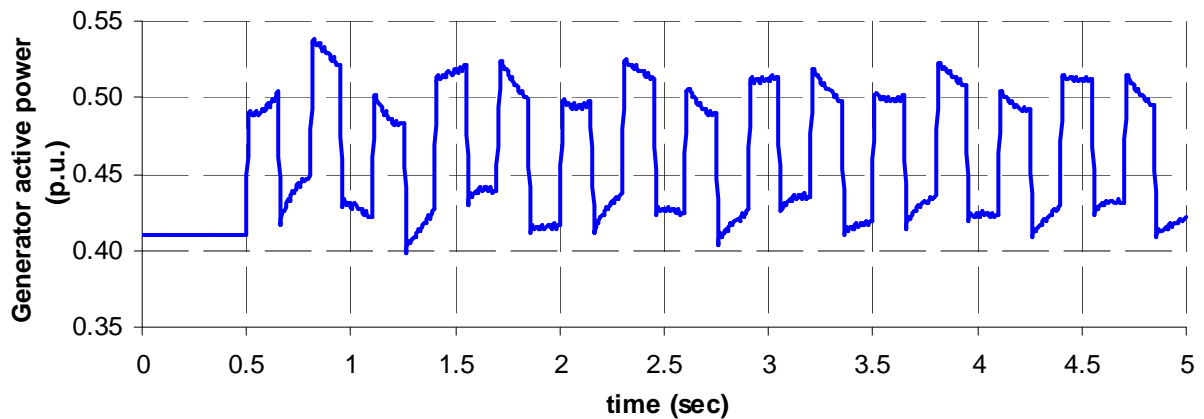
| | | | |
|-------------|--------|-------------------|-------|
| T_6 (sec) | 0.0384 | T_F (sec) | 0.1 |
| | | T_R (sec) | 0.020 |
| | | V_{Rmax} (p.u.) | 6.0 |
| | | V_{Rmin} (p.u.) | -6.0 |

Indicative results concerning repetitive pulsed load application are shown in Fig. 9 for the basic operation scenario of AES with the pulsed load installed at the high voltage system. The generator active power, the system frequency, the root mean square (RMS) voltages at the generator bus, the high voltage bus, the 440V service load bus and the 115V service load bus are presented.

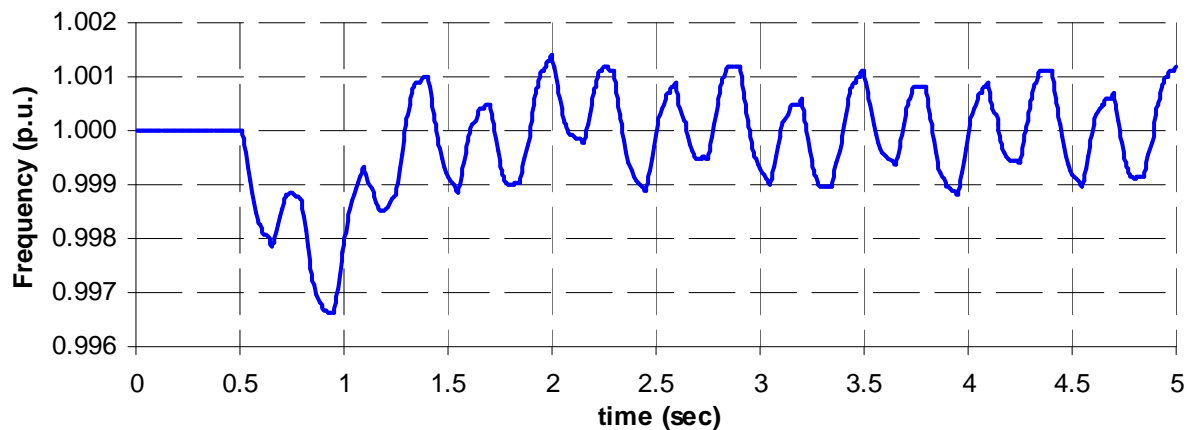
Basic scenario includes the following assumptions: initial service base load is 0.40 p.u. (divided in 85% in high voltage-propulsion service load, 10% in 440 V service load and 5% in 115V service load), the system frequency is 60 Hz, the equivalent length is 100 m for each network cables, while the pulsed load apparent load equals 0.10 p.u., the respective duty cycle 50% and the respective period 0.3 sec. It is noted that the pulsed load is activated at 0.5 sec for first time.

It is obvious from Fig. 9 (a) to 9 (c) that immediately after pulsed load application a sub-transient phenomenon occurs which should be included in voltage/frequency modulation estimation. The governor and the automatic voltage regulator are trying to stabilize the frequency and the voltage close to their nominal values, but the pulsed load causes significant deviations. The patterns of the voltage at the load buses follow the respective one of the generator bus voltage but with smaller mean values.

Similar results can be obtained from the other two topologies.



(a)



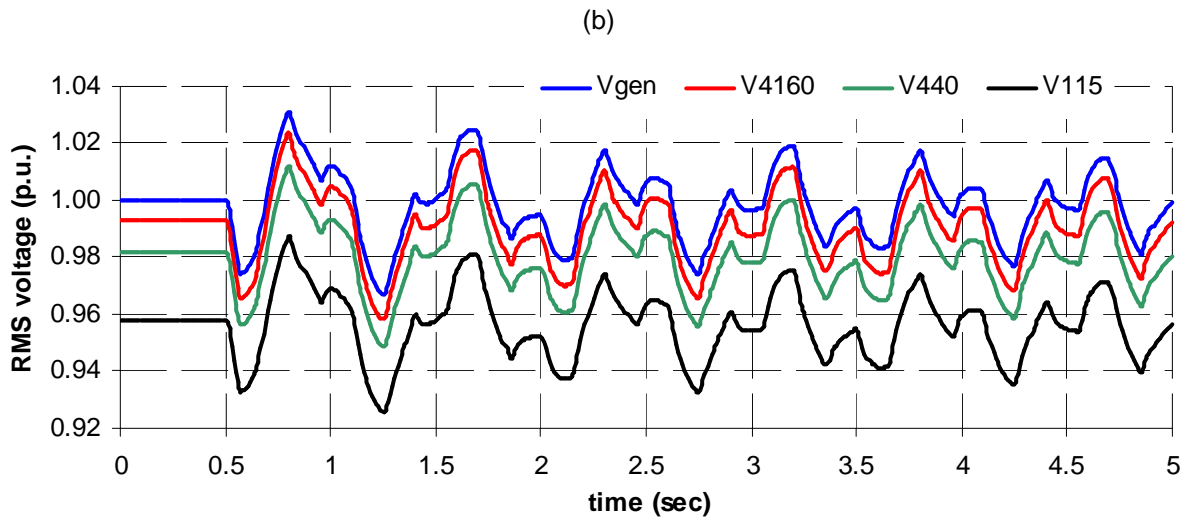


FIGURE 24. (a) Generator active power, (b) frequency, (c) root mean square (RMS) voltages at the generator bus (Vgen), the high voltage bus (V4160), the 440V low voltage bus (V440) and the 115V low voltage bus (V115) vs time for the basic operation scenario of AES with pulsed load in HV network (Service base load = 0.40 p.u., system frequency = 60 Hz, Pulsed load apparent load = 0.10 p.u., duty cycle = 50%, pulsed load period = 0.3 sec, $L_{HV} = L_{LV440} = L_{LV115} = 100$ m, $n_{HV} = 0.85$ and $n_{LV440} = 0.10$).

SIMULATION RESULTS FOR THE THREE DIFFERENT TOPOLOGIES OF THE SHIP ELECTRIC NETWORK

The electrical networks shown in Fig. 3, 4, 5 are simulated for different operating scenarios with a rectangular pulsed load. The obtained results concerning pulsed load limits are compared with the power factor – pulsed load apparent power limit curve proposed by STANAG 1008 (inequalities (5), (6) and Fig. 2). The standard voltage / frequency modulation limits, 2%, 0.5% are considered for all examined operating scenarios and network topologies measured and are measured at 440 V low voltage service load bus. Typical operation parameters of the basic scenario for each ship topology are presented in Table 3.

TABLE (3). Typical values of operation parameters of the basic scenario for each ship topology.

| Ship power system Parameter | Conventional [2] | AES with pulsed load in LV network Values | AES with pulsed load in HV network |
|--|---------------------|---|---------------------------------------|
| Service load factor of the generator (without losses) at the time of the pulsed load occurrence n_{serv} (-) | 0.50 | 0.40 | 0.40 |
| Ratio of HV service load apparent power to the total one n_{HV} | - (no existence) | 0.85 | 0.85 |
| Ratio of 440V service load apparent power to the total one n_{LV440} | 0.75 | 0.10 | 0.10 |
| Ratio of 115V service load apparent power to the total one n_{LV115} | 0.25 | 0.05 | 0.05 |
| Service load power factor (-) | 0.80 | 0.80 | 0.80 |
| HV cable equivalent length L_{HV} (m) | - (no existence) | 100 | 100 |
| 440V cable equivalent length L_{440} (m) | 100 | 100 | 100 |
| 115V cable equivalent length L_{115} (m) | 50 | 100 | 100 |
| Pulsed load period (sec) | 0.3 | 0.3 | 0.3 |

| | | | |
|--|-------|-------|-------|
| Pulsed load duty cycle (%) | 50 | 50 | 50 |
| Generator's sub-transient reactance $X_d' = X_q'$ (p.u.) | 0.177 | 0.150 | 0.150 |
| Generator's inertia H (sec) | 1.07 | 1.50 | 1.50 |
| Governor's gain K (-) | 40 | 40 | 40 |
| AVR gain K_A (-) | 200 | 100 | 200 |
| Generator's field voltage upper bound $V_{Rmax} = - V_{Rmin}$ (p.u.) | 5.0 | 6.0 | 6.0 |

The time-profile of the pulsed load is rectangular, because other shapes such as triangular etc, lead on milder transient phenomena and smaller modulation effects for the same peak apparent power, duty cycle and period. Pulsed load can be connected either to the high voltage network or to the 440 V low voltage network. The 115V low voltage has already been excluded for all examined topologies, because the pulsed load strains the respective equipment hard. Generally, only one basic parameter is changed and the rest are maintained constant, examining in this way the extent that the specified parameter affects the results. Before any of the following simulations the system is initialized properly and then it is simulated for a time interval of 2.5 sec (except for cases that pulsed load period greater than 0.6sec is examined) iteratively for different pairs of values of apparent power and power factor of the pulsed load, until STANAG 1008 modulation limits are reached. In this way the actual corresponding power factor – pulsed load apparent power curve point is determined. It is noted that the usual values of the parameters almost always activate the voltage modulation inequality.

Following, a sensitivity analysis of each parameter is provided separately.

SERVICE LOAD FACTOR OF THE GENERATOR AT THE TIME OF THE PULSED LOAD OCCURRENCE

The service load factor of the generator before the application of the pulsed load is considered as a parameter. Specifically, this parameter takes into account only the service load in any network, without the losses of the cables and of the windings of the generator and the transformers. Because of the losses of the system the mechanical input power of the diesel engine will be slightly bigger than the power of the service load.

For the case of the AES with the pulsed load in HV network, service loads of 5%, 10%, 20%, 30%, 40% (basic scenario), 50%, 60%, 70%, 80% are considered and the system is simulated repeatedly, so that the respective power factor – pulsed load apparent power curves are extracted, as shown in Fig. 10. It is obvious that the increase of the base load tends to decrease the unacceptable operation area for small values of service load (between 10% and 30%). For very small values (as 5%) or big values (above 40%) the unacceptable operating area increases making the respective curve of STANAG 1008 quite insufficient. This does not happen for all respective values, i.e. 60%, due to the non-linear behavior of voltage / frequency modulation with the service load factor.

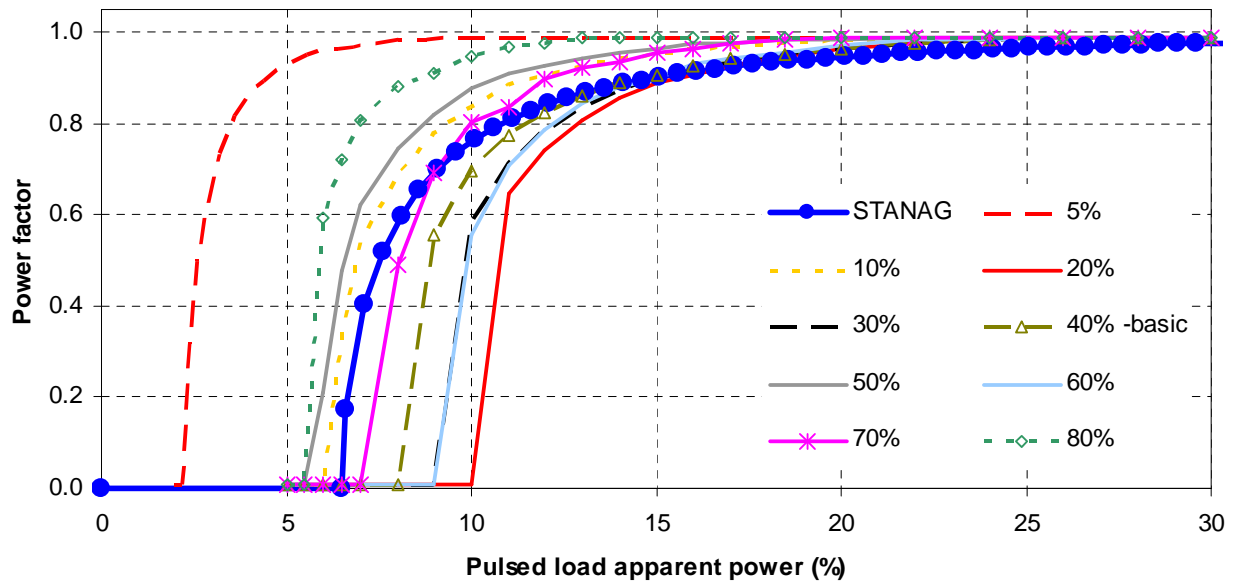


FIGURE 25. Power factor vs pulse load apparent power for different values of the service load factor of the generator in the case of the AES with pulsed load in HV network.

In case of the AES with the pulsed load installed at LV network, the system is simulated repeatedly for 5%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80% service base loads and the respective curves are extracted, as it is shown in Fig. 11. It is obvious that the respective curve-and the unacceptable operating area are underestimated in STANAG 1008. However, the respective curves are located in a narrower area than the previous ones of Fig. 10.

For the case of the conventional ship, as the authors have already mentioned in [2] and as it is shown in Fig. 12, the increase of the base load tends to decrease the unacceptable operating area. In this case the unacceptable operating area of the respective STANAG 1008 curve is quite sufficient.

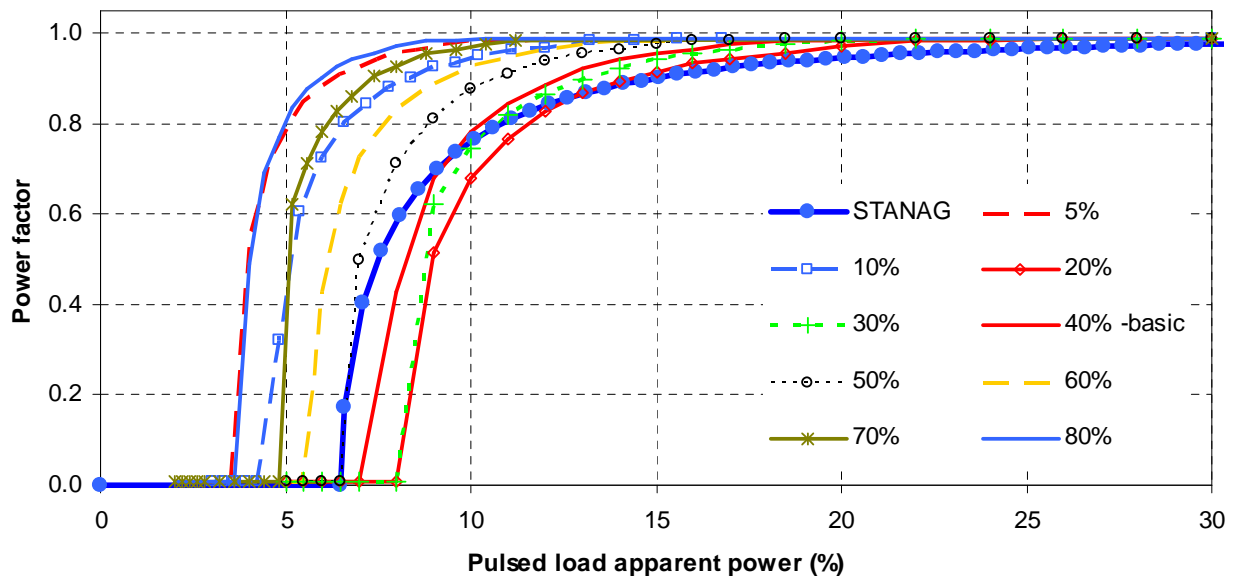


FIGURE 26. Power factor vs pulse load apparent power for different values of the service load factor of the generator in the case of the AES with pulsed load in LV network.

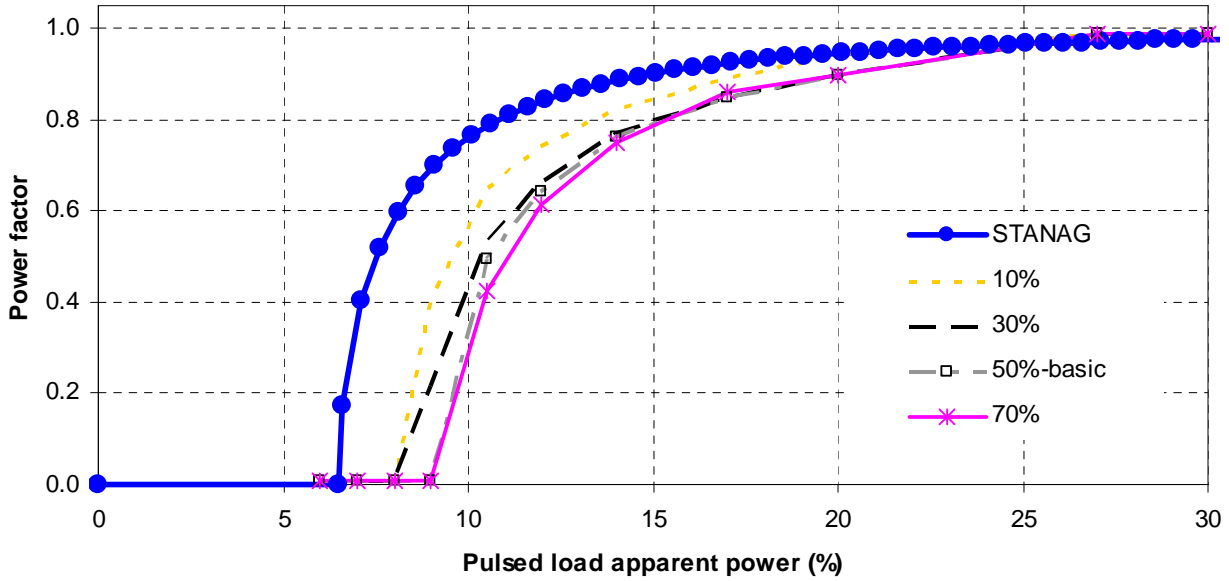


FIGURE 27. Power factor vs pulse load apparent power for different values of the service load factor of the generator in the case of the conventional ship [2, Fig.7].

SERVICE LOAD DISTRIBUTION TO DIFFERENT VOLTAGE NETWORKS

For the two topologies of the AES the electric service load is distributed into three different voltage networks according to the following ratios:

- the ratio n_{HV} of the HV service load apparent power to the total service load apparent power,
- the ratio n_{LV440} of the 440V low voltage service load apparent power to the total service load apparent power,
- the ratio n_{LV115} of the 115V low voltage service load apparent power to the total service load apparent power.

It is noted that the total apparent power of the service load does not take into account the losses of the cables and of the windings of the generator and the transformers. So the three ratios are connected by the following equation:

$$n_{HV} + n_{LV440} + n_{LV115} = 1 \quad (93)$$

It is obvious that two ratios of the three ones can be independent parameters. The third ratio is calculated by eq. (7).

Similarly, in the case of the conventional ship only the ratios n_{LV440} and n_{LV115} are defined, while the respective equation is:

$$n_{LV440} + n_{LV115} = 1 \quad (94)$$

In eq. (8) only one ratio is the free parameter.

For the case of the AES with the pulsed load installed at HV network, first it is assumed that the ratio n_{LV115} is constant and equal to 5%, while the ratio n_{HV} of the service load in the HV network takes the values 60%, 65%, 70%, 75%, 80%, 85% (basic scenario) and 90%. Respectively the ratio

n_{LV440} of the service load in the 440V LV network is calculated by eq. (7). For the above values of the ratio n_{HV} the equivalent model is simulated repeatedly and the respective power factor – pulsed load apparent power curves are obtained, as it is shown in Fig. 13. It is obvious that the increase of the ratio n_{HV} of the HV service load, with the respective ratio n_{LV115} of the 115V LV service load to be constant, tends to increase the unacceptable operating area slightly.

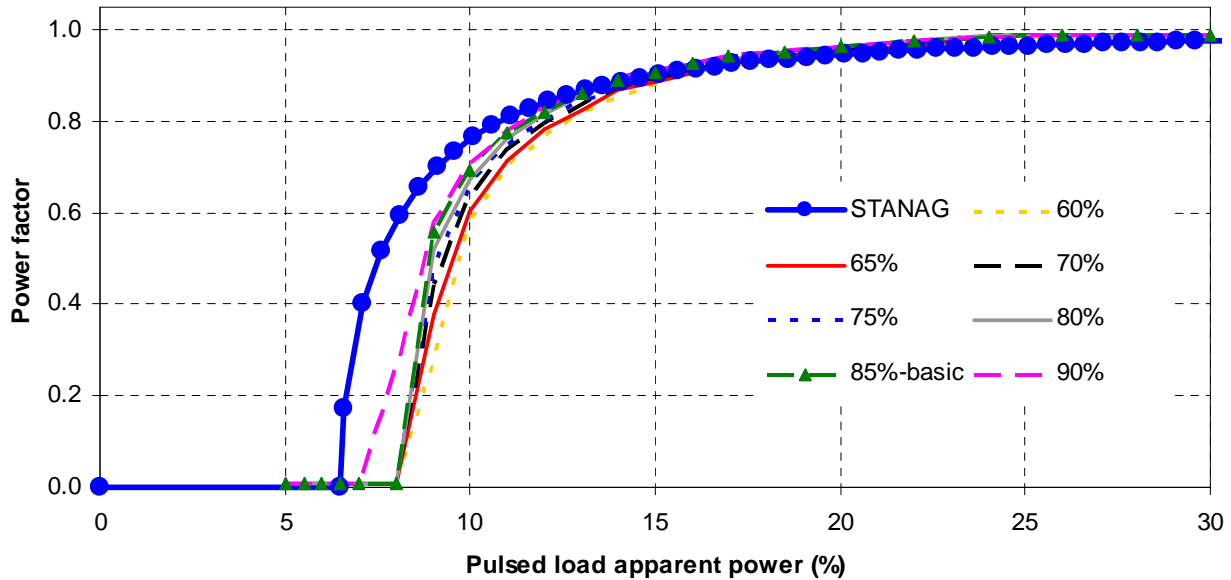


FIGURE 28. Power factor vs pulse load apparent power for different values of the ratio n_{HV} of the HV service load apparent power to the service load apparent power with constant the ratio n_{LV115} of the 115V LV service load apparent power to the service load apparent power and equal to 5% in the case of the AES with pulsed load in HV network.

In the second step it is assumed that the ratio n_{LV440} is constant and equal to 10%, while the ratio n_{HV} of the service load in the HV network is equal to 75%, 80%, 85% (basic scenario), 89%. Respectively the ratio n_{LV115} of the service load in the 115V LV network is calculated by eq. (7) to be equal to 15%, 10%, 5% (basic scenario), 1%. For the above values of the ratio n_{HV} the equivalent model is simulated repeatedly and the respective power factor – pulsed load apparent power curves are obtained, as it is shown in Fig. 14. It is obvious that the increase of the ratio n_{HV} of the HV service load, with the respective ratio n_{LV440} of the 440V LV service load to be constant, tends to increase the unacceptable operating area very slightly.

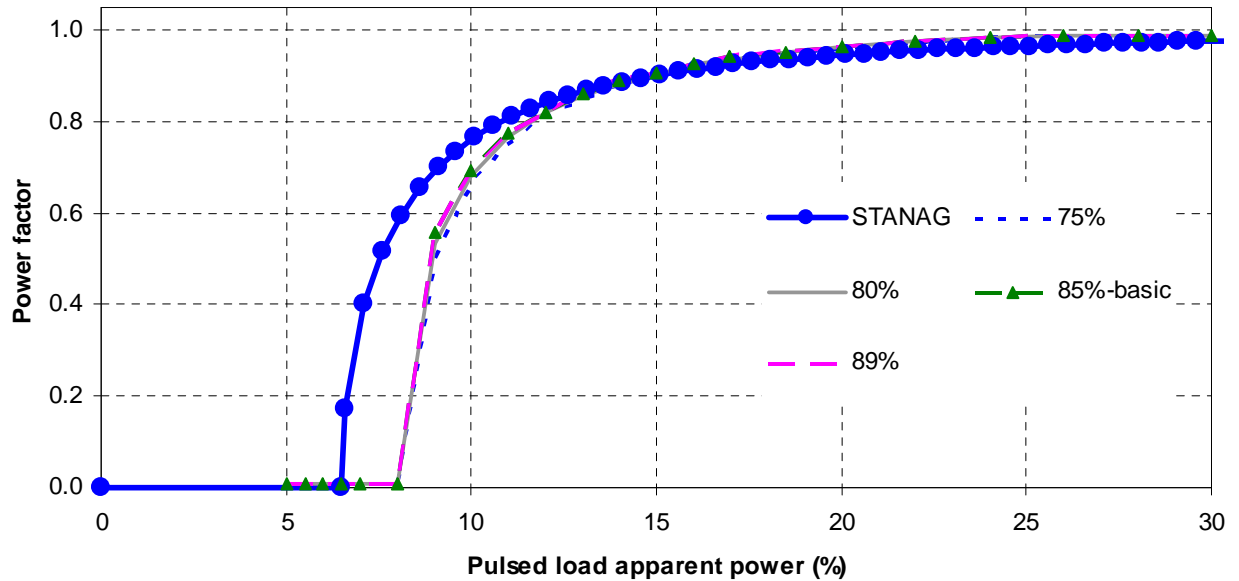


FIGURE 29. Power factor vs pulse load apparent power for different values of the ratio n_{HV} of the HV service load apparent power to the service load apparent power with constant the ratio n_{LV440} of the 440V LV service load apparent power to the service load apparent power and equal to 10% in the case of the AES with pulsed load in HV network.

For the case of the AES with the pulsed load installed at LV network in the first step it is assumed that the ratio n_{LV115} is constant and equal to 5%, while the ratio n_{HV} of the service load in the HV network is equal to 75%, 80%, 85% (basic scenario), 89%. The respective power factor – pulsed load apparent power curves are extracted, as it is shown in Fig. 15. The increase of the ratio n_{HV} of the HV service load, with the respective ratio n_{LV115} to be constant, tends to increase the unacceptable operating area slightly. Next, it is assumed that the ratio n_{LV440} is constant and equal to 10%, while the ratio n_{HV} varies between 75% and 89%. The respective curves are extracted and they are presented in Fig. 16. It is obvious that these curves are practically the same, which means that there is zero effect in the modulation phenomenon. Meanwhile there is a minor overlap of the unacceptable operating area determined by the STANAG 1008 curve.

For the case of the conventional ship, the examined values if the ratio n_{LV440} of the service load in the 440V LV network are 30%, 75% (basic scenario), 90%. Respectively the ratio n_{LV115} of the service load in the 115V LV network is calculated by eq. (8). The equivalent model is simulated repeatedly and the respective power factor – pulsed load apparent power curves are extracted, as it is shown in Fig. 17. It is obvious that the increase of the ratio n_{LV440} of the 440V LV service load tends to decrease the unacceptable operating area very slightly.

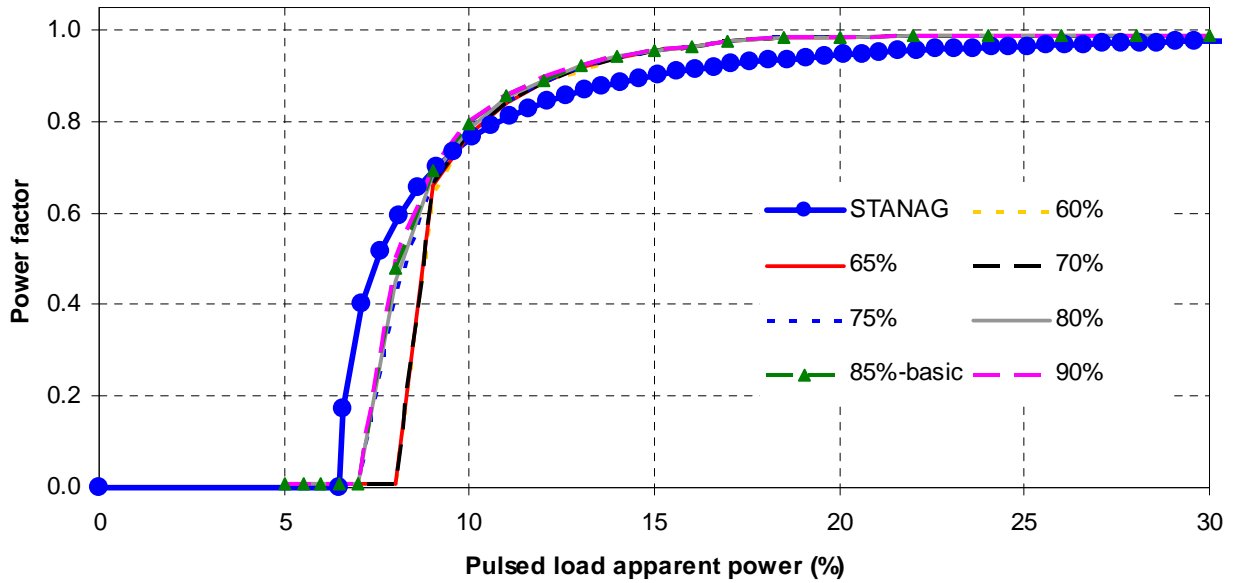


FIGURE 30. Power factor vs pulse load apparent power for different values of the ratio n_{HV} of the HV service load apparent power to the service load apparent power with constant the ratio n_{LV115} of the 115V LV service load apparent power to the service load apparent power and equal to 5% in the case of the AES with pulsed load in LV network.

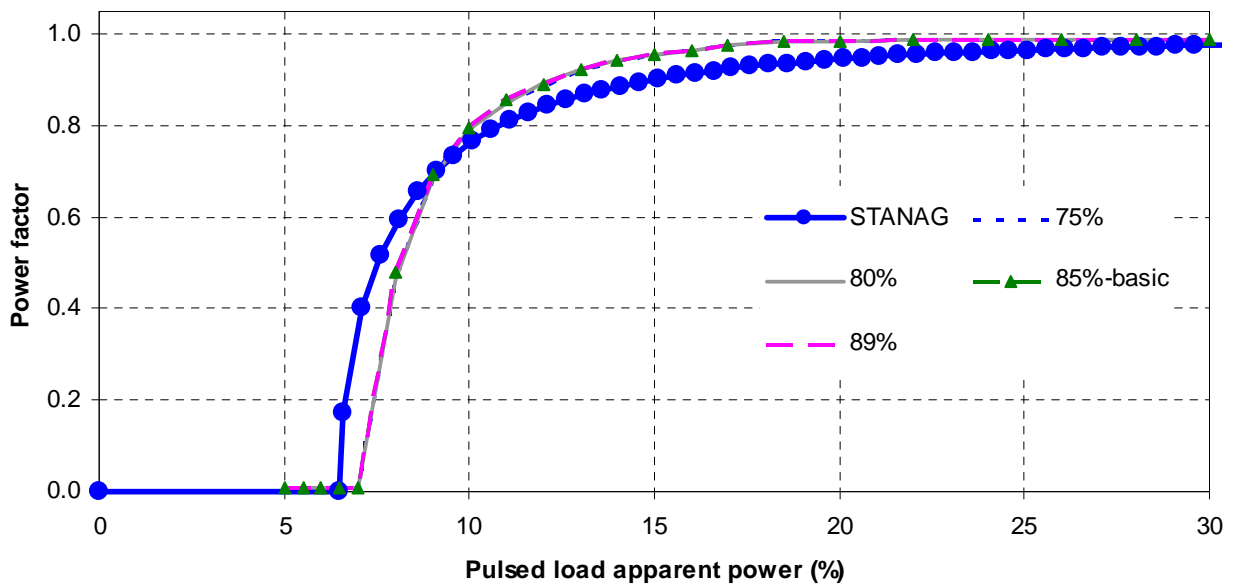


FIGURE 31. Power factor vs pulse load apparent power for different values of the ratio n_{HV} of the HV service load apparent power to the service load apparent power with constant the ratio n_{LV440} of the 440V LV service load apparent power to the service load apparent power and equal to 10% in the case of the AES with pulsed load in LV network.

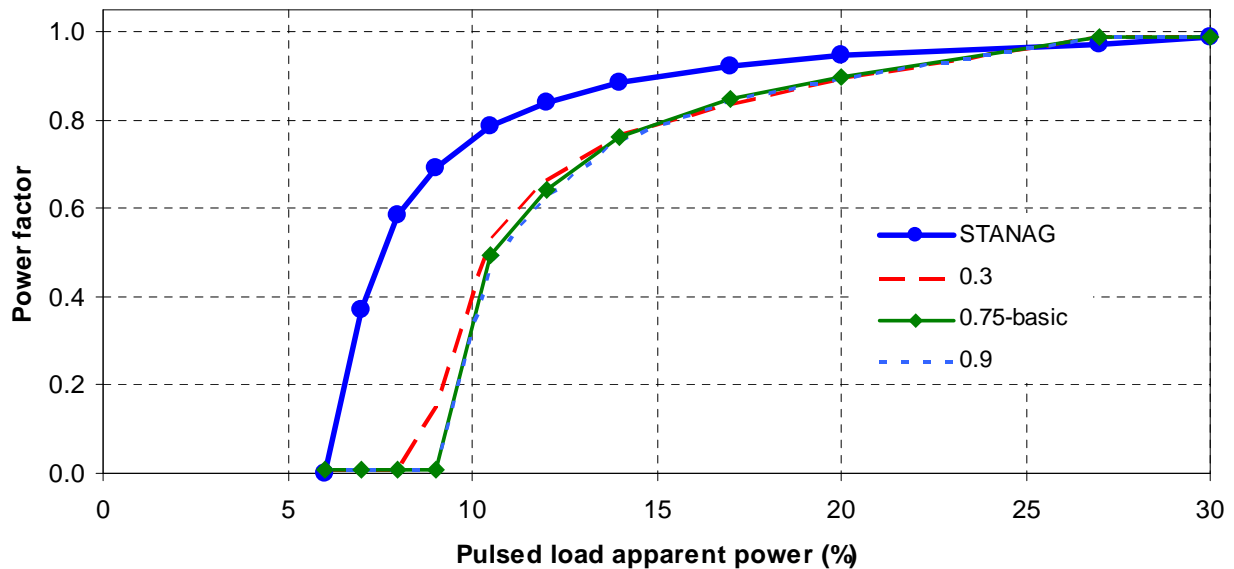


FIGURE 32. Power factor vs pulse load apparent power for different values of the ratio n_{LV440} of the 440V LV service load apparent power to the service load apparent power in the case of the conventional ship.

SERVICE LOAD POWER FACTOR

In the previous cases the power factor of the service load in all sub-networks has been considered equal to 0.80 and inductive because of the inductive behavior of the motors and of the fluorescent lamps. Next different values of inductive power factor are examined.

For the case of the AES with the pulsed load installed at LV network, the respective power factor – pulsed load apparent power curves are extracted for different values of the inductive power factor (0.60, 0.707, 0.80 (basic scenario), 0.90 and 0.98) and they are presented in Fig. 18. It is obvious that the increase of the power factor of the service load tends to decrease the unacceptable operating area significantly, until the power factor reaches up to 0.90. Afterwards, the further increase of the power factor increases the respective area. In this case the respective curve of STANAG 1008 is quite insufficient for pulsed load power factor smaller than 0.80 and for service load power factor smaller than 0.80.

Similarly, for the case of the AES with the pulsed load installed at HV network, the respective curves are extracted for different values of the inductive power factor (between 0.70 and 0.90) and they are presented in Fig. 19. It is observed that the variation of the power factor of the service load above 0.80 tends to increase the unacceptable operating area significantly. The respective curves of the power factor are overlapped the curve of STANAG 1008.

For the case of the conventional ship the respective curves are extracted for different inductive power factors (between 0.70 and 1.00) and they are presented in Fig. 20. It is observed again that the increase of the power factor of the service load tends to increase the unacceptable operating area significantly. The respective curves of power factor are overlapped the curve of STANAG 1008 slightly for service load power factor 1.00 and pulsed load power factor bigger than 0.95.

For the aforementioned analysis it is clear that the power factor of the service load affects significantly the modulation.

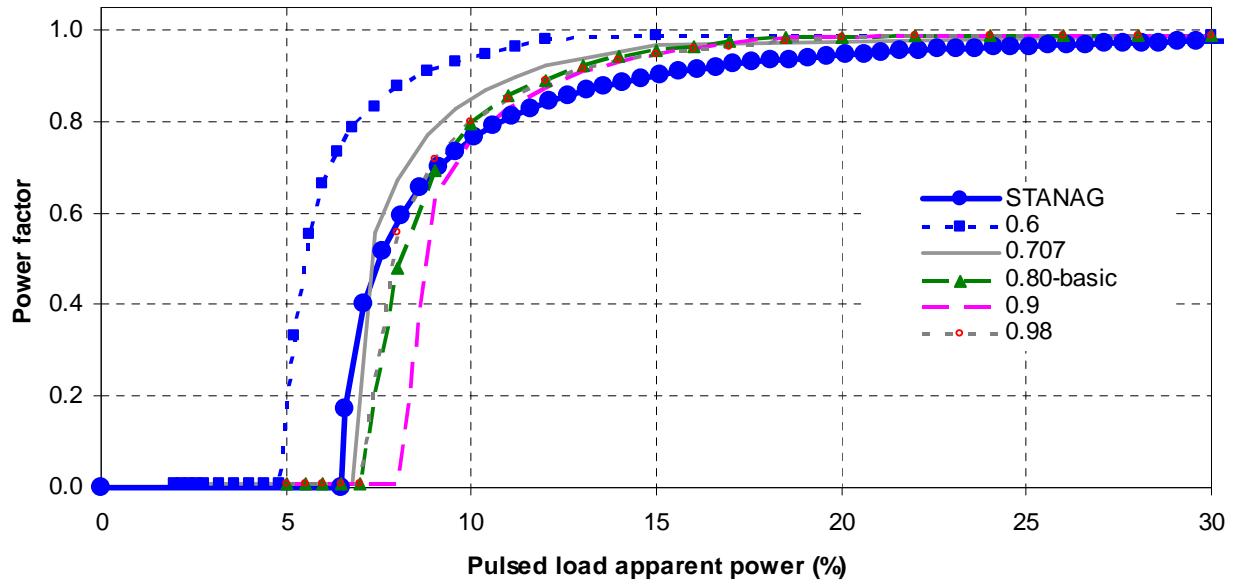


FIGURE 33. Power factor vs pulse load apparent power for different values of the service load power factor in the case of the AES with pulsed load in LV network.

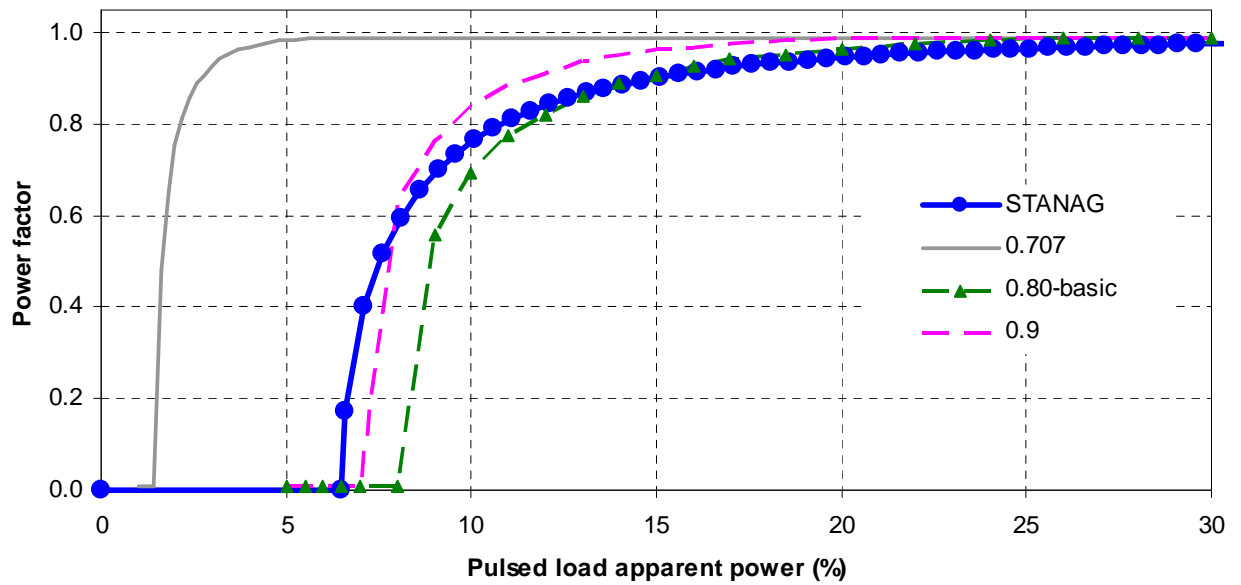


FIGURE 34. Power factor vs pulse load apparent power for different values of the service load power factor in the case of the AES with pulsed load in HV network.

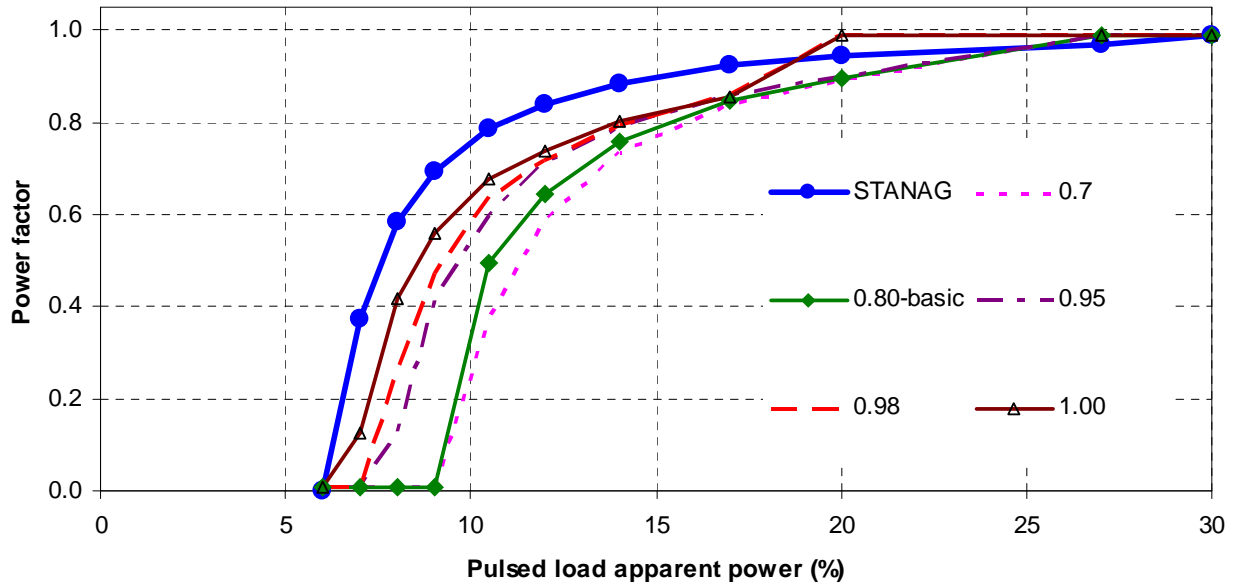


FIGURE 35. Power factor vs pulse load apparent power for different values of the service load power factor in the case of the conventional ship

HIGH VOLTAGE CABLE'S EQUIVALENT LENGTH

High voltage cable's equivalent length is a parameter, which is met only for the AES, because the typical conventional ship does not comprise high voltage network. In these case studies the system is simulated with high voltage cable's equivalent length of 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400 m.

For the case of the AES with the pulsed load installed at HV network, the respective power factor – pulsed load apparent power curves are extracted and presented in Fig. 21, which is properly enlarged in Fig. 22. It is obvious that the increase of high voltage cable's length tends to decrease slightly the unacceptable operating area.

For the case of the AES with the pulsed load installed at LV network, the respective power factor – pulsed load apparent power curves are extracted for different HV cable's equivalent length and they are presented in Fig. 23. Practically, these curves are the same, while there is a minor overlap of the unacceptable operating area determined by the STANAG 1008 curve from the one determined by the curves for pulsed load power factor higher than 0.80.

It is obvious that the HV cable's length is not a critical factor, especially for the AES with the pulsed load installed at LV network, because in this case voltage modulation is calculated at 440V.

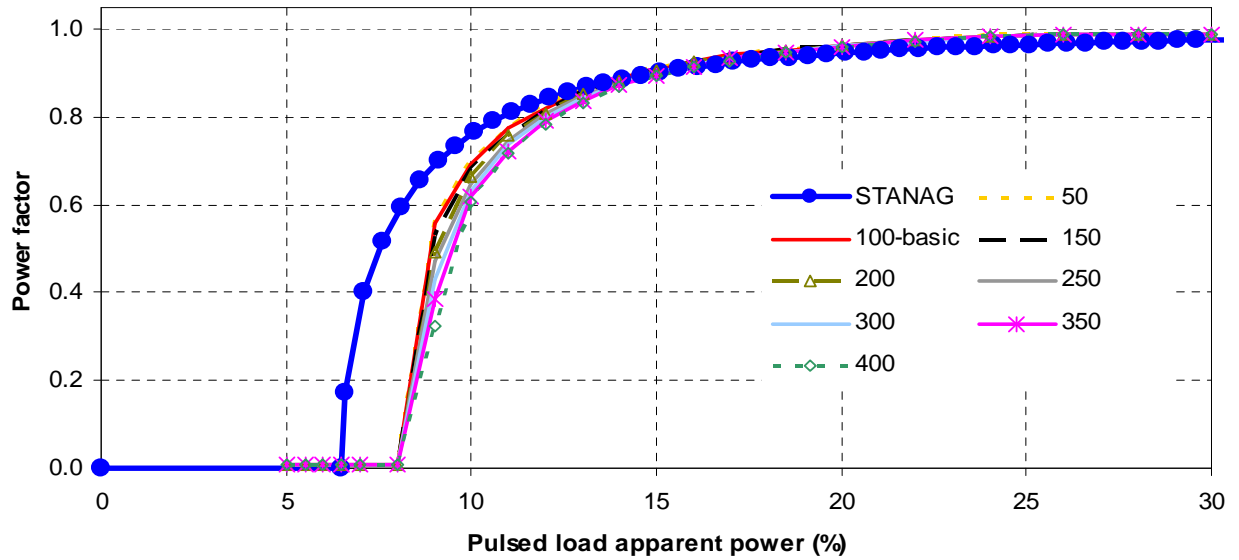


FIGURE 36. Power factor vs pulse load apparent power for different values of the HV cable's equivalent length in the case of the AES with pulsed load in HV network.

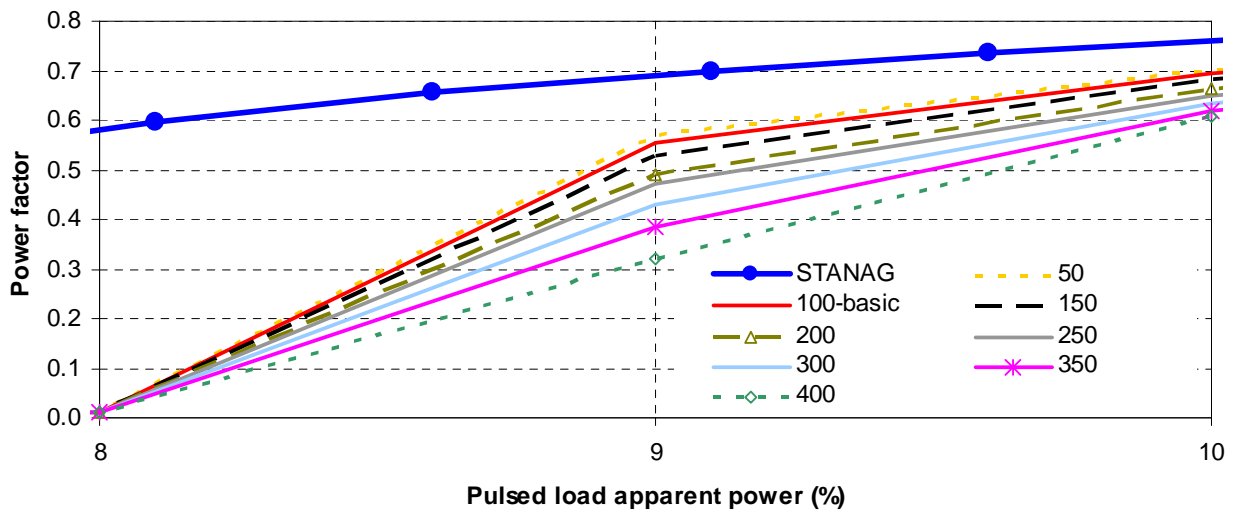


FIGURE 37. Enlargement of Fig. 21 with power factor vs pulse load apparent power for different values of the HV cable's equivalent length in the case of the AES with pulsed load in HV network.

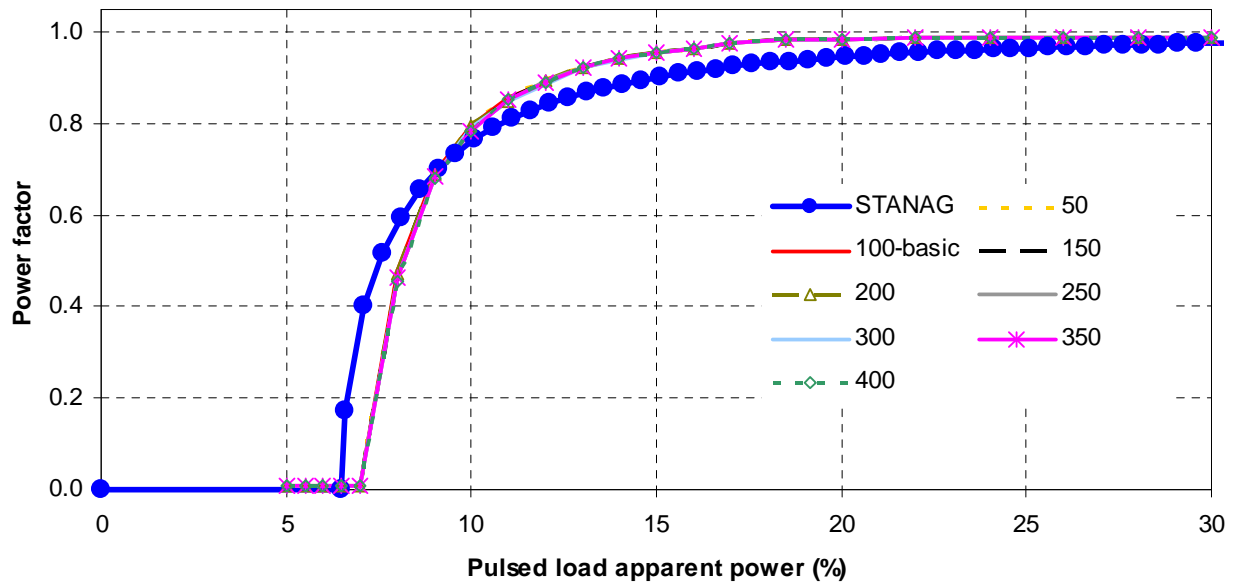


FIGURE 38. Power factor vs pulse load apparent power for different values of the HV cable's equivalent length in the case of the AES with pulsed load in LV network.

440V LOW VOLTAGE CABLE'S EQUIVALENT LENGTH

In the following, the AES with the pulsed load in LV network is simulated repeatedly for different 440V voltage cable's equivalent length (50, 100 (basic scenario), 150, 200, 250, 300, 350, 400 m). The respective power factor – pulsed load apparent power curves are extracted, as it is shown in Fig. 24. It is obvious that the increase of the 440V low voltage cable's length tends to increase the unacceptable operating area. The respective curve of STANAG 1008 is proved quite insufficient as the cable's length and the pulsed load power factor increase.

For the case of the AES with the pulsed load installed at HV network, the respective power factor – pulsed load apparent power curves are extracted for different 440V LV cable's equivalent length and they are presented in Fig. 25. Practically, these curves are the same, while there is a minor overlap of the unacceptable operating area determined by the STANAG 1008 curve and the one from the curves obtained for pulsed load power factor higher than 0.90. This happens, because in this case the pulsed load is connected to the high voltage network and 440V LV cable's length has practically zero effect in the modulation phenomenon.

In case of the conventional ship, the respective power factor – pulsed load apparent power curves are extracted for different 440V LV cable's equivalent lengths (50, 150, 250, 400, 500 m) in Fig. 26. As the authors have already mentioned in [2], the increase of the 440V low voltage cable's length tends to increase the unacceptable operating area. The power factor – pulsed load apparent power curves are varied in an area wider than the ones of Fig. 24, which means that the respective effect is more significant in this case. This happens, because conventional ship's main load is connected to the 440V LV network, in contrast with the AES connected to the HV network.

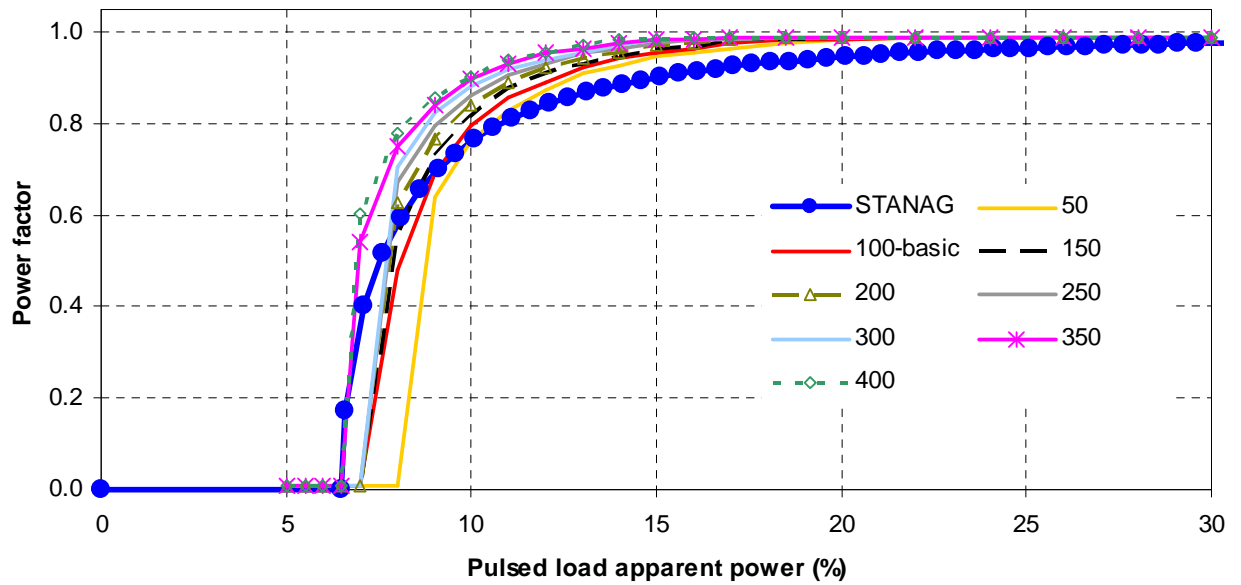


FIGURE 39. Power factor vs pulse load apparent power for different values of the 440V LV cable's equivalent length in the case of the AES with pulsed load in LV network.

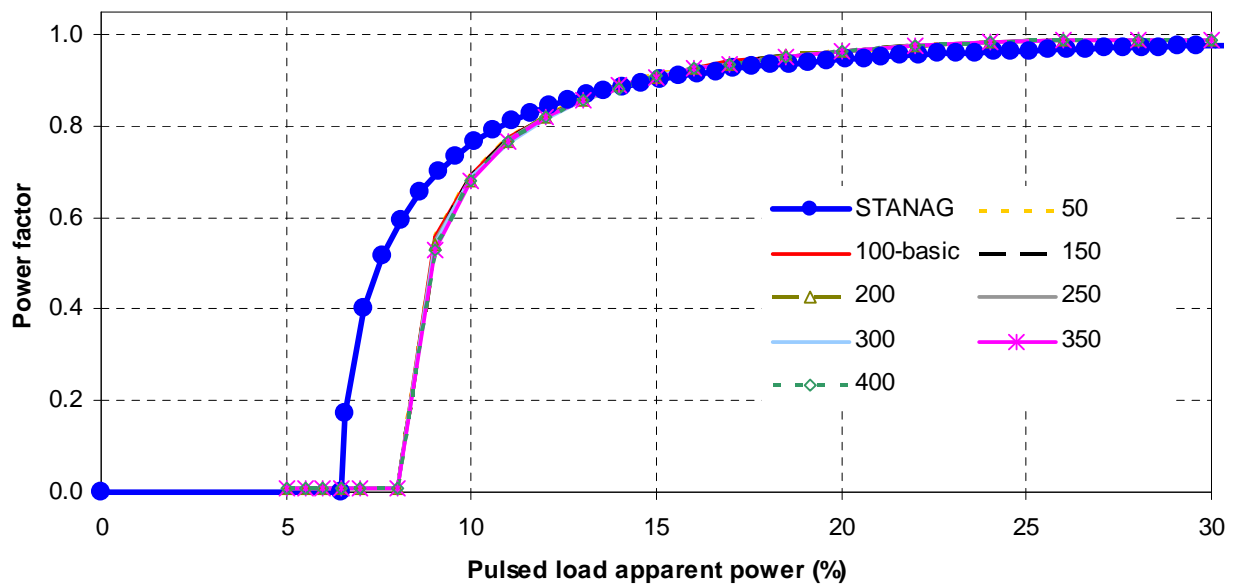


FIGURE 40. Power factor vs pulse load apparent power for different values of the 440V LV cable's equivalent length in the case of the AES with pulsed load in HV network.

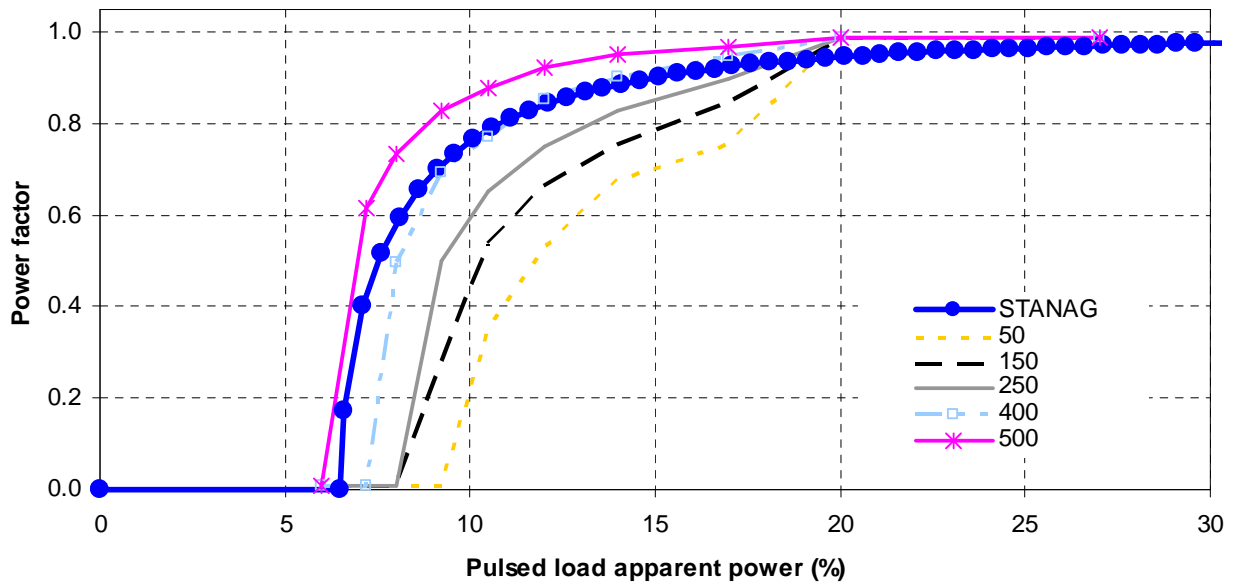


FIGURE 41. Power factor vs pulse load apparent power for different values of the 440V LV cable's equivalent length in the case of the conventional ship [2, Fig. 10] with the base load of the generator equal to 10%, pulsed load duty cycle 60% and pulsed load period 0.4 sec.

It is obvious that the 440V LV cable's length is a critical factor, except of the case of the AES with the pulsed load installed at HV network. In last one, the effect of the voltage modulation in the LV network is more limited. On the contrary, in cases of the conventional ship and the AES with the pulsed load installed at LV network it is observed that the longer the cables, the bigger the obtained unacceptable operating area.

115V LOW VOLTAGE CABLE'S EQUIVALENT LENGTH

In the following, the AES with the pulsed load in LV network is simulated repeatedly for different 115V low voltage cable's equivalent length (50, 100 (basic scenario), 150, 200, 250, 300, 350, 400 m). The respective power factor – pulsed load apparent power curves are extracted, as it is shown in Fig. 27. Practically, these curves are the same, while there is an overlap of the unacceptable operating area determined by the STANAG 1008 curve from the curves obtained for pulsed load power factor higher than 0.75.

For the case of the AES with the pulsed load installed at HV network, the respective power factor – pulsed load apparent power curves are extracted for different values of the 115V LV cable's equivalent length and they are presented in Fig. 28. Practically, these curves are the same, while there is a minor overlap of the unacceptable operating area determined by the STANAG 1008 curve from the curves obtained for pulsed load power factor higher than 0.90. Similar results are also obtained in case of the conventional ship

This happens, because the pulsed load is connected either to the high voltage network or to the 440V low voltage network, and 115V LV cable's length has practically zero effect in the modulation phenomenon.

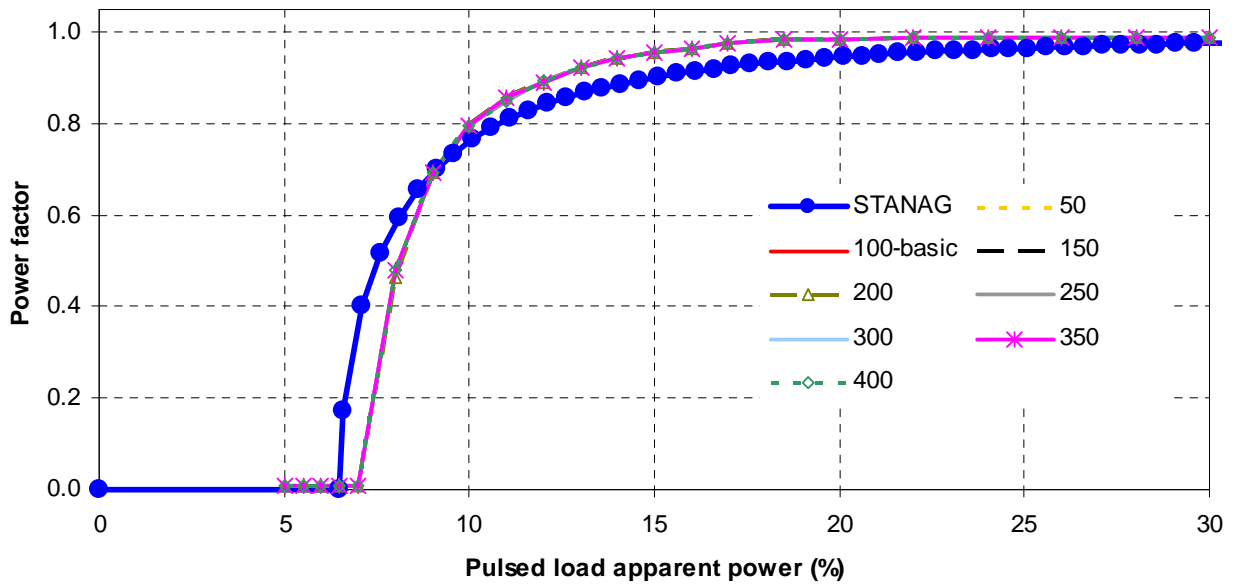


FIGURE 42. Power factor vs pulse load apparent power for different values of the 115V LV cable's equivalent length in the case of the AES with pulsed load in LV network.

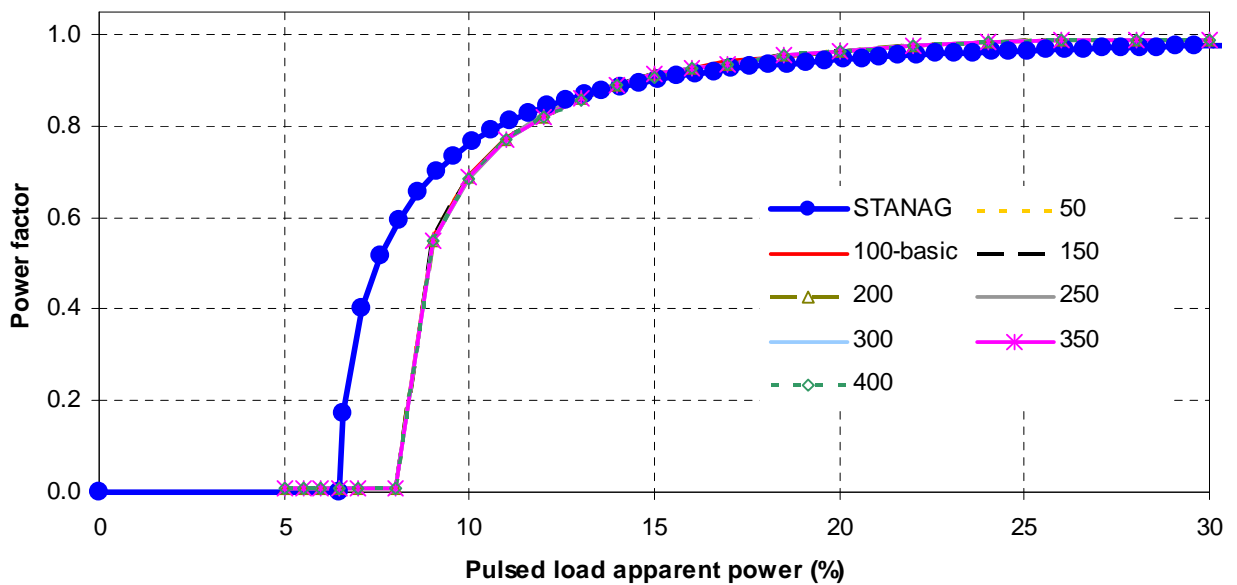


FIGURE 43. Power factor vs pulse load apparent power for different values of the 115V LV cable's equivalent length in the case of the AES with pulsed load in HV network.

PULSED LOAD PERIOD

Pulsed load period should be greater than the power system period according to the STANAG 1008 request [2, § A.3.d].

In case of AES with the pulsed load installed at LV, the network is simulated repeatedly for different values of the pulsed load period (0.05 sec, 0.15 sec, 0.3 sec (basic scenario), 0.6 sec, 1.0

sec, 1.5 sec). The respective power factor – pulsed load apparent power curves are extracted, as it is shown in Fig. 29. It is obvious that the increase of the pulsed load period tends to increase the unacceptable operating area until the period reaches up to 1 sec. The respective curve of STANAG 1008 is proved quite insufficient for periods between 0.6 and 1.0 sec. It is mentioned that the simulation time is 2.5 sec except of the cases that period equals or is greater than 0.6 sec where the simulation duration is five times the respective period in order to permit the system reach “balanced” operation.

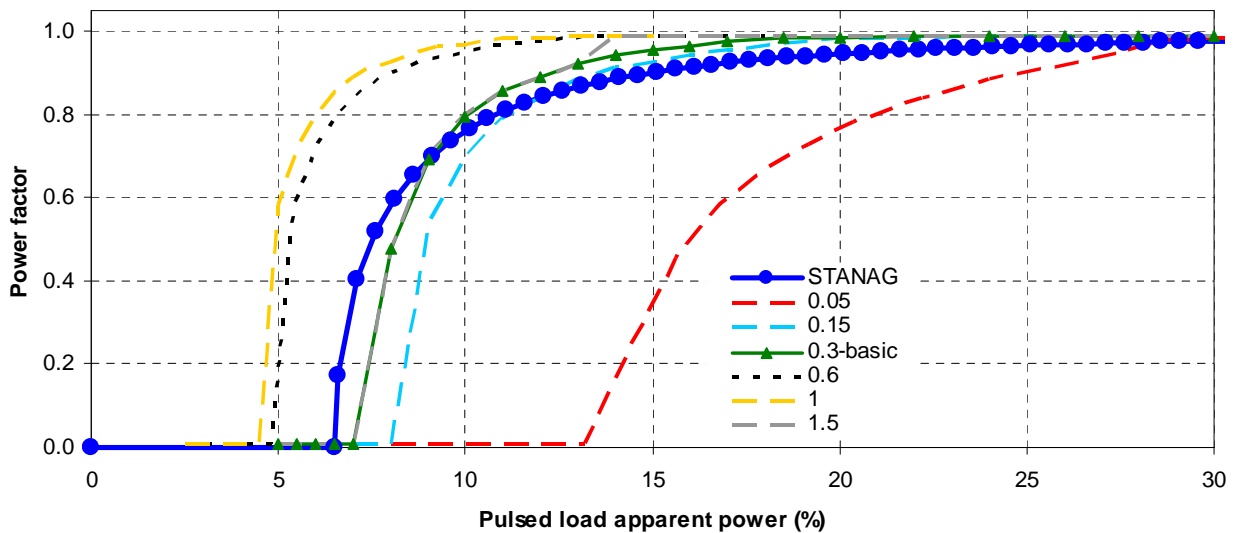


FIGURE 44. Power factor vs pulse load apparent power for different values of the pulsed load period in the case of the AES with pulsed load in LV network.

For the case of the AES with the pulsed load installed at HV network, the respective power factor – pulsed load apparent power curves are extracted for different values of the pulsed load period and they are presented in Fig. 30. Here, the increase of the pulsed load period tends to increase the unacceptable operating area until the period reaches up to 0.6 sec. For periods greater than 0.6 sec the respective area decreases (see curve with $T=1$ sec against $T=0.6$ sec). Especially, the curve with $T=0.6$ sec exceeds the unacceptable operating area determined by the STANAG 1008 curve. The power factor – pulsed load apparent power curves are located in an area wider than the previous ones of Fig. 29.

For the case of the conventional ship, as it is shown in Fig. 31, the increase of the pulsed load period tends to increase the unacceptable operating area until the period reaches up to 1.6 sec without exceeding the unacceptable operating area determined by the STANAG 1008 curve.

It is obvious that the pulsed load period is a critical factor affecting significantly the shape of the limitation curves and their position on the respective plane.

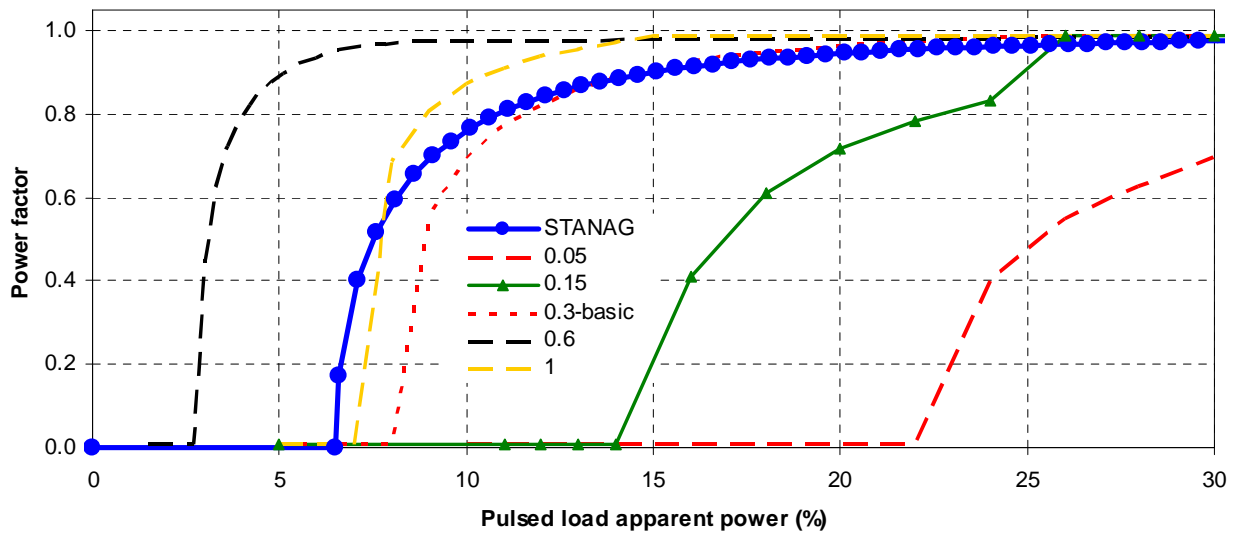


FIGURE 45. Power factor vs pulse load apparent power for different values of the pulsed load period in the case of the AES with pulsed load in HV network.

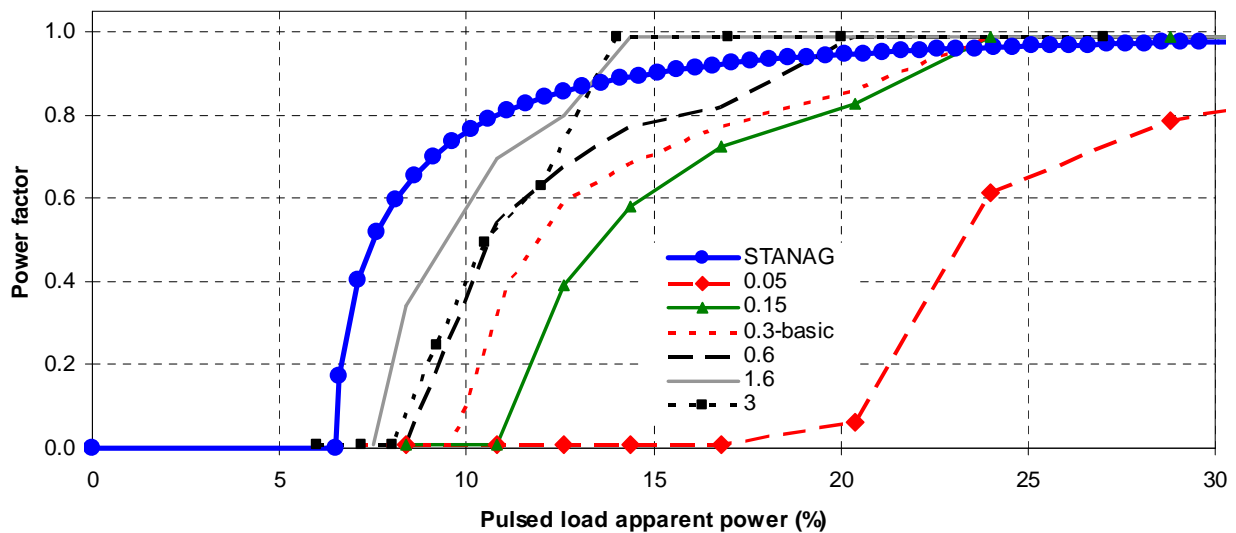


FIGURE 46. Power factor vs pulse load apparent power for different values of the pulsed load period in the case of the conventional ship [2, Fig. 11].

PULSED LOAD DUTY CYCLE

Next, the AES with the pulsed load installed at LV, the network is simulated repeatedly for different pulsed load duty cycles (10%, 20%, 30%, 40%, 50% (basic scenario), 60%, 70%, 80%, 90%). In Fig. 32 the respective power factor – pulsed load apparent power curves are shown. The increase of the pulsed load duty cycle tends to increase the unacceptable operating area until the duty cycle reaches up to 70%. Increasing more of the duty cycle leads to the decrease of the respective area. STANAG 1008 curve seems to be slightly underestimated for duty cycles greater than 20% and for power factor higher than 0.7.

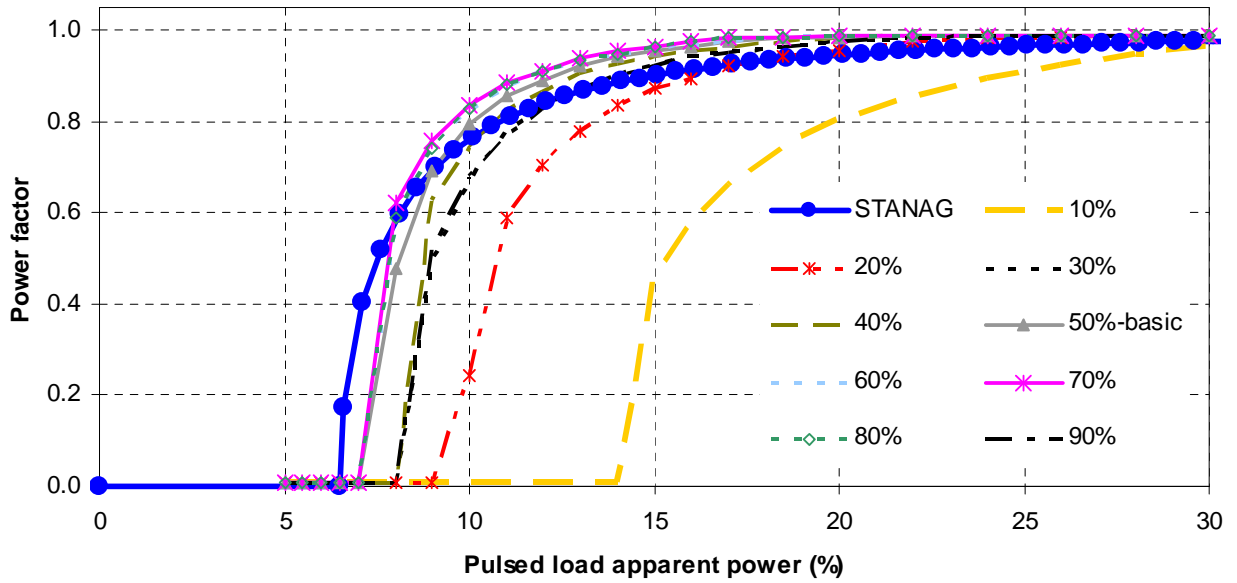


FIGURE 47. Power factor vs pulse load apparent power for different values of the pulsed load duty cycle in the case of the AES with pulsed load in LV network.

For the case of the AES with the pulsed load installed at HV network, the respective power factor – pulsed load apparent power curves are extracted for different values of the pulsed load duty cycle and they are presented in Fig. 33. Here, the increase of the pulsed load duty cycle tends to increase the unacceptable operating area until the duty cycle reaches up to 30%, while above 30% it tends to decrease the respective area. This means that the behavior of the power factor – pulsed load apparent power curves is different than the previous ones of Fig. 32.

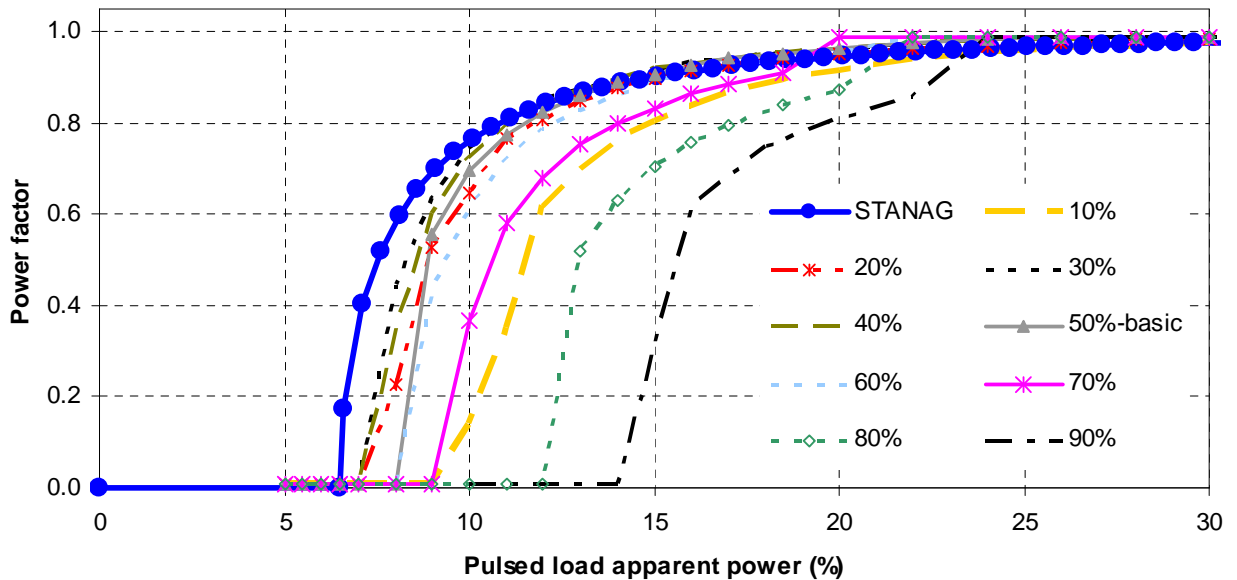


FIGURE 48. Power factor vs pulse load apparent power for different values of the pulsed load duty cycle in the case of the AES with pulsed load in HV network.

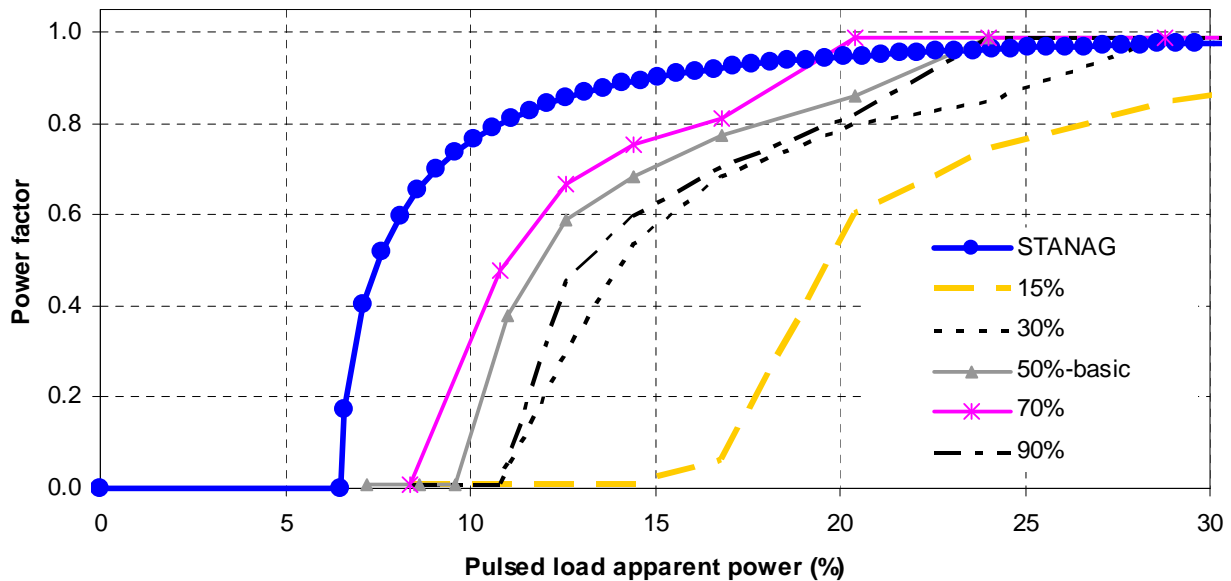


FIGURE 49. Power factor vs pulse load apparent power for different values of the pulsed load duty cycle in the case of the conventional ship [2, Fig. 12].

For the case of the conventional ship, as it is shown in Fig. 34, the increase of the pulsed load duty cycle tends to increase the unacceptable operating area until the duty cycle reaches up to 70%. Further increase leads to decrease of the respective area.

In the last two cases, there is a minor overlap of the unacceptable operating area determined by the STANAG 1008 curve from the curves obtained for a 70% duty cycle.

Pulsed load duty cycle is a significant parameter, which determines affects significantly the unacceptable operating area on the power factor – pulsed load apparent power plane.

GENERATOR'S SUB-TRANSIENT REACTANCE

In the following, the AES with the pulsed load installed at LV network is simulated repeatedly for different values of the generator's sub-transient reactance of d-axis X_d'' (12,5%, 15% (basic scenario), 17.5%, 20%, 25%, 30%). Simultaneously, it is considered that the respective sub-transient reactance of q-axis X_q'' equals to X_d'' . In Fig. 35 the respective power factor – pulsed load apparent power curves are shown. It is obvious that for very small values of X_d'' the unacceptable operating area is increased (see curve of 12.5%), while practically the curves of 15% and 30% are identical, as well as the curves of 17.5%, 20% and 25%. The respective STANAG curve approaches the respective curves sufficiently, except the curve obtained for $X_d'' = X_q'' = 12,5\%$.

In Fig. 36 the respective power factor – pulsed load apparent power curves are extracted for different values of X_d'' (15%, 17.5%, 20%, 25%, 30%) and for the AES with the pulsed load installed at HV network. The respective results are similar with the previous ones, even if the respective curves are spread in a wider area than the previous one of Fig. 35.

Regarding the case of the conventional ship, as the authors have already mentioned in [2] and as it is shown in Fig. 37, the unacceptable operating area of the respective STANAG 1008 curve contains the respective areas of the estimated curves.

The obtained results demonstrate that the generator's sub-transient reactance affects considerably the unacceptable operating area, especially for small values of X_d'' . This leads to the

conclusion that it is one of the parameters that must be considered for the design of the respective power system.

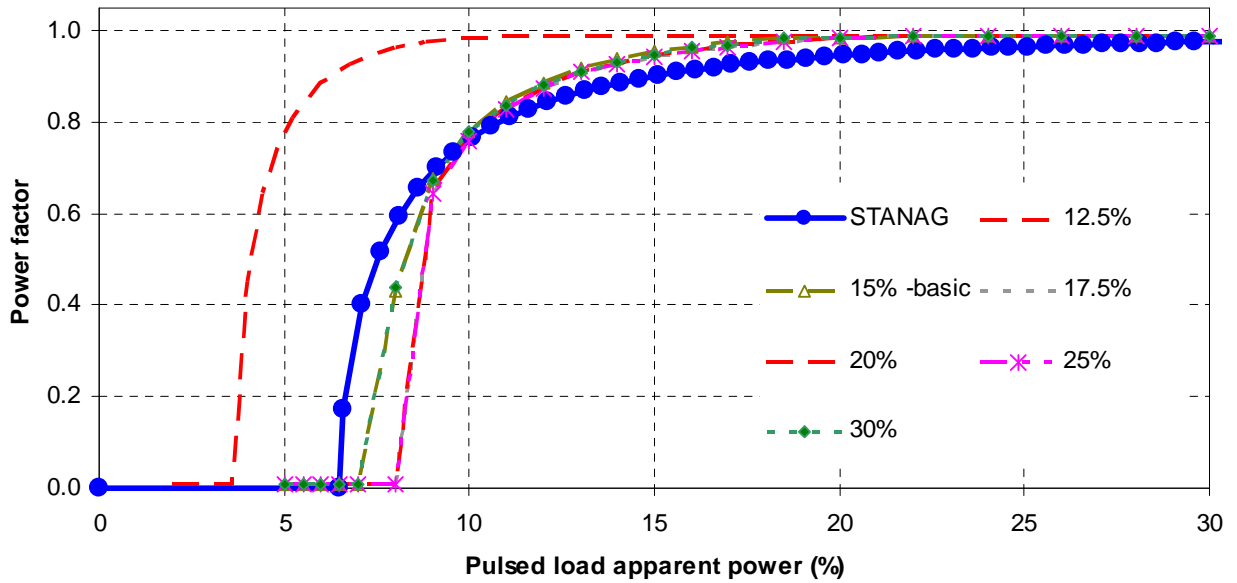


FIGURE 50. Power factor vs pulse load apparent power for different values of the generator's sub-transient reactance in the case of the AES with pulsed load in LV network.

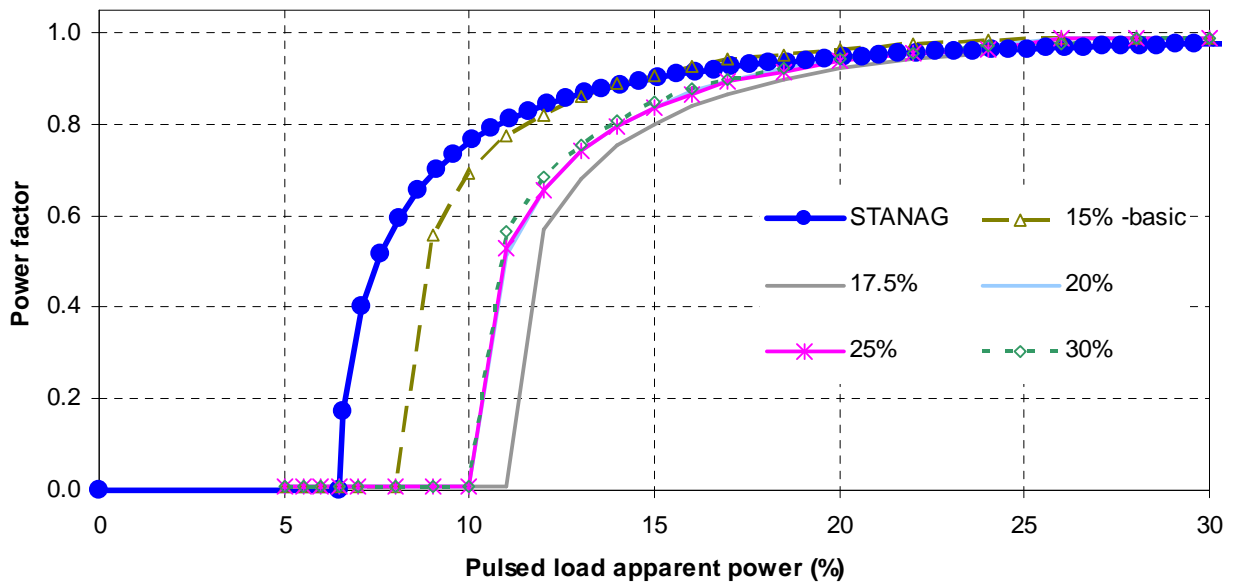


FIGURE 51. Power factor vs pulse load apparent power for different values of the generator's sub-transient reactance in the case of the AES with pulsed load in HV network.

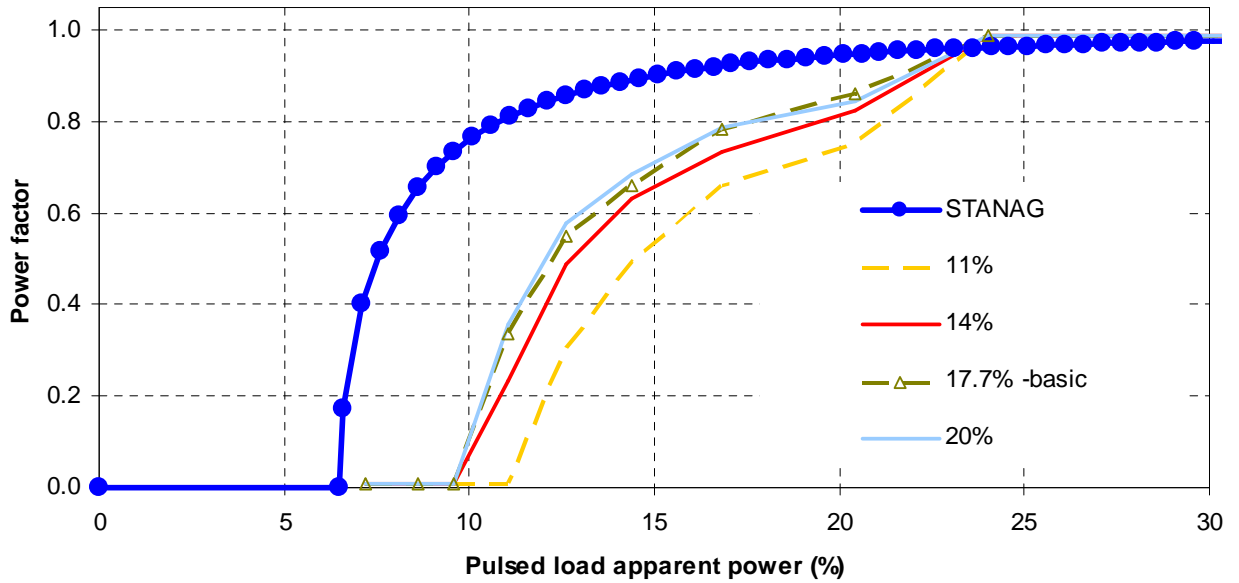


FIGURE 52. Power factor vs pulse load apparent power for different values of the generator's sub-transient reactance in the case of the conventional ship [2, Fig. 8].

GENERATOR'S INERTIA

Next, the AES with the pulsed load installed at LV network is simulated repeatedly for different values of the generator's inertia (1.00, 1.25, 1.5 (basic scenario), 1.75, 2.00, 2.50, 3.00). In Fig. 38 the respective power factor – pulsed load apparent power curves are shown, where no significant effect is observed for this range of values.

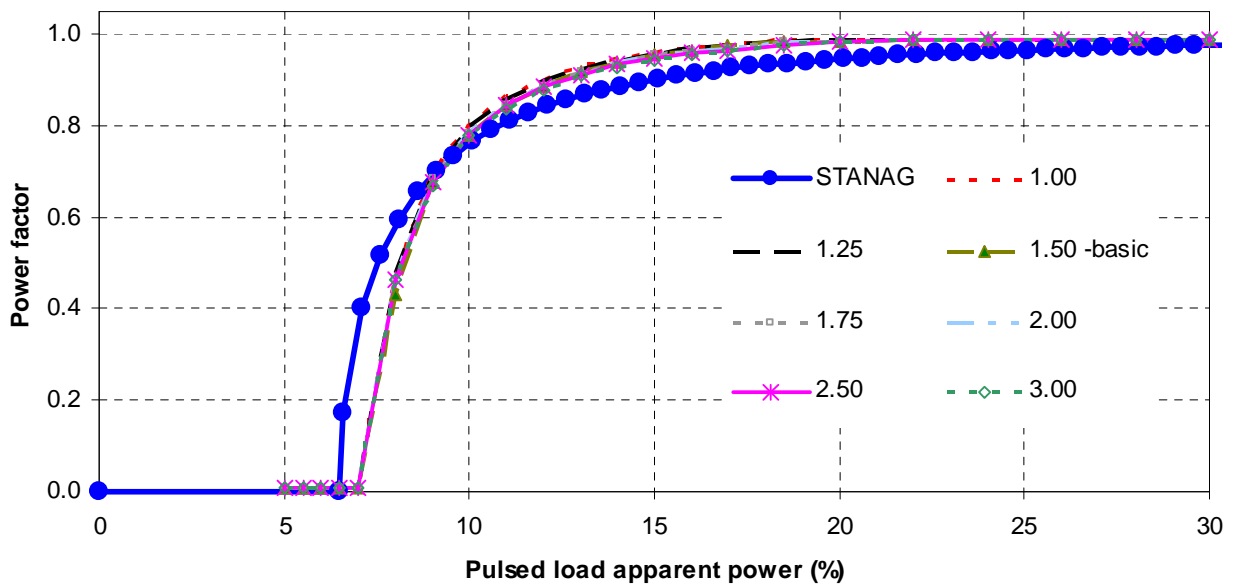


FIGURE 53. Power factor vs pulse load apparent power for different values of the generator's inertia in the case of the AES with pulsed load in LV network.

Similarly, in Fig. 39 the respective power factor – pulsed load apparent power curves are shown for different values of inertia (0.75, 1.00, 1.25, 1.5 (basic scenario), 1.75, 2.00, 2.50, 3.00) and obtained for the AES with the pulsed load installed at HV network. The respective results are similar with the previous ones, even if the respective curves are slightly different for small apparent power of pulsed load. In case of the conventional ship, as it has already mentioned in [2] and as it is shown in Fig. 40, no significant effect is observed on the respective. Only for power factor larger than 0.8 and small generator inertia values the curves begin to separate.

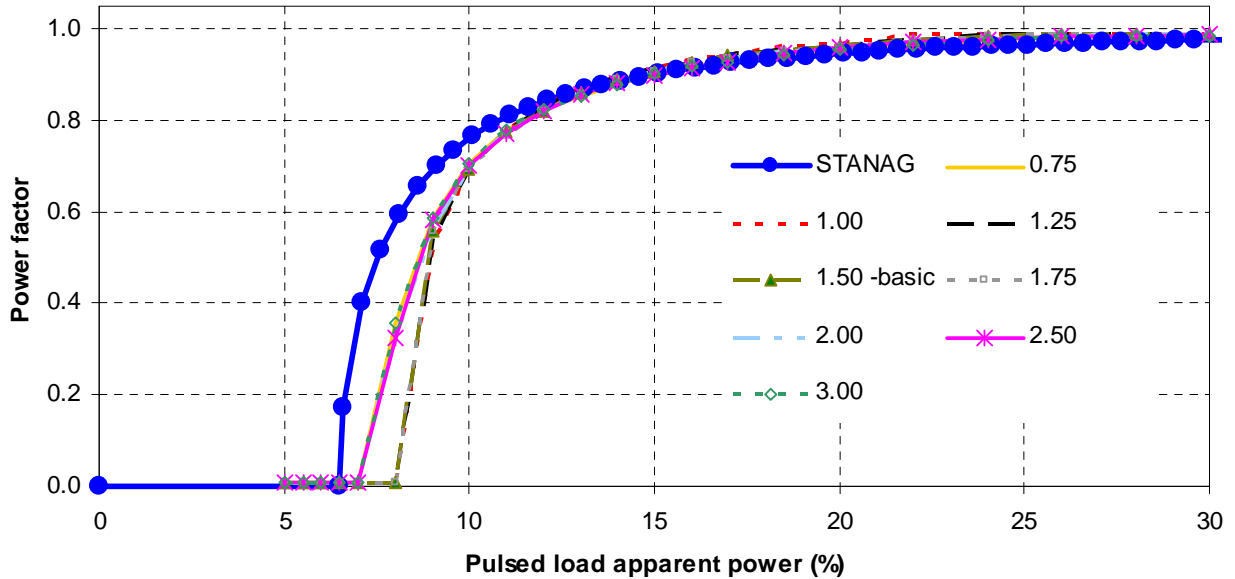


FIGURE 54. Power factor vs pulse load apparent power for different values of the generator's inertia in the case of the AES with pulsed load in HV network.

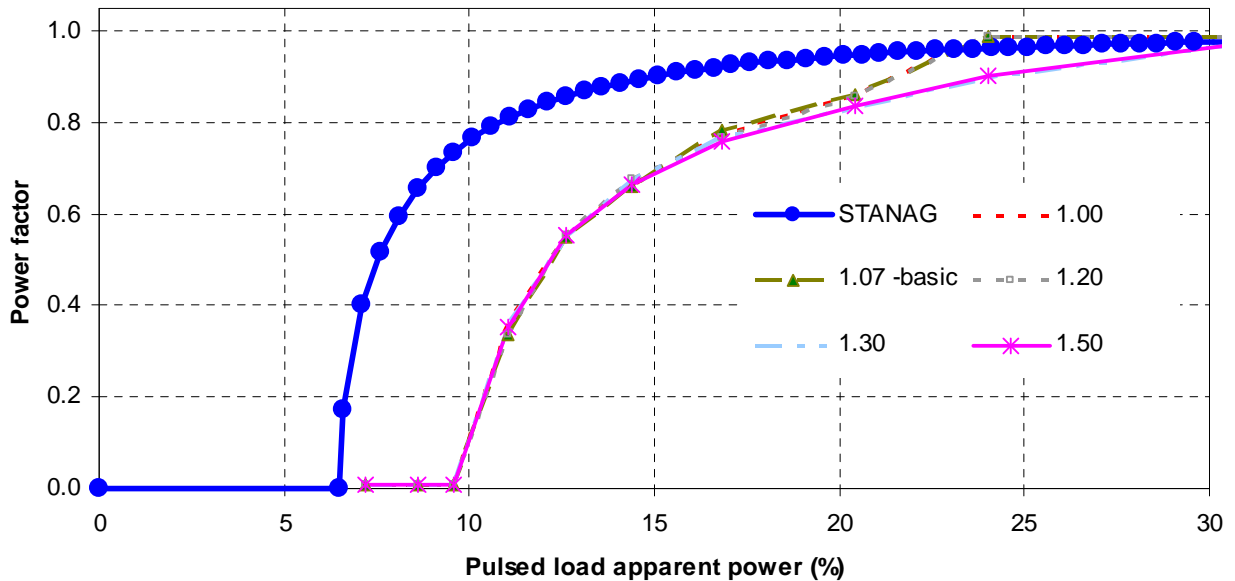


FIGURE 55. Power factor vs pulse load apparent power for different values of the generator's inertia in the case of the conventional ship [2, Fig.9].

A long series of simulation results not provided here due to space limitations also led to the conclusion that average frequency modulation decreases with inertia constant increase. This is expected as the bigger the generator inertia the lower the speed variations due to load changes. As it was shown above, generator inertia affects slightly the unacceptable operating area.

GOVERNOR'S GAIN

Next, an AES with the pulsed load installed at LV network is simulated repeatedly for different values of the governor's gain K (10, 20, 30, 40 (basic scenario), 50, 60). In Fig. 41 the respective power factor – pulsed load apparent power curves are shown, where no significant effect is observed for this range of values. Similarly, the respective power factor – pulsed load apparent power curves for different values of governor's gain for the AES and the pulsed load installed at HV network are shown in Fig. 42. They resemble to the previous ones. In case of the conventional ship, as it has already mentioned in [2] and as it is shown in Fig. 43, no significant effect is observed on the respective curves, except from operation with power factors larger than 0.75, where curves begin to separate.

Finally, it is concluded that the governor's gain has a weak effect on the unacceptable operating area.

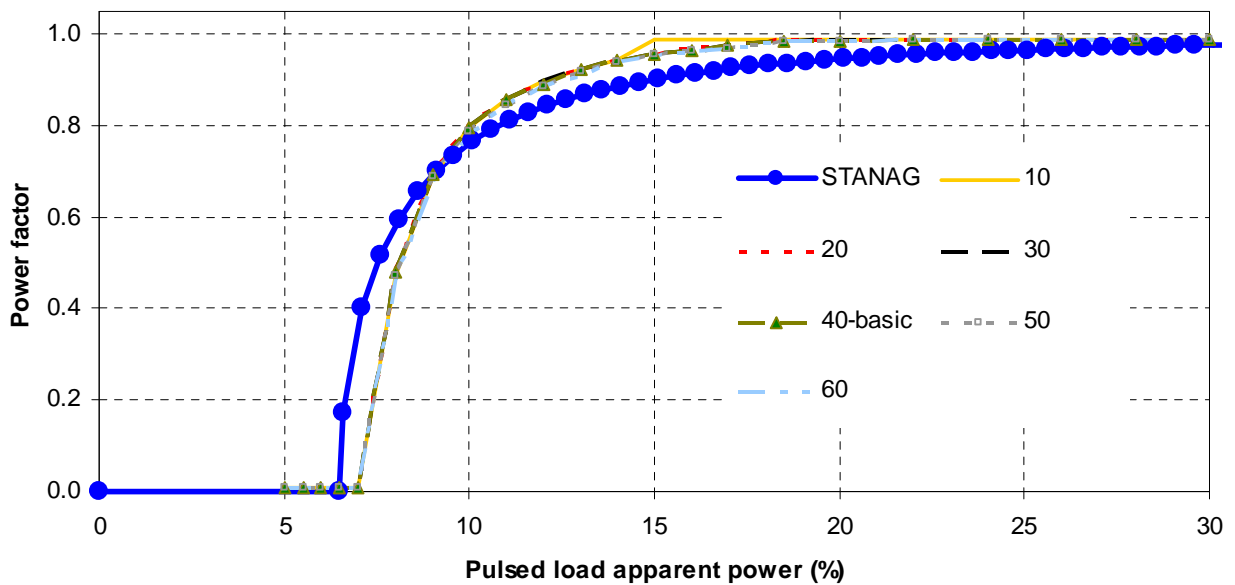


FIGURE 56. Power factor vs pulse load apparent power for different values of the governor's gain in the case of the AES with pulsed load in LV network.

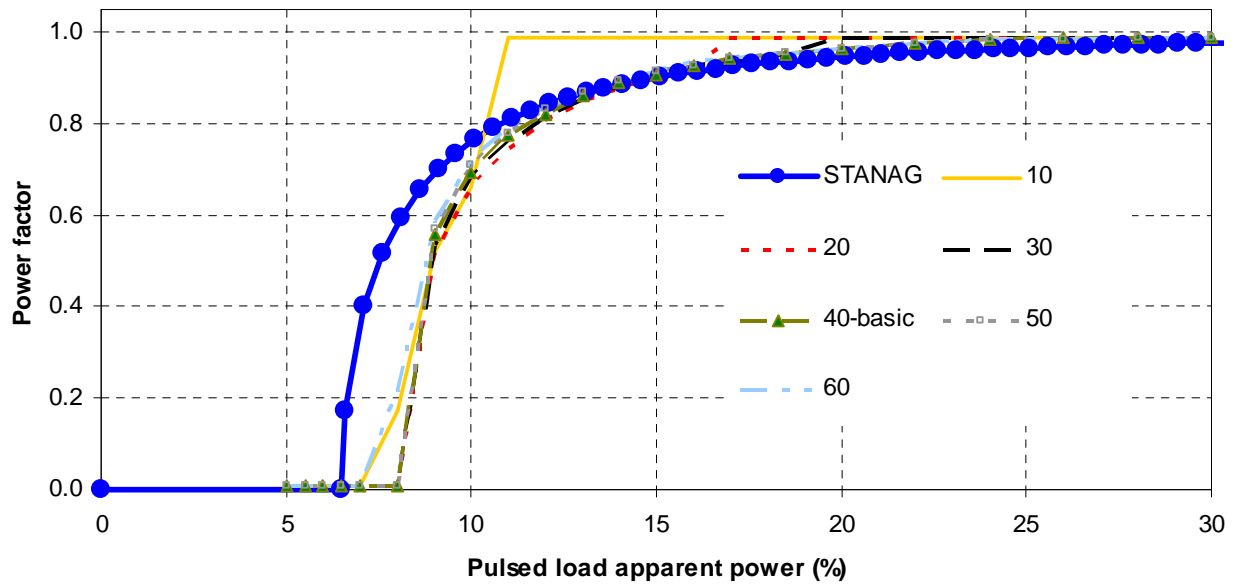


FIGURE 57. Power factor vs pulse load apparent power for different values of the governor's gain in the case of the AES with pulsed load in HV network.

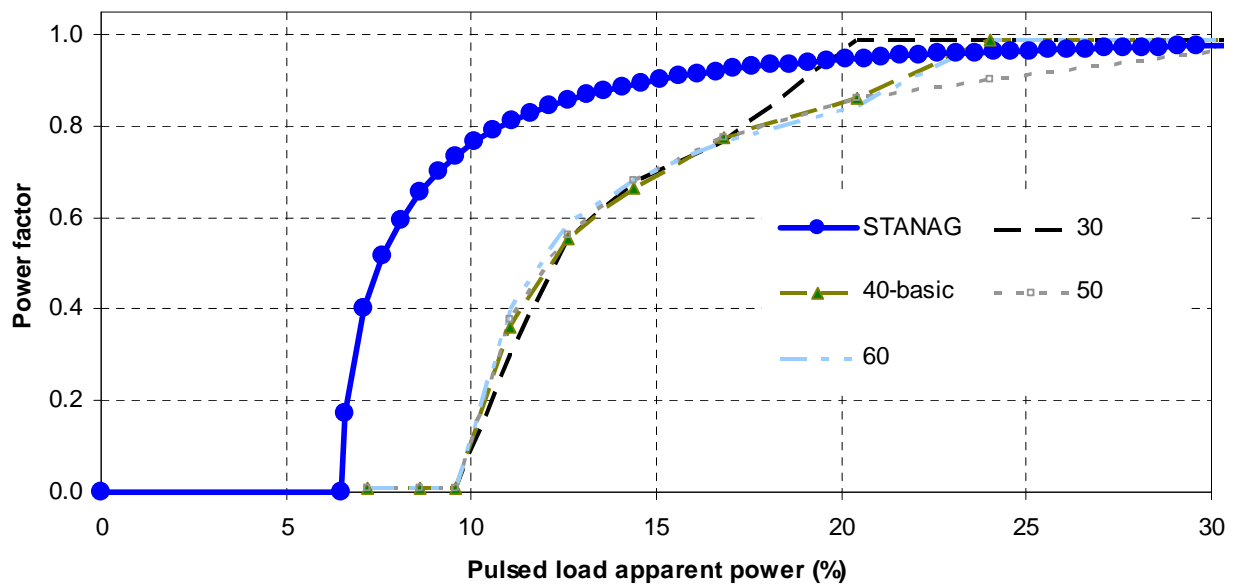


FIGURE 58. Power factor vs pulse load apparent power for different values of the governor's gain in the case of the conventional ship [2].

AVR GAIN

Next, the AES with the pulsed load installed at LV network is simulated repeatedly for different values of the AVR gain K_A (50, 100 (basic scenario), 150, 200, 250). The respective power factor – pulsed load apparent power curves are shown in Fig. 44, where it is obvious that the increase of the

AVR gain tends to extend the unacceptable operating area, outside the area defined by STANAG 1008 curve.

Similarly, in Fig. 45 the respective power factor – pulsed load apparent power curves are shown for different values of AVR gain K_A (50, 100, 150, 200 (basic scenario), 225) and for the AES with the pulsed load installed at HV network. Here, the increase of the AVR gain tends to increase the unacceptable operating area, but not beyond the limitation curve defined by STANAG 1008. Larger values for AVR gain can not be provided as system is led to instability.

In case of the conventional ship, no significant effect is observed on the respective curves as it has already mentioned in [2] and as it is shown in Fig. 46.

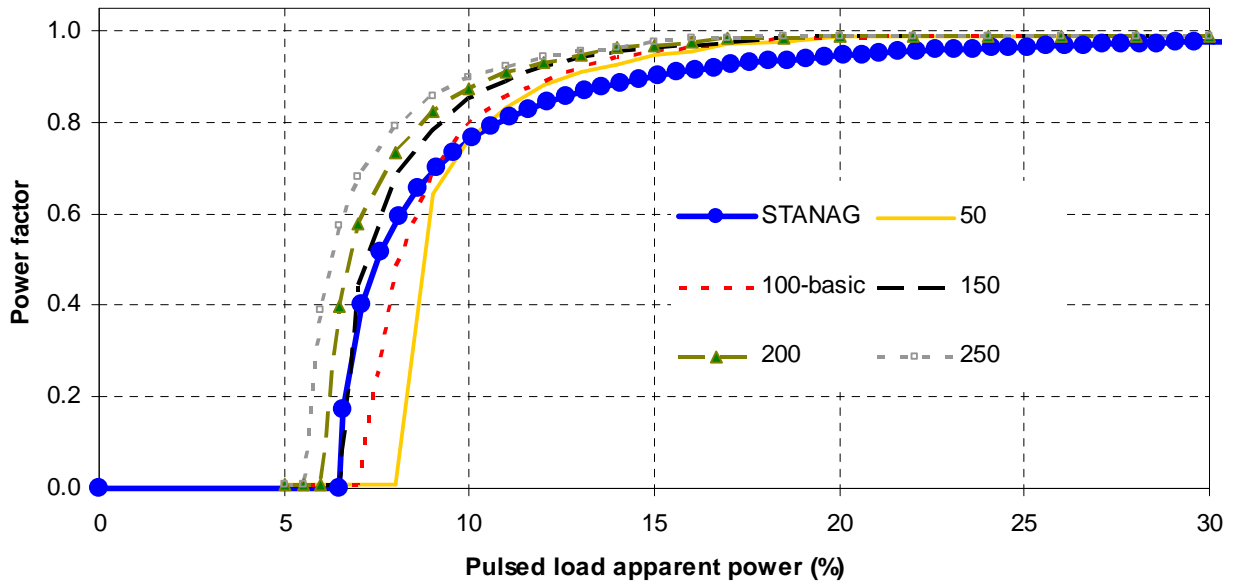


FIGURE 59. Power factor vs pulse load apparent power for different values of the AVR gain in the case of the AES with pulsed load in LV network.

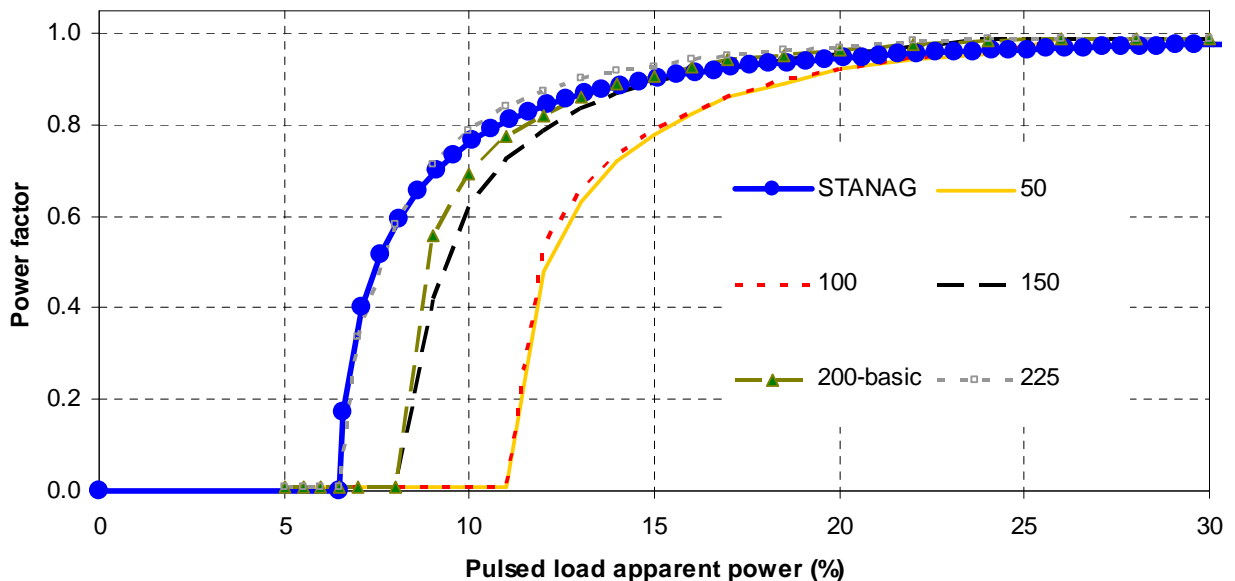


FIGURE 60. Power factor vs pulse load apparent power for different values of the AVR gain in the case of the AES with pulsed load in HV network.

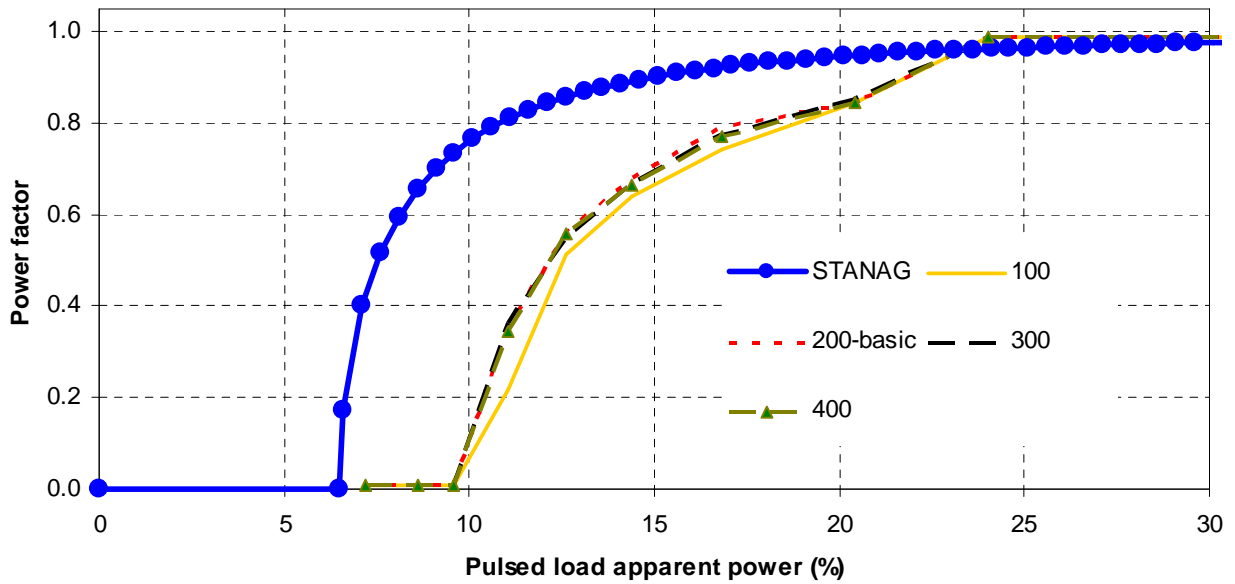


FIGURE 61. Power factor vs pulse load apparent power for different values of the AVR gain in the case of the conventional ship [2].

It is concluded that the AVR gain has strong effect on the obtained unacceptable operating area for the AES topologies.

GENERATOR'S FIELD VOLTAGE UPPER BOUND

Next, the AES with the pulsed load installed at LV network is simulated repeatedly for different values of the generator's field voltage upper bound, V_{Rmax} (1.25, 2, 4, 6 (basic scenario), 8, 10, 12). In Fig. 47 the respective power factor – pulsed load apparent power curves are shown. The curves obtained for $V_{Rmax}=4, 6, 8, 10, 12$ are identical. It is obvious that the respective parameter tends to increase the unacceptable operating area for very small values (less than 2). However, the usual values are above 3.

Similarly, the respective power factor – pulsed load apparent power curves for different values of the generator's field voltage upper bound V_{Rmax} and for the AES with the pulsed load installed at HV network are shown in Fig. 48. Here, the curves present the same behavior with the ones of the AES with the pulsed load connected to LV network, but with larger range of variation. In case of the conventional ship no significant effect is observed on the respective curves.

The results presented above demonstrate that generator's field voltage upper bound has weak effect on the unacceptable operating area for typical values (equal or greater than 3.0).

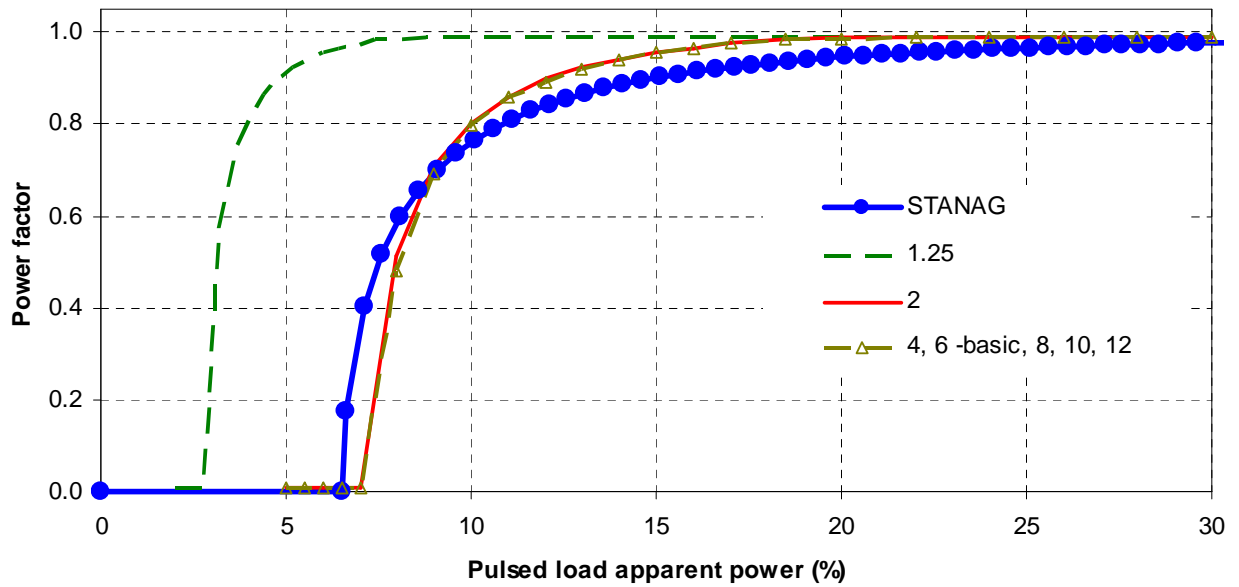


FIGURE 62. Power factor vs pulse load apparent power for different values of the bound of the generator's field voltage in the case of the AES with pulsed load in LV network.

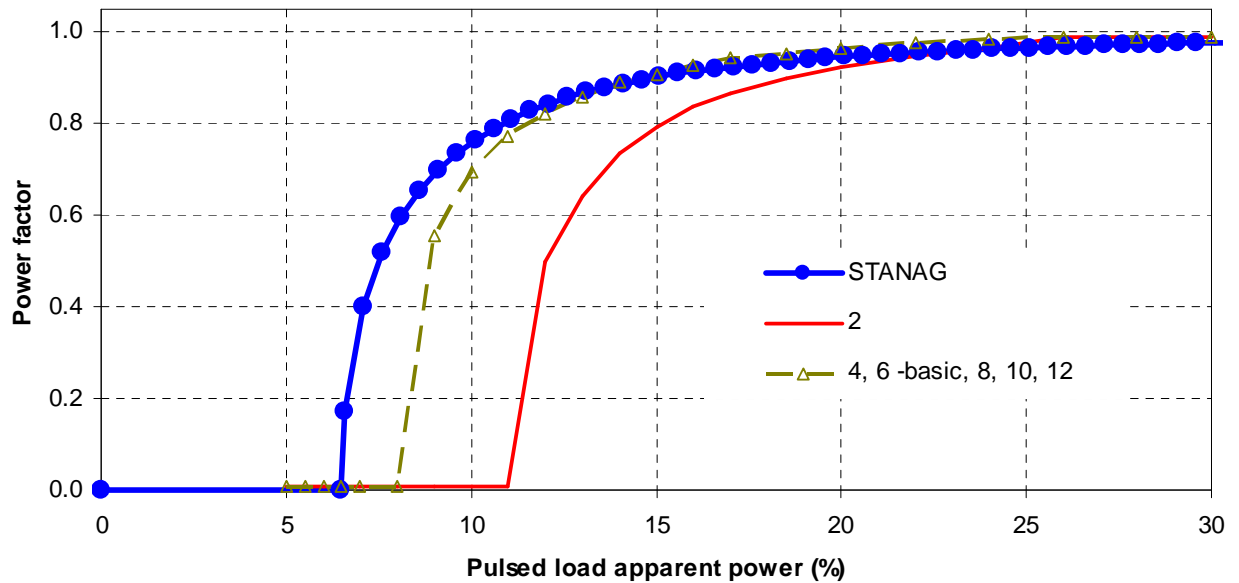


FIGURE 63. Power factor vs pulse load apparent power for different values of the bound of the generator's field voltage in the case of the AES with pulsed load in HV network.

CONCLUSIONS

In this paper the STANAG 1008 design constraints for voltage / frequency modulation have been examined extending its application from the conventional ships to the AES. The last one includes high voltage electric power generation, low voltage ship service power supply system, high voltage

electric propulsion, high or low voltage pulsed loads, while the conventional ship only low voltage network.

Voltage and frequency modulation measure at low voltage sub-networks is studied via simulations in Matlab / Simulink, taking into account various parameters affecting the entire phenomenon. The significance of the respective effects are presented synoptically in Table 4 for three different topologies examined:

- conventional ship electrical network,
- AES with pulsed load installed at low voltage system,
- AES with pulsed load installed a high voltage system.

TABLE (4). Gravity of the effects of various parameters in the voltage/ frequency modulation for each ship topology.

| Ship power system Parameter | Conventional | AES with pulsed load in LV network <i>Gravity</i> | AES with pulsed load in HV network |
|---|---------------------------|---|---------------------------------------|
| Service load factor of the generator at the time of the pulsed load occurrence | Significant | Very significant | Very significant |
| Ratio of HV service load apparent power to the total apparent power | - (<i>no existence</i>) | <i>Less significant</i> | <i>Less significant</i> |
| Ratio of 440V service load apparent power to the total apparent power | Less significant | <i>Less significant</i> | <i>Less significant</i> |
| Ratio of 115V service load apparent power to the total apparent power | Less significant | No significant | No significant |
| Service load power factor | Very significant | Very significant | Very significant |
| HV cable equivalent length | - (<i>no existence</i>) | No significant | Less significant |
| 440V cable equivalent length | Significant | Less significant | No significant |
| 115V cable equivalent length | Very significant | No significant | No significant |
| Pulsed load period | Very significant | Very significant | Very significant |
| Pulsed load duty cycle | Very significant | Very significant | Very significant |
| Generator's sub-transient reactance | Significant | Significant | Significant |
| Generator's inertia | Less significant | No significant | Less significant |
| Governor's gain | No significant | No significant | No significant |
| AVR gain | Less significant | Significant | Significant |
| Bound of generator's field voltage | Less significant | <i>Less significant</i> | <i>Less significant</i> |

In more detail, the effect of each studied parameter is analyzed next:

- Service load factor of the generator at the time of the pulsed load occurrence the presents a strong effect, especially in the case of AES. The variation of this factor beyond 0.20 tends to increase significantly the unacceptable operating area. In this case the design constraints of STANAG 1008 are proved to be insufficient.
- In case of service load distribution to different voltage networks the analysis of the obtained results is more complicated. The ratio of the rated apparent power of the voltage network that the pulsed load is connected to, to the total service load apparent power has a weak effect while the rest of the ratios do not practically affect.
- The effect the service load power factor is very significant, especially in case of the AES. The variation of this factor out of the range of 0.70 - 0.80 tends to increase the unacceptable operating area and the design constraints of STANAG 1008 are insufficient.
- The effect equivalent length of the cables connecting the generator and the pulsed load is less significant. The rest of the cables' lengths do not practically affect. In the case of the AES with the pulsed load installed at high voltage network the increase of the high voltage

cable's equivalent length tends to decrease slightly the unacceptable operating area. In case of the AES with the pulsed load installed at 440V low voltage network or the conventional ship the increase of the 440V low voltage cable's equivalent length tends to increase significantly the unacceptable operating area.

- Pulsed load period the effect is very significant. Maintaining it within 0.6 – 1.0 sec any increase tends to increase the unacceptable operating area while any further increase leads to decrease the unacceptable operating area. Generally, the design constraints of STANAG 1008 are proved insufficient in this case.
- Pulsed load duty cycle is a very significant parameter. Any increase of this factor until 70% (for the cases of the conventional ship and of AES with the pulsed load installed at LV network) or 30% (for the case of AES with the pulsed load installed at HV network) tends to increase the unacceptable operating area, while further increase is decreasing the area. The design constraints of STANAG 1008 are proved insufficient in case of AES.
- Generator's sub-transient reactance is a very significant parameter lacking of a regular behavior. In case of AES, the design constraints of STANAG 1008 are insufficient for very small values of generator's sub-transient reactance.
- Generator's inertia the effect is less significant for very small values of this parameter, while for larger values do not present any effect.
- Governor's gain there has no effect for the typical values. Only for very small values or very big values (such as 10 and 60) a small shift of the curves occurs.
- Automatic Voltage Regulator (AVR) gain effect is significant, especially in the case of the AES. The increase of this factor tends to increase the unacceptable operating area, while the design constraints of STANAG 1008 are proved insufficient to satisfy the respective variations.
- The effect of the upper bound of generator's field voltage is less significant and it only appears for values smaller than 2 (which are not usual).

The above analysis has proved that voltage/frequency limits proposed in STANAG 1008 can lead to different pulsed load power factor – pulsed load apparent power limitation curves depending on various parameters. Some of the most important affecting parameters are: the periodicity and the duty cycle of the pulsed load, the sub-transient reactance of the generators, their associated automatic voltage regulator (AVR) gain, the loading factor of the generator at the time of the pulsed load occurrence, the service load power factor, the equivalent length of the cable between the pulsed load with the generator, the ratio of the service load which is supplied by the same sub-network of the ship to the total one, etc. Therefore, the limitation curves proposed in STANAG 1008 are proved insufficient in many cases according to the above analysis. Under these circumstances, it seems necessary to redesign the respective constraints of STANAG 1008 taking into consideration the aforementioned parameters. A family of limitation curves or analytical mathematical expressions for pulsed load limit calculations invoking the examined parameters, if it is possible, will greatly enhance the design process.

REFERENCES

1. J. Prousalidis, E. Styvaktakis, I.K. Hatzilau, F.D. Kanellos, S. Perros and E. Sofras: "Electric Power Supply Quality in ship systems an overview", *International Journal of Ocean Systems Management*, Vol. 1, no.1 pp. 68 – 83 , 2008.
2. F.D. Kanellos, I.K. Hatzilau, J. Prousalidis, "Investigation of voltage/frequency modulation in ship electric networks with pulsed loads according to STANAG 1008 design constraints", All Electric Ship Conference 2007, London.

3. I.K. Hatzilau, J. Prousalidis, E. Styvaktakis, F.D. Kanellos, S. Perros, E. Sofras, "Electric Power Supply Quality Concepts for the All Electric Ship (AES)", World Maritime Technology Conference (WMTC2006), INEC 2006, IMarEST, 6-10 March 2006, London .
4. Howard A., Smolleck Satish J., Ranade Nadipuram R., Prasad Rudolph, O. Velasco, "Effects of Pulsed – Power Loads upon an Electric Power Grid", IEEE/PSS 1990 Sumner meeting, Minneapolis, Minnesota, July 15-19, 1990.
5. Z.W. Vilar, R.A. Dougal, "Effectiveness of generator control strategies on meeting pulsed load requirements in ship electric systems", IEEE ESTS 2005, July 25-27, 2005, Philadelphia, PA, USA
6. S.D. Sudhoff, B.T. Kuhn, E. Zivi, D.E. Delisle, D. Clayton, "Impact of Pulsed Power Loads on Naval Power and Propulsion Systems", 13th SCSS 2003, April 7-9, 2003, Orlando-Florida, USA
7. IEEE Std 45-1998, "IEEE Recommended Practice for Electrical Installations on Shipboard".
8. STANAG 1008, "Characteristics of Shipboard Electrical Power Systems in Warships of the NATO Navies", NATO, Edition 9, 24 Aug. 2004.
9. USA MIL-STD-1399(NAVY), "Interface standard for Shipboard systems – Section 300A – Electric Power, Alternating Current".
- 10.F.D. Kanellos, I.K. Hatzilau, J. Prousalidis, E. Styvaktakis,, "Simulation of a Shipboard Electrical Network (AES) comprising Pulsed Loads", Engine as a Weapon II, IMarEST, Dec. 2006, London.
11. P. Krause, "Analysis of Electric Machinery", McGraw-Hill, 1986.
- 12.Chee Chee-Mun Ong, "Dynamic Simulation of Electric Machinery using Matlab/Simulink", Prentice Hall PTR, 1998.

Section C: NAVAL ARCHITECTURE AND MARINE ENGINEERING

On the Seakeeping Operability of Naval Ships

Gregory J. Grigoropoulos

^a*National Technical University of Athens, School of Naval Architecture and Marine Engineering, 9 Heron Polytechniou str., 15773 Zografou, Greece*

Abstract. The operability of a vessel in the sea environment, i.e. the capability to accomplish its mission is a major performance indicator of the vessel. It is well known that adverse sea conditions induce significant dynamic motions, velocities, accelerations and loads, which deteriorate the performance of both the crew and the various subsystems onboard, including the hull form itself. For example, the operation of medium and large naval ships e.g. destroyers, frigates and corvettes depends highly on the capability of the helicopters onboard to take-off and, more important to land. Otherwise, they are vulnerable to the attack of submarines. In severe wind and sea conditions and in order to ensure a convenient air wake field operation of helicopters, the captains use to manoeuvre their vessel so that they sail in quartering to following sea conditions. Furthermore, the specifications of the helicopters operating on board ships provide maximum acceptable values (criteria) which should not be violated in order the take-off and landing procedures are safe. Thus, the operation of the aircraft and especially the helicopters depends on the motions of the vessels in a seaway. In this paper, the current practice in the design and operation of naval ships to ensure its operational availability in specified sea conditions will be analyzed and the pertinent existing criteria will be reviewed. Additional information contained in NATO STANAG 4154 will be discussed and a framework of procedures to satisfy all involved subsystems will be proposed. Available methods to improve the performance of existing vessels or new designs will be presented and discussed.

Keywords: operability, seakeeping, naval ships, criteria.

PACS: 02.30.Nw, 02.50.Fz, 02.60.Pn, 02.70.Hm, 04.30.Nk

INTRODUCTION

Following the pioneering works of Ursell (1949a, 1949b) ^{[1],[2]} on the two-dimensional motions of a cylinder in waves, Korvin-Kroukovsky (1955) ^[3] developed the first practical method to predict analytically the seakeeping performance of a ship in waves. The method denoted as strip theory is based on the two-dimensional hydrodynamic characteristics of the ship's sections and it is widely used for the evaluation of the seakeeping qualities of ships. The latter are either mapped to circular sections to implement Ursell's solutions, using Lewis (Lewis, 1929) ^[4] or Extended-Lewis (Athanasoulis and Loukakis, 1982) ^[5] conformal mapping techniques or are fitted with sources along the wetted contour (Frank, 1967) ^[6]. Later on, more exact and rigorous versions of the strip theory, as well as alternative two-dimensional techniques have been proposed. Their presentation, however, is outside the scope of this paper.

In the 80s three-dimensional theories for zero speed were developed (Guevel and Bougis, 1982) ^[7] were developed. The forward speed in that case is treated in the same way as in the strip theory. At the same time fully three-dimensional methods were proposed, using either the translating and pulsating Kelvin source (see e.g. Liapis, 1986 ^[8]), which satisfies the free surface condition, or the simple Rankine source (Sclavounos, 1996 ^[9]). The latter methods provide more promising results.

By means of the above theories the seakeeping responses in regular waves are estimated. The more interesting dynamic behavior in realistic seaways is derived on the basis of the regular wave results using the methodology described in the pioneering paper of St. Denis and Pierson (1953) ^[10].

The assessment of the seakeeping performance leads to the following very interesting applications for both commercial and naval ships:

- The evaluation of the ability of the ship to accomplish his service in a specific sea environment.
- The overall potential of the vessel to operate in the sea conditions that it is expected to encounter throughout its life cycle.
- The evaluation of alternative routes, especially for ocean going merchant vessels to conclude to the optimum one, along which the deterioration of the performance of the vessel is kept to a minimum.
- The optimization of the hull form to exhibit best seakeeping behavior without deterioration of the other performance characteristics.

Excluding the third of these applications which refers mainly to merchant ships, the remaining ones will be discussed in detail in the sequel.

SEAKEEPING OPERABILITY PERFORMANCE ASSESSMENT

On the basis of the theoretical background, shortly described in the introduction, the seakeeping responses of a ship in specific sea conditions are assessed. Since the sea environment is of statistical nature ship responses, randomly occurring events and human response are expressed via statistical quantities, too. Approximate statistical relations exist between the responses and their probability, in the short term. Equivalence can be assumed between statistical and spectral definitions. To specify whether a vessel can operate in a given sea environment, the designer has to compare each dynamic response with one or more seakeeping criteria. These criteria are limiting values derived on the basis of experience, good practice and systematic trials to establish the threshold between operability and non-operability (failure to operate) of the vessel as a whole or any of the systems onboard.

Usually the root mean square (RMS) values are used to evaluate the severity of the dynamic responses, while the randomly occurring events are described via their frequency of appearance per hour. Recently, additional criteria referring to the well being of the personnel as well as their capability to accomplish their assigned tasks are suggested. The motion sickness incidence (MSI)

and the motion induced interruption (MII) indices are to most common of them. The former declares the percentage of personnel that suffers of motion sickness, nausea etc. while the latter focuses on the ability of a crew member to move from one location to another one aboard without many interruptions. These indices are calculated by correlating the performance of the humans with the dynamic responses of the ship ^[11, 12].

Regarding the establishment of seakeeping criteria, significant work, both for merchant and naval ships, as well as small craft has been reported by the NORDIC Project ^[13]. The criteria that are associated with the hull of naval ships, as well as the subsystems onboard and the personnel comfort are presented in STANAG 4154, 3rd Edition (2000) ^[14], issued by NATO. According to this STANAG, the criteria that apply in each case depend on the type of the naval ship and the assigned mission for which it is assessed. Thus, in the text of STANAG 4154 the sets of criteria imposed on naval ships for various common missions are listed. On Table 1, the set of criteria that apply to a monohull frigate or corvette for helicopter operations are presented.

| TABLE 1. Hull and Helicopter operations criteria | | |
|---|----------------------------------|---|
| Criterion Response | Location | Criterion Levels |
| | | Helicopter Recovery |
| Vertical Velocity, RMS | Helicopter Platform | 2.0 m/s |
| | | Criteria for the hull (monohull) |
| Deck Wetness | Worst Station in bow region | 30 occurrences / hour |
| Bottom Slamming | Worst Station in bow region | 20 occurrences / hour |
| Propeller Emergence | ¼ Propeller Diameter | 90 occurrences / hour |
| | | Default Criteria for the personnel |
| Pitch, RMS | | 1.5 deg |
| Roll, RMS | | 4 deg |
| Vertical Acceleration, RMS | Bridge | 0.2 g |
| Lateral Acceleration, RMS | Bridge | 0.1 g |
| Relative Wind, Mean Value | Flight Deck | 35 kn |
| | | Recommended Criteria for the personnel |
| Motion Sickness Incidence MSI | Task Location | 20% of crew @ 4 hours |
| Motion Induced Interruption MII | Task Location | 1 / min |
| Lateral Acceleration, RMS | Bridge | 0.1 g |
| Relative Wind, Mean Value | Task Location if on Weather Deck | 35 kn |

The aforementioned criteria for establishing the operability of ships is used both during their design and their operation. In the former case, the formulation of the requirements should be carefully carried out, taking into account that adjustments of a design to meet them are possible, but noticeable improvements of the seakeeping performance may have major impact on the design. Results derived by computational methods should be further supported by model tests and/or full-scale trials. Full scale trials represent the tool which provides the most comprehensive information on seakeeping performance, assuming that the encountered sea state can be assessed. They should be better performed to assess performances which are highly critical for the project and where other methods are not sufficiently reliable.

In ship operation, the assessment of the operability defines the capability of the ship to transit across the seas to the area of interest and to use its subsystems and weapons to accomplish its assigned mission encompassing patrolling, fighting or carrying out support operations (naval air operations, replenishment at sea, weapon systems reload or maintenance and repair). A specific ship in a given sea environment may be operable for some combinations of speeds and encountered wave headings. These findings are graphically represented on the polar diagrams

proposed by Comstock and Keane [15]. A typical polar diagram for the helicopter performance assessment is shown on Figure 1.

The operability of medium and large naval ships e.g. destroyers, frigates and corvettes depends highly on the capability of the helicopters onboard to take-off and, more important to land. Otherwise, these ships are vulnerable to the attack of submarines. Furthermore, the specifications of the helicopters operating onboard ships provide maximum acceptable values (criteria) which should not be violated in order the take-off and landing procedures are safe. Thus, the operation of the helicopters depends on the motions of the vessels in a seaway. The same holds true for the aircrafts onboard an aircraft carrier although they are escorted by a small fleet of surface ships and submarines.

Following Figure 1, the operational region is characterized by the wave headings printed around the outer circle and the ship speeds defining the radii of the circles (7, 14, 18, 22.5 and 27 kn in Figure 1). The borders of the various criteria have been drawn and the operable and restricted areas for each criterion are defined. The allowable area of operation is the one where all criteria are satisfied (yellow colored in Figure 1). Since the seakeeping responses are symmetric around the vessel axis, only the right side of the figure is used. However, in case asymmetric responses, e.g. the vertical acceleration at a location off the centre-plane, in oblique seas, both sides should be used. By calculating the allowable area and dividing it with area of between the inner and the outer circle, the operability index i.e. the percentage of time for which the vessel is operable in this specific sea state is estimated. It should be noted here that, in severe wind and sea conditions and in order to ensure a convenient air wake field operation of helicopters, the captains use to maneuver their vessel so that they sail in quartering to following sea conditions. This further restricts the operational envelop of the naval ship.

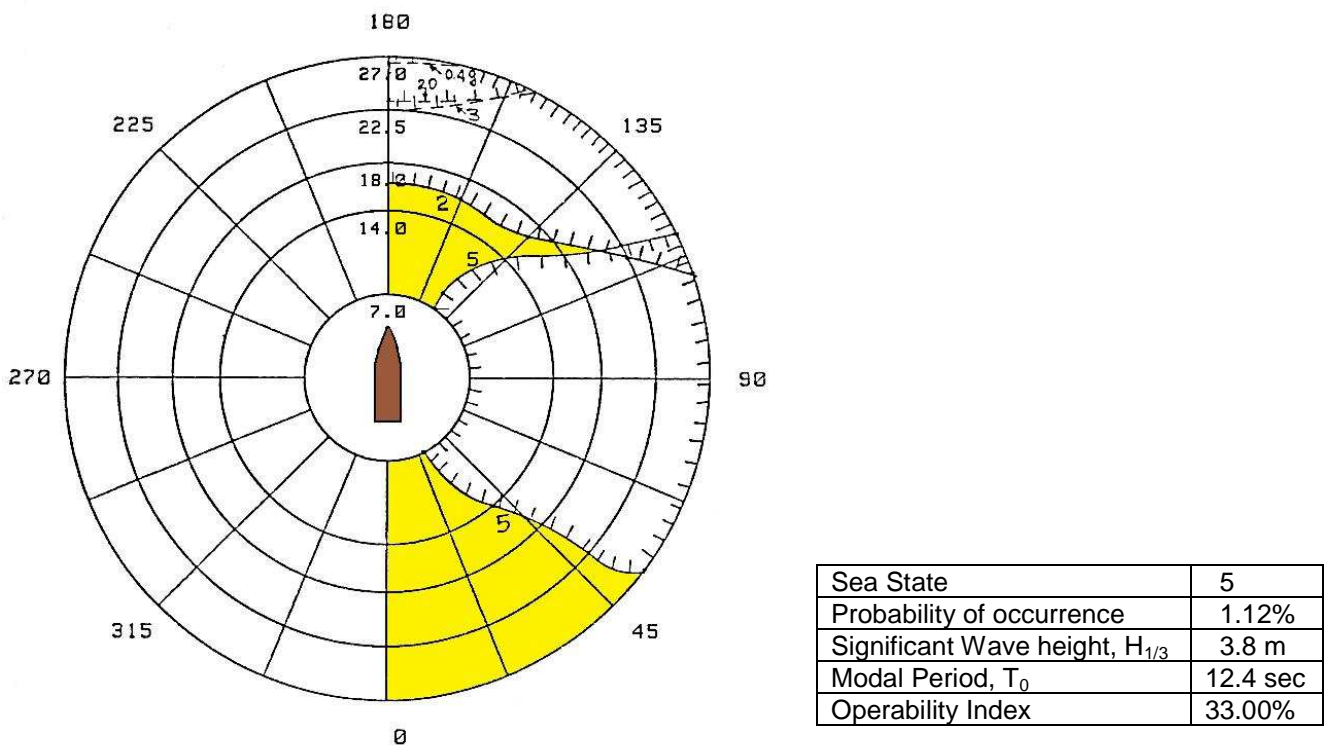


FIGURE 1. Speed polar diagram for helicopter performance assessment.

The investigation of the seakeeping operability performance of a ship along alternative routes may lead to the exclusion of some of them, along which the ship or some of its systems violates one or more seakeeping criteria. Furthermore, for a specific route, in case the ship encounters an area where excessive sea conditions prevail, the captain should circumvent this area, i.e. he should handle this area in the same way he copes with the islands. Finally, the aforementioned procedure can be embedded in a route optimization algorithm to select the optimum route for a vessel. In that case, the speed loss due to the encountered seaway as well as the voluntary speed reduction to reduce the excessive motions should also be taken into account.

OPERATIONAL EFFECTIVENESS FOR SEAKEEPING

Operational effectiveness refers to the ability of the ship to accomplish its mission in whatever conditions it may encounter ^[11]. In order to estimate the operational effectiveness of a naval ship for seakeeping, the whole procedure described in the previous section, is repeated for a set of sea states expected to meet during its mission. Furthermore, it is combined with the probability of encountering each sea condition on the way to accomplish its assigned mission. To this end, the designer makes use of the available statistical data for each sea area, providing the frequency of occurrence of each combination of significant wave height $H_{1/3}$, modal period T_0 and wave direction θ in the area. This data are available in annual, seasonal or monthly basis. By combining the aforementioned statistical characteristics of the sea area, with the expected speeds and route of the vessel, when it crosses the area and with the operability properties of the vessel for each sea condition the respective statistical information regarding the annual, seasonal or monthly operational effectiveness of the vessel is assessed. The method can be extended to life-cycle calculations for the ship. In Figure 2, a typical conditional frequency distribution of sea area, f_{area} , for a naval ship operating in North Atlantic during given seasons is shown. In this Figure, sea areas are defined according to Hogben et al (1986) ^[16].

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|----------|----------|----------|-----------|-----------|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----|-----|-----|--|
| Winter | .05 | 0 | .10 | .10 | .07 | .07 | .10 | .10 | .07 | .07 | .10 | .07 | .05 | .05 | .25 | |
| Autumn | .10 | .03 | .20 | .20 | .04 | .04 | .07 | .07 | .04 | .04 | .07 | .04 | .03 | .03 | .25 | |
| Summer | .10 | .03 | .20 | .20 | .04 | .04 | .07 | .07 | .04 | .04 | .07 | .04 | .03 | .03 | .25 | |
| Spring | .10 | .03 | .20 | .20 | .04 | .04 | .07 | .07 | .04 | .04 | .07 | .04 | .03 | .03 | .25 | |
| Sea Area | 1 | 2 | 3 | 4 | 8 | 9 | 10 | 11 | 15 | 16 | 17 | 23 | | | | |
| | | | | 24 | 25 | f_{season} | | | | | | | | | | |

FIGURE 2. Typical conditional frequency distribution of sea area, f_{area} , for a naval ship in North Atlantic, during given seasons.

In Figure 3 the conditional frequency distributions of speed, f_u , along given courses of a naval ship are depicted. All courses are equally likely, and a wide range of speeds is demanded. Nevertheless, the economical cruising speed is frequently used. Very high or very low speeds are rare. On the basis of the aforementioned information a simplified version of the method proposed by Andrew et al (1984) ^[17] is used to estimate the operational effectiveness. The calculation is

illustrated in graphical form in Figure 4. The operating environment is specified in terms of the scatter diagram of seasons and sea areas as already shown in Figure 2. For each combination of sea area and season we can use a wave atlas [18] to obtain the conditional frequency distribution of the wave directions f_x and the joint frequency distribution of the modal periods T_0 and significant wave heights $H_{1/3}$, f_{TH} . Subsequently, we for each sea state we can calculate the dynamic ship responses for all possible combinations of ship course and speed. The required heading is derived from the wave directions and the ship courses. In case one or more seakeeping criteria are exceeded, the ship can not accomplish its mission.

| Ship speed (knots) | Ship course | | | | | | | |
|--------------------|-------------|------|------|------|------|------|------|------|
| | N | NE | E | SE | S | SW | W | NW |
| 30 | .01 | .01 | .01 | .01 | .01 | .01 | .01 | .01 |
| 25 | .10 | .10 | .10 | .10 | .10 | .10 | .10 | .10 |
| 20 | .50 | .50 | .50 | .50 | .50 | .50 | .50 | .50 |
| 15 | .30 | .30 | .30 | .30 | .30 | .30 | .30 | .30 |
| 10 | .07 | .07 | .07 | .07 | .07 | .07 | .07 | .07 |
| 5 | .02 | .02 | .02 | .02 | .02 | .02 | .02 | .02 |
| 0 | .125 | .125 | .125 | .125 | .125 | .125 | .125 | .125 |

f_{course}

FIGURE 3. Typical conditional frequency distributions of speed, f_U , along given courses of a naval ship.

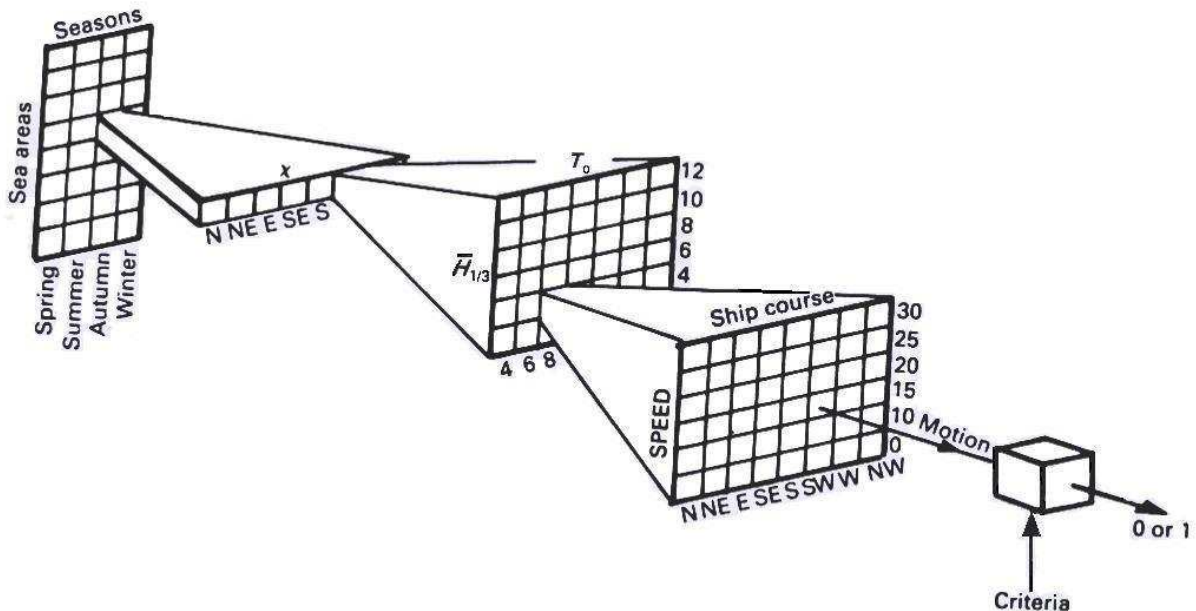


FIGURE 4. Calculation of the operational effectiveness (Andrew et al, 1984).

The proportion of time spent in a given season, sea area, wave direction, modal period, significant wave height, speed and course is defined by following relation:

$$P = f_{\text{season}} f_{\text{area}} f_x f_{\text{TH}} f_{\text{course}} f_U \quad (1)$$

where,

- f_{season} the frequency distribution of season,
- f_{area} the conditional frequency distribution of the sea areas where the ship operates during a given season,
- f_x the conditional frequency distribution of the primary wave directions relative to North, for the given season and sea area,
- f_{TH} the joint frequency distribution of modal periods and significant wave heights for the given season, sea area and wave direction,
- f_{course} the frequency distribution of the ship course relative to North, and
- f_U the conditional frequency distribution of the ship speed for a given ship course.

The ship is capable of accomplishing its mission if all the responses don't violate any of the seakeeping criteria imposed for the mission being considered. The proportion of time for which this is the case, is obtained from the weighted sum of all the possible values of P. This may be written as:

$$E = \sum_{\text{season}} \sum_{\text{area}} \sum_x \sum_{\text{TH}} \sum_{\text{course}} \sum_U (P \Gamma_1 \Gamma_2 \Gamma_3 \dots \Gamma_N) \quad (2)$$

where the symbol Σ declares summation over the subscript, i.e. Σ_{season} , declares summation over all four seasons. Γ_N is a cumulative function defined by:

$$\begin{aligned} \Gamma_n &= 1 & \text{for } r_n < r_{\text{ncrit}} \\ \Gamma_n &= 0 & \text{for } r_n > r_{\text{ncrit}} \end{aligned} \quad (3)$$

where r_n is the n^{th} response and r_{ncrit} is its limiting value.

OPTIMIZATION FOR SEAKEEPING

Thirty years ago, Bales (1980) ^[18] used analytical seakeeping results to derive a regression formula correlating the performance of Destroyer-type hull forms in head seas and at various speeds to certain empirically selected hull form parameters. Then, he used this formula to find the optimum combination of these form parameters which minimize the seakeeping responses. Grigoropoulos and Loukakis (1988) ^[19] presented a more general method for developing hull forms with superior seakeeping qualities. The method, described by Grigoropoulos (1989) ^[20], was used for the analytical development of an optimized hull form for a reefer ship, the efficiency of the method was experimentally verified by model tests of both the parent and the optimum hull.

The method demonstrated that there is also room for considerable seakeeping improvements even when the displacement and the principal characteristics of a new design have been determined without any seakeeping considerations. The methodology can either be incorporated directly in the preliminary design spiral or it can be used to modify a parent hull form. In the assessment of the seakeeping operability the main aim is to ensure that a specific dynamic response of the hull form does not violate a specific seakeeping criterion at a given speed and in specified sea conditions. On

the contrary, the objective of the proposed optimization methodology is to ascertain that a ship, designed with a very complex objective function and many practical constraints in mind, will have as good seakeeping qualities as possible.

The hull form is described in adequate detail for seakeeping calculations, but in a simple manner to allow for the automatic generation of the many variants required by the optimization scheme. Thus, the hull form is considered to be known if the following characteristics are specified: the main dimensions: length between perpendiculars L_{BP} , breadth B and draught T , the sectional area curve $S(x)$, the waterline curve $B(x)$, the longitudinal profile curve $Z(x)$ and the curve of the longitudinal distribution of the centroid of the ship sections $KB(x)$ [5]. From these curves, all necessary ship design parameters can be derived i.e. the displacement Δ , the form parameters C_B , C_P , C_M , C_{VP} , C_{WP} , the location of centers LCB , LCF , KB etc.

The optimization process is based on the automatic generation of variants of a parent hull form with varying one or more of the design parameters, using an extension of Lackenby method [21], to accommodate waterlines and sectional area curves of any shape. To obtain an optimum solution a figure of merit should be specified. The method is based on the assertion: “*Ship responses at sea are minima when the corresponding peak value of their Response Amplitude Operator (RAO) is minimized*” and that, “*therefore, seakeeping optimization can be achieved on the basis of regular wave results only*”. This statement has been numerically verified for ships with displacement and dimensions close to those of the parent hull form. Then, the optimization problem reduces to the following:

“Find the variant with the optimum seakeeping performance of a parent hull form, described by a set of four curves $S(x)$, $B(x)$, $Z(x)$ and $KB(x)$ and identified by a set of design variables (L_{BP} , B , T , C_B , C_{WP} , LCB , LCF , KB) under given constraints.”

Seakeeping performance is expressed as the weighted sum of the peak values of a prescribed set of ship responses in regular waves, for various ship speeds and headings. Optimum performance corresponds to the minimum value of this sum, which is the objective function of the problem. Hydrostatic, stability and common design practice equality and inequality constraints are imposed to the problem which is characterized by the experimentally verified unimodality of the bell-shaped objective function. The direct optimization method proposed by Hooke and Jeeves (1961) [22] in conjunction with the External Penalty Function Method [23], to convert the constrained optimization problem to an unconstrained one, are used to solve the problem.

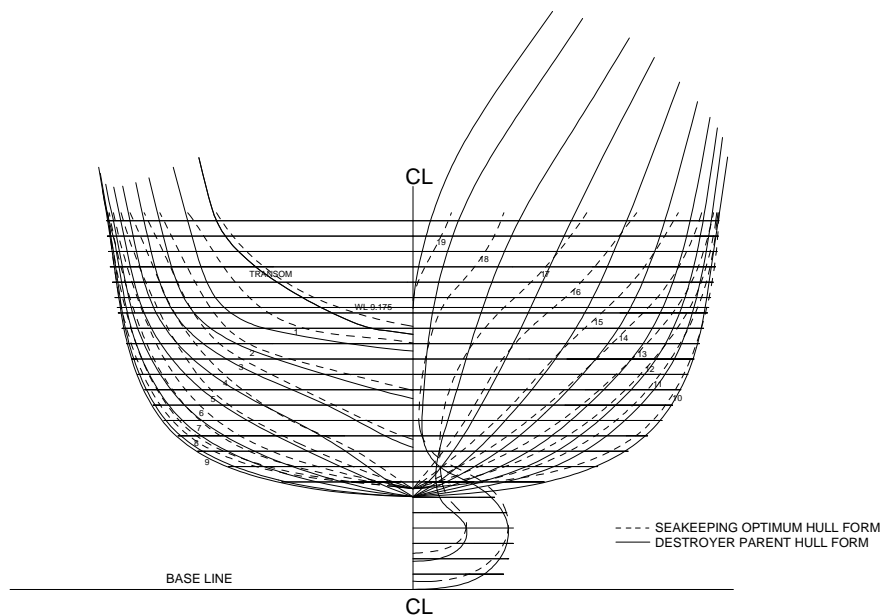


FIGURE 5. Body plans of the parent and the seakeeping optimum DDG-51 destroyer hull form Grigoropoulos (2004) ^[24] implemented the proposed method to optimize US Destroyer DDG- 51. The body plans of the parent and the seakeeping optimum destroyer hull form are depicted in Figure 5. The secondary hull form parameters of the hull form were optimized for the bow Absolute vertical Acceleration (AVA) and Relative Vertical Motion (RVM) at a speed corresponding to Froude number $Fn = 0.41$. The optimization procedure recommended the following modifications to be carried out (shifts forwards or upwards are considered as positive):

$$\delta C_{WP} = +4.00\%, \quad \delta LCB = -0.125\% L_{WL}, \quad \delta LCF = +3.50\% L_{WL}, \quad \delta KB = -2.00\%$$

The main characteristics of the parent and the optimized hull forms are shown in Tables 2A and 2B. Both the parent and the optimum hull forms have been faired using AVEVA Marine ^[25] system. The optimization results were experimentally verified by tests with 1: 24.824 scaled models of both of these hull forms, within the EUCLID 10.14 project (Watson et al, 2002) ^[26].

TABLE 2A. Main geometrical characteristics of DDG-51 destroyer

| | | |
|---------------------|--------------|---------|
| Length of waterline | L_{WL} (m) | 142.00 |
| Beam | B (m) | 18.90 |
| Breadth | T (m) | 6.16 |
| Displacement | Δ (t) | 8636.00 |
| Block coefficient | C_B | 0.502 |
| Wetted surface | WS (m^2) | 2949.50 |

TABLE 2B. Characteristics of the parent, the optimum and the final destroyer hull form. (The volume of displacement is $6103 m^3$ and the draft 6.50 m in all cases.)

| CASE | WS [m^2] | C_M | C_{WP} | LCB [% L_{BP}] | LCF [% L_{BP}] | KB [m] |
|---------------------------|--------------|-------|----------|-------------------|-------------------|--------|
| DESTROYER PARENT | 2949.5 | 0.825 | 0.778 | -0.591 | -4.867 | 3.691 |
| DESTROYER OPTIMUM (Ag) | 2967.2 | 0.827 | 0.777 | 0.084 | -2.655 | 3.584 |
| DESTROYER FINAL HULL FORM | 2999.2 | 0.798 | 0.780 | -0.147 | -2.777 | 3.668 |

The respective RAO curves of the dynamic responses AVA and RVM at a point $0.1 L_{BP}$ aft of FP, and the added resistance for the three hull forms (the parent, the seakeeping optimum Ag hull form and the final hull form derived by optimizing Ag hull form for resistance) are shown in Figures 6-8. In these figures analytically derived results using NTUA strip theory code and Frank close-fit method to model the sectional characteristics and SWAN-2 time-domain panel-method code ^[9] are presented. A careful inspection of these figures leads to the following comments:

- The overall superiority of the optimized hull form is demonstrated experimentally.
- Both analytical tools predict satisfactorily the superiority of Ag hull form over the parent one for seakeeping.
- Both codes provide in general reliable AVA predictions. However strip theory is by far superior in the prediction of the relative merit of the optimized hull form compared to the parent one.
- The seakeeping optimized hull form is superior also with respect to added resistance.

On the basis of the optimization results, it can again be concluded that increasing C_W , moving LCB and LCF forwards and lowering VCB reduce the peak values of the RAO of vertical

acceleration at FP by 18% on the basis of experimental values. It should be mentioned here that, the experimental RAO curves have been based on model tests in random waves of a specific spectrum.

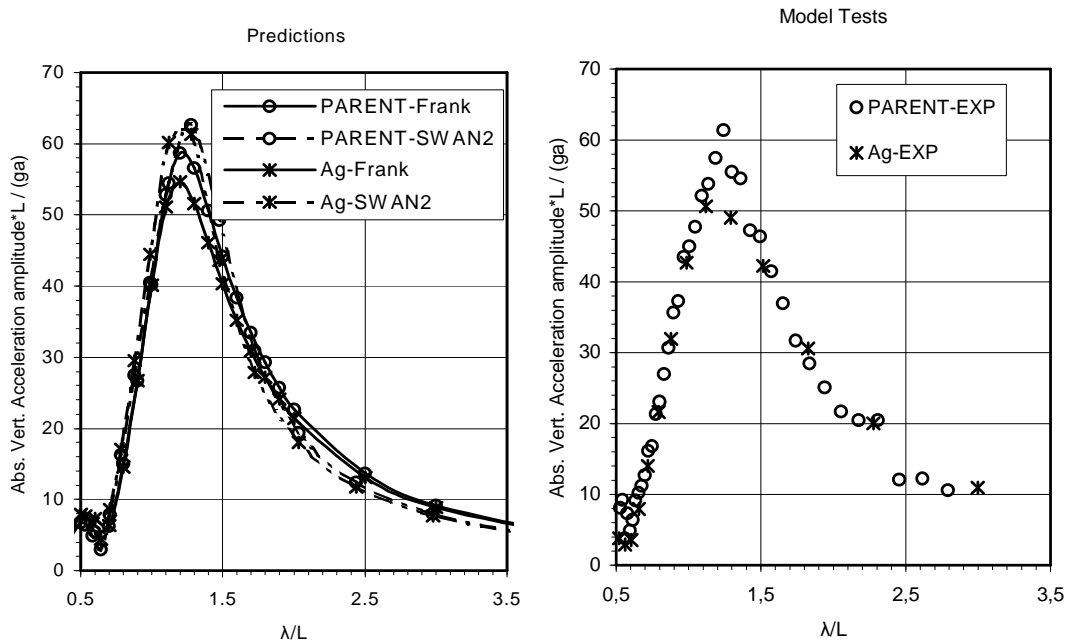


FIGURE 6. Analytical and experimental results for the RAO curve of bow AVA of the parent and the seakeeping optimum destroyer-type hull forms (Fr. No. = 0.41).

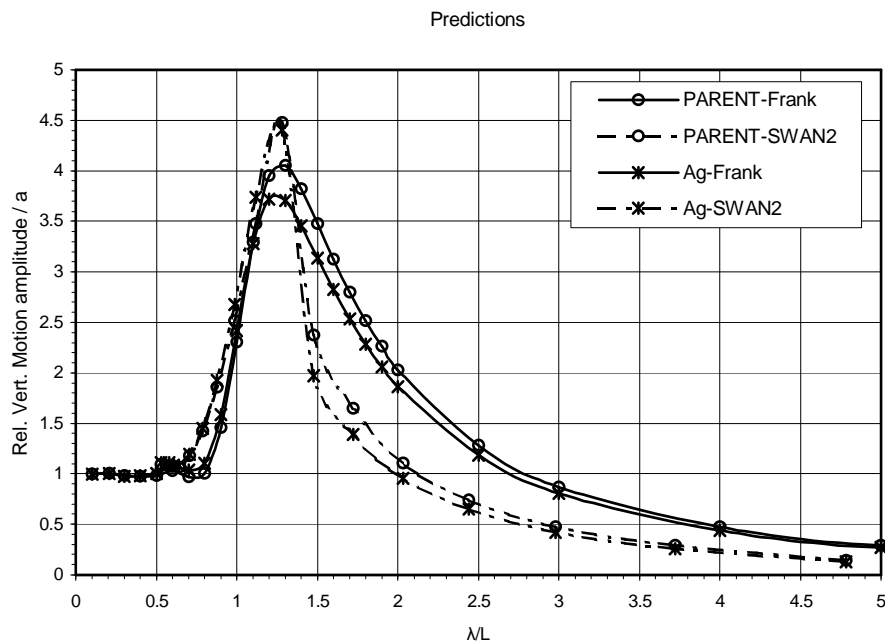


FIGURE 7. Analytical results for the RAO curve of bow RVM of the parent and the seakeeping optimum destroyer-type hull forms (Fr. No. = 0.41).

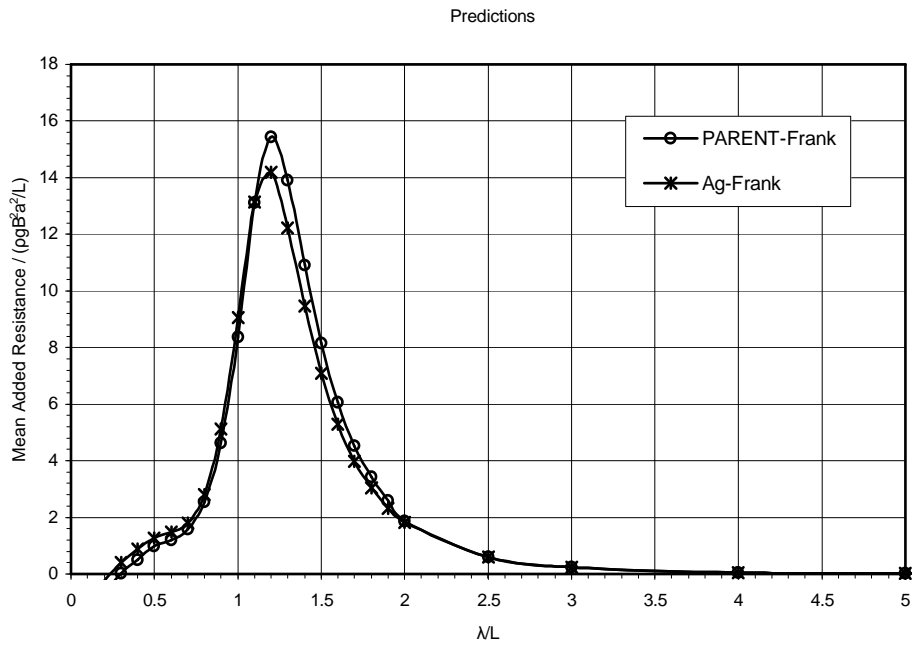


FIGURE 8. Analytical results for the RAO curve of added resistance in head waves of the parent and the seakeeping optimum destroyer-type hull forms (Fr. No. = 0.41).

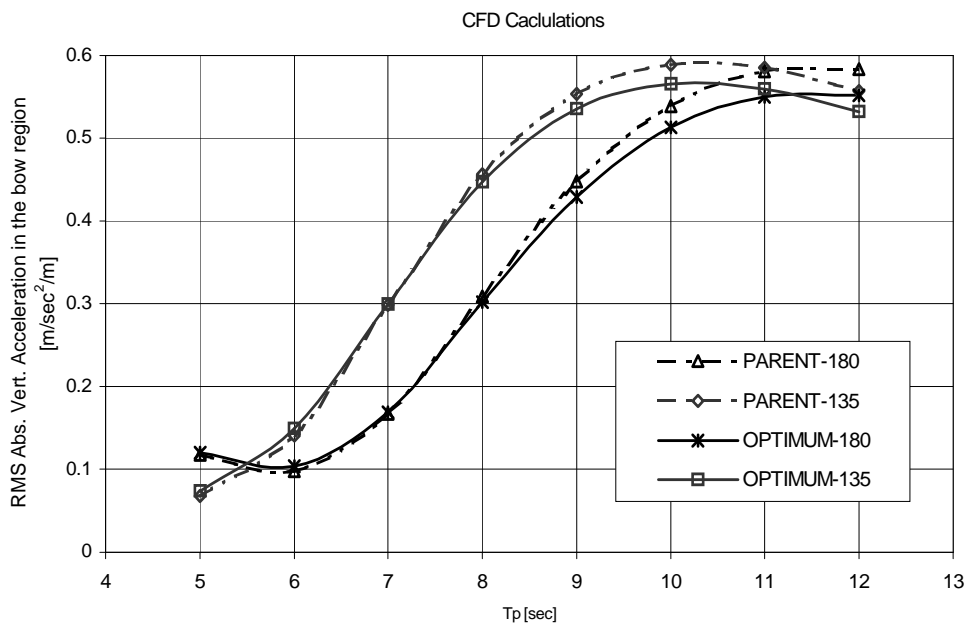


FIGURE 9. RMS Absolute Vertical Acceleration / $H_{1/3}$ of the in the bow region ($0.1 L_{BP}$ aft of FP), for the parent and the seakeeping optimum destroyer-type hull forms ($Fn = 0.41$).

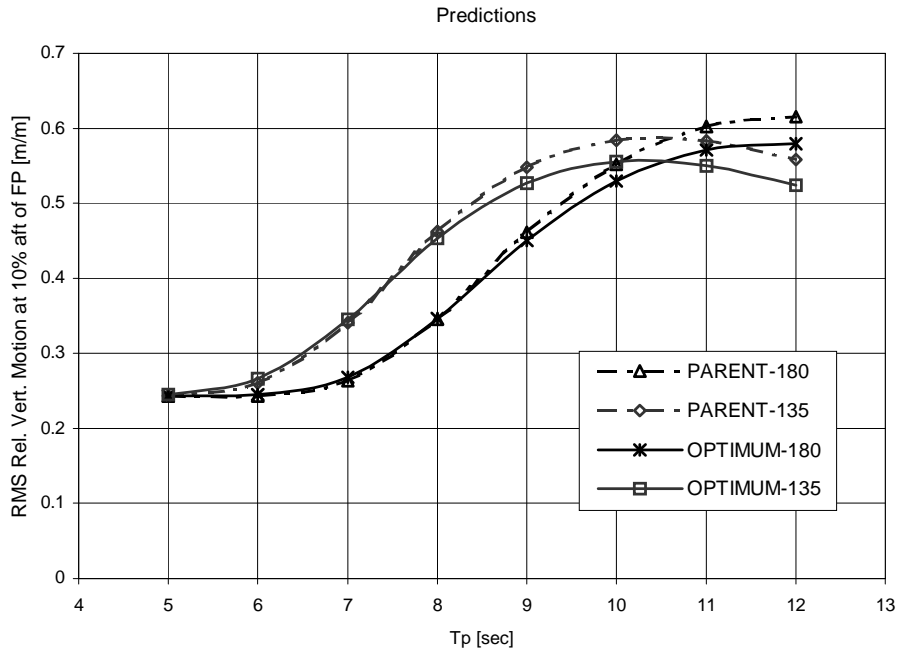


FIGURE 10. RMS Relative Vertical Motion / $H_{1/3}$ of the in the bow region ($0.1 L_{BP}$ aft of FP) for the parent and the seakeeping optimum destroyer-type hull forms ($F_n = 0.41$).

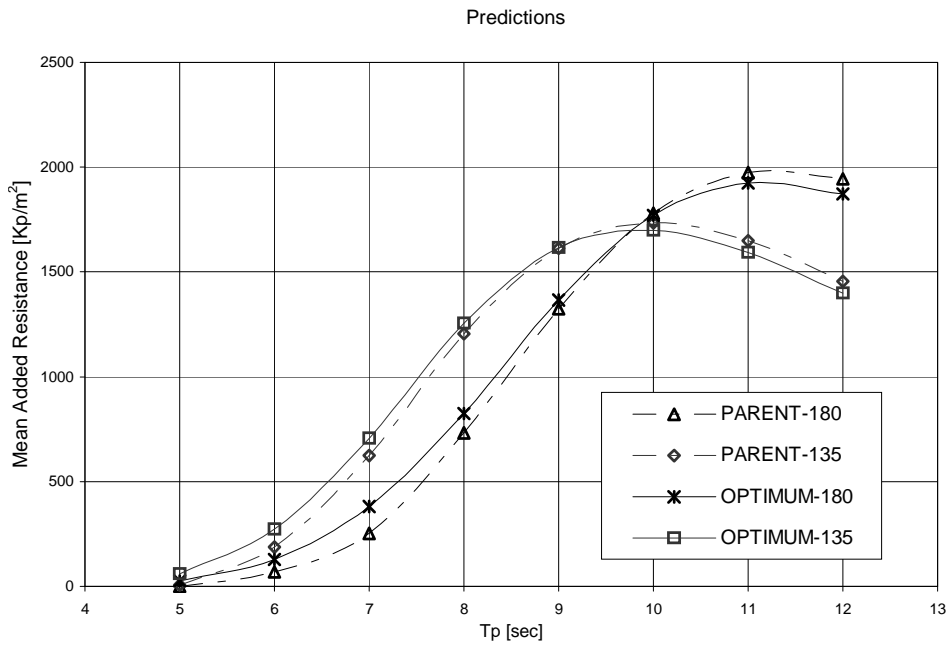


FIGURE 11. Mean Added Resistance / $H_{1/3}$ for the parent and the seakeeping optimum destroyer-type hull forms ($F_n = 0.41$).

In order to demonstrate the advantages of the optimum hull form in real sea states, the RMS values of the Absolute Vertical Acceleration and the Relative Vertical Motion response at the aforementioned point for $H_{1/3} = 1$ m and at head (180°) and bow (135°) waves are depicted in Figures 9 and 10, respectively. Additional calculations have been carried out for the rest of the heading angles. Mean Added Resistance for $H_{1/3} = 1$ m at the above heading angles is presented in Figure 11. The standard strip theory code of NTUA (SPP-86) ^[27] using Frank method was used for these calculations, too. As it can be seen in these figures and concluded from the additional calculations, the superiority of the optimized hull form is apparent at the longer modal periods, corresponding to severe seas, and all headings, whereas the optimization was carried out for head seas.

ADVANCED MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION FOR SEAKEEPING

The aforementioned described procedure is very fast and powerful. However, it has two drawbacks: Although the method is very robust in providing the trends in the design parameters for improving seakeeping performance, the final outcome of the optimization procedure is not a fair and realistic hull form. Fairing by a CAD software is needed which partly reduces the advantages of the optimum combination of design parameters.

In case more than one discipline is to be optimized, a weighted sum of the measures of merits for each discipline is used as objective function. The weighting factors actually impose the relative significance of each of the disciplines and the final outcome may not be quite optimum for each one of the disciplines.

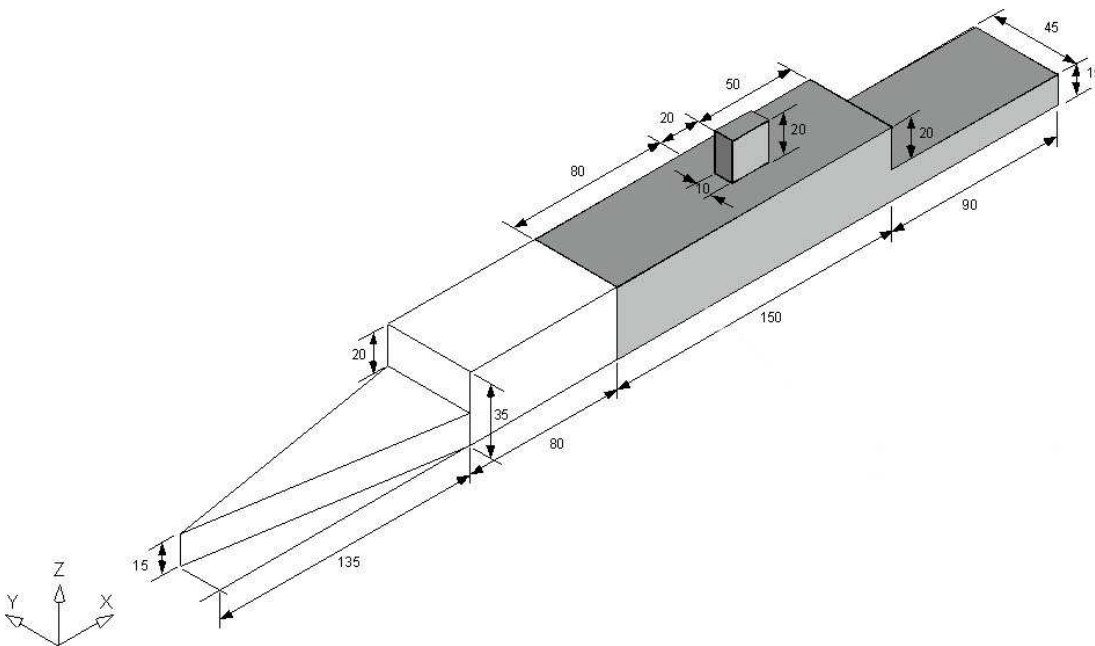


FIGURE 12. The platform lay-out.

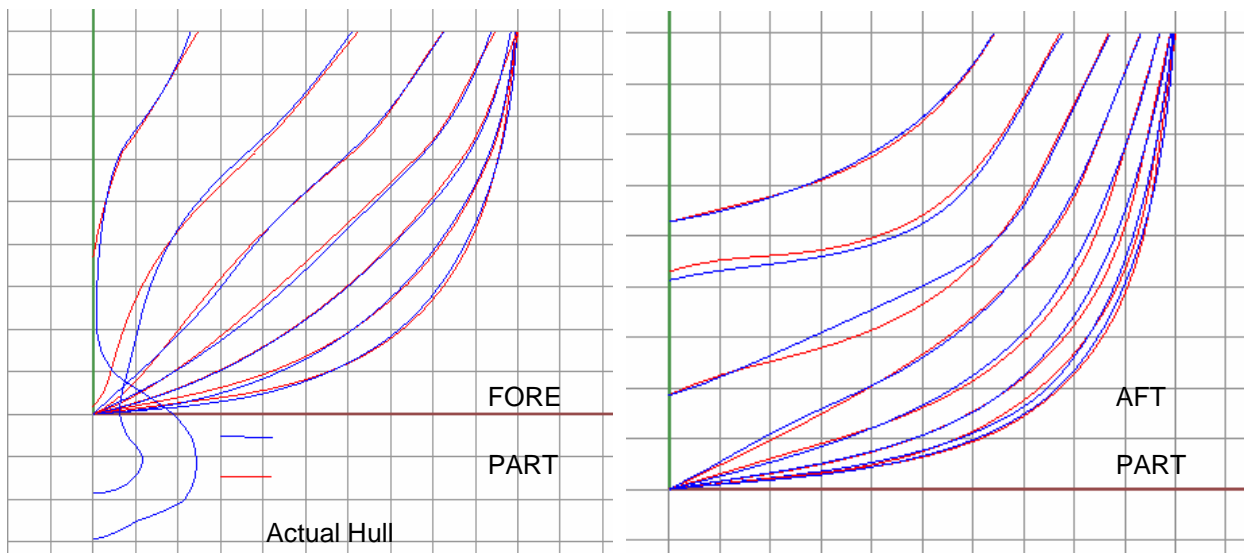
In order to remedy these drawbacks and to exploit new tools available during the last decade Grigoropoulos ^[28] proposed a new methodology to optimize the hull form for seakeeping and implemented it on a frigate for helicopter operation. The main dynamic responses affecting helicopter operations are the vertical velocity at the helicopter platform and roll. Since this kind of operation take place with the vessel sailing at following or quartering seas, the most complicated case of sailing at 10 kn in quartering seas (heading 30°) will be presented in the sequel. Furthermore, the absolute vertical acceleration at the bridge is another significant dynamic response

that accounts for the well being and performance of the crew was added as a third objective of the optimization. Thus, triple-objective optimization numerical tests have been carried out to derive the less responding hull forms with respect to all three of the aforementioned criteria.

The US DDG-51 class hull form without the sonar dome was scaled down to a frigate size to be used as the parent underwater hull form. The overall dimensions of this hull form were tuned to fit the deck configuration shown on Figure 12. The result was a frigate parent hull form that was a fairly close scaled-down version of the DDG-51 hull. Weight distribution was assumed to vary so that the trim of the parent hull and its transverse stability characteristics were kept constant along the runs. Main dimensions (L_{BP} and B) were kept fixed during the optimization, while small variations of draft T were only allowed to counterbalance the deviation of the displacement due to the variation of the hull form and limit it within 1% of its initial value. The main particulars of this hull form are presented on Table 3.

TABLE 3. Main particulars of the parent hull form

| Main Characteristic | Symbol | Value |
|-------------------------------|----------------------------|--------|
| Length Overall | L_{OA} [m] | 145 |
| Length Between Perpendiculars | L_{BP} [m] | 140 |
| Breadth maximum | B [m] | 19.19 |
| Draught design | T [m] | 6.16 |
| Volume of Displacement | Δ [m ³] | 8274.6 |
| Waterplane area | A_{WP} [m ²] | 1456.5 |
| Wetted Surface | WS [m ²] | 2798.3 |
| Long. Centre of Flotation | LCF [m] | 67.3 |
| Long. Centre of Buoyancy | LCB [m] | 69.0 |
| Block Coefficient | C_B [-] | 0.500 |
| Prismatic Coefficient | C_P [-] | 0.614 |



Parametric Representation

FIGURE 13. Parametric representation of the frigate hull form

The methodology implements Friendship-Modeller, as described by Abt et al (2001) ^[29], to represent hull form parametrically. The modelling procedure encompasses three steps:

- Parametric design of the basic longitudinal curves
- Parametric modelling of the design stations (vertical / lateral curves) on the basis of the longitudinal ones.
- Development of surfaces (patches) to interpolate the design stations.

The model of the parent hull form over the actual one has been plotted in Figure 13. Among the more than 50 geometrical parameters involved in the modelling of the hull, the following eleven have been selected to vary either all or some of them, with specified limits for the optimization:

1. SACcpForBody
2. SACcaForFrame
3. GSACareaCoeff
4. GSACxcbAft
5. TRANSECdraft
6. TRANSECtanAtCpc
7. TRANSECbeamAtDec
8. DWLtanAtBow
9. DWLareaCoeff
10. FOSforEnd
11. FOSanAtBow

These parameters encompass the shape of the flat of side and the flat of bottom, the freeboard, the deadrise angle, the centers of areas, the entrance and run lengths, and the parallel middle body. Their names are self-explanatory.

For the optimization an Evolutionary Strategy (ES) is used, as implemented by EASY v.2.0 system. The method is described in its User Manual, as well as by Karakasis et al (2003) ^[30]. The following parameters of the ES were used:

- Offspring population size: 25
- Parent population size: 6
- Parent of one offspring: 3
- Maximum generations/evaluations: 20/500
- Elite archive size: 4
- Maximum idle generations/evaluations: 4/15

Using the above procedure dual-objective (vertical velocity at the helicopter platform and roll) and triple-objective (vertical acceleration at the bridge, in addition) optimization has been performed. The values of the variables for the parent and the optimum hull forms for the dual- and triple-objective optimization schemes are presented on Table 4. The aft parts of the parent and the optimum hull form for the dual- and triple-objective optimization schemes have been plotted in Figure 14.

Following the results of Table 4, improvements of the order of 4-5% in all three responses are achieved when all 11 design parameters are varied. For comparison purposes, the respective results for the dual-objective optimization (excluding AVA at the bridge), where only five of the design variables are modified, are presented. In this case the optimum values for the two objectives are less than in the former case.

TABLE 4. Values of the variables for the parent and the optimum hull forms for the dual- and triple-objective optimization schemes (V= 10 kn).

| Parameters | Triple-Objective Problem | | | Dual-Objective Problem | |
|-------------------|--------------------------|----------------|-----------|------------------------|-----------|
| | Parent | Optimum | Variation | Value | Variation |
| SACcpForBody | 0,570 | 0,533 | -6,5% | | |
| SACcaForframe | 0,42 | 0,43 | 3,3% | | |
| GSACareaCoeff | 0,726 | 0,738 | 1,6% | 0,737 | 1,5% |
| GSACxcbAft | 42,4 | 40,4 | -4,8% | 41,6 | -2,0% |
| TRANSECdraft | 0,88 | 0,84 | -4,2% | 1,07 | 21,4% |
| TRANSEctanAtCpc | 15,0 | 24,0 | 59,8% | 24,5 | 63,5% |
| TRANSECbeamAtDec | 0,64 | 0,72 | 11,8% | 0,72 | 12,0% |
| DWLTanForFrame | 20,0 | 25,3 | 26,4% | | |
| DWLareaCoeff | 0,735 | 0,732 | -0,5% | | |
| FOSforEnd | 90,0 | 79,7 | -11,5% | | |
| FOStanAtBow | 20,0 | 26,7 | 33,4% | | |
| Objectives | Parent | Optimum | % | Optimum | % |
| AbsVelocHeli | 0,47 | 0,45 | -4,2% | 0,46 | -1,6% |
| AbsAccelBridge | 0,12 | 0,11 | -5,8% | | |
| Roll | 1,29 | 1,24 | -4,0% | 1,25 | -3,6% |

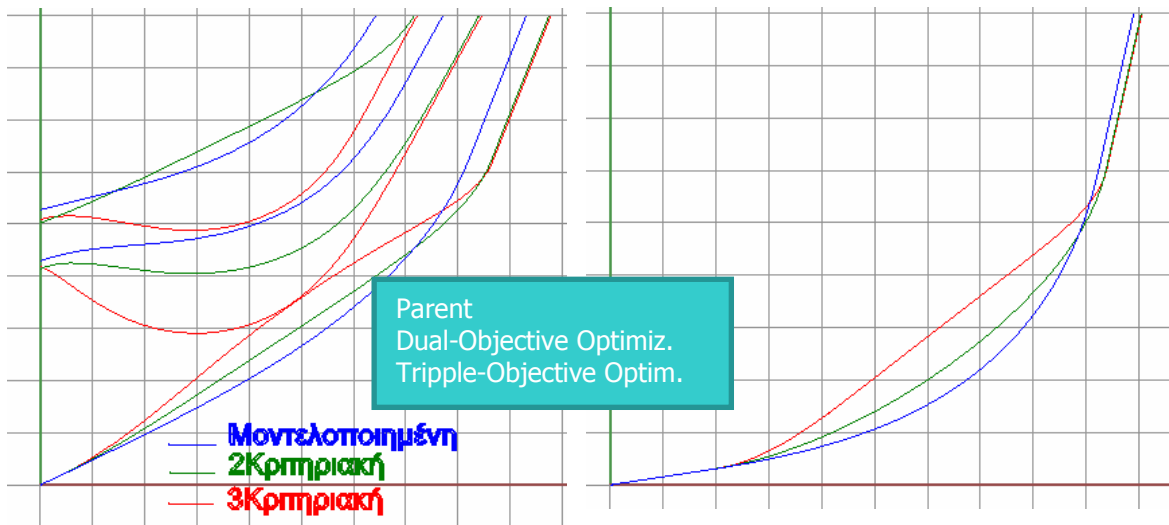


FIGURE 14. Aft part of the parent and optimum hull form for the dual- and triple-objective optimization schemes.

CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

In this paper, the theoretical background and the tools available to the designer and the operator to carry out seakeeping calculations are presented.

The designer, equipped with these tools is able to assess the dynamic response of any ship in a specific seaway. In order to evaluate the operability of a ship in a seaway, a set of seakeeping criteria should be specified which depend on the mission of the ship. The ship is considered as operable in any sea state where all set criteria are satisfied. The emphasis of the respective

discussion was on medium and large naval ships, which operate at least one helicopter for anti-submarine warfare.

Furthermore, the hull form of any naval ship can be significantly improved with respect to seakeeping, if it undergoes an optimization procedure. Two alternative methodologies were presented in this respect, the more traditional one where the combination of some hull form parameters is sought which minimizes the seakeeping performance of the corresponding vessel. However, since this procedure does not result in a fair hull form, an a posteriori fairing is carried out which partly reduces the benefits of the optimization. Anyway the whole procedure is robust and results in quite improved hull forms.

Recently, some modern tools became available to the designer (parametric modelling, genetic algorithms), that allow for a more general multi-objective methodology. A complicated test case implementing this methodology is described to demonstrate the potential of the method.

The main intention of the author is to demonstrate that currently plenty of powerful tools are available both to the designer and the operator that allow the incorporation of seakeeping behavior in the design process and that these tools may result in a final product with significantly improved seakeeping characteristics even when the main dimensions and parameters are fixed. The evolution of computer power permits the execution of these complicated optimization procedures within reasonable computing time.

ACKNOWLEDGMENTS

The author would like to acknowledge HULLOPT (Optimal Techniques for Hull Geometry), EUCLID 10.14 Project sponsored by CEPA 10, for supporting this research and for permitting the publication of the results regarding DDG-51 and Ag hull. Greece, Italy, Turkey and United Kingdom participated in this project with industrial partners NTUA, INSEAN and FINCANTIERI, ITU and QINETIQ, respectively.

He also would like to thank Lieutenant Commander (HN) Emmanuel Chatzipanagiotou for carrying out the optimization computations within his thesis for the postgraduate program on Marine Science and Technology supervised by the author.

REFERENCES

1. F. Ursell, "On the Heaving Motion of a Circular Cylinder on the Surface of a Fluid", *Quart. Journal of Mech. And Appl. Maths*, Vol. 2, p. 213, (1949a).
2. F. Ursell, "On the Rolling Motion of a Cylinders in the Surface of a Fluid", *Quart. Journal of Mech. and Applied Maths*, Vol. 2, p. 335, (1949b).
3. B.V. Korvin-Kroukovsky and W.D. Jacobs, "Pitching and Heaving Motions of a Ship in Regular Waves", *Trans. SNAME*, Vol. 65, p. 590, 1957.
4. F.M. Lewis, "The Inertia of Water Surrounding a Vibrating Ship", *Trans. SNAME*, Vol. 37, p. 1, 1929.
5. G.A. Athanassoulis and T.A. Loukakis, "An Extended Lewis Form Family of Ship Sections and Its Applications to Seakeeping Calculations", *Intl. Shipbuilding Progress*, Vol.32, No.366, p.33, 1982.
6. W. Frank, "Oscillation of Cylinders in or Below the Free Surface of Deep Fluids", NSRDC, Rep. No. 2375, Washington D.C. (1967).
7. P. Guevel and J. Bougis, "Ship Motions with Forward Speed in Infinite Depth", *Intl. Shipbuilding Progress*, Vol. 29, No. 332, p.103, Apr. 1982.

8. S.J. Liapis, "Time Domain Analysis of Ship Motions", *Technical Report 302*, Department of Naval Architecture and Marine Engineering, The University of Michigan, Ann Arbor, 1986.
9. P.D. Scлавounos, "Computation of Wave Ship Interactions", *Advances in marine hydrodynamics*, edited by Qhkusu M., Computational Mechanics Publications, 1996.
- 10.M. St. Denis and W.J. Pierson, "On the Motions of Ships in Confused Seas", *Trans. SNAME*, Vol. 61, p. 280, 1953.
- 11.A.R.J.M. Lloyd, "Seakeeping: Ship Behaviour in Rough Weather", Ellis Horwood Ltd Publ., John Wiley & Sons, New York, 1989.
- 12.International Organization of Standardization ISO, "Mechanical Vibration and Shock: Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration. Part 1: General Requirements", ISO 2631-1, 1997.
- 13.NORDIC Project Board (1987), "Assessment of Ship Performance in a Seaway", *NORD-FORSK, NORDIC Cooperative Project: Seakeeping performance of ships*, Copenhagen Denmark.
- 14.STANAG 4154 NAV (EDITION 3), Common Procedures for Seakeeping in the Ship Design Process, 13 December 2000, MAS/1 5 14-NAVI4154
- 15.E.N. Comstock and R.G. Keane, "Seakeeping by Design", *Naval Engineering Journal*, April 1980.
- 16.N. Hogben, N.M.C. Dacunha and G.F. Olliver, "Global Wave Statistics", *Publ. for British Maritime Technology Ltd by Unwin Brothers Ltd*, Feltham, Middlesex TW140LQ, ISBN 0946653380, 1986.
- 17.R.N. Andrew, P.R. Loader and V.E. Penn, "The Assessment of Ship Seakeeping Performance in Likely to Be Encountered Wind and Wave Conditions", *RINA Intl. Symposium On Wave and Wind Climate Worldwide*, London, 1984.
- 18.N.K. Bales, "Optimizing the Seakeeping Performance of Destroyer-Type Hulls", *13th ONR Symposium on Naval Hydrodynamics*, Tokyo, Japan, 1980.
- 19.G.J. Grigoropoulos and T.A. Loukakis, "A New Method for Developing Hull Forms with Superior Seakeeping Qualities", *CADMO'88*, Southampton, U.K, September 1988.
- 20.G.J. Grigoropoulos, "Hull Form Optimization with Respect to Seakeeping", *PhD Thesis*, NTUA, Dept. of Naval Arch. and Marine Eng., Athens, Greece, May 1989.
- 21.H. Lackenby, "On the Systematic Geometrical Variation of Ship Forms", *Trans. INA*, Vol. 92, p. 289, 1950.
- 22.R. Hooke R. and T.A. Jeeves, "Direct Search Solution of Numerical and Statistical Problems", *Journal of Assoc. for Computing Machinery*, Vol.8, No.4, p. 212, 1961.
- 23.G.E. Wangdahl, "The External Penalty Function Optimization Technique and Its Application to Ship Design", The Univ. of Michigan, Ann Arbor, Rep. No.129, 1972.
- 24.G.J. Grigoropoulos, "Hull Form Optimization for Hydrodynamic Performance", *Marine Technology*, Vol. 41, No. 4, October 2004.
- 25.AVEVA Marine, "User's Manual", AVEVA Solutions Ltd, High Cross, Madingley Road, Cambridge, CB3 0HB, United Kingdom, September 2007.
- 26.S.J.P. Watson, C. Richardsen and M.C. Johnson, "Technical Report for EWP2 of HULLOPT", EUCLID Project RPT 10.14/003 (Optimal Techniques for Hull Geometry), Vers. 0, QINETIQ, UK, February 2002.

- 27."SPP-86: User Manual", Lab. for Ship and Marine Hydrodynamics, National Technical Univ. of Athens, Athens, Greece, 1986.
- 28.G.J. Grigoropoulos, "Ship Motion Simulation", in *Modelling and Simulation of the Ship Environment for Safer Aircraft Launch and Recovery*, NATO Technical Report RTO-TR-AVT-148, 2010, to appear.
- 29.C. Abt, S.D. Bade, L. Birk and S. Harries, "Parametric Hull Form Design – A Step Towards One Week Ship Design", 8th Intl. Symp. on Practical Design of Ships and Other Floating Structures, PRADS 2001, Shanghai, 2001.
- 30.M.K. Karakasis, A.P. Giotis and K.C. Giannakoglou, "Inexact Information Aided, Low-cost, Distributed Genetic Algorithms for Aerodynamic Shape Optimization", *Intl. Journal for Numerical Methods in Fluids*, 43, pp. 1149-1166, 2003.

Assessment of a Marine Gas Turbine Installation on a Liquefied Natural Gas Carrier

M. Bonet^a, G Doulgeris^a and P. Pilidis^a

a Department of Power&Propulsion, Cranfield University, Cranfield, MK43 0AL, UK

Abstract. A prototype integrated marine simulation environment, “POSEIDON”, has been developed. It encompasses the numerical model of a ship, coupled to a gas turbine propulsion system and can be used for a wide range of ship type simulation with the ability to program journey scenarios under diverse geographical and resistance conditions (weather and hull fouling), while the engine operational parameters are recorded for assessing engine performance.

In the present paper, the performance of a Liquefied Natural Gas carrier, powered by two 25MW marine gas turbines, has been assessed for several trip scenarios. The vessel travels from Algiers to Southampton and is subject to varying ambient weather conditions, whose effect on ship and engine performance is evaluated. Moreover, extra scenarios include various hull fouling levels in order to assess the performance degradation due to increased hull resistance. As a result the off-design performance of a marine gas turbine has been assessed, in a systemic approach.

Keywords: marine gas turbine performance, ship performance model, LNG carrier.

INTRODUCTION

Investigation of the off-design performance of marine gas turbines is vital in order to predict the suitability of a prime-mover on a specific operational profile of a chosen ship type. A proposed method of off-design performance investigation is the simulation of the prime-mover in a virtual environment that can approach the engine’s actual operating conditions in the open sea and consequently in a more accurate technical analysis of the prime mover.

The gas turbine is a prime mover that has not been broadly utilized in marine applications, especially in the category of civil, low speed vessels. A significant reason can be traced at its relatively lower thermal efficiency [1], compared to low speed Diesels that is not compensated by its superior power-to-volume and power-to-weight characteristics [1]. However, when extra design conditions, and external constraints come to force, the gas turbine becomes a possible candidate.

One application of particular interest is the Liquefied Natural Gas carrier. The main reason is that the gas turbine is a power generator that can easily adapt to several types of fuel. As a result, it can operate with boil-off fuel, which can be mixed with the main fuel that can be natural gas. Additionally,

a gas turbine offers several benefits to full electric configurations, due to its coupling to electric generators [2].

Gas turbine performance calculation methods are well established in existing literature such as [3] and [4]. However, most of studies regard the prime mover as isolated equipment, separated from its operating environment. This study comes to fill this gap, following a systems-of-systems approach, where the gas turbine is modeled as part of a system; i.e. the marine vessel. As a result, the off-design behaviour of the prime mover is predicted in close couple to the performance of the ship.

MODEL DESCRIPTION

Investigation of the off-design performance assessment of complex ship propulsion systems is vital in order to predict the suitability of the chosen prime-mover on the specific operational profile of the chosen ship type. A proposed method of off-design performance investigation is the simulation of the prime-mover in a virtual integrated environment (Figure 1) that can approach the prime-mover's actual operating conditions in the open sea. Such an environment has been developed in Cranfield University, under the name "POSEIDON". "POSEIDON" can be used for a wide range of ship type simulation using either electrical or mechanical propulsion systems, and is provided with the ability to program journey scenarios not only in ideal but also in increased resistance conditions, such as weather or hull fouling, by the implementation of relevant modules, as seen in Figure 1.

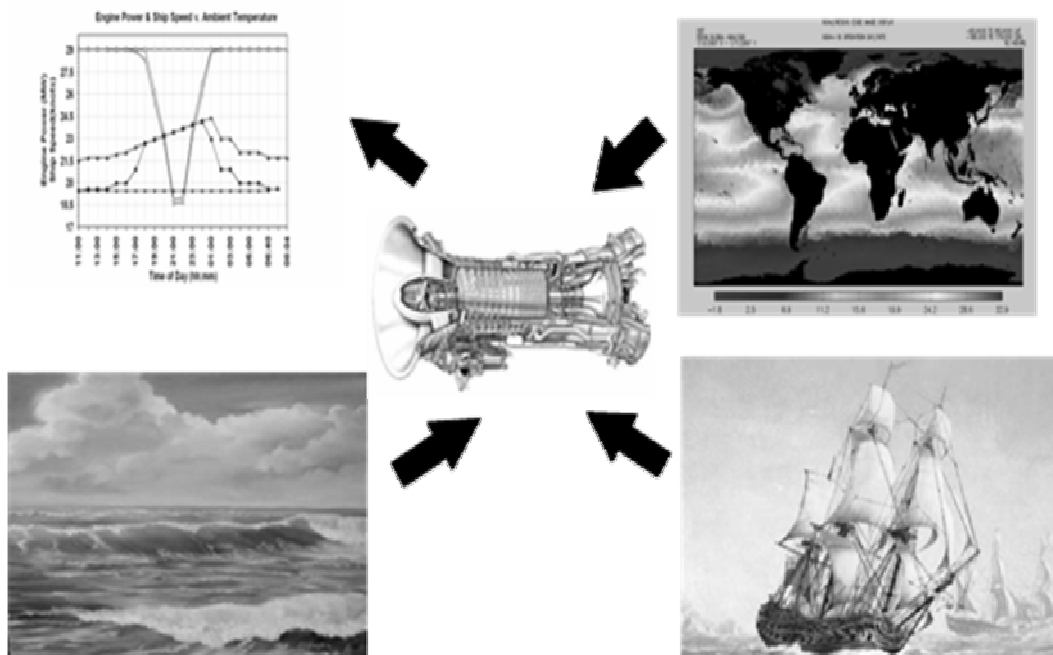


FIGURE 1. Virtual integrated marine environment.

The prototype integrated marine simulation environment tool is constituted by six modules; a ship model, a propeller model, a gas turbine model, a weather model, hull fouling model and a journey model, further discussed below.

Ship Model

A statistical method [5], [6] is used to estimate the power requirements of the ship type to be used as a platform for any propulsion system. The chosen statistical method is capable of simulating full-displacement and semi-displacement vessels, under trial conditions [5], while the propulsion factors are calculated according to [6] for one or two propeller units. The current adopted statistical method simulates several types of existing monohull vessels, with a valid range discussed in [7].

The ship type that is chosen in the present work as engine platform a Liquefied Natural Gas Carrier monohull [8] with the main characteristics shown in Table 1, while integrated full electric propulsion (IFEP) approach is implemented. The prime movers are chosen to be two identical gas turbines, sharing equally the propulsion load, each one driving an electrical generator, which are responsible only for the propulsion of the vessel, and it is assumed that they transfer power to two podded drives. The transmission efficiency from the prime movers to the propellers is estimated at 95% and has been kept constant throughout the journey, as the propulsion system is expected to operate at high power settings.

TABLE (1): Main design parameters of vessel.

| Main parameters | Nomenclature | Values |
|----------------------------------|--------------|-----------|
| Length at water level [m] | L_{WL} | 266.0 |
| Maximum beam [m] | B | 42.6 |
| Average design draft | T | 11.3 |
| Block coefficient | C_B | 0.7493 |
| Mid ship coefficient | C_M | 0.9857 |
| Water plane coefficient | C_{WP} | 0.7848 |
| Service speed [knots] | V_S | 19.5 |
| Froude number | F_n | 0.1964 |
| Displacement [ton] | Δ | 965604.88 |
| Wetted surface [m ²] | S | 13831.0 |
| Lambda | λ | 0.93 |

Propeller Model

The method that is used to simulate the design-point open water characteristics of the propellers is based on the open water characteristics of the Wageningen B-series propellers, [9]. The propeller model is also complemented by the calculation of water-jet open water characteristics, [10]. In order to be able to obtain the open water efficiency at any required off-design conditions an iterative method [11] has been applied, using the advance ratio as variable.

The propellers that are installed on the pods of the marine vessel that is used in the journey scenarios are assumed to be two fixed-pitch propellers (FPP) and their main design-point parameters at service speed are shown in Table 2.

TABLE (2): Design parameters of vessel's propeller

| Propeller parameters | Values |
|--------------------------------|--------|
| Propeller diameter, D_p | 8.5m |
| Expanded area ratio, A_E/A_0 | 0.7674 |
| Pitch ratio | 0.8895 |
| Propeller rotational speed | 76 rpm |
| Open water efficiency | 0.663 |

Gas Turbine Model

The performance of the power generation system is predicted using ‘Turbomatch’. ‘Turbomatch’[12] is a 0-D gas turbine performance code, with the capability of design point and off design calculations, under development in Cranfield University, since 1967 [13]. At design point mode, ‘Turbomatch’ provides engine performance and size data, while at off-design mode, engine performance is predicted for varying throttle setting (rotational speed, combustor exist temperature, or fuel flow). Of particular interest, is the working principle of Turbomatch’s thermodynamic off design calculation being based on mass and energy balance, carried out through an iterative method, based on component maps. These generic, experimentally derived maps are scaled to match the design point of a particular engine before an off-design calculation is performed. The choice of using such maps came as a result of the structure of this code. ‘Turbomatch’ comprises several pre-programmed modules, known as Bricks. Most Bricks correspond to models of individual gas turbine components, such as compressors, burners, turbines, mixers, nozzles, heat exchangers, splitters and power turbines. As a result, its modularity –supported by the implementation of generic component maps – enables the detailed design of any modern and aero engine. ‘Turbomatch’ has been validated against commercially sensitive data and further details can be found in [14], [15] and [16], while the working design point and off-design calculations in ‘Turbomatch’ are fully described in [4] and [12].

In the present study, a Brayton cycle gas turbine has been modeled using “Turbomatch”. In order to assess the overall performance of the engine, a systemic approach has been followed, installing the prime mover on a LNG carrier platform using “POSEIDON”, as previously discussed.

The two marine gas turbines are rated at 25MW and their design parameters are included in Table 3. They are 2-spool with a free power turbine, allowing for improved performance at part load.

TABLE (3). Design parameters of the gas turbine.

| Parameters | Values | Units |
|--------------------------------|--------|-------|
| Power turbine rating, P_{PT} | 25 | MW |
| Turbine entry temperature | 1500 | K |
| Compressor Pressure Ratio | 19.25 | - |
| Intake mass flow | 72.5 | Kg/s |
| Exhaust mass flow | 74.05 | Kg/s |
| Exhaust gas temperature | 805 | K |
| Thermal efficiency | 37.57 | % |
| Specific fuel consumption | 222.8 | g/KWh |
| HPT blade height | 13.3 | cm |
| Mid blade to mid shaft | 67.2 | cm |

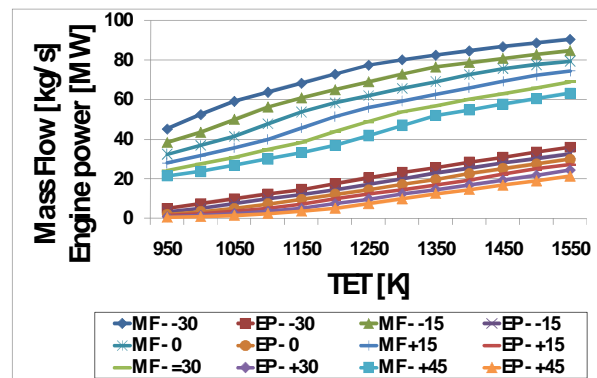
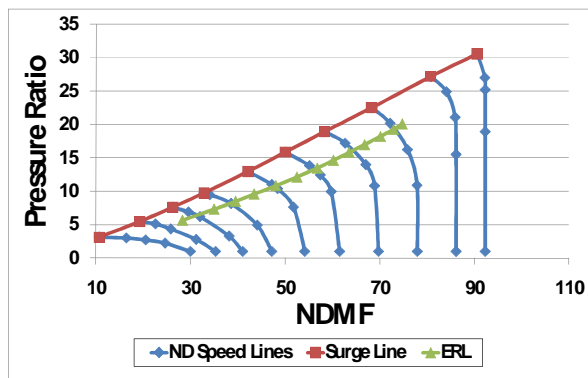


FIGURE 2. (A) Gas turbine performance characteristics. **(B)** Effect of changes in the ambient conditions over the Gas turbine power output and mass flow

The operational behaviour of the gas turbine is illustrated in Figures 2 and 3, where its off-design performance is presented. The operating line of the engine, in Fig. 2a, is created by varying engine power setting. The throttling of the engine is controlled by varying the turbine entry temperature (TET), as shown in Fig. 2b.

The decrease of TET has an adverse effect on both engine mass flow and power, illustrated in Fig. 2, as low energy at the combustor exit, drives the power-balance between turbine and compressor to lower levels, thus lower pressure ratio, rotational speed and non dimensional mass flow (NDMF). The resulting operating line, plotted on the compressor map, lies almost parallel to the compressor surge line, proving that the compressor is safe from surge under most off design conditions.

The performance effect of engine power setting, as represented by turbine entry temperature is depicted in Fig.3, where fuel flow, specific fuel consumption and thermal efficiency have been plot for various ambient temperature and TET levels. The decrease of TET, has a consistent degrading effect on fuel flow which is mainly driven by both the decrease of fuel to air ratio, and compressor mass flow.

In Figs. 2 and 3 is also shown the effect of ambient temperature on engine performance, with temperature varying from -30°C to +45°C. It becomes apparent that increasing ambient temperature has an adverse effect on performance; i.e. lower power output, higher specific fuel consumption, lower efficiency, lower mass flow. This comes as a result of the duofold effect of high ambient temperature, firstly on the engine temperature ratio defined as the ratio of maximum and minimum cycle temperatures, and secondly on the density of the air entering the compressor, reducing the mass flow of air ingested.

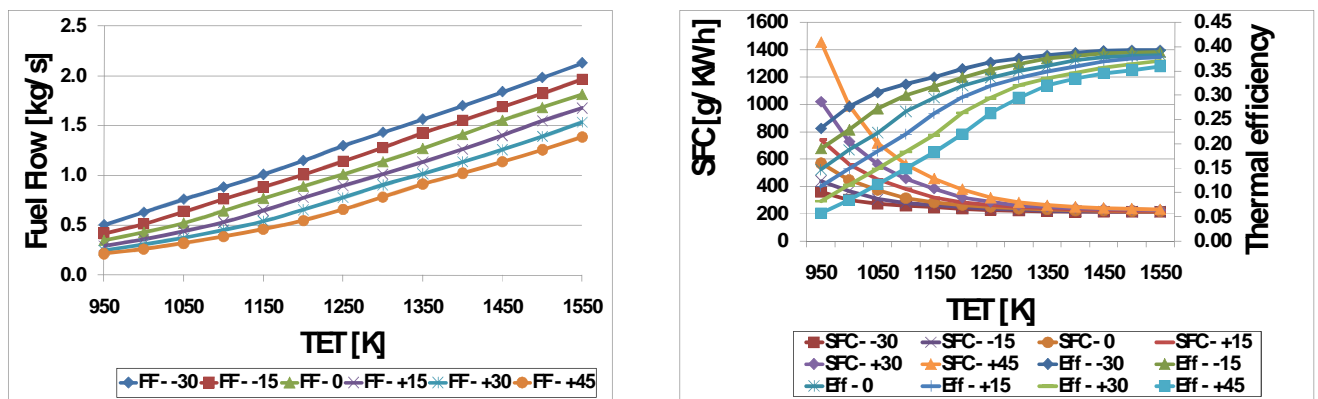


FIGURE 3. Effect of changes in ambient conditions over: **(A)** The fuel flow and **(B)** The efficiency and SFC of the gas turbine when considering a wide range of ambient temperature regimes

Weather and Hull Fouling Model

The weather model that is incorporated within the “POSEIDON” simulation tool is comprised by two modules: a sea-wave module, [17] and a wind module, [18]. The input variables are, the ambient temperature of the air and sea, sea state, and wind speed. All input variables can change value as required by the simulated journey, with the ambient temperature of air and sea being

independent variables and on the other hand wind speed being depended on the chosen sea state. Both sea-waves and wind act, at this prototype stage of the method, in all cases in a head direction towards the vessel's bow. The hull fouling model, described in [19], uses as variable the mean hull roughness amplitude and as an average it increases hull resistance by approximately 2% for every 30µm of mean additional roughness amplitude.

Journey Model

The journey model handles the journey distance, the time intervals that ambient conditions change, the ambient temperature of air and sea at the specified time intervals, as also the speed of the vessel, and calculates the total journey time and the total fuel consumption of the engines. It should be noted though, that the journey focuses on cruise, so port time and maneuvering is not taken into consideration.

CASE DESCRIPTION

This paper presents the utilisation of 'POSEIDON' tool on a Liquefied Natural Gas (LNG) carrier powered by two 25MW marine gas turbines, part of an integrated full electric propulsion system. Outcome of the study is the assessment of the ship and engine performance, under several journey scenarios. The base to all scenarios is a ~1600nm journey from Algiers to Southampton, with details shown in Table 4. During its journey, the vessel is subject to varying ambient weather conditions; i.e. ambient temperature and sea state, shown in Fig.4. These variations come as results of the route, as the vessels passes through several parallels. As a result, ambient temperature is calculated as a function of geographical position, season and time of day, while sea-state has been assumed as a function of geographical position and annual season. These information are based on MET office data, for given regions and annual seasons, as shown in Table 4 and Fig.4.

Several journey scenarios have been investigated. These include several weather conditions for various annual seasons, In further detail, trips for Winter, Spring and Summer have been calculated, for both ideal (IWC) and adverse weather conditions (AWC), represented as variable sea state profile, in order to introduce a level of realism in the calculation. Furthermore, four hull fouling levels, starting with clear hull (CSHS) and increasing for three fouling levels (SHSD1=120µm, SHSD2=240 µm and SHSD3=300µm) have been taken into account. Their adverse effect on engine and ship performance is plotted and analysed in the following sections.

The journey distance for all scenarios is 1619 nautical miles and under permissible conditions the vessel travels constantly at speed of 19.5knots. Under increased resistance conditions the prime movers are allowed to increase their output power until maximum TET is reached. The target in all cases is to maintain the speed of the vessel speed, or the maximum permissible speed. Each journey is split into one hour segments and calculations of the system's parameters are carried out for each time segment until the end of each journey.

TABLE 4. Journey profile of vessel

| Sea port | Journey(nm) | Duration(hrs) | Max temp | Min temp | Max temp | Min temp | Max temp | Min temp |
|-------------------|-------------|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Algiers-Malaga | 366 | 19 | 17 | 7 | 24 | 12 | 33 | 20 |
| Malaga-Porto | 509 | 26 | 14 | 5 | 22 | 10 | 28 | 15 |
| Porto-Brest | 499 | 26 | 13 | 4 | 19 | 9 | 25 | 13 |
| Brest-Southampton | 245 | 12 | 7 | 2 | 17 | 7 | 22 | 11 |

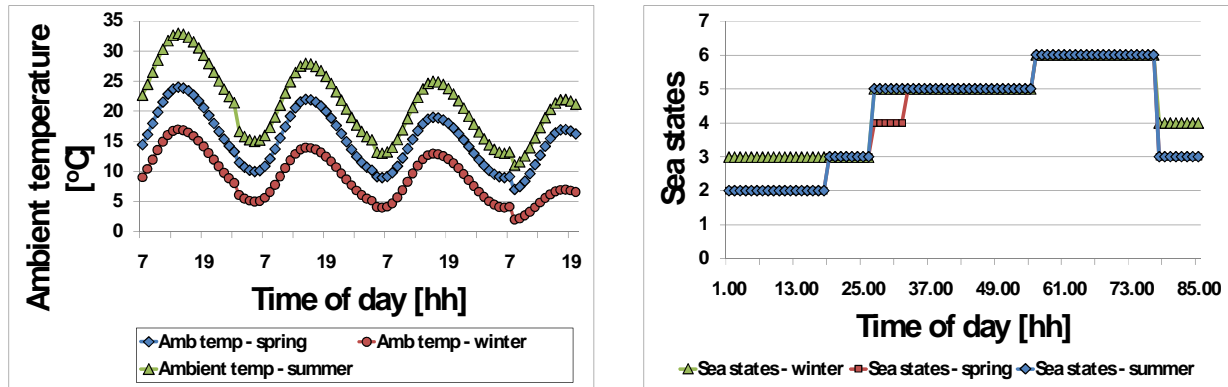


FIGURE 4(A). Ambient temperature profile and **(B)** Sea state profile along the trade of the LNG Carrier from Algiers to Southampton in winter spring and summer seasons

Figure 4 shows the variation of ambient temperature and sea state for the three season scenarios. In this figure, the effect of geographic position is clearly depicted, where maximum day temperature that appears at ~14:00 reduces, as a result of the vessel travelling north. Moreover, minimum temperatures are experienced during the winter season. On the other hand, sea-state starts at 2 in the Beaufort scale, during the Algiers-Malaga part, increases to 3 from Malaga to Porto, to 5 during the Porto-Brest leg and to a maximum of 7 for most of the Brest-Southampton leg.

The major results of the analysis are presented in Figs. 5 to 12, which show the variation of vessel and engine performance during all journey scenarios. This includes, engine power, ship speed, fuel flow and turbine entry temperature. Moreover, total results are plotted for the assessment of the effect of various journey scenarios on total fuel consumed during the chosen trip.

Gas Turbine Power Output

Power output from each gas turbine has been calculated for the duration of every journey and is plotted in Figs. 4 and 5. Engine power is derived from break power propelling the ship, less the transmission losses. As seen in Fig.4a for ideal weather conditions, and clean hull, power output remains constant during the summer journey, and shows a minor fluctuation for spring and winter. However, in general terms, it is considered as constant, as the prime mover is able to cover the power requirement in order to maintain cruise speed. This is not the case, though when the vessel travels under adverse weather condition, in addition to 120 μ m of hull roughness.

It becomes apparent in Fig.4b that after the first third of the journey, the engine reaches its limits at maximum allowed operating turbine entry temperature, in an attempt to maintain cruise speed, under adverse conditions. After this point power output fluctuates. This fluctuation is a function of ambient temperature. As a result, during summer, where higher ambient temperature is experienced, power output ranges between 24MW and 27MW, while during the winter journey, power fluctuates between 27.5MW and 29MW, as the low ambient temperature acts in favour of total power.

Further increase of hull fouling, has a direct impact on brake power of the vessel and the part of the journey during which power demand is constant and completely covered by the prime mover is limited. It can be observed in Fig.5a that for 120 μ m of hull roughness, less than a third of the trip is performed at constant power, during the winter and spring scenarios. On the other hand, during summer, where ambient temperature is higher, engine power output fluctuates as a function of ambient temperature during the whole journey. The same attribute is shown in Fig. 5b for higher hull fouling, and all annual seasons.

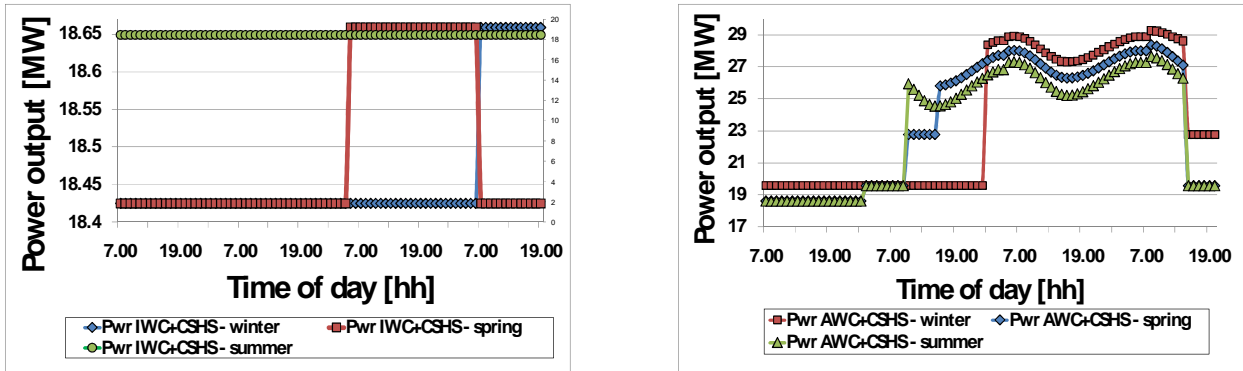


FIGURE 4. Engine power output variation in (A) IWC and (B) AWC with a CSHS

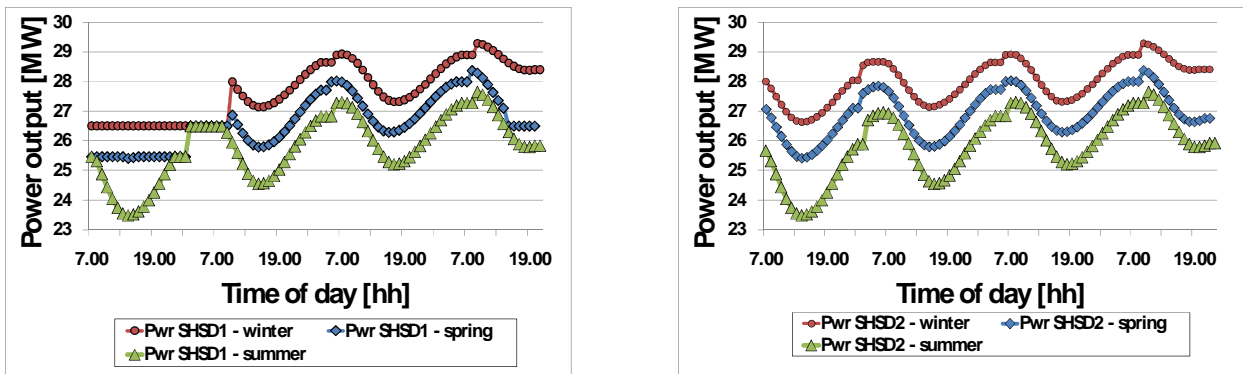


FIGURE 5. Engine power output variation in AWC with (A) 120 μ and (B) 240 μ of SHSD

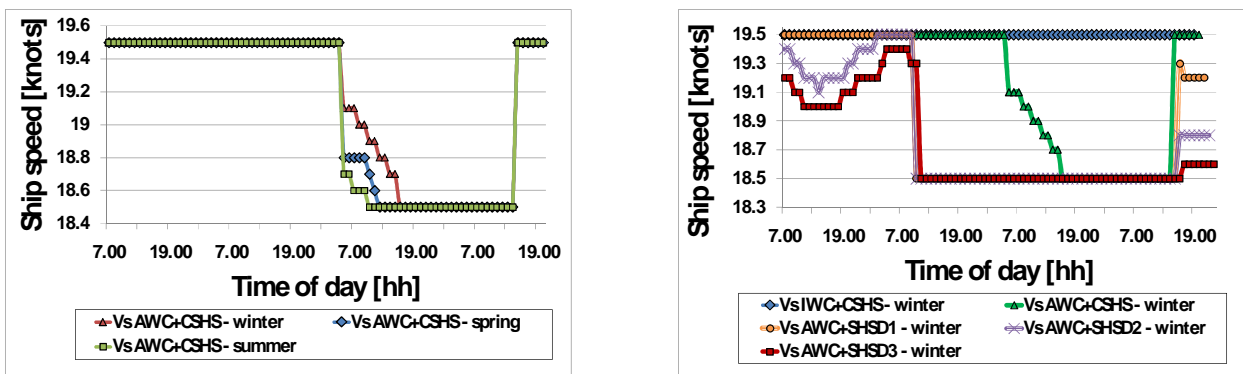


FIGURE 6: Ship speed variation under (A) Different weather and SHSDs in winter season only (B) AWC with a CSHS in winter, spring and summer seasons

Vessel Cruise Speed

One of the features of ‘POSEIDON’ is its ability to predict maximum attainable ship speed, for every timestep, by evaluating the balance between power requirement and available power. As a result, for adverse conditions that increase brake power, the vessel is forced to slow down and operate at speed that is in agreement with available power.

As it is expected and shown in Fig.6b, for ideal weather conditions, the vessel is able to maintain its original speed for the duration of the journey. However, the application of high sea-state has an adverse effect, shown in Fig.6a for all seasons. Even though, the ship travels at constant speed for the first 24 hours, it gradually decelerates, when beaufort levels are in excess of 5. It is worth noting that deceleration is more steep for the case of summer, due to the effect of higher ambient temperature. Furthermore, when hull fouling is added to adverse weather conditions, the increase brake power leads the prime mover to its limits since the beginning of the trip. As a result, the vessel speed fluctuates between 19.5 and 19 knots during the first 12 hours, in accordance to the fluctuation of engine power, as shown in Fig.6b. After the first 24 hours, though, cruise speed falls further as a result of the increase of sea-state, something that is apparent in Fig.7 as well, where two different hull fouling levels have been taken into consideration.

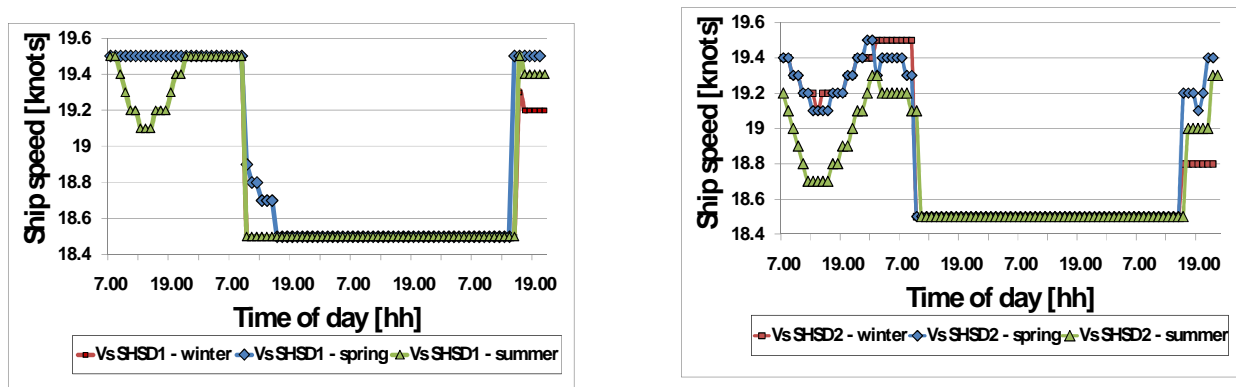


FIGURE 7. Ship speed variation in AWC under (A) SHSD of 120µ and (B) SHSD of 240µ

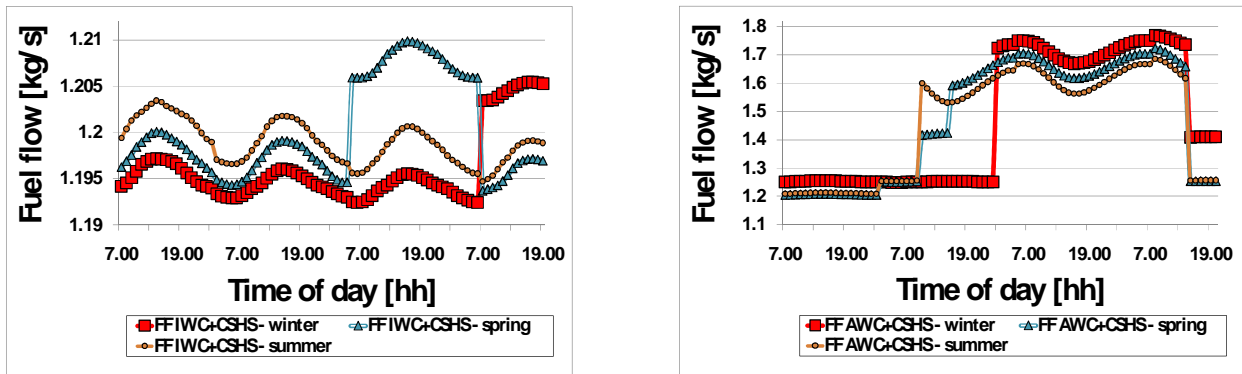


FIGURE 8. Seasonal variation of engine fuel flow in (A) IWC and (B) AWC under a CSHS condition

Gas Turbine Fuel Consumption

A significant benefit from a systems approach analysis, such as in the present paper, is the ability to accurately predict fuel consumption for every time interval, of the journey. This is plotted in Figs. 8 and 9.

Fuel flow in kg/s refers to each prime mover and it appears to be affected by both the power demand curve and ambient temperature variation. For the journey scenarios where ideal weather and clean hull conditions have been assumed, the power of the prime mover is constant. However, in order to maintain constant power under varying inlet temperature, the engine varies by a very small amount its fuel flow in order to maintain its operating point, which is governed by its temperature ratio (turbine entry temperature by inlet temperature). As a result fuel flow in Fig.8a varies in accordance to ambient temperature, but it should be noted that the range of this variation is very limited. The situation is different when adverse weather is encountered. In such scenario, fuel flow appears almost constant, for the first third of the journey, where a small variation is the result of ambient temperature. However, when sea state increases and engine is operating at maximum available power, fuel flow (Fig.8b) varies in accordance to engine power (Fig.4b). The same attribute, but to bigger extent is shown in Fig.9, where adverse weather is combined with hull fouling. In these scenarios it appears that for constant power, (Fig.5), fuel flow (Fig.9) follows ambient temperature fluctuation, while for varying power, fuel flow follows engine power curve.

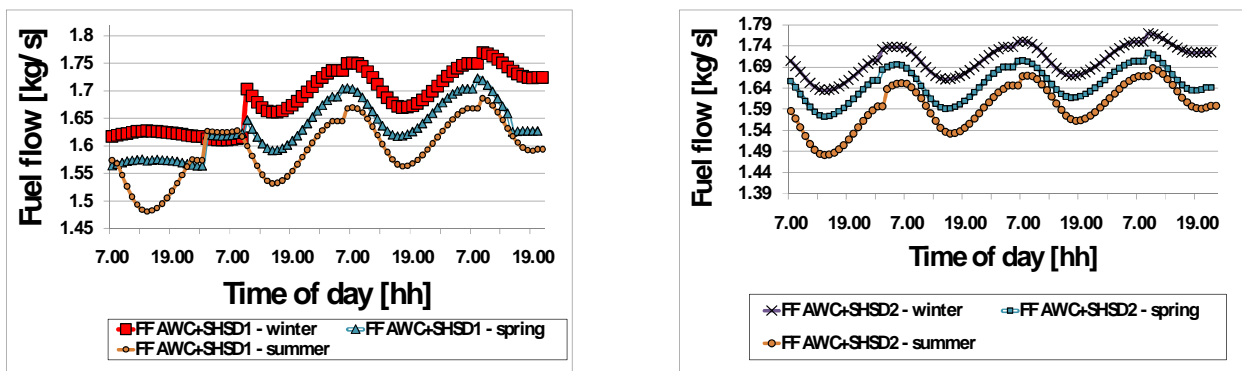


FIGURE 9. Fuel flow variation in AWC with (A) 120 μ and (B) 240 μ of SHSD

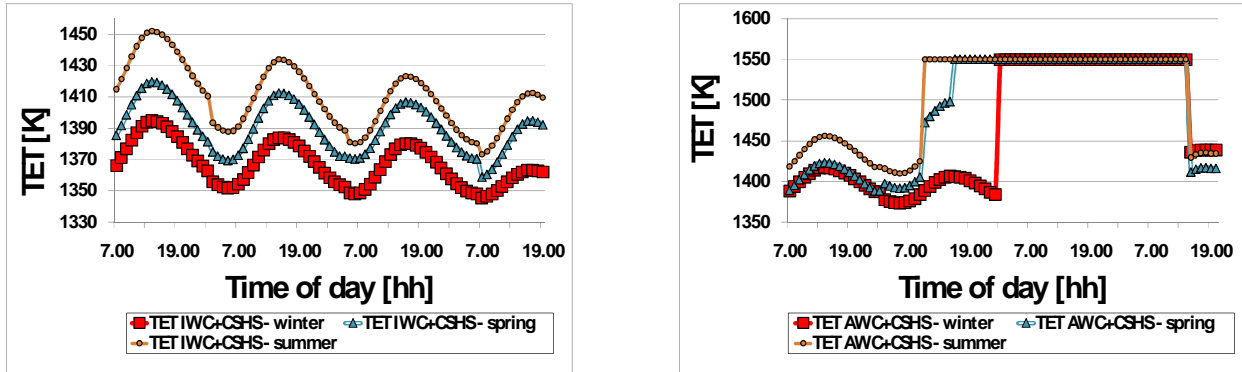


FIGURE 10. Seasonal variation of engine TET under (A) IWC and (B) AWC with a CSHS condition

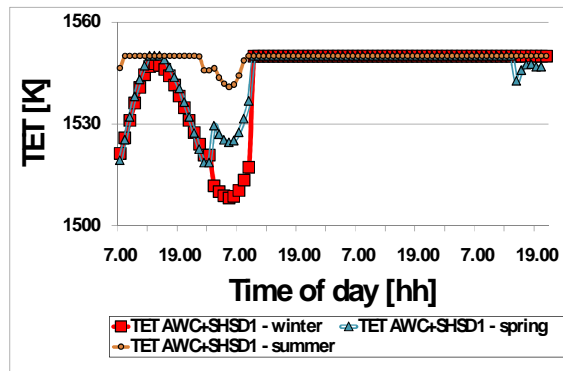


FIGURE 11. Seasonal variation of engine TET in AWC with a SHSD of 120 μ m

A critical parameter for the assessment of a marine gas turbine is the turbine entry temperature, for various reasons. It is effectively the maximum temperature of the thermodynamic cycle having a direct effect on power produced by the turbines. Moreover, its value has a severe impact on engine operating life through affecting the high pressure, high temperature components' (high pressure turbine rotor) life duration. As a result, it becomes apparent that high power production comes at the expense of high life consumption, something to be taken into consideration when deciding the utilization of a marine gas turbine.

In a similar manner to fuel flow variation, TET fluctuates with time and ambient temperature, for journeys that include ideal weather and clean hull conditions. The reason is that in such scenarios the gas turbine maintains constant power, thus constant engine temperature ratio, (Fig.10a). The application of adverse weather, brings the engine to its limit for the two thirds of the journey, as previously discussed. This is clearly depicted in Fig.10b, where maximum limit of 1550K is maintained during this part of the journey. It should be noted that maximum TET is in accordance to material limitations and blade cooling technology on the high pressure turbine rotor and nozzle guide vanes.

A similar attribute appears in Fig.11 where the effect of adverse weather and fouled hull for different seasons on TET is shown. A close comparison with Fig.5a reveals that for the first third of the journey, turbine entry temperature fluctuates, following the fluctuation of ambient temperature, but only for the winter and spring seasons. During the summer journey, where inlet temperature is even higher, TET reaches a maximum value, thus power fluctuates, falling with increasing ambient temperature. This relationship between power, ambient temperature and

TET is apparent in the rest part of the journeys, where the engine operates at its limit (maximum TET) and power production is directly affected by ambient temperature.

CONCLUSIONS

The 'POSEIDON' code is a tool for assessing the performance of a marine gas turbine, as a part of a system, in a virtual environment. As a result, the off-design performance of the engine is predicted in relation to ambient conditions and journey requirements, contributing to an apprehensive preliminary gas turbine performance estimation. As a result, conclusions, regarding the total effect on fuel consumption of any journey scenario can be derived, as shown in Fig.12.

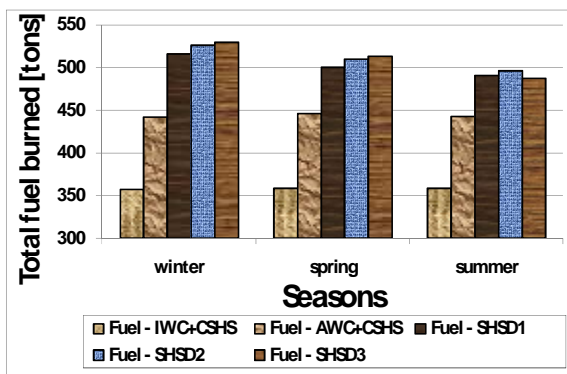
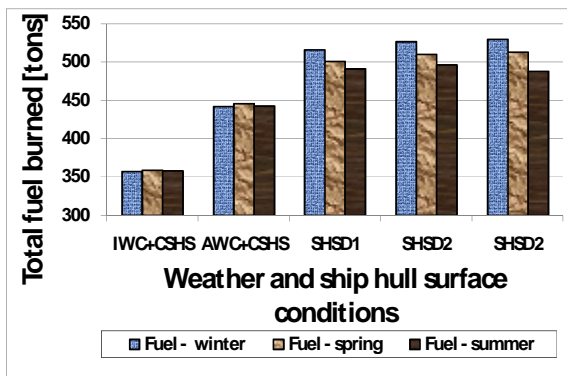


FIGURE 12. Comparison of the quantity of fuel burned per voyage under the effect of **(A)** Weather and ship hull fouling conditions. **(B)** Climatic conditions in winter, spring and summer seasons

Figure 12 illustrates the overall results for all journeys calculated in the present paper. The effect of season, weather and hull condition is therefore clearly depicted through the amount of total journey fuel consumed.

As expected, an LNG carrier traveling from Algiers to Southampton is predicted to consume minimum amount of fuel when exposed to ideal calm weather, and operates with a clean hull. Moreover, under these ideal conditions, the effect of ambient temperature can be noticed, that leads to slightly higher fuel consumption during the summer season. This effect though, becomes obsolete when adverse weather and hull fouling is taken into account. In Fig.12 it becomes apparent that hull fouling can have a significant effect on the operating costs of the prime mover, showing a ~15% increase in fuel consumption, even for hull roughness as low as 120 μ m. Moreover, it is shown that further increase of hull roughness does not have a linear impact on fuel consumption, highlighting the need for clean hull.

The effect of weather can be assumed as an uncertainty parameter that appears to have a contribution to total fuel consumption. As shown in Fig.12 a vessel traveling under adverse weather profile, can consume ~20% more fuel, compared to ideal weather conditions. Evidently, journey prediction results should be approached with a conscious mind of the uncertainties that could apply in a real life scenario. Nevertheless, studies as the present, highlight the sensitivity of prime mover performance to external conditions and can be utilized for quantitative assessment and preliminary design of marine gas turbines.

REFERENCES

11. P. Pilidis, *Gas Turbine Theory and Performance*, Thermal Power MSc Course Notes, Cranfield University, UK, (2009)
12. P.J. Norman, C.D. Booth, J.D. Schuddebeurs, G.M. Burt, J.R. McDonald, J. Apsley, M. Barnes, A. Smith, S. Williamson, E. Tsoudis, P. Pilidis, R. Singh, *Integrated Electrical and Mechanical Modelling of Integrated-Full-Electric-Propulsion Systems*, The 3rd IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, (2006).
13. H. Cohen, G.F.C. Rogers, and H.I.H. Saravanamuttoo, *Gas Turbine Theory*, - 4th Edition. Addison-Wesley Longman, London,UK, (1996).
14. P. P. Walsh and P. Fletcher. *Gas turbine performance*. Blackwell Publishing, UK, (2004).
15. J. Holtrop, G. Mennen, *An Approximate Power Prediction Method*, International Shipbuilding Progress, Vol. 29, (1982).
16. Holtrop, J., *A Statistical Re-analysis of Resistance and Propulsion Data*, International Shipbuilding Progress, Vol. 31, (1984).
17. Hydrocomp, *Applicability Range of Holtrop-1984 Method*, Hydrocomp Technical Report, (1999).
18. E. Lewis, *Principles of Naval Architecture, Vol. II, Resistance, Propulsion and Vibration*, SNAME, ISBN No. 0-939773-01-5, pp 66-93, (1988).
19. M.W.C. Oosterveld, p. van Oossanen, *Further Computer Analysed Data of the Wageningen B-Screw Series*, International Ship Building Progress, (1975).
20. T. Lamb, *Ship Design and Construction Vol. II*, SNAME, ISBN No. 0-939773-41-4, chapter 38, pp 19, (2003).

21. M.A. Hugel, *An Evaluation of Propulsors for Several Navy Ships*, MSc Thesis, Massachusetts Institute of Technology, USA, (1993).
22. W.L. MacMillan., '*Development of a Modular Type Computer Program for the Calculation of Gas Turbine Off Design Performance*', Doctoral dissertation, School of Mechanical Engineering, Cranfield Institute of Technology, Cranfield, UK, (1974).
23. J.R. Palmer, *The 'Turbocode' Scheme for the Programming of the Thermodynamic Cycle Calculations on an Electronic Digital Computer*, COA/AERO-198, College of Aeronautics, Cranfield Institute of Technology, (1967).
24. J.R. Palmer and V. Pachidis. *The Turbomatch Scheme; for Aero/Industrial Gas Turbine Engine Design Point/Off Design Performance Calculation*, Manual, Cranfield University, UK, (2005).
25. A. Sirinoglou, *Implementation of Variable Geometry for Gas Turbine Performance Simulation Turbomatch Improvement*, MSc Thesis, SME, Cranfield University, UK, (1992).
26. F. Van den Hout, *Gas Turbine Performance Simulation Improvements to the Turbomatch Scheme*, MSc Thesis, SME, Cranfield University, UK, (1991).
27. E. Lewis, *Principles of Naval Architecture, Vol. III, Motion in Waves and Controllability*, SNAME, ISBN No. 0-939773-02-3, pp 118-121, (1988).
28. H. Schneekluth, V. Bertram, *Ship Design for Efficiency and Economy*, 2nd edition, Butterworth-Heinemann, UK, (1998).
29. B.S. Bowden, N.J. Davison, *Resistance increments due to hull roughness associated with form factor extrapolation methods*, N. M. I. Ship, TM 3800, (1974).

Degradation Effects on Marine Gas Turbines

Ioannis Roumeliotis

Hellenic Naval Academy, Section of Naval Architecture & Marine Engineering, Piraeus, Greece

Abstract. This paper provides a discussion on how degradation develops and affects the performance of marine gas turbines. As the operation of a gas turbine is the result of the aerothermodynamic matching of several components, especially in the case of marine gas turbines that are multi-shaft engines, the emphasis of this paper is on the interaction of the engine components and the effect of several degradation phenomena on both performance and operability parameters. The model of a typical twin-shaft marine engine is subjected to various types of degradation, and the effect on operating parameters is studied. The focus is on three areas: How does component degradation impact the operation of the engine compressor, especially with respect to the surge margin, how does component degradation impact full load and part load gas turbine performance and operation, and how does component degradation impact measurable engine operating parameters in order to provide fault signatures, thus providing guidance for the practice of condition monitoring.

Keywords: marine gas turbine, component degradation, fouling, erosion, fault signatures

PACS: 89.40.Cc

INTRODUCTION

Marine gas turbines have been in service for more than three decades and have proved to be reliable and offer significant advantages to the user. Despite the well-proven reliability of these machines, their operation in the hostile marine environment results in the degradation of their performance characteristics. Several mechanisms result in engine degradation, such as fouling, erosion and tip clearance increase causing a change of the rotating components' operation and consequently a change of the whole engine operation. From operational, economic, and safety considerations, gas turbine performance deterioration has emerged as a very important topic of research. For the marine gas turbine user it is crucial to have the ability to identify the fault type, if it is recoverable or not, if it affects the engine's life cycle and to have a clear idea of the effect of the fault on the engine performance, namely power output and fuel consumption.

It is the aim of this paper to provide a throughout discussion of the effect of faults on the engine operation and specifically on the match of the components. At the same time fault classification and identification are essential information for the user, thus it is of interest to examine the deviation of the engine monitoring parameters with respect to the degradation phenomena and to the operating point. For this reason typical fault signatures are presented for

different engine control variables in order to identify the most suitable measurements for specific faults identification and to examine the effect of the engine control variable on the fault signatures.

ENGINE MODEL

In order to have the ability to examine the operation of gas turbines of different configuration, under various operating conditions and control variables, a generic 0-D non-linear adaptive performance model is used. The model was developed by the research group of the LTT/NTUA. The model is capable of simulating all existing gas turbine configurations from a single shaft engine, to a three spool engine with power turbine, reheating, recuperation and water injection at various positions along the engine. Also as the control variable of different engines may be different, or even change throughout their operation the model is capable to acknowledge several parameters as control variables like Turbine Inlet Temperature (TIT), Compressor Discharge Pressure (CDP), Shaft Speed, Power output, etc. depending on the engine configuration. The model layout and the system of equations to be solved are modified in accordance with the engine configuration under consideration.

A schematic representation of the generic model and its break down scheme to individual components is shown in FIGURE 1. The components' operation is modeled via maps (e.g. turbomachinery component maps), via analytical relationships (e.g. water/steam injection [1]) or a combination of analytical relationships including empirical constants (e.g. duct pressure loss).

The model utilizes the adaptive modeling technique, as introduced by the research group of the LTT/NTUA [2], which will be used in order to model the engine faults. The basic idea behind the adaptive modeling is that component characteristics (e.g. compressor map) are allowed to change through the introduction of appropriate modification factors. The values of these factors in the case of adaptive modeling are determined by requiring that the available engine performance data are matched by the engine model results. In the end of the adaptive procedure a unique set of components characteristics is produced. The engine model incorporating this set is capable of simulating the specific engine operation with great accuracy (Tsalavoutas et al. [3]).

When diagnostic applications on an actual engine are considered, the modification factors are used as engine health indices as, for example, presented in [4], in order to identify faulty engine components. The use of the model as a diagnostic tool requires the creation of an accurate model of the healthy engine by means of adaptive modeling. The adaptive (or modification) factor for each component parameter is defined via eq.(1).

$$f = \frac{X_{act}}{X_{ref}} \quad (95)$$

Specifically, if a particular component parameter has a value X_{ref} on the reference map and a value X_{act} on the actual "engine" map, then the relation between the two can be expressed by means of the modification factor f . The value of this factor shows how strong is the deviation of a particular performance parameter with respect to its reference/nominal value.

Each rotating component (compressors and turbines) employs two modification factors, one related to pumping (or swallowing) capacity and the other related to efficiency. The swallowing capacity factor is:

$$f_{swi} = \frac{\left(W \cdot \sqrt{T/p}\right)_{act}}{\left(W \cdot \sqrt{T/p}\right)_{ref}} \quad (96)$$

The efficiency factor is:

$$f_{SEi} = \frac{\eta_{act}}{\eta_{ref}} \quad (97)$$

It should be noted that, as discussed by Li et al. [5], a component pressure ratio modification factor can be utilized as well.

In the case of the combustion chamber, the modification factors correspond to the pressure losses and the combustion efficiency (see for example [1]). Pertaining to all modification factors the term i corresponds to a specific component of the selected engine configuration. For example in the case of a twin shaft arrangement and for the rotating turbomachinery factors $i=1$ corresponds to the compressor, $i=2$ to the gas generator turbine and $i=3$ to the power turbine.

A schematic representation of the generic engine configuration and its subdivision to individual components is shown in FIGURE 1.

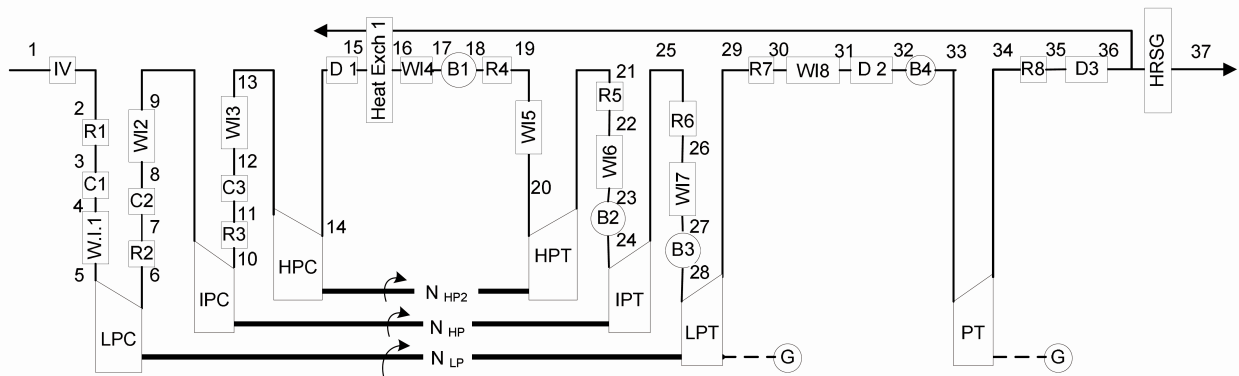


FIGURE 1. Schematic representation of a three spool gas turbine and its various components

The GE LM2500, an engine widely used for marine propulsion purpose, is selected as a test engine in order to simulate the degradation phenomena and their effect on engine performance and components operation. The engine model used is capable to reproduce the engine's operation with acceptable accuracy as discussed by Yfantis and Kapasakis [6]. The GE LM2500 is a twin shaft engine.

Air Filtration System

The filtration systems currently installed on the majority of the warships have the primary purpose of substantially reducing the levels of salt ingested in the Gas Turbine. The salt removal systems employed in the Navies today utilize either a two stage Coalescor/Vane removal philosophy, or a three stage approach which includes an additional vane separator/mist eliminator stage in front of the two stage system as discussed in [7]. Fouling of inlet filtration system occurs progressively over time, resulting to the increase of pressure drop in the inlet, thus deteriorating the engine performance. In FIGURE 2 the effect of inlet pressure loss on power and specific fuel consumption (sfc) is presented for the examined engine.

It is evident that the effect of inlet pressure drop can be rather significant, as for example an increase of inlet pressure depression from 10mbar to 30mbar will result to a power decrease of 3.2% and an increase of specific fuel consumption in the range of 1.23% for the case of the examined engine. According to these values it is evident that a strict schedule on filters cleaning/changing should be followed in order to achieve good operating conditions and fuel economy.

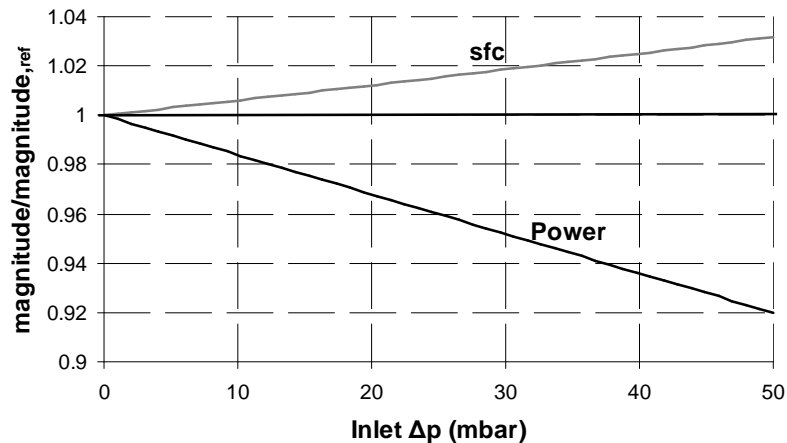


FIGURE 2. Impact of inlet pressure loss on engine power and specific fuel consumption (sfc)

DEGRADATION OF COMPONENTS

The faults are simulated by modifying the performance characteristics of the components from their “healthy” values, using the appropriate modification factors. The modified characteristics are used by the engine model and the deviations of the performance parameters are established. For example, setting the value of the swallowing capacity of the compressor 0.97 it represents a 3% reduction in compressor pumping capacity from the nominal (healthy) operation. To simulate the existence of a malfunction, modification factors with values different from unity will be used, based on experimental and numerical data from the literature.

It must be noted that the impact of individual components degradation is influenced by the control system and the control modes of the engine. Specifically the effect of components degradations on a multi-shaft engine depends on the control mode they are in, namely if the shaft speed or the firing temperature is the limiting factor. Also in normal operation it is expected the limiting factor to change according to the operating envelope. For this reason the engine operation analysis will be done assuming the Turbine Inlet Temperature as the control parameter of the engine, while the shaft speed will be limited according to the value of the healthy engine case. It should be noted that in practice both the location of the measured control temperature and the measuring technique will influence the behavior of the engine in degraded conditions.

The degradation phenomena that will be examined concerns the rotating turbomachinery components, as the combustor efficiency is usually not significantly decreased during operation, except for severe cases of combustor distress. In the case of combustor faults usually scheduled boroscope inspections in combination with the monitoring of the exhaust gas temperature distribution allows the identification of a fault occurrence.

Compressor Degradation

Compressor degradation is going to impact pressure ratio, efficiency and flow capacity, albeit the effect on these parameters is dependent of the degradation type as presented in [8]. Usually for the case of compressor the independent parameters that are used for diagnostic purposes or fault simulation are the compressor swallowing capacity and efficiency, assuming the shape of the compressor map unaltered. According to the recent work by Morini et al. [9], this assumption is valid for relative high rotational speeds. For this reason the analysis is limited to power setting

down to 50% of the nominal one. In order to investigate the effect of compressor degradation on the engine and compressor operability the effect of these parameters are firstly investigated separately by imposing a 3% reduction on swallowing capacity and efficiency, independently. In this way general conclusions can be drawn in order to give general guidelines for condition monitoring practice. Then specific ratio between the swallowing capacity factor and efficiency factor are used in order to simulate specific compressor faults.

In FIGURE 3 the effect of reduced swallowing capacity and efficiency on the compressor operating line and engine pressure ratio is presented. It is evident that for the case of TIT as control parameter the effect of reduced swallowing capacity is rather small on the operating line. In reality as the downstream capacities remain unaltered the operating line remains the same and the compressor is working at higher rotational speeds, as seen in FIGURE 4 (a), in order to maintain the inlet mass flow and the pressure ratio. As a result the effect of decreased swallowing capacity on the engine performance is minimal as seen in FIGURE 4 (b) and depends on the compressor efficiency gradient across the map. For the case of efficiency reduction the operating line is shifting closer to surge line, while the net effect is a reduction in both pressure ratio and mass flow for the same firing temperature compared with the healthy engine, as seen in FIGURE 3. This behavior is the result of the increased power consumption by the compressor which leads to the decrease of the gas generator speed as seen in FIGURE 4 (a) and consequently of the mass flow. The efficiency reduction results in a significant degradation of the engine's performance as seen in FIGURE 4 (b), as the specific fuel consumption (sfc) is significantly increasing throughout the operation, while power output is diminishing.

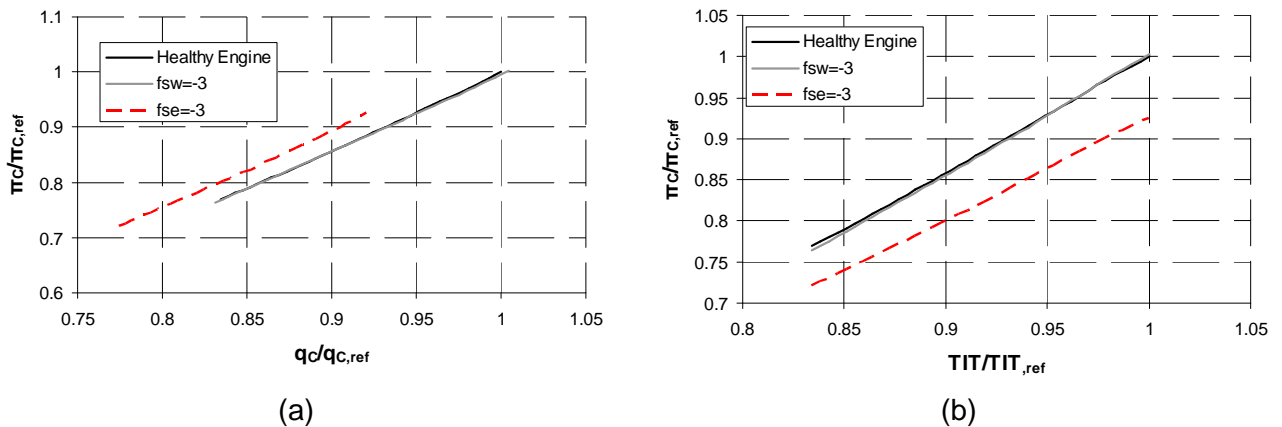


FIGURE 3. Impact of reduced swallowing capacity and efficiency on the compressor operating line versus (a) corrected mass flow and (b) operating TIT for TIT as the control parameter

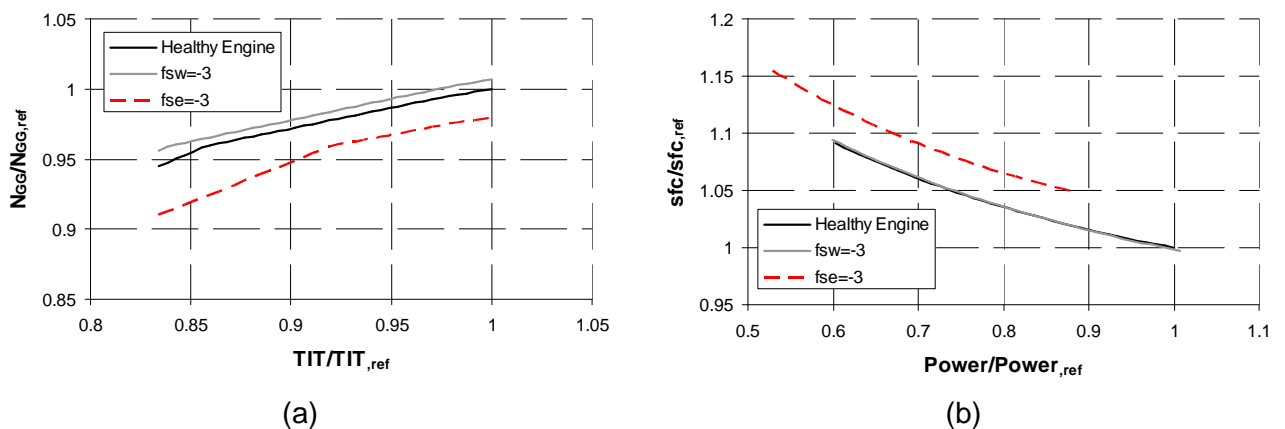


FIGURE 4. Impact of reduced swallowing capacity and efficiency on (a) the gas generator speed and (b) engine performance for TIT as the control parameter

In real operation overspeeding protection may occur, in order to maintain gas generator speed (N_{GG}) below a certain value. Assuming that the maximum gas generator speed of the healthy engine is the limiting control value, then for the case of swallowing capacity decrease the engine will have a limit at the maximum power output, as it is working in higher rotational speed. Consequently the user for the case of maximum continuous power setting will witness a decrease on the available power compared to the healthy engine as seen in FIGURE 5 (a). At the same time the maximum measured pressure at the compressor exit will be lower as the faulty engine at the maximum power output is working underfired (FIGURE 5 (b)). It should be noted that an operating point at part load can still be maintained with a degraded compressor, albeit at higher rotating speed for the case of decrease swallowing capacity and at higher TIT for the case of decreased efficiency as seen in FIGURE 5 (b). The need to operate at higher TIT for part load operation may result to increased maintenance needs for specific conditions.

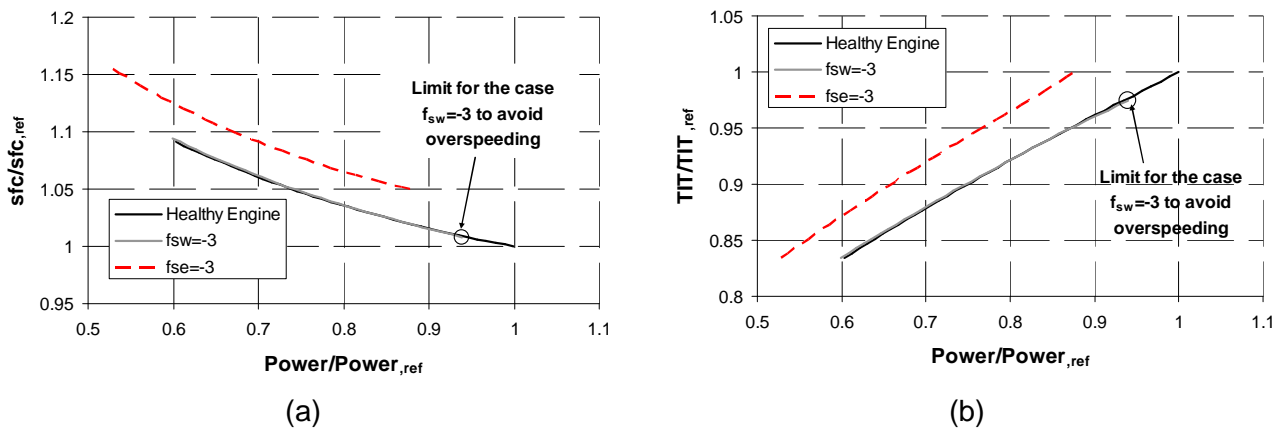


FIGURE 5. Impact of reduced swallowing capacity and efficiency on (a) engine performance and (b) turbine inlet temperature versus power setting for TIT as control variable and imposing an overspeeding limit

Analyzing the effect of the two different degradation modeling parameters on the engine operation and performance some interesting conclusions can be drawn with respect to condition monitoring. The reduction of the swallowing capacity results in the increase of the Gas Generator speed, while the effect on performance is rather minimal. This means that in the case of fault signatures that are usually used for condition monitoring the measurement that is expected to be more affected is the gas generator speed. At the same time it is expected to see the most visible measurements deviation, thus having a clearer fault signature, when measurements at the same rotating speeds are compared (Gas Generator speed as control variable). This is due to the fact that then the degraded engine is actually working on a different operating point compared with the healthy one. These observations are evident by examining FIGURE 6 (a). As seen in FIGURE 6 (a) when measurements for the same TIT and Load are compared the fault signatures do not give any clear information, while the signature using measurements taken for the same GG speed gives a clear indication of a deteriorated engine.

For the case of efficiency reduction the engine performance is significantly affected thus fault signatures under various control parameters will give a clear indication of engine deterioration. The engine under the same firing temperature is working at lower gas generator speeds, lower pressure ratios and mass flows (W), thus to lower Load. As seen in FIGURE 6 (b) these are the measurements that produce the most notable deviations from the healthy ones for operation under the same TIT. When the deteriorated engine is working at the same GG Speed or Load as the healthy one then it is working at higher firing temperature, thus the hot section temperatures are the measurements that give a clear indication of a degradation occurrence. Also in the case of operating at the same Load and GG Speed the engine is working at pressure

ratios close to the ones of the healthy engine, thus as the efficiency is decreasing the Compressor Discharge Temperature (CDT) is increasing noticeably, also giving indication of a degraded engine. It is worth mentioning that for the case of efficiency reduction and for all three different control variable cases the inlet mass flow reduces, indicating the shift of the engine operation from the healthy one, but inlet mass flow measurement is not standard on operational engines.

It must be noted that when measurement deviations are considered the magnitudes used are the corrected ones in order to take into consideration the change of the engine operating point due to the ambient conditions. An in depth discussion of the corrected parameters can be found in [10].

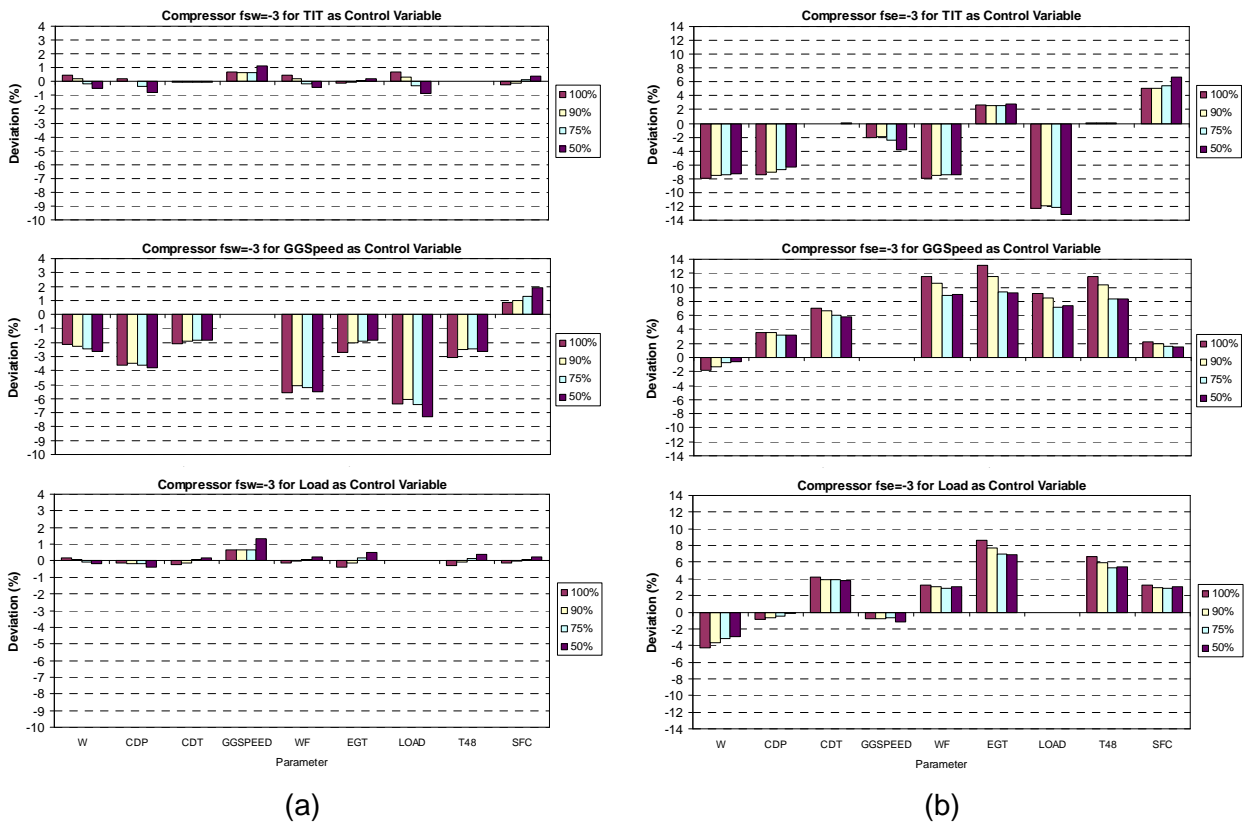


FIGURE 6. Fault signatures for the case (a) of decreased swallowing capacity and (b) of decreased compressor efficiency

COMPRESSOR FOULING

All compressors are susceptible to fouling as a result of the ingestion of air impurities that accumulate on and stick to gas path free surfaces, blades and shrouds, modifying the airfoil geometry [11]. In addition oil leaks from compressor seals and bearings mix with some of the ingested particles and deposit on the blade surfaces [12]. In the case of marine gas turbines salt ingestion and deposition is also a major contributor to compressor fouling. The result of fouling is the deterioration of airfoils aerodynamic behaviour and the reduction of flow area, meaning that fouling will result to a decrease on both the compressor swallowing capacity and efficiency. It should be noted that, according to the experimental results of Tarabrin et al. [13] and more recently of Syverud et al. [14], the distribution of contaminates on the blades is close to exponential with the first two stages significantly more prone to fouling than the subsequent ones. Fouling can be often reversed to some degree by washing of the compressor, mainly by

off-line washes, while on-line washing is also very popular in order to extend the operating period between off-line washes. It should be noted that the on-line washing process may transport contaminants from the first stages of the compressor towards the rear stages or the turbine section, as discussed by Kurz et al. [15].

For the case of fouling the ratio of swallowing capacity reduction to the efficiency reduction is taken equal to 3.37 according to the findings of Aretakis et al. [8], which agrees well with available experimental data. The maximum swallowing capacity decrease selected is 3.1% and the corresponding efficiency decrease is 0.906. It must be noted that in actual engine operation the degradation can be even larger. For example Diakunchak [11] reported site test data obtained on a large industrial gas turbine indicating that compressor fouling resulted in a 5 percent reduction in inlet mass flow and 1.8 percent reduction in compressor efficiency.

As the reduction of the swallowing capacity has minimal effect on the operating line, it is the reduction of the efficiency that alters the operating line. Specifically the efficiency reduction results to a shift of the operating line towards the surge line, while at the same time the compressor operation is moving towards lower mass flow and pressure ratio compared to the healthy engine and for the same TIT, as seen in FIGURE 7. This behavior is in agreement with the experimental results presented by Syverud et al. [14] for the case of salt ingestion on a J-85 engine. The reduce of the Surge Margin is rather small, as for example for the maximum continuous load of the fouled engine the Surge Margin is 14.19%, while for the same mass flow the healthy engine has a Surge Margin of 15.57%, indicating that surge margin reduction is not of major concern in a fouled engine.

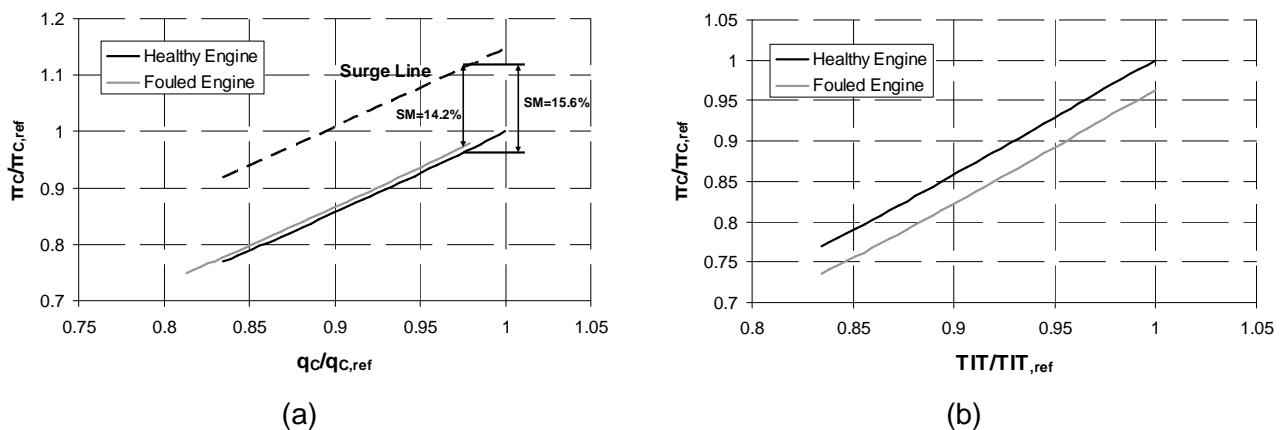


FIGURE 7. Impact of fouling on the compressor operating line versus (a) corrected mass flow and (b) operating TIT for TIT as the control parameter

Apart from the small reduction in the surge margin; there is also a significant degradation of the engine performance, as seen in FIGURE 8. As an example a fouled engine working at the maximum allowable TIT (TIT max for the healthy engine) will witness a reduction of 5,7% in gas turbine power and an increase of 2,2% in sfc. This means that under maximum continuous operation a fouled engine will not give the expected power. For the case of part load operation the user will witness a net increase of the fuel consumption, for example at the 90% of nominal power the increase in fuel consumption is 1.26%.

In FIGURE 9, the fault signatures for different control parameters for the case of fouling are presented. As discussed compressor fouling produces an effect on engine operation that can be reproduced by a decrease on the compressor swallowing capacity and efficiency. Thus for the case of TIT and Load as control variables it is the efficiency reduction effect which is dominant, as the decreased swallowing capacity does not significantly affect the fault signatures. If measurements for equal gas generator speed are used to produce the fault signature it is the reduced swallowing capacity effect that is dominant. This behavior means that if the user is

comparing measurements taken for the same N_{GG} or TIT then CDP, inlet mass flow and Load are the magnitudes that give the clearer indication of a fouled engine. In the case that the user is comparing measurements taken for the same Load, then as expected the temperatures are the measurements that give the higher deviation.

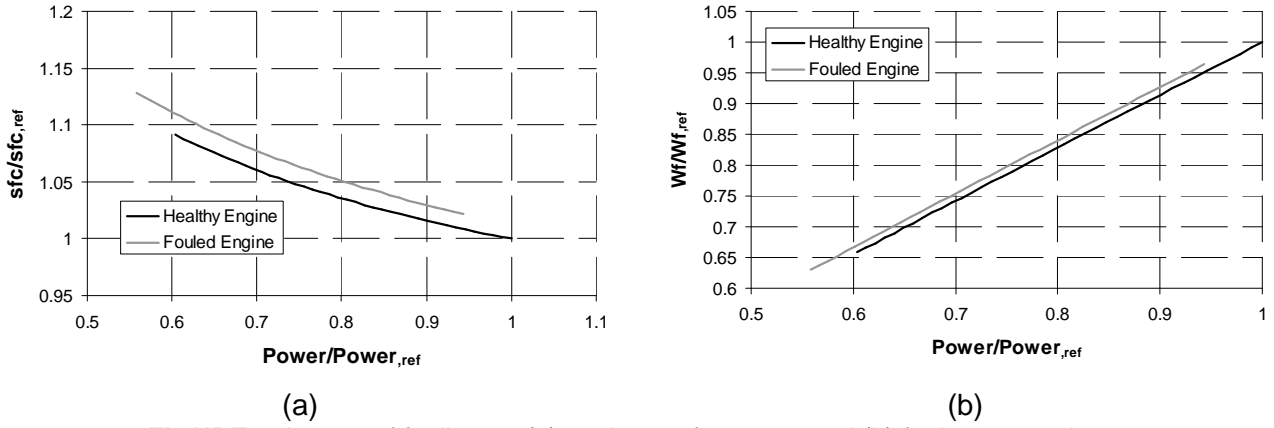


FIGURE 8. Impact of fouling on (a) engine performance and (b) fuel consumption

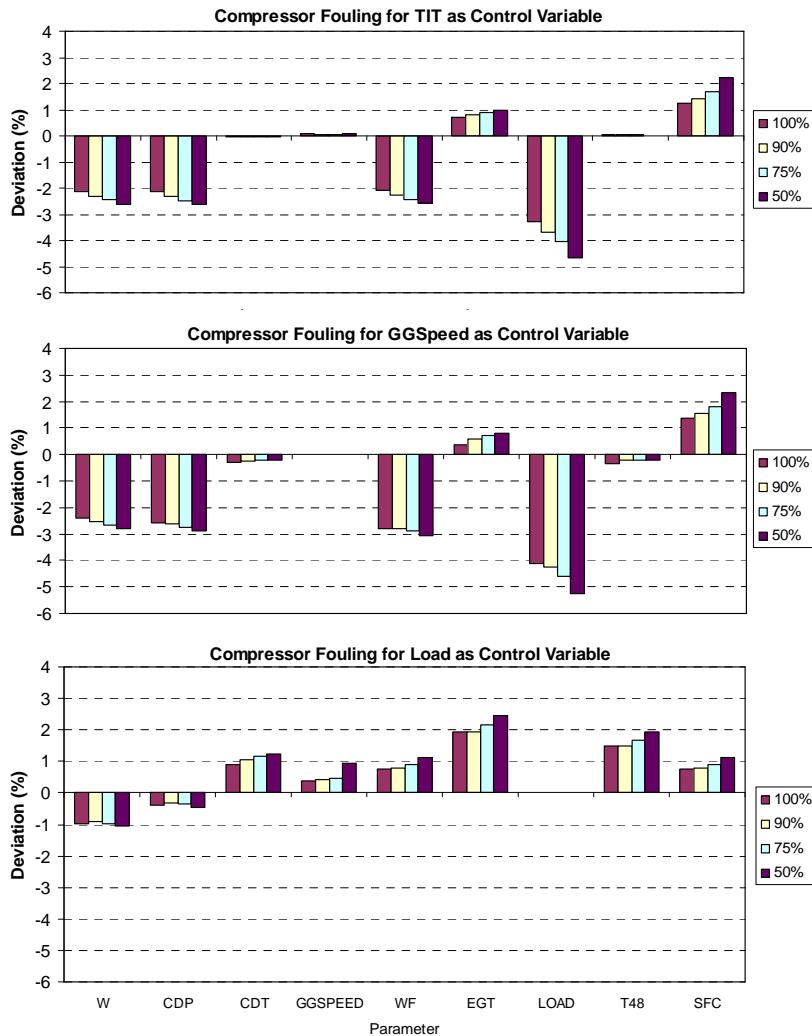


FIGURE 9. Fault signatures for the case of fouling and for different control parameter

COMPRESSOR TIP CLEARANCE INCREASE

Excessive compressor blade tip wear is a typical fault for in service engines, in case the compressor rotor becomes unbalanced or misaligned due to front or rear compressor bearing damage. Depending on the operation, it may be the result of differences in thermal growth of the rotors and casing during transient phenomena as discussed by Zaita et al. [16].

Also in the case that the blades are not in contact with the casing, the clearance may be increased by erosion as discussed by Schmücker and Schäffler [17]. In any case, compressor tip clearance increase results in a severe reduction of air mass flow rate and pressure ratio as reported by MacLeod et al. [18]. According to the experimental results given by Schmücker and Schäffler [17] compressor tip clearance increase should be represented by reduced swallowing capacity at the component inlet as well as by a reduction in the component efficiency, while from the mean loss for a 1% change in tip clearance, is 2% in both efficiency and mass flow rate, thus giving a ratio of change equal to 1. This value is in agreement with the results presented by Aretakis et al. [8] for the case of simulated faults, thus the ratio of 1 will be used herein. The maximum swallowing capacity decrease selected is 2.44%.

The effect of tip clearance increase is the movement of the operating line closer to surge line, as a result of the efficiency reduction. For the specified severity simulated herein this may give a reduction in surge margin from 16.68% for the case of a healthy engine to a value close to 13%, as seen in FIGURE 10 (a). Thus the surge margin decrease can be a problem only in the case of an engine that already has deteriorated surge margin due to other reasons. As expected tip clearance increase effect is more evident than in the case of fouling, as the efficiency reduction effect is dominant (FIGURE 10 (b)). This behavior results in a significant deterioration of engine performance as seen in FIGURE 11. Specifically the maximum continuous power output will decrease down to the 90% of the healthy one, while at the same time the used fuel will increase by 2.4%.

In FIGURE 12, the fault signatures for different control parameters for the case of tip clearance increase are presented. In the case of tip clearance increase the effect of the efficiency reduction is dominant when the fault signatures are considered. In the case of constant TIT the indicative measurements are inlet mass flow, CDP and Load, while the fuel flow is also decreasing as a result of the operating point moving to lower mass flows and pressure ratios. The CDT is not affected as although the compressor efficiency is decreasing, at the same time the CDP is also decreasing. The measurements deviation for the case of constant N_{GG} and Load indicates that the temperatures (CDT, EGT and T48) are the magnitudes that react strongly for the specific fault.

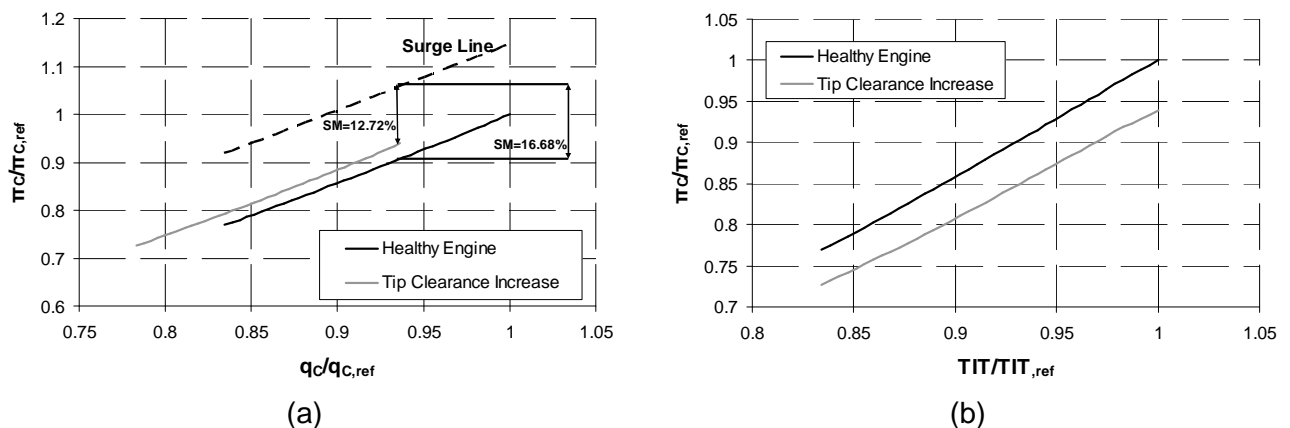


FIGURE 10. Impact of tip clearance increase on the compressor operating line versus (a) corrected mass flow and (b) operating TIT for TIT as the control parameter

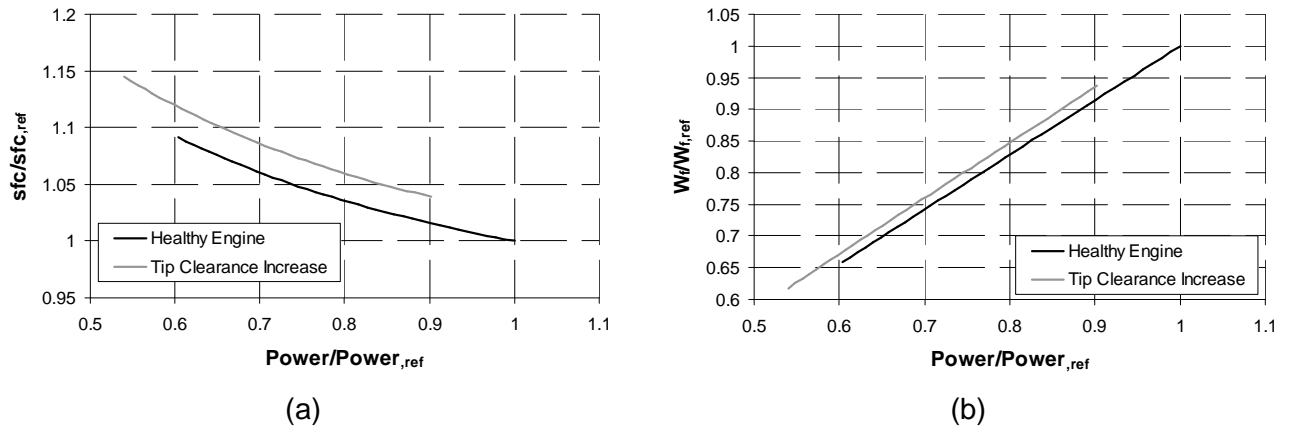


FIGURE 11. Impact of tip clearance increase on (a) engine performance and (b) fuel consumption

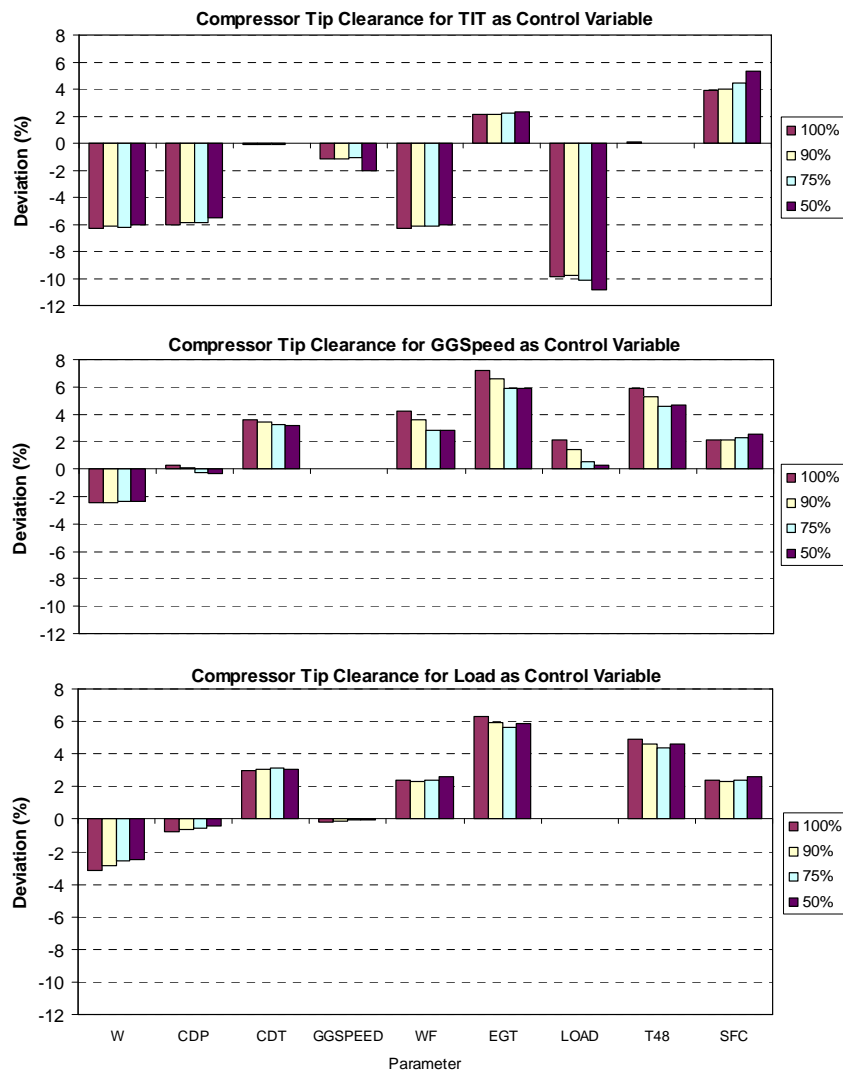


FIGURE 12. Fault signatures for the case of tip clearance increase and for different control parameter

COMPRESSOR EROSION

While in service, the engine will swallow dust and small sand particles resulting to the exfoliation of blade material. This material removal causes increased tip clearances and reduced chord lengths. The erosion of the blade, results in increased surface roughness, changes in the inlet metal angle (hence, a change in airfoil incidence), change in airfoil profile, change in airfoil throat opening, and an increase in blade tip and seal clearances. The results of these changes are increased losses and therefore a reduction in the compressor performance. Erosion has been manifested to be more severe in the tip region at the rear part of the compressor due to the existence of centrifugal forces which cause the migration of solid particles to the outer diameter, as discussed by Tabakoff [19] and adopted by Zaita et al. [16].

No experimental data concerning the alternation of the modification factors due to erosion is available in literature, thus the results derived by Aretakis et al. [8] through the modeling of erosion for a multistage compressor will be used herein. The results indicate that the blade erosion effect, not accounting for the tip clearance increase, will affect mainly the air mass flow and only slightly decrease the compressor efficiency, results that are in agreement with the findings reported by Kurz et al. [15] for engines that have been subject to regular condition based water washing. Thus for the compressor erosion simulation a ratio between swallowing capacity reduction and efficiency reduction equal to 8.5 will be used with the compressor swallowing capacity decreased by 2.6%.

In the case of erosion the dominant effect is the effect of the swallowing capacity, thus according to the analysis presented the effect on the engine performance is expected to be minimal, as the compressor is operating on the same operating line, albeit in higher rotational speeds. Thus the part load performance is only slightly deteriorated, due to the slight efficiency reduction as presented in FIGURE 13. At the same time the maximum load is bounded from overspeeding protection, meaning that the user will not have the capability to reach the maximum continuous power output with a eroded compressor. For example in this case, which is not severe, the maximum power output of the faulty engine is the 96% of the healthy engine.

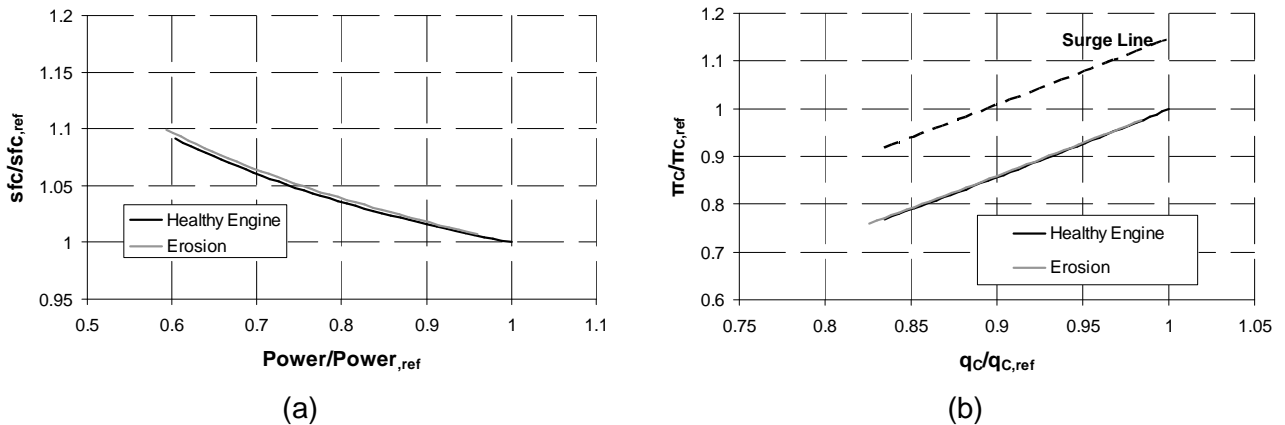


FIGURE 13. Impact of erosion on (a) engine performance and (b) compressor operating line

In FIGURE 14, the fault signatures for different control parameters for the case of erosion are presented. In this case the dominant effect on the fault signatures is the one of the reduced swallowing capacity. This means that the fault signatures for the case of TIT and Load as control variables do not give a strong indication of the fault. On the other hand the fault signature for the N_{GG} as the control variable gives a clear indication of a faulty engine. In the case that measurements from equal N_{GG} for healthy and faulty operation are used it is the

compressor oriented measurements that can be used in order to recognize the fault, along with the engine Load.

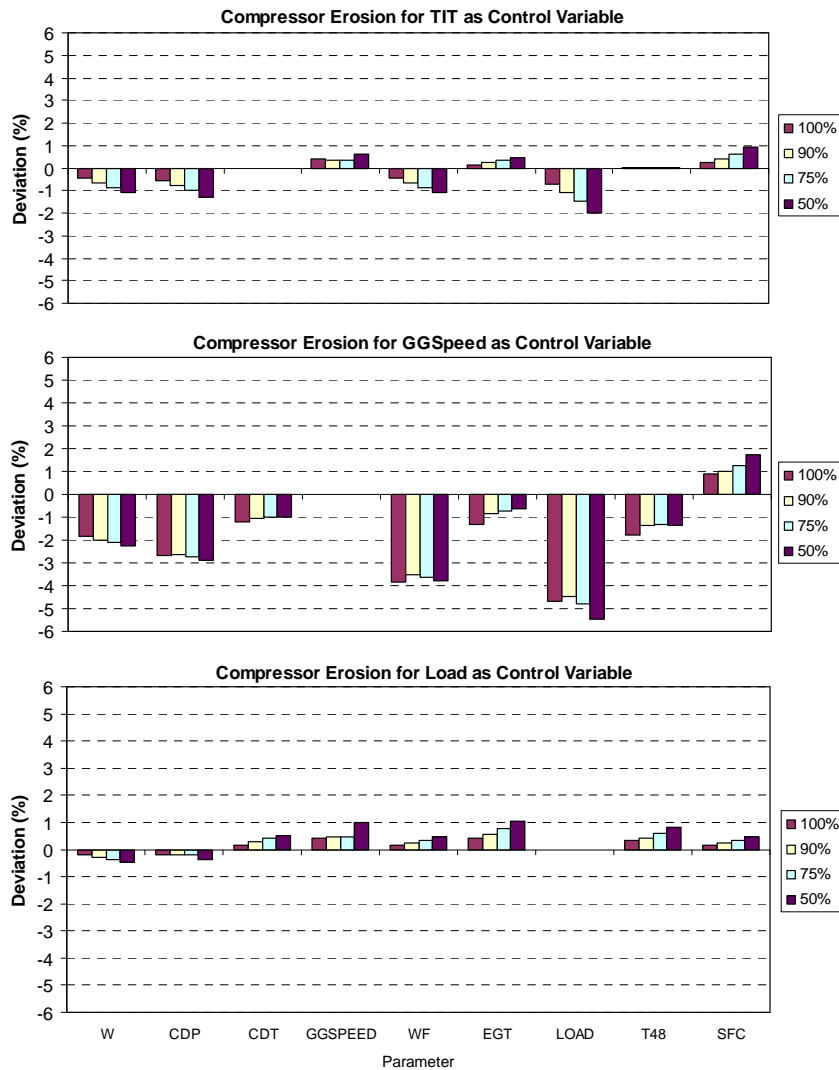


FIGURE 14. Fault signatures for the case of erosion and for different control parameter

Gas Generator Turbine Degradation

As for the compressor section the degradation is going to impact efficiency, pressure ratio and flow capacity for the case of the turbine as well. According to Morini et al. [9] the turbine swallowing flow capacity factor and efficiency factor are capable to simulate the fault occurrence. The analysis of the turbine degradation phenomena materialized herein is focused on the gas generator turbine, as it is the turbine that is working at the most aggressive environment, thus it is more prone to deterioration.

Degradation effects on the flow capacity of the turbine can either increase or decrease the flow capacity. Specifically the reduction of the flow path, as discussed by Kurz [23] is either due to added surface roughness or the result of eroded leading edges, which lead to thicker boundary layers and consequently to reduced effective throat area. On the other hand the throat area increases when the nozzle trailing edges erode as a result of the impingement of particles against the blades, or as a result of corrosion. Thus the analysis of the engine operation will be

done by assuming both a decrease and an increase of 5% for the swallowing capacity of the examined turbine and a decrease of 2.5% of efficiency.

The decrease of the turbine swallowing capacity results in a pronounced change in the operating line of the compressor, shifting it to higher pressure ratios, as seen in FIGURE 15. This change results in a significantly reduction of the compressor surge margin. As an example a reduction in surge margin from 15.1% to 9.3% has been predicted for a 5% reduction in turbine swallowing capacity. The move of the operating line to higher pressure ratios results in the reduction of the engine specific fuel consumption, as seen in FIGURE 16 (b). At the same time and although the N_{GG} is increasing (FIGURE 16 (a)) the off-design operation results in lower power output. The reduction in the power output is a result of the decreased mass flow rate and of the compressor working off-design.

The increase of the turbine swallowing capacity results in a pronounced change in the operating line of the compressor as well, moving it towards choking this time. The resulting reduction of the pressure ratio leads to an increase in the engine specific fuel consumption as seen in FIGURE 16 (b). At the same time the off-design operation of the compressor (lower efficiency) results in a reduction of the engine power output.

The decrease of the turbine efficiency has the most pronounce effect on the engine performance as seen in FIGURE 16 (b). This is a combination of reduced air mass flow, engine operating pressure ratio for specific TIT as seen in FIGURE 15 (b) and the reduction of the component efficiency. Also it must be noted that the decrease of pressure ratio and air mass flow is at different rates resulting to a mild shift of the compressor operation towards stall (FIGURE 15 (a)).

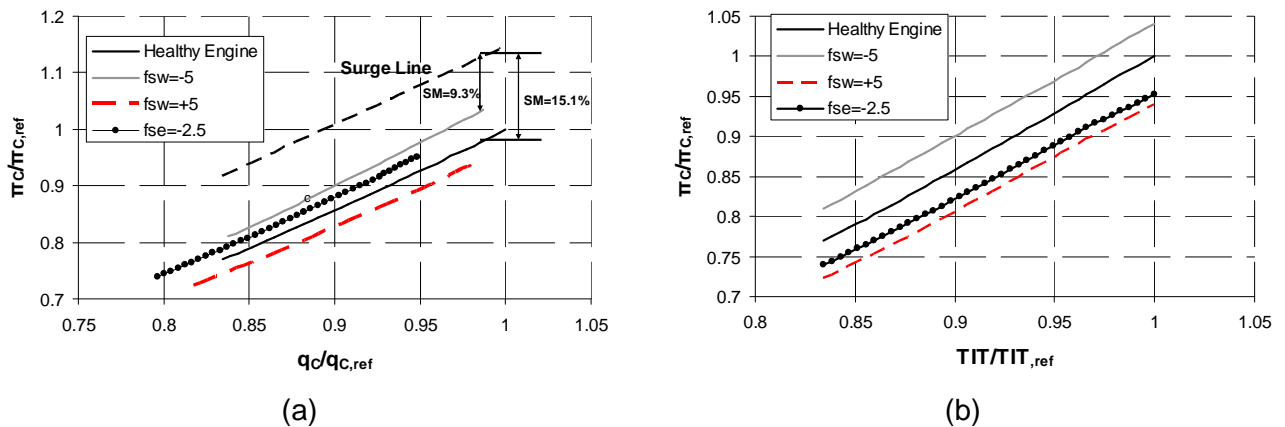


FIGURE 15. Impact of reduced GG turbine swallowing capacity and efficiency on the compressor operating line versus (a) corrected mass flow and (b) operating TIT for TIT as the control parameter

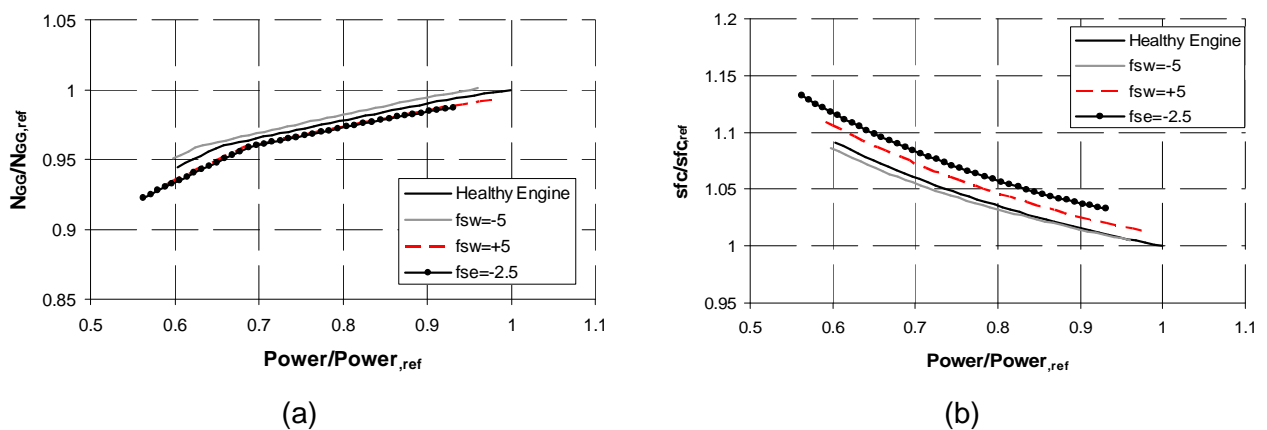


FIGURE 16. Impact of reduced GG turbine swallowing capacity and efficiency on the compressor operating line versus (a) corrected mass flow and (b) operating TIT for TIT as the control parameter

An interesting observation underlying the importance of the measurement that is used in order to limit the engine operation can be deduced from FIGURE 17. It is evident that if the firing temperature is indirectly controlled via the power turbine inlet temperature (T_{48}) or via the power turbine exhaust temperature (EGT) then the engine will work underfired in the case of increased swallowing capacity and decreased turbine efficiency. This means that in operation the engine continuous maximum power output will decrease as a result of both the engine deterioration and the effect of the control mode. In the case of reduced efficiency and for the EGT as the limiting measurement the maximum power output will be the 0.86 of the nominal one, while for the case of T_{48} the maximum power output will be the 0.9 of the nominal one.

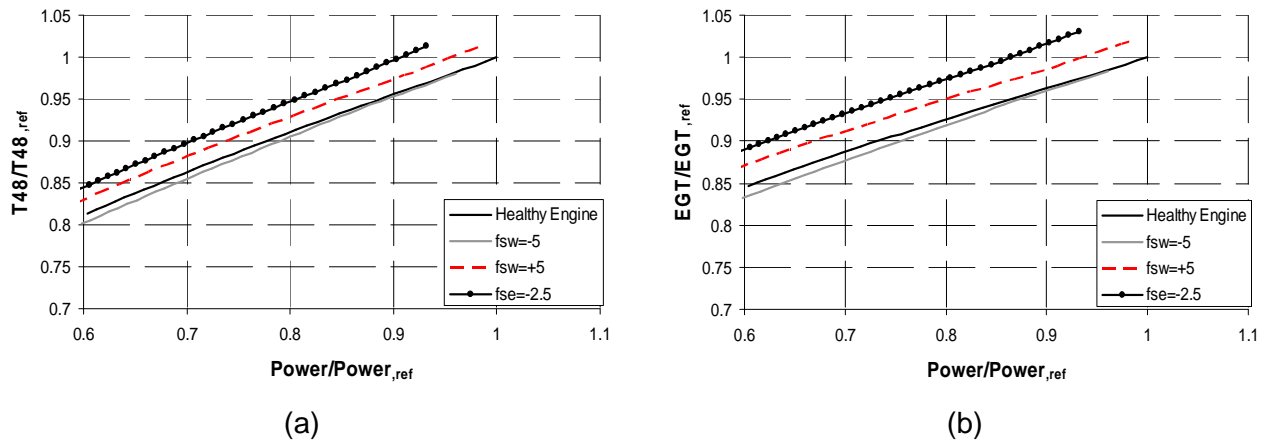


FIGURE 17. Impact of reduced GG turbine swallowing capacity and efficiency on the compressor operating line versus (a) corrected mass flow and (b) operating TIT for TIT as the control parameter

GAS GENERATOR TURBINE FOULING

Turbine fouling is mainly depending on type and quality of the operating fuel as discussed by Meher-Homji [20]. If the gas turbine is running on clean fuel such as natural gas, the turbine degradation will be much slower, while when heavy fuel oil or crude oil is used, the turbine degradation is likely to appear earlier. Low melting point ashes, metals and unburned hydrocarbons can be aggregated in the turbine in the form of scale. The contaminants deposition will have an impact over blade, by changing the airfoil shape, the inlet angle and increasing the surface roughness. These effects will result to the reducing of the airfoil throat area and apparently reducing the performance characteristics and the service life of the component. Also, especially in marine gas turbines, sulfidation may occur resulting in turbine corrosion. As a result, fouling rate will increase, as discussed by Basendwah et al. [21].

Turbine fouling is liable for the decrease of both turbine swallowing capacity and efficiency. According to the experimental results presented by Zaba [22] the ratio of the factors is expected to be in the range of 1. Thus, for the turbine fouling simulation, a ratio between turbine swallowing capacity reduction and efficiency reduction equal to 1 will be used. The value of the decrease used herein in order to examine the gas turbine behavior is equal to 2.5%, while in practice even larger values may appear, as for example presented by Zaba [22].

As seen in FIGURE 18 turbine fouling alters the compressor operation line significantly, moving it towards stalling. The loss of surge margin can be rather significant, as it reduces from 16.4% to 10.1%. Turbine fouling has a pronounced effect on the engine performance as both sfc and power output degrade compared to the healthy engine as seen in FIGURE 19 (a). This

degradation is the result of the turbine efficiency reduction and the operation of the engine at lower pressure ratios. At the same time the engine is forced to work at higher TIT in order to maintain the load at part-load operation as seen in FIGURE 19 (b). It must be noted that if T_{48} , or EGT are used in order to control the engine firing temperature then the maximum power output will be bounded to even lower values that the ones due to the engine degradation as seen in FIGURE 20.

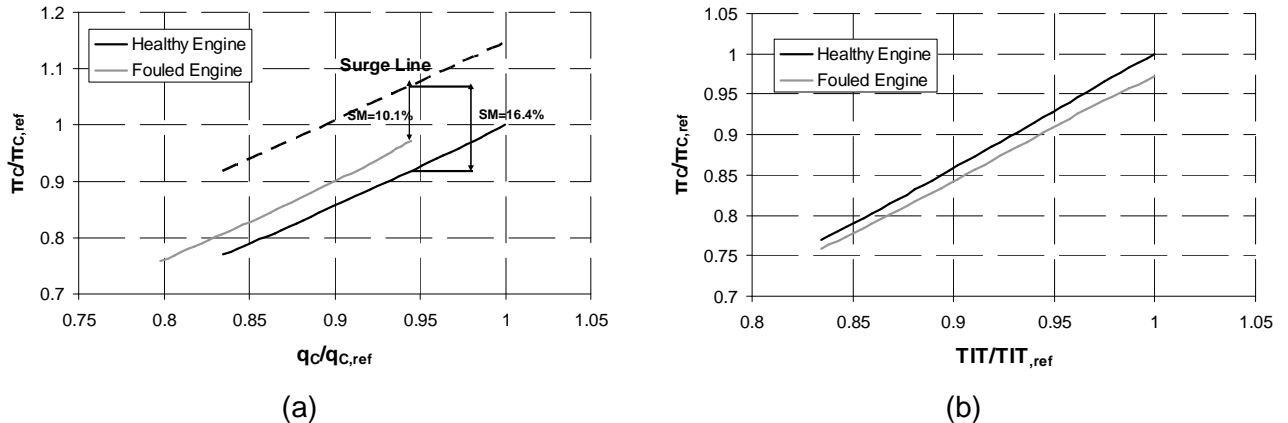


FIGURE 18. Impact of GG turbine fouling on the compressor operating line versus (a) corrected mass flow and (b) operating TIT for TIT as the control parameter

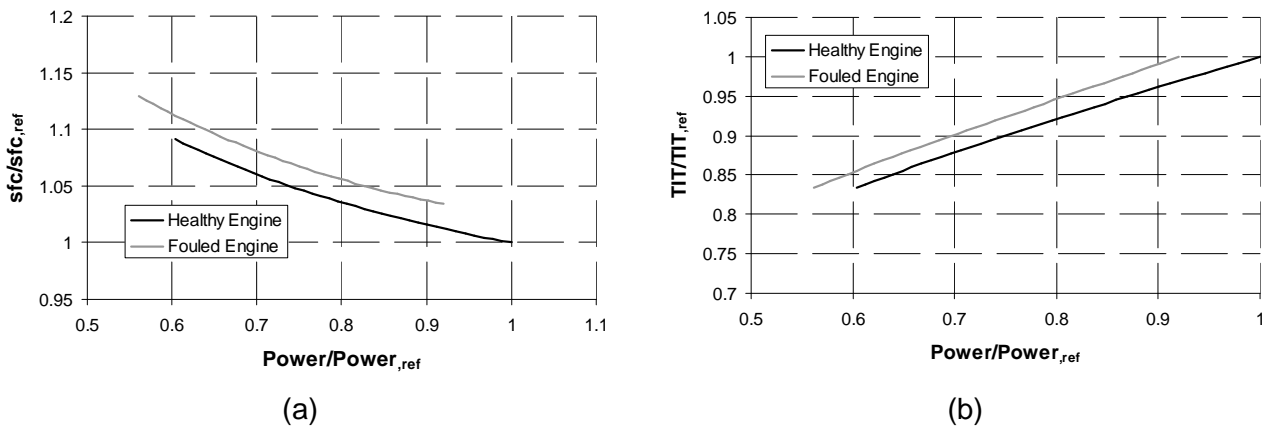


FIGURE 19. Impact of GG turbine fouling on (a) engine performance and (b) firing temperature for specific Power output

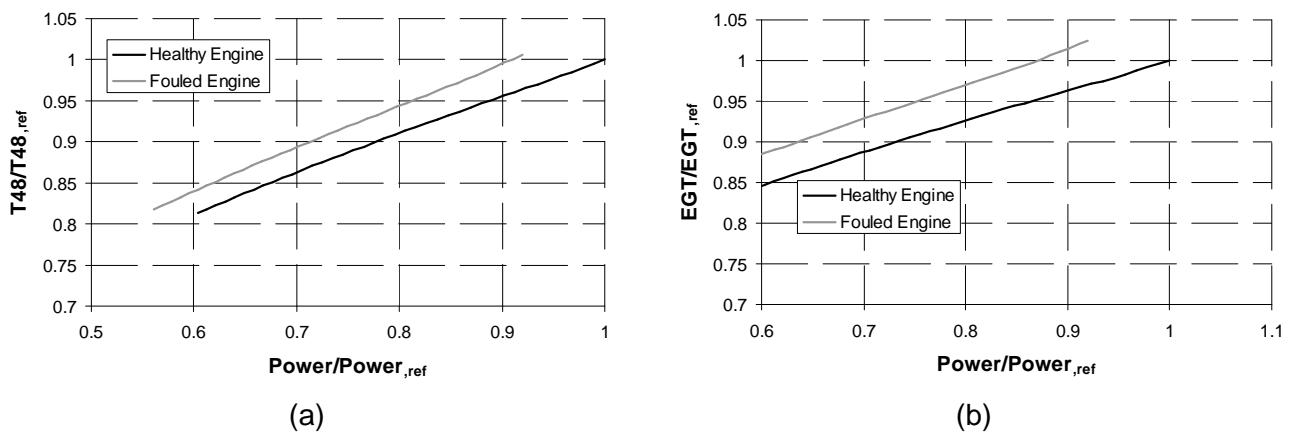


FIGURE 20. Impact of GG turbine fouling on (a) power turbine inlet temperature (T_{48}) and (b) Exhaust Gas Temperature (EGT)

In FIGURE 21 the fault signature for different control modes and for a fouled turbine is presented. It is worth mentioning that for all three cases the inlet air mass flow indicate that the engine is faulty. For the case that N_{GG} and Load are the control variables the hot section temperatures are giving the clearer indication of a fault, while in the case that TIT is the control variable it is the inlet air mass flow and Load that are more sensitive to the specific fault.

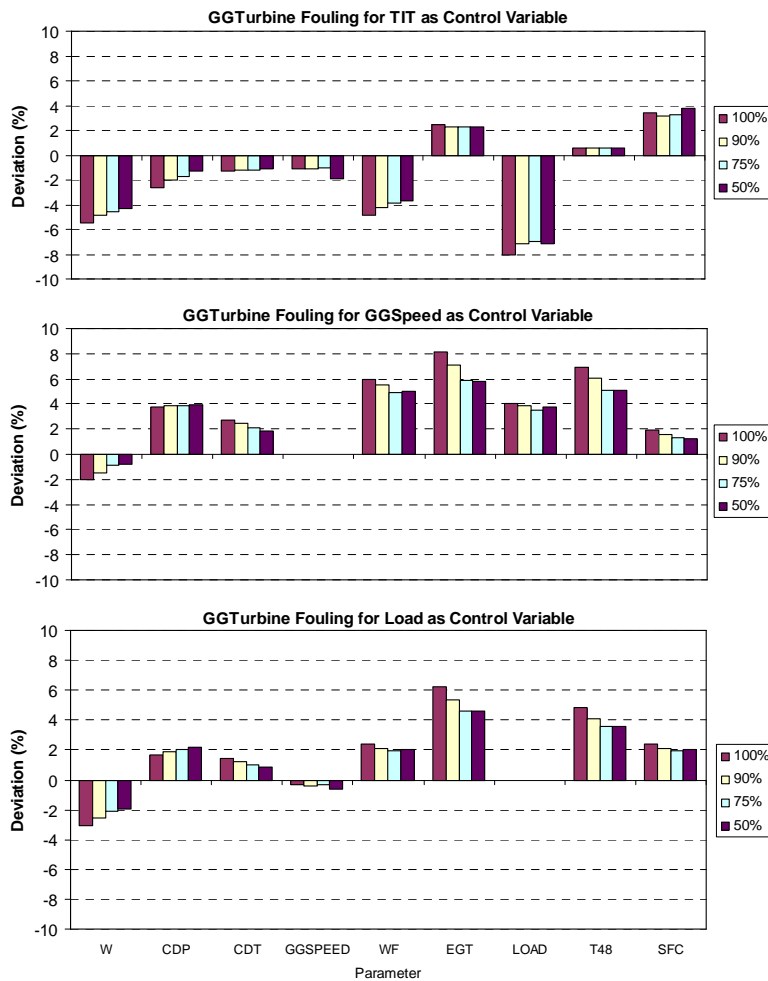


FIGURE 21. Fault signatures for the case of GG turbine fouling and for different control parameter

GAS GENERATOR TURBINE EROSION

Erosion is caused by the impingement attack of particles against the surface of the turbine blade. Due to the high speeds, at which the blades rotate, a collision with even a very small particle induces a significant damage effect on the turbine blade affecting the performance of the turbine. Erosion is generally attributed to the larger particle sizes in excess of approximately 20 μm in diameter. According to the 1-D analysis by Morini et al. [9], erosion causes a shift of the non-dimensional corrected mass flow rate curves towards higher values, while efficiency curves are in practice unaffected by this type of deterioration. The same effect of erosion was considered by Zhu and Saravanamuttoo [24] in their simulation, although they suggested that turbine erosion may cause efficiency degradation as well. No experimental data is available in

the open literature thus, for the turbine erosion simulation, a ratio between swallowing capacity increase and efficiency reduction of (-) 8 will be used since the effect on swallowing capacity is predominant. The swallowing capacity increase used herein is 5%.

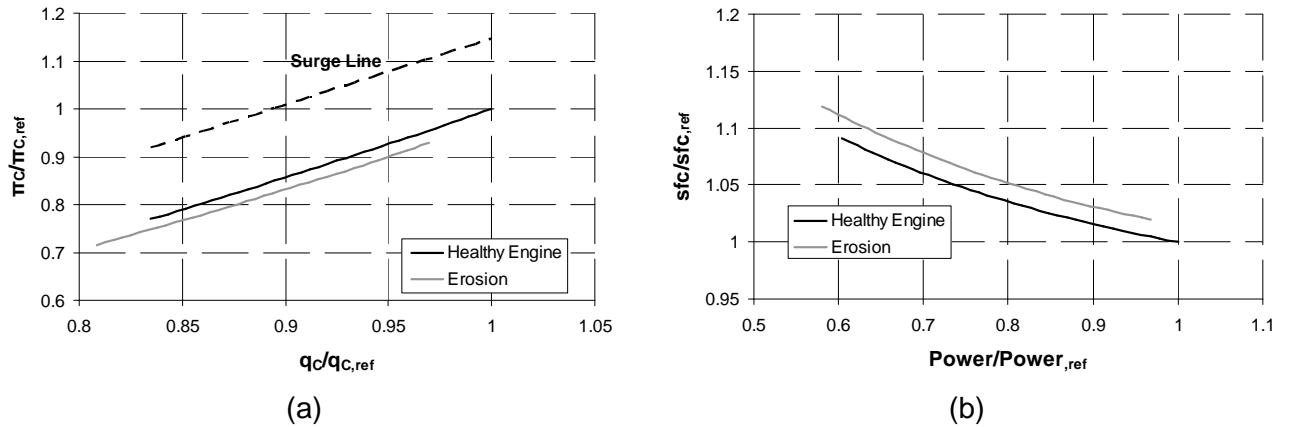


FIGURE 22. Impact of turbine erosion on (a) the compressor operating line and (b) engine performance for TIT as the control parameter

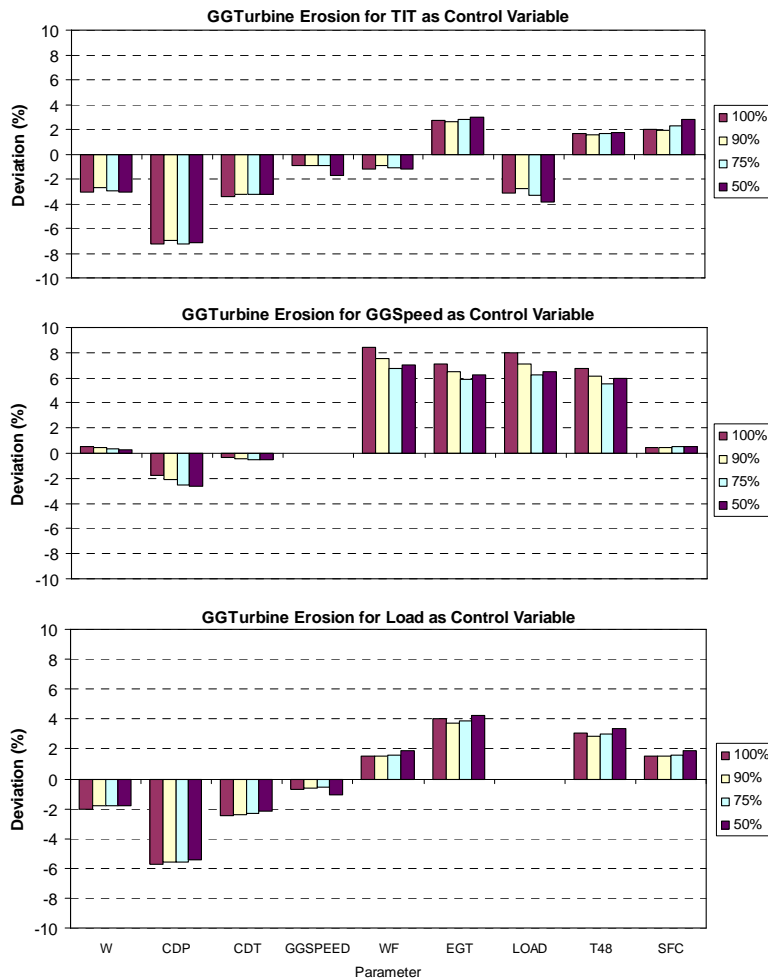


FIGURE 23. Fault signatures for the case of turbine erosion and for different control parameter

As seen in FIGURE 22 the operating line is moved towards the choking region, thus the measured CDP of the faulty engine is expected to be lower than the healthy one. The engine performance is also deteriorated for the case of erosion, resulting to a significant increase on sfc and a noticeable decrease of the engine power output, as seen in FIGURE 22 (b).

In FIGURE 23 the fault signature for different control modes and for an eroded turbine is presented. For the case that TIT and Load are the control variables it is compressor oriented measurements that gives an indication for the fault, while if operating points for the same N_{GG} are compared the hot section temperatures and Load are giving the clearer indication of a fault.

CONCLUDING REMARKS

The paper covered in detailed degradation phenomena and the impact of component degradation on overall engine performance, result of both component degradation and component rematching. The effect of components fault on the engine performance has been discussed in detail in order to highlight the importance of a strict schedule on engine components maintenance, especially for recoverable faults as is the filter fouling and compressor fouling. It is clear from the results that a faulty engine will not be in a position to obtain the expected maximum continuous power output, thus the expected propulsive power can be significantly reduced, while at the same time the specific fuel consumption will increase. Fault signatures have been produced and the results indicate that different faults may be identified by using appropriate measurements and control variables.

For the case of compressor the analysis indicated that for a faulty engine the need to operate at higher TIT in order to maintain part load operation may increase maintenance needs during the engine operation. The most sever fault with respect to surge margin is the occurrence of tip clearance increase, although the surge margin reduce can be characterized as permissible if no other conditions that reduce surge margin occurs, like water injection.

Some interesting observations are deducted from the compressor fault signatures that may allow easier fault type identifications. If measurements from operating points at the same gas generator speed are used then fouling and tip clearance increase produce a significantly different fault signature, as in the first case the compressor oriented measurements present the most obvious deviation, while in the second case the hot section temperatures are more sensitive. The distinction is not as clear in the case that measurements for the same TIT or power output are used. In the case of compressor erosion the fault signature for the same GG speed is similar to the one of fouling, but the insensitivity of the measurements for the same Load and TIT can give an indication that the fault is erosion.

For the case of turbine the faulty engine needs to operate at higher TIT in order to maintain part load operation as well, while the effect of fouling on the surge margin can be rather significant and under specific conditions it may threaten the engine's stable operation. The importance of the measurement used in order to control TIT was discussed and the results indicate that in a faulty engine the maximum power output may be further decreased as although the engine can operate underfired the turbine exhaust temperatures may be greater than the ones of the healthy engine.

Concerning the fault signatures both examined turbine faults produce similar signatures with respect to the hot section temperatures, while the compressor oriented measurements (CDP and CDT) have different behavior when measurements for the same GG speed and Load are used, thus it can be said that the turbine faults can be clearly identified using measurements taken at the same GG speed or Load.

For the case of turbine and compressor faults it can be concluded that the turbine fouling can be identified versus all examined faults by using the fault signature for the Gas generator Speed

as the control variable. In this case although the hot section measurements deviation is similar to some of the compressor fault signatures and to the turbine erosion signature, the CDP increase allows the identification of the specific fault. Turbine erosion on the other hand produces a distinct signature when the measurements from the same Load are used.

REFERENCES

1. Roumeliotis I., Mathioudakis K., Aretakis N., Performance analysis of twin-spool water injected gas turbines using adaptive modeling, ASME paper No. GT2003-38516.
2. Stamatis A., Mathioudakis K., Papailiou D.K., Adaptive Simulation of Gas Turbine Performance, ASME J Eng Gas Turbines Power 1990, 112(2): 168-175
3. Tsalavoutas A., S. Pothos, Mathioudakis K., Stamatis A., Monitoring the performance of a twin-shaft ship propulsion turbine by means of adaptive modeling, RTO Symposium on Gas Turbine Operation and Technology for Land, Sea and Air Propulsion and Power Systems, Ottawa, Canada, 18-21 October 1999
4. Stamatis, A., Mathioudakis, K., Smith, M., Papailiou, K.D., "Gas Turbine Component Fault Identification by Means of Adaptive Performance Modelling". ASME Paper 90-GT-376, 1990
5. Li Y.G, Abdul Ghafir M.F., Singh W.R., Huang K., Feng X, "Non-Linear Multipoints Gas Turbine Off-Design Performance Adaptation Using a Genetic Algorithm". ASME Paper GT2010-22285, 2010
6. Yfantis E. A., Kapasakis P., "Marine Gas Turbine Performance Diagnostics: A Case Study", Diagnostyka Nr 3(47)/2008, September 2008, ISSN 1641-6414, pp. 61-64.
7. Oswald A.D. and Hiner S.D., "More Efficient Application for Naval Gas Turbines-Addressing the Mismatch between Available Technology and the Requirements of Modern Naval gas Turbine Inlets", ASME paper No. GT2006-90305
8. Aretakis N., Roumeliotis I., Mathioudakis K., 'Performance Model Zooming for In-Depth Component Fault Diagnosis', 2010, ASME paper GT2010-23262
9. Morini M., Pinelli M., Spina P. R., Venturini M., "Influence of Blade Deterioration on Compressor and Turbine Performance", ASME paper No. GT2008-50043
10. Volponi A. J., "Gas Turbine Parameter Corrections", ASME J. of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 121, pp. 613 – 621
11. Diakunchak, I. S. , 1992, "Performance Deterioration in Industrial Gas Turbines» Asme J. of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 114, pp. 161-168.
12. Lakshminarasimha, A. N., Boyce M. P., Meher-Homji C. B., 1994, "Modelling and Analysis of Gas Turbine Performance Deterioration» ASME J. of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 116, pp. 46-52.
13. Tarabrin, A. P., Schurovsky, V. A., Bodrov A. I., Stadler J-P, 1998, "Influence of Axial Compressor Fouling on Gas Turbine Unit Performance based on Different Schemes and with Different initial Parameters" ASME Paper No. 98-GT-416.
14. Syverud, E., Brekke, O., Bakken, L. E., 2005, "Axial Compressor Deterioration Caused by Saltwater ingestion" ASME Paper No. GT2005-68701
15. Kurz R., Brun K., Wollie M., 2008, "Degradation Effects on Industrial Gas turbines" ASME paper No. GT2008-50020
16. Zaita, A. K., Buley, G, Karlsons, G., 1997 "Performance Deterioration Modeling in Aircraft Gas Turbine Engines" ASME paper No. 97-GT-278
17. Schmücker, J., Schäffler, A., 1994, "Performance Deterioration of Axial Compressors Due to Blade Defects" Paper presented at the Propulsion and Energetics Panel (PEP) Symposium held in Rotterdam, the Netherlands in April 1994

18. MacLeod, J. D., Taylor, V., Laflamme, J. C., 1992, "Implanted Component Faults and Their Effects on Gas Turbine Engine Performance" ASME J. of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 114, pp. 174-179
19. Tabakoff, W., 1986, "Compressor Erosion and Performance Deterioration," ASME Publication FED-Vol. 37, presented at the AIAA/ASME 4th Joint Fluid Mechanics, Plasma Dynamics, and Lasers Conference, Atlanta, Georgia.
20. Meher-Homji. C. B, 1989, "Compressor and Hot Section Fouling in Gas Turbines – Causes and Effects", Proceedings of the 9th Industrial Energy Technology Conference, Houston. September 16-18. 1987, Texas A&M University.
21. Basendwah A. A., Pilidis P., Li Y. G., "Turbine Off- Line Water Wash Optimization Approach for Power Generation", ASME paper No. GT2006-90244
22. Zaba, T., 1980, "Losses in Gas Turbines Due to Deposits on the Blading," Brown Boveri Review, Volume 67, Number 12, December 1980
23. Kurz R., 1995, "Effects of nonuniform Blade Pitch on the Flow through an Annular Turbine Nozzle", Int. J. of rotating Machinery, Vol. 2, No.1, pp. 59-65
24. Zhu P., Saravanamuttoo H.I.H., 1994, "Simulation of an Advanced Twin – Spool Industrial Gas Turbine", Asme J. of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 114 , pp. 180-185

Thermal Efficiency and Environmental Performance of a Natural Gas – Diesel Compression Ignition Engine – An Experimental Approach.

R.G. Papagiannakis^a

^a*Thermodynamic & Propulsion Systems Section, Department of Aeronautical Sciences, Hellenic Air Force Academy, Dekelia Air Force Base, 1010 Dekelia Attikis, Greece*

Abstract. Reduction of exhaust emissions is a major research task in diesel engine development in view of increasing concern regarding environmental protection and stringent exhaust gas regulations. Simultaneous reduction of NO_x emissions and particulate matter is quite difficult due to the soot/NO_x trade-off and is often accompanied by fuel consumption penalties. Towards this aim, automotive engineers have proposed various solutions, one of which is the use of alternative gaseous fuels as a supplement for the commercial liquid diesel fuel. This type of engine, which operates fuelled simultaneously with conventional diesel oil and gaseous fuel, is called “dual fuel” diesel engine. The majority of the dual fuel diesel engines operate on the fumigation principle where the liquid diesel fuel is partially replaced by gaseous one fumigated into the intake air. One of the gaseous fuels used commonly in compression ignition engine is natural gas, which has a relatively high auto-ignition temperature and moreover is an economical and clean burning fuel. The high auto – ignition temperature of natural gas is a serious advantage against other gaseous fuels since the compression ratio of most conventional DI diesel engines can be maintained. Moreover the combustion of natural gas produces practically no particulates since natural gas contains less dissolved impurities (e.g. sulfur compounds). In the present work, experimental results are provided concerning the combustion of natural gas in a compression ignition environment. The experimental investigation has been conducted on a single cylinder, naturally aspirated; high speed direct injection diesel engine properly modified to operate under dual fuel mode. By comparing the results, an important effect of engine operating point (i.e. load and engine speed) in combination with the presence of natural gas on the exhaust emissions and main combustion characteristics is observed. Through the experimental results provided here, it is observed that the main dual fuel combustion characteristics (i.e cylinder pressure, heat released rate, duration of

combustion, ignition delay, total brake specific energy consumption, maximum combustion pressure) are affected remarkably so by the liquid fuel percentage replacement by natural gas as by the engine operating conditions (i.e. load and engine speed). As far as the exhaust emissions are concerned, it is revealed that the effect of the dual fuel operation on NO, CO and HC emissions is affected by the engine operating point (i.e. load and engine speed). Thus, the main objective of this comparative assessment is to elaborate the relative impact of each one of the above mentioned parameters on engine performance characteristics and exhaust emissions. Furthermore, an endeavor is made to determine the optimum combinations of these engine operational parameters. The conclusions of this study may be proven to be considerably valuable for the application of this technology on existing DI diesel engines.

Keywords: Dual Fuel Combustion; Natural Gas Fumigation; Supplement Ratio; Performance; Emissions.

PACS: 88.05.Xj; 88.20.th; 88.85.mf; 88.20.jj; 07.20.Pe

INTRODUCTION

The worldwide energy consumption is constantly increasing and it will certainly increase during at least the 21st century. Nowadays, around 80% of the world primary energy demand is satisfied by fossil fuels [1,2,3,4]. Awareness of limitations of fossil fuels reserves and the fact that burning of fossil fuels has a major contribution to the greenhouse gases emission has led to a growing interest in the use of alternative fuels, particularly for the operation of internal combustion engines that are also the main “energy consumer”. A promising solution is the use of natural gas as a supplement for the conventional diesel fuel (dual fuel natural gas diesel engines), owing to its inherent clean nature of combustion combined with the high availability at attractive prices [1-4,5,6]. Thus, many conventional compression ignition engines can also operate on dual fuel principle (i.e. natural gas and diesel fuel). For the majority of the compression ignition engines, natural gas is most usually inducted with the air during the induction stroke. They are mixed and compressed as in a conventional diesel engine. The mixture does not auto-ignite due to the high auto-ignition temperature of methane which is the main constituent of the natural gas. At the same point near the top dead centre (TDC), an amount of the liquid diesel fuel is injected through the conventional diesel fuel injection system. Diesel fuel auto-ignites and creates ignition sources for the surrounding gaseous fuel mixture [5,6]. The specific type of dual fuel engine is referred to as “Fumigated Natural Gas Diesel (FNGD) Engine”. Natural gas is fumigated into the intake air and premixed with the air during the induction stroke. Under dual fuel operating mode, the amount of the gaseous fuel fumigated into the intake air replaces an equal amount of the inducted combustion air since at constant engine speed the total amount of the inducted mixture has to be kept constant. Furthermore, in fumigated dual fuel operating systems, the desired engine power output is controlled by changing the amount of the gaseous fuel (natural gas). Most current dual fuel engines are made to operate either on dual fuel principle with diesel ignition, or simply as conventional diesel engines [5,6].

A number of experimental and theoretical investigations concerning the dual fuel diesel – natural gas operating mode have been reported in the international literature [5-22]. Various researchers [5-22] have published extensive theoretical and experimental investigations

concerning the combustion processes occurring inside the combustion chamber of a fumigated dual fuel diesel-natural gas compression ignition engine. During the last years, the present research group has reported experimental investigations along with computer simulations conducted on such kind of engines [23-27].

A primary objective of the present work is to examine the main characteristics of the dual fuel combustion under various combinations of load and engine speeds, primarily from the viewpoint of engine performance and exhaust emissions, where the liquid diesel fuel is partially replaced by natural gas at various percentages. For this purpose, an extended experimental investigation has been conducted on an existing single cylinder, naturally aspirated, high speed, direct injection (HSDI) diesel engine properly modified to operate under dual fuel operating mode. The engine is supplied with natural gas from the local low pressure distribution network after making the appropriate modifications. During the experimental investigation, pressure measurements are taken from the engine combustion chamber and the liquid fuel injection system using a high speed sampling device, while pollutants are measured at the engine exhaust. Moreover, measurements are taken of engine power, liquid and gaseous fuel consumption, exhaust gas temperature, and intake air mass flow rate.

From the analysis of the experimental measurements, important information is derived revealing the effect of engine operating conditions (i.e. load and engine speed) in combination with the natural gas concentration on the combustion mechanism occurring inside the combustion chamber, by estimating the ignition delay period, the duration of combustion and the intensity of the heat release mechanism as a function of the natural gas concentration in the cylinder charge. Moreover, under dual fuel operating mode, from the examination of both the experimental cylinder pressure and its derived heat release rate diagrams, for each engine operating condition (i.e. load and engine speed), important information is derived concerning the possibility of the appearance of knocking phenomena as the mass of supplementary fuel increases. Furthermore, under dual fuel operating mode and at various liquid fuel percentage replacement ratios by natural gas, the effect of engine operating conditions (i.e. load and engine speed) on the formation of pollutant emissions (NO, CO, HC and Soot) is revealed, by comparing the related values to the corresponding ones obtained under normal diesel fuel operation. The information derived from the present investigation is extremely valuable if one wishes to apply dual fuelling on an existing high speed direct injection diesel engine. It will be accomplished through the estimation of the proper combination of the engine operating condition and the ratio of diesel-natural gas fuel consumption so that the engine operation becomes friendlier to the environment, without deteriorating its performance compared to that of the conventional diesel operation.

EXPERIMENTAL SECTION

Experimental Installation

Facilities to monitor and control engine variables were installed on a single-cylinder test-bed Lister LV1 experimental engine. This is a four-stroke, naturally aspirated, air-cooled engine with a "bowl-in-piston" combustion chamber having a bore of 85.73 mm, a stroke of 82.55 mm and a rod length to crank radius of 3.6. The compression ratio is 18:1 and the nominal speed range is between 1000 and 3000 rpm. The liquid fuel is injected inside the cylinder through a three-hole injector nozzle (hole diameter of 250 μm), located near the combustion chamber center with an opening pressure of 180 bar. The engine is coupled to a Heenan & Froude hydraulic dynamometer [23-27].

The air drawn-in by the engine is passed first through a filter and then through a viscous type air flow meter, where the inducted volume air flow rate is measured. It must be stated here that

there is no need to use an air damper to damp the air pulsations, since the highly viscous element damps the pulsations of the air flow and produces a smooth average flow towards the cylinder chamber. The fuel system consists of both liquid diesel fuel injection and natural gas supply subsystems. The engine can be easily switched over to operate on either pure diesel fuel (normal diesel operation) or diesel and natural gas (dual fuel operation) operating modes. The engine is supplied with natural gas obtained from the local distribution network. The gaseous fuel, before entering the engine cylinder, passes through a small tank (to dampen the pressure fluctuations from the engine intake) and two flow meters (for accuracy), a positive displacement and a rotary flow one. The adjustment of gaseous fuel supply is accomplished through a control valve located after the flow meter. Then, the gaseous fuel flows towards the intake of the engine and is mixed with the intake air.

The main measuring instruments were: an Alcock (viscous type) air flow meter; tanks and flow meters for fuel; temperature sensors for the exhaust gas, inlet air, lubricating oil and cooling water; a TDC marker (magnetic pick-up); an rpm indicator and a Kistler piezoelectric transducer for the combustion chamber pressure [23-27]. Another similar piezoelectric transducer was fitted to the high-pressure fuel pipe (from pump to injector) near the injector. A fast data-acquisition and recording system was used to record the pressure diagrams obtained by the piezoelectric transducers.

Exhaust gas analyzers were used to measure smoke, nitrogen oxide (NO), total unburned hydrocarbons (HC) (equivalent propane) and carbon monoxide (CO) at the tailpipe. A Bosch RTT100 smoke meter was used to measure smoke levels in the exhaust gases, NO emissions were measured with a Signal chemiluminescent analyzer and the HC emissions were measured with a Signal flame-ionization detector. The last two devices were fitted with thermostatically controlled heated lines. Finally, CO was measured with a Signal non-dispersive infrared analyzer.

At each operating point (i.e. load and engine speed) forty cycles were acquired on a time basis. For the estimation of the mean indicator diagram averaging took place over the indicator diagrams of 40 consecutive cycles. Each one of the measured indicator diagram is converted to a crank angle basis one using the engine speed which is measured every half revolution of the crankshaft. Thus, for each engine speed the actual sampling rate in degree crank angle is determined from the precise engine speed which is estimated from the TDC signal and the desired crank angle resolution.

Description of Test Fuels

The main properties of the liquid diesel fuel used are given in Table 1. The present liquid fuel is the representative of a typical commercial automotive diesel fuel. The composition of the natural gas used, based on data obtained from the supplier at the time of measurements, is given also in Table 1. As observed, methane is the main constituent of the natural gas resulting in a relatively high octane number, which makes it suitable for engines of high compression ratio. Furthermore, its C/H ratio is low resulting in a significant reduction of the specific CO₂ emissions.

TABLE 1. Basic Characteristics of the fuels used.

| Liquid Diesel Fuel (CEN EN-590) | |
|--|----------------------------|
| Cetane Number | 52.5 (-) |
| Density : | 833.7 (kg/m ³) |
| LHV | 42.74 (MJ/kg) |
| Sulfur Content | 45 (mg/kg) |
| Natural Gas (ISO 6974-6) | |
| Methane | 98 % (v/v) |

| | |
|----------------|--------------|
| Ethane | 0.6 % (v/v) |
| Propane | 0.2 % (v/v) |
| Butane | 0.2 % (v/v) |
| Pentane | 0.1 % (v/v) |
| Nitrogen | 0.8 % (v/v) |
| Carbon Dioxide | 0.1 % (v/v) |
| LHV | 48.6 (MJ/kg) |

Experimental Procedure

For all test cases examined during the experimental investigation, the static injection timing was kept constant at 26 degrees crank angle before top dead center (BTDC), the air inlet temperature was measured about 23 °C and the air absolute humidity was measured about 50%. Measurements have been taken at three different engine loads corresponding to 2.45 bar, 3.69 bar and 4.92 bar brake mean effective pressure, and three engine speeds of 1500, 2000 and 2500 rpm under both normal diesel and dual fuel operation. Under dual fuel operation and for each operating point (i.e. load and engine speed), measurements have been taken for various liquid fuel percentage replacement ratios by natural gas (i.e. supplement ratio). In the present work the “supplement ratio” (X) represents the quotient of the mass flow rate of natural gas divided by the total fuel (diesel and natural gas) mass flow rate, and is given by the formula:

$$x = \frac{\dot{m}_{NG}}{\dot{m}_D + \dot{m}_{NG}} \cdot 100 (\%) \quad (1)$$

It must be stated here that under dual fuel operating mode, the amount of the gaseous fuel fumigated into the intake air replaces an equal amount of the inducted combustion air since for specific engine speed the total amount of the inducted mixture has to be kept constant. Furthermore, in the present investigation an attempt was made to conduct all experiments without significant fluctuations in air inlet temperature and lubricating oil temperature as a method to prevent possible discrepancies in engine operation during the tests and mainly, to avoid variations in engine loading.

Under dual fuel operating mode the experimental procedure has as follows: At a given constant engine speed, enough amount of liquid diesel fuel is provided to achieve a percentage of the desired engine power output. The rest percentage of the desired engine power output is reached by using only natural gas, which is fumigated into the air intake. Thus, for example, at 2000 rpm engine speed when the engine runs under dual fuel operating mode with supplement ratio $x = 27\%$ at 4.92 bar brake mean effective pressure (i.e. corresponds to 80% of full engine load), a percentage of the desired engine power output (~75%) is obtained using only diesel fuel while the remaining (~25%) up to the desired engine load is obtained from the gaseous fuel.

ESTIMATION OF THE TOTAL BURNING RATE

For each engine operating point (i.e. load and engine speed), the total burning rate is estimated by using the mean cylinder indicator diagram. Combustion duration and intensity are estimated from the TDC pickup signal combined with the calculated heat release rate, which is a most valuable source of information for the combustion mechanism in diesel engines [28,31]. The net heat release rate is determined by applying the first thermodynamic law as follows [28,31]:

$$\frac{dQ_{net}}{d\phi} = \frac{C_v}{R} \left(P \frac{dV}{d\phi} + V \frac{dP}{d\phi} - \frac{PV}{m} \frac{dm}{d\phi} \right) + P \frac{dV}{d\phi} \quad (2)$$

During this analysis, the following assumptions are made:

- The cylinder charge is considered as an ideal gas.
- The composition of the working gas is considered to be variable and is estimated from the trapped mass (air and gaseous fuel) at inlet valve closure and the amount of fuel burned up to the current engine crank angle
- The distribution of thermodynamic properties inside the combustion chamber is considered to be uniform
- No dissociation present in combustion products
- The cylinder is considered as a closed system, so that no variation of cylinder mass due to blow-by or gas leakage through the inlet/exhaust valves is considered.

The gross heat release rate, which provides the actual rate of energy release, is then obtained by

$$\frac{dQ_{gross}}{d\phi} = \frac{dQ_{net}}{d\phi} - \frac{dQ_w}{d\phi} \quad (3)$$

where the heat loss rate ($\frac{dQ_w}{d\phi}$) (negative from gas to walls) is obtained from Eq. (4) using the heat transfer model of Annand [29],

$$\frac{dQ_w}{dt} = A \left(\alpha_c \frac{\lambda}{D} \text{Re}^b (T_w - T_g) + c_r (T_w^4 - T_g^4) \right) \quad (4)$$

where (α_c , b and c_r) are constants, (A) is the total area of the cylinder and (λ) is the thermal conductivity of the working medium. In Eq. (4), it is required to have an estimate of the cylinder gas temperature (T_g). For this reason, it is assumed that the cylinder content behaves as a perfect gas as already mentioned. The mean cylinder gas temperature is obtained using the following expression:

$$T_g = \frac{P \cdot V}{m \cdot R} \quad (5)$$

where the cylinder pressure (P) is obtained from the mean cylinder indicator trace. The specific gas constant (R) is calculated from the mean gas composition estimated from the initially trapped mass and the fuel burned up to the current engine crank angle. The trapped mass at inlet valve closure is estimated from an open cycle simulation of the engine, using the measured mass flow rate of air and gaseous fuel. Using the previous methodology, we obtain a good estimate of the actual rate of heat release inside the combustion chamber, since the net heat release rate does not account for the energy loss due to heat exchange with the cylinder walls. The heat transfer model coefficients are calibrated using an iterative procedure, so that the cumulative gross heat release rate calculated is equal to the total energy released from the combustion of the measured gaseous and liquid fuel mass. This provides us with a good estimate of the rate of fuel consumption (combustion) inside the engine cylinder. Under dual fuel operation, the estimated heat release rate is the total one due to the combustion of both the liquid fuel and the gaseous one [32].

UNCERTAINTY ANALYSIS OF THE EXPERIMENTAL DATA

For each engine operating mode, i.e. normal diesel and dual fuel operation, two sets of measurements have been taken. At each engine operating point three measurements were

taken and, thus, the values reported for all measured parameters are the mean ones from six different measurements. This makes possible to estimate the repeatability of measured data and the relevant measuring error. To estimate the accuracy of the measurements, the coefficient of variance (COV) for each measured parameter is determined. This represents the standard deviation of each magnitude as a percentage of its mean value. The COV for each measured parameter is presented in Table 2. Considering these values, it is shown that the measurements are quite repeatable, especially concerning engine performance characteristics.

TABLE 2. Coefficient of Variance for the Measured Quantities

| Measured Quantity | COV (%) |
|-----------------------------------|----------------|
| Maximum Combustion Pressure | 1.2 |
| Brake Specific Energy Consumption | 0.9 |
| Exhaust Gas Temperature | 3.1 |
| Nitric Oxide | 3.5 |
| Carbon Monoxide | 2.9 |
| Unburned Hydrocarbons | 3.2 |
| Soot | 3.9 |

RESULTS AND DISCUSSION

Cylinder Pressure and Total Heat Release Rate Data

Figures 1-3 provide the experimental pressure and total heat release traces for 1500, 2000 and 2500 rpm engine speed, at 2.45 and 4.92 bar brake mean effective pressure, under normal diesel ($X = 0\%$) and dual fuel natural gas-diesel ($X \neq 0\%$) operating modes. Observing these figures, it is obvious that the presence of natural gas in the cylinder charge affects both cylinder pressure and the total burning rate. Specifically, at low load (i.e. 2.45 bar brake mean effective pressure) and for all engine speeds examined, the gaseous fuel affects only slightly the value of the cylinder pressure compared to the one under normal diesel operation. The difference becomes more evident during the last stage of compression and during the initial stage of the combustion process. The difference observed during the last stages of the compression stroke is the result of the higher specific heat capacity of the natural gas – air mixture compared to that of the air for normal diesel operation while the difference observed during the initial stage of the combustion process is the result of the poor combustion of the gaseous fuel during the premixed controlled combustion phase. Moreover, at low load, the increase of engine speed leads to an increase of the cylinder pressure traces observed under dual fuel operating modes which tend to converge to the respective one observed under normal diesel operating mode. This is due to the fact that the increase of engine speed leads to a warmer engine and to an increase of the turbulence inside the combustion chamber. These factors affect positively (enhance) the flame speed contributing thus to the improvement of the gaseous fuel combustion quality (lower ignition delay and faster flame speed).

At high load (i.e. 4.92 bar brake mean effective pressure), as the amount of the replaced liquid diesel fuel increases, the rate of cylinder pressure rise during the initial stage of the combustion process becomes lower compared to the respective one under normal diesel operation while the peak of the cylinder pressure occurs later compared to the respective value observed under normal diesel operation. It is the result of both the later initiation of combustion and the lower premixed controlled combustion rate of diesel fuel due to its smaller amount. At low supplement ratios it becomes more evident at low engine speed, while the increase of engine speed results in a slightly increase of the rate of the cylinder pressure rise especially during the initial stages of combustion. At high supplement ratios, the increase of engine speed

results in a considerable improvement of the gaseous fuel combustion quality (faster flame speed) which affects positively the rate of the cylinder pressure rise during the combustion process resulting thus to a considerable increase of the maximum cylinder pressure, which may converge to the respective one under normal diesel operation.

As far as the total heat release rate curves are concerned, it is revealed that the presence of natural gas in the cylinder charge affects the combustion process. The initiation of combustion observed under dual fuel operating modes starts later compared to the respective one under

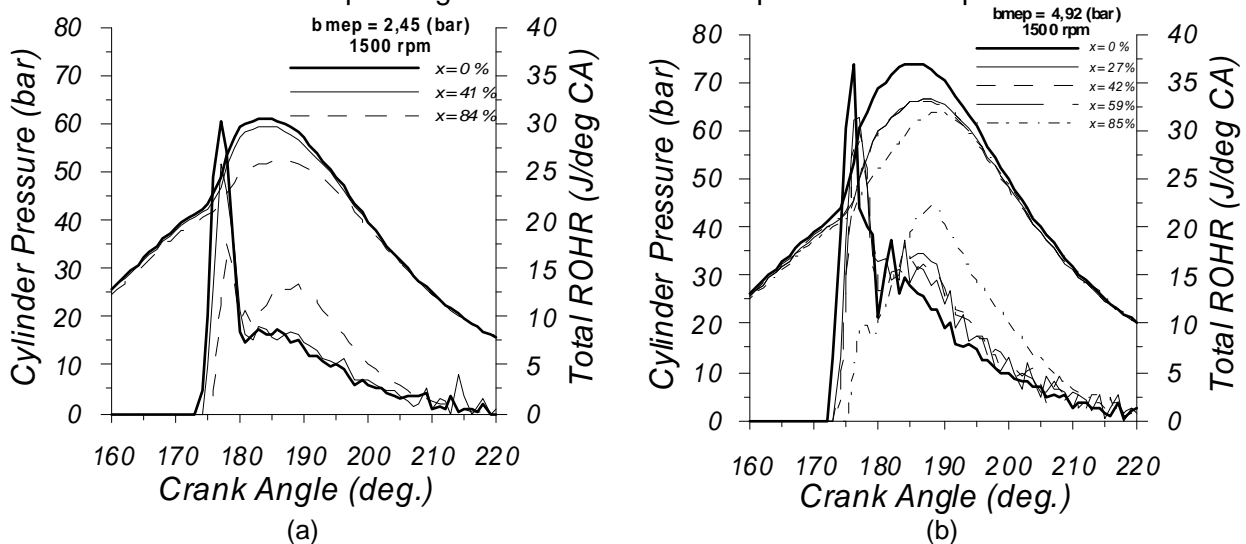


FIGURE 1. Experimental pressure and heat release traces under normal diesel and dual fuel operating modes for 1500 rpm engine speed (a) at 2.45 bar and (b) at 4.92 bar brake mean effective pressure.

normal diesel operation. This is due to the fact that under dual fuel operation the cylinder charge (i.e. gaseous fuel – air mixture) has higher overall specific heat capacity compared to the respective one (i.e. air) under normal diesel operating mode. For all engine operating points examined, the total burning rate observed during the initial stages of combustion under dual fuel operating modes decreases with the increase of the gaseous fuel concentration in the cylinder charge. This is due to the lower amount of diesel fuel burned during the specific combustion phase and also to the fact that the combustion of the gaseous fuel has not yet progressed enough, since the cylinder charge conditions (i.e. cylinder charge temperature, gaseous fuel concentration etc.) do not favor the existence of the flame front. The difference becomes more evident at part load and for all engine speed examined.

As far as the second phase of combustion process is concerned, it is revealed that the total burning rate during the diffused controlled combustion phase is considerable higher compared to the respective one observed under normal diesel operation. This is the result of the considerable improvement of the gaseous fuel combustion quality that is caused by the improvement of the cylinder charge conditions (i.e. gaseous fuel concentration, cylinder gas temperature etc.), which contributes significantly to the existence and the fast spread of the flame front surrounding the burning zone. The effect is stronger again at low engine speed, revealing the longest duration of the gaseous fuel combustion. However, this does not have any significant effect on the cylinder pressure, since the major part of the gaseous fuel combustion occurs during the expansion stroke.

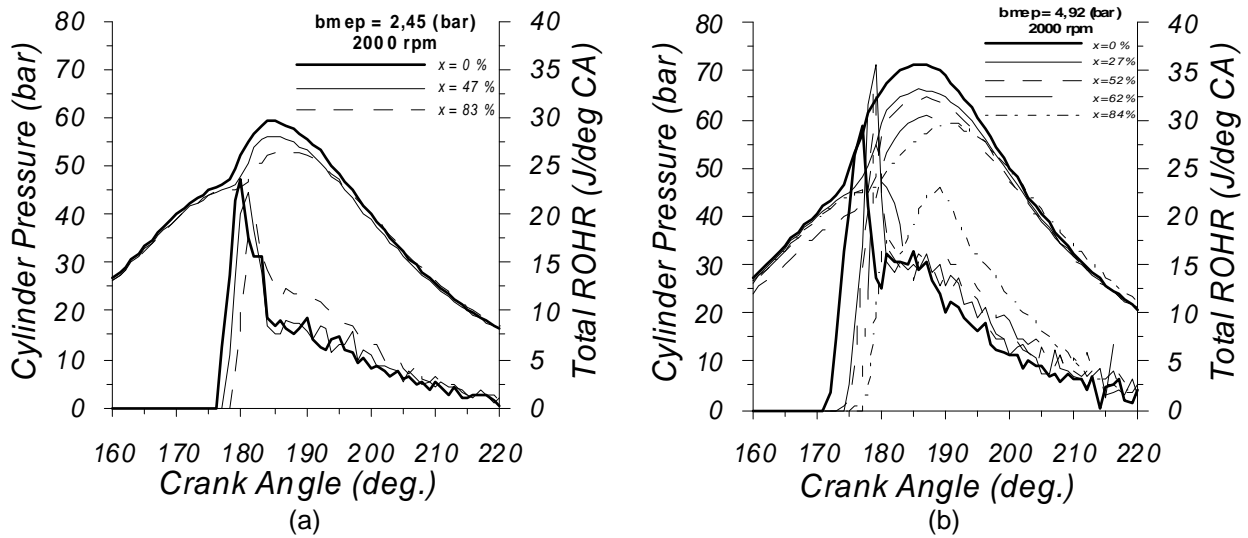


FIGURE 2. Experimental pressure and heat release traces under normal diesel and dual fuel operating modes for 2000 rpm engine speed (a) at 2.45 bar and (b) at 4.92 bar brake mean effective pressure.

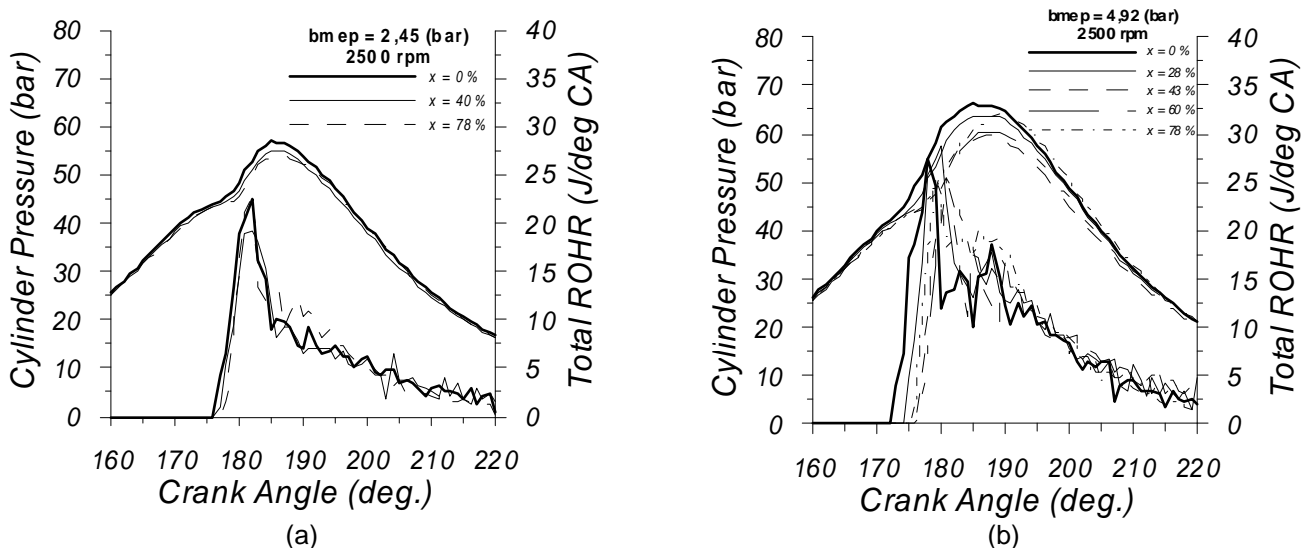


FIGURE 3. Experimental pressure and heat release traces under normal diesel and dual fuel operating modes for 2500 rpm engine speed (a) at 2.45 bar and (b) at 4.92 bar brake mean effective pressure.

Maximum Cylinder Pressure

Figures 4 (a, b and c) provide the variation of the maximum cylinder pressure as a function of the supplement ratio for 2.45, 3.69 and 4.92 bar brake mean effective pressure at 1500, 2000 and 2500 rpm engine speed, respectively. Observing these figures it is revealed that under dual fuel operating modes the increase of the supplement ratio, keeping engine load constant, leads to a significant decrease of the maximum cylinder pressure. For the same engine speed the slope each one of the load curves being almost the same for the entire range of the supplement ratios examined. At part load and low engine speed conditions the decrease of the maximum cylinder pressure becomes more evident at low supplement ratios. As engine speed increases the improvement of the gaseous fuel combustion affects positively the maximum cylinder pressure revealing thus to smaller decrease of the maximum cylinder pressure.

At high load the maximum combustion pressure starts to decrease with the increase of gaseous fuel concentration in the cylinder charge. Further increase of the amount of the gaseous fuel leads, beyond a certain value, to an increase of the maximum combustion pressure, which tends to converge to the one under normal diesel operation. The effect becomes more evident at high engine speed.

It should be mentioned that under dual fuel operating modes examined, the lower heat release rate during premixed controlled combustion phase and the higher specific heat capacity of the natural gas – air mixture are the main reasons of the lower and delayed appearance of maximum combustion pressure compared to normal diesel operation. This is encouraging since, apparently, no danger exists for the engine structure associated to cylinder pressure, if the specific technology is to be applied on conventional diesel engines.

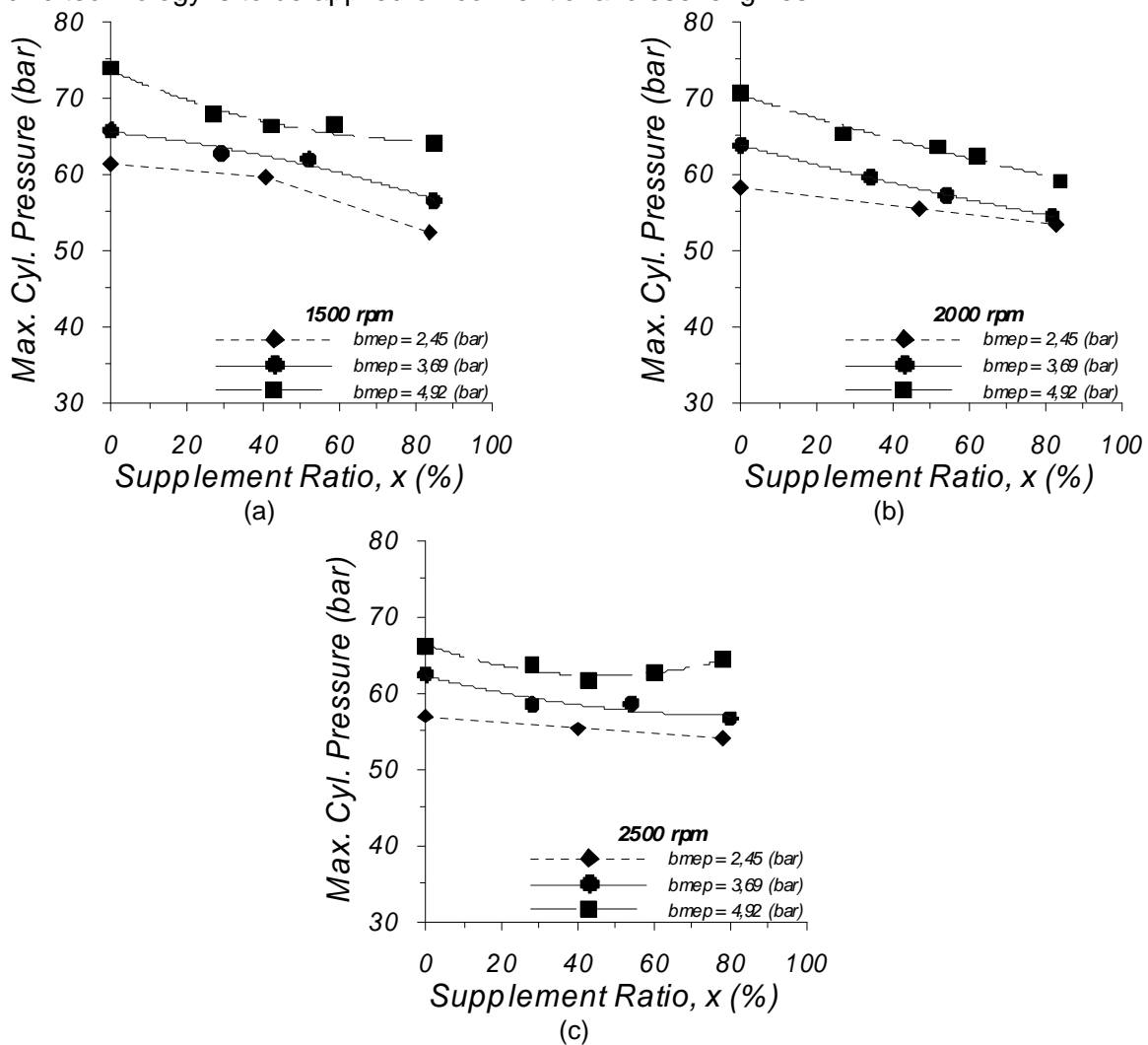


FIGURE 4. Variation of Maximum Cylinder Pressure as function of supplement ratio for 2.45, 3.69 and 4.92 bar brake mean effective pressure at (a) 1500 rpm, (b) 2000 rpm and (c) 2500 rpm engine speed.

Exhaust Gas Temperature

The variation of the measured exhaust gas temperature with diesel fuel supplement ratio is given in figures 5 (a, b and c), for various combinations of engine load (i.e. 2.45 bar, 3.69 bar and 4.92 bar brake mean effective pressure) and engine speed (i.e. 1500, 2000 and 2500 rpm). As well recognized [28,30-32], at each engine load the exhaust gas temperature is favored, in

general, by the increase of the engine speed. Thus, for the same supplement ratio, keeping constant engine load, the increase of engine speed leads to an increase of the exhaust gas temperature. Moreover, at each engine speed the increase of engine load leads to a considerable increase of the exhaust gas temperature.

Under dual fuel operating mode at low load, the effect of the percentage of liquid fuel replacement on the exhaust gas temperature is almost negligible. Moreover, at low load and for all engine speeds, the exhaust gas temperature measured at extremely high supplement ratios seems to be slightly lower compared to the respective one observed under normal diesel operation.

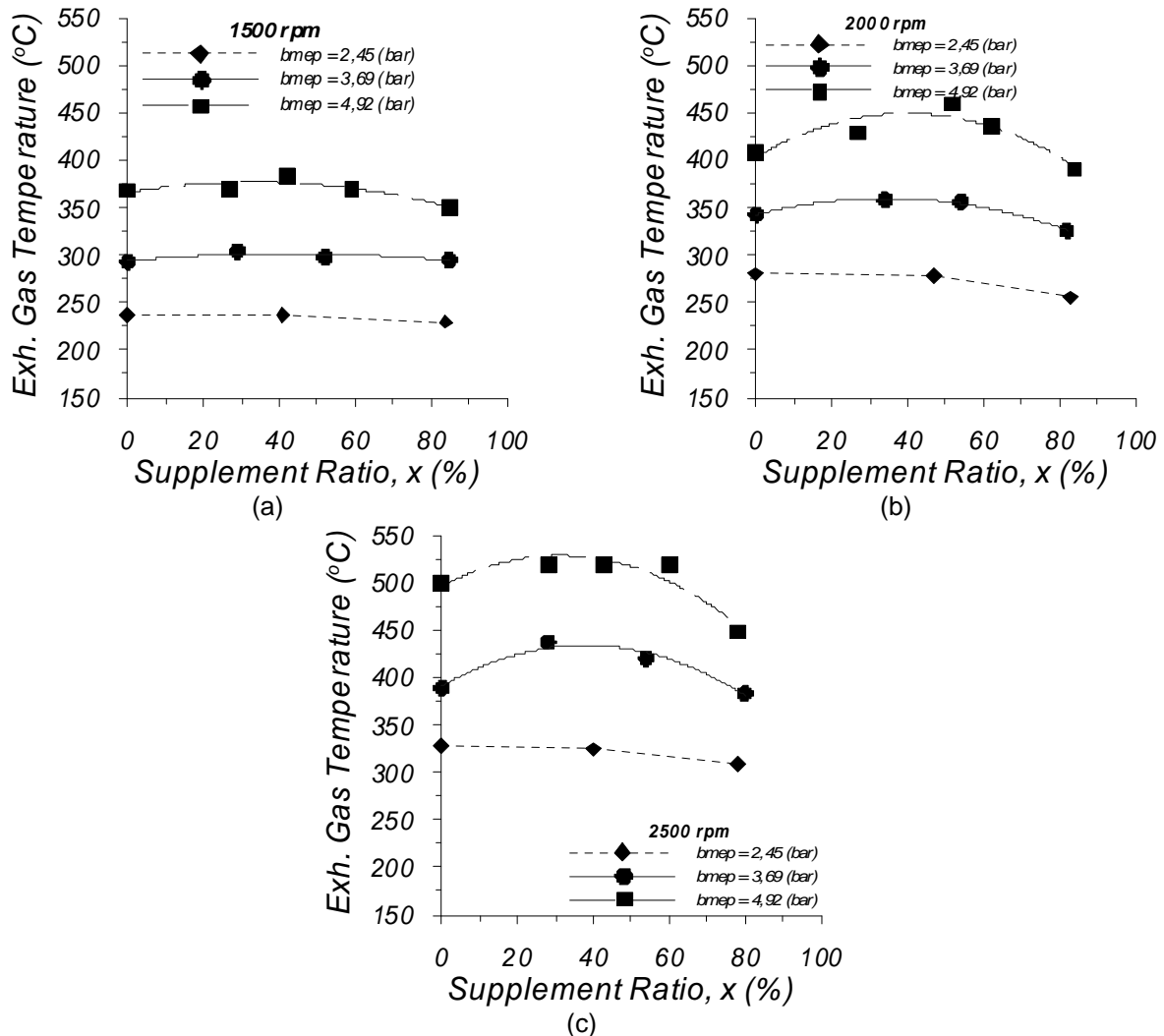


FIGURE 5. Variation of Exhaust Gas Temperature as a function of supplement ratio for 2.45, 3.69 and 4.92 bar brake mean effective pressure at (a) 1500 rpm, (b) 2000 rpm and (c) 2500 rpm engine speed.

At high engine load, as the percentage of liquid fuel replacement increases, there is an increase of the exhaust gas temperature. Further increasing the supplement ratio beyond a certain limit, leads to a slight decrease of the exhaust gas temperature which may in some cases seems to be lower than the respective one observed under normal diesel operation. In some cases, it follows an incremental way and the specific trend becomes more evident at high engine speed.

Ignition Delay Period

The ignition delay period is defined as the time interval from the start of injection of the liquid fuel to the initiation of the liquid fuel combustion [28,31,32]. The variation of ignition delay period as a function of the supplement ratio for various combinations of engine load (i.e. 2.45, 3.69 and 4.92 bar brake mean effective pressure) and engine speed (i.e. 1500, 2000 and 2500 rpm) is given in figures 6 (a, b and c). It is well known [28] that under normal diesel operation ignition delay period is affected, in general, by the change of the engine load. Thus, under normal diesel operation ($x=0\%$), the increase of the engine load, keeping constant engine speed, results in a considerable decrease of the ignition delay period.

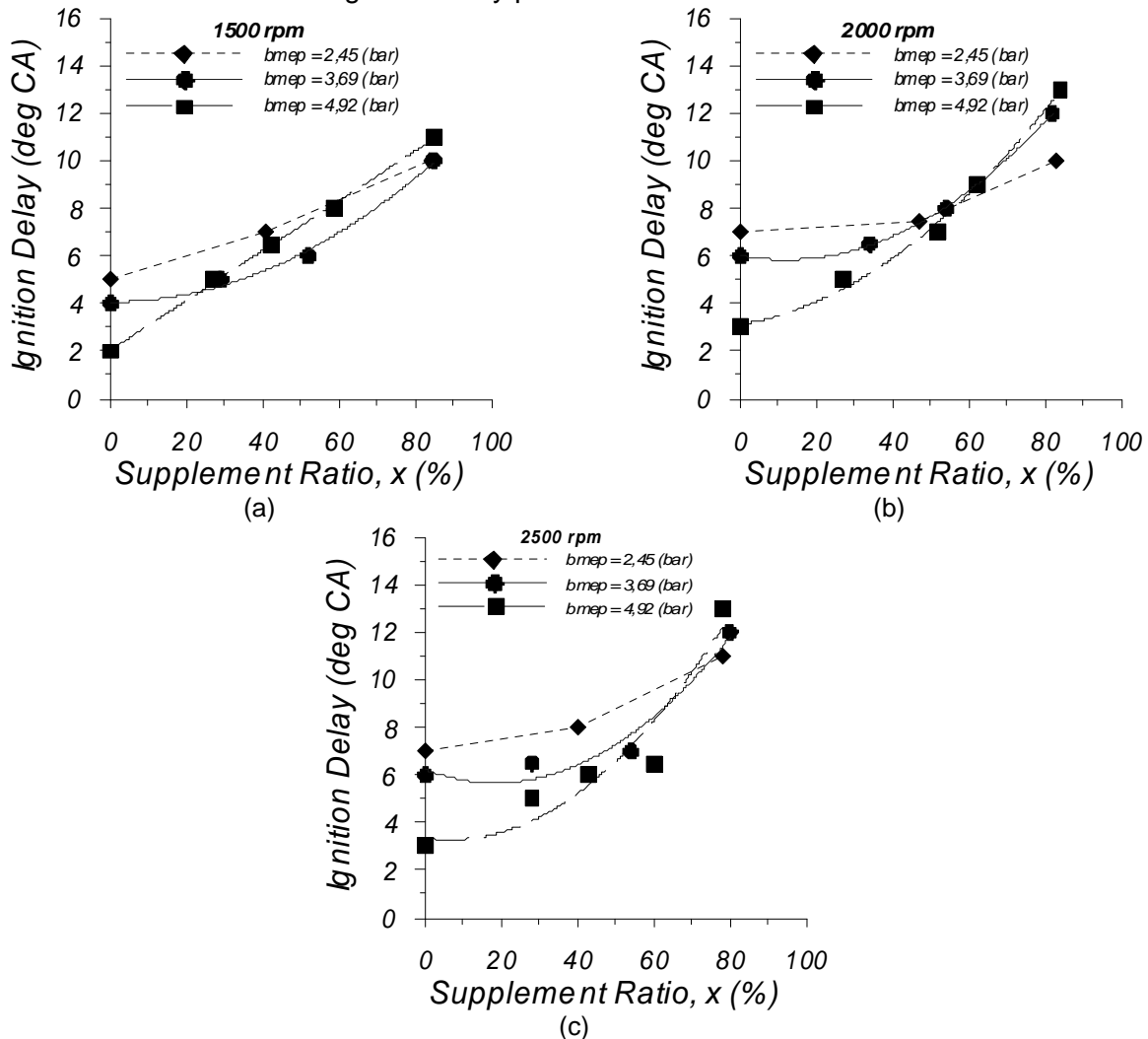


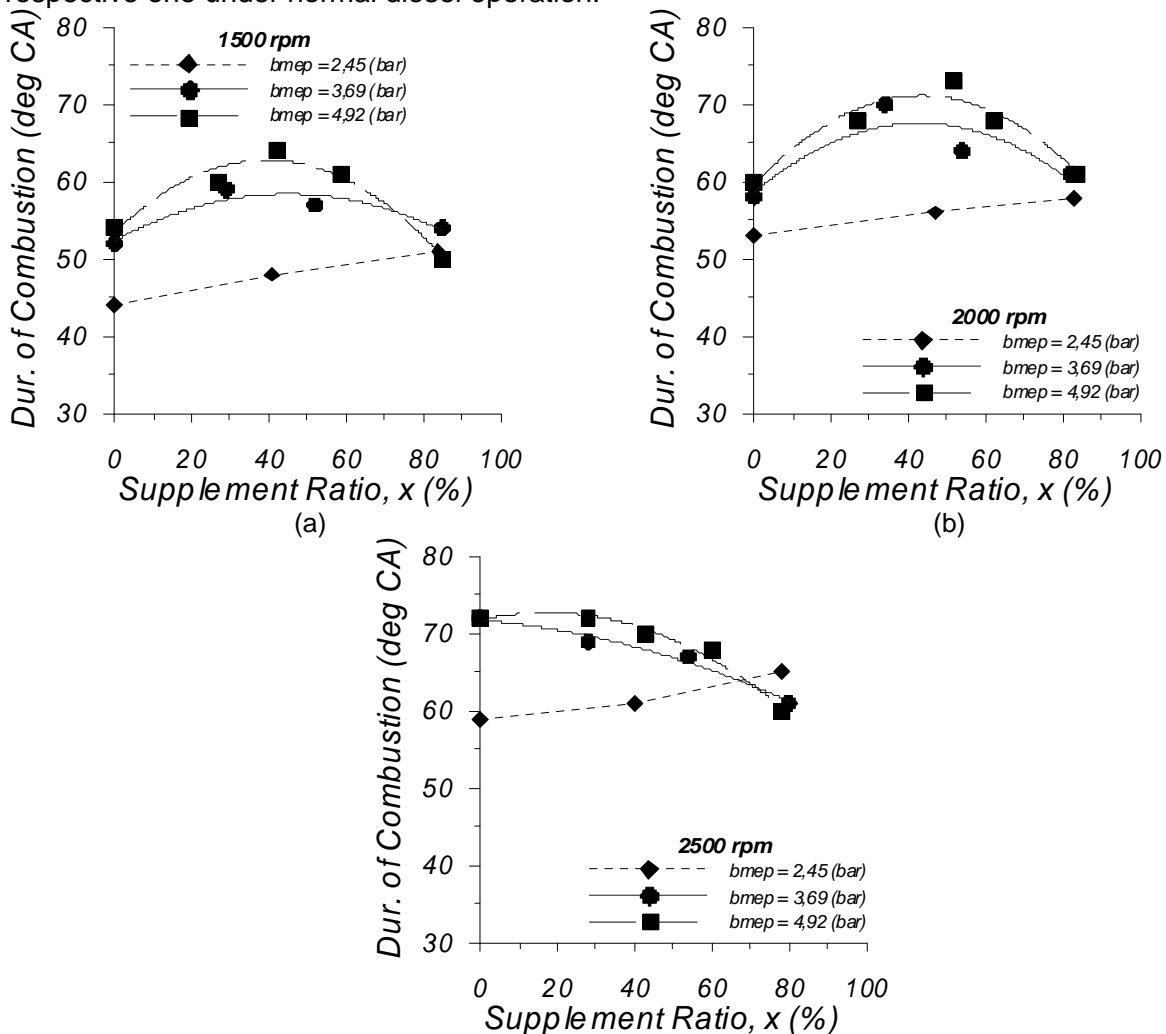
FIGURE 6. Variation of Ignition Delay period as function of supplement ratio for 2.45, 3.69 and 4.92 bar brake mean effective pressure at (a) 1500 rpm, (b) 2000 rpm and (c) 2500 rpm engine speed.

Under dual fuel operating mode ($x \neq 0\%$), the presence of the gaseous fuel affects the ignition point of the liquid diesel fuel. This is due mainly to the reduction of charge temperature close to the point of the liquid fuel injection which is caused to the higher overall specific heat capacity of the gaseous fuel – air mixture as compared with the respective one of the air observed under normal diesel operation. This has as a result a drop of gas temperature at the start of diesel fuel injection, which obviously affects positively (i.e. increase) the ignition delay period [28]. Thus, for all engine operating points (i.e. load and engine speed), the increase of the supplement ratio leads to an increase of the ignition delay period of the injected liquid fuel. Thus, for the same engine operating point (i.e. load and engine speed), ignition delay period

under dual fuel mode is higher compared to the respective one observed under normal diesel operation. At extremely high supplement ratios, the increase of engine load results to a decrease of the ignition delay period which seems to be opposed to the respective trend observed under normal diesel operation. This is explained taking into account the fact that in fumigated natural gas – diesel operating mode, the increase of engine load is accompanied by an increase of the fumigated amount of the natural gas which results in extremely high overall specific heat capacity of the gaseous fuel – air mixture close to the point of the liquid fuel injection.

Duration of Combustion

Figures 7 (a, b and c) provide the variation of the duration of combustion as a function of the supplement ratio for 2.45, 3.69 and 4.92 bar brake mean effective pressure at 1500, 2000 and 2500 rpm engine speed, respectively. Examining these figures, it is observed that for the same supplement ratio the increase of engine speed, keeping constant engine load, results to a slight increase of the duration of combustion. At low load, the increase of the supplement ratio leads to a slight increase of the duration of combustion. Comparing the results between normal diesel and dual fuel operating modes corresponding to low engine load conditions, it is revealed that the duration of combustion under dual fuel operating mode is slightly higher compared to the respective one under normal diesel operation.



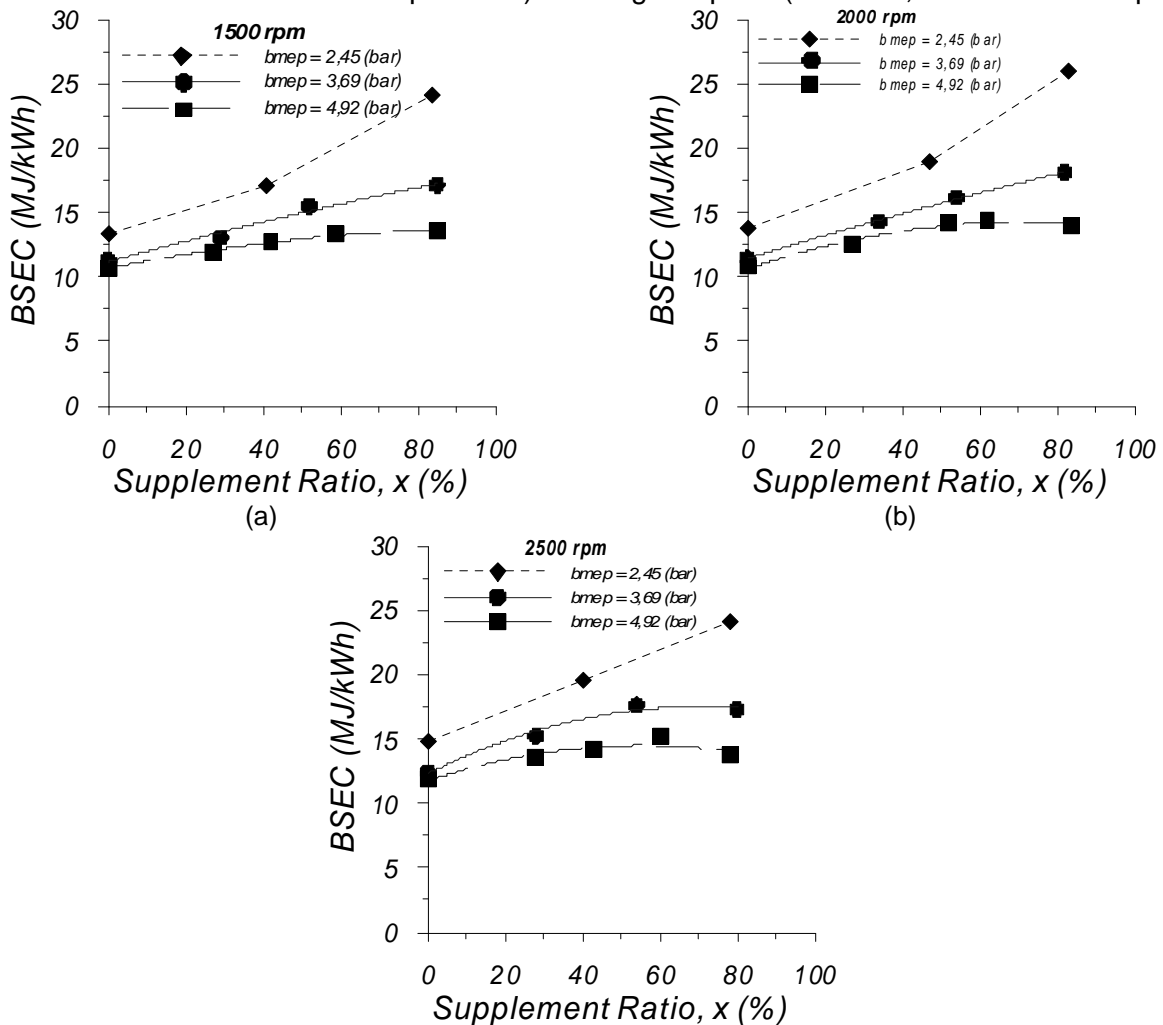
(c)

FIGURE 7. Variation of Duration of Combustion as function of supplement ratio for 2.45, 3.69 and 4.92 bar brake mean effective pressure at (a) 1500 rpm, (b) 2000 rpm and (c) 2500 rpm engine speed.

At high load and for low and intermediate engine speed, the duration of combustion increases with increasing natural gas mass ratio and beyond a certain value of the gaseous fuel percentage it starts to decrease, as a result of the high cylinder charge temperature and the faster combustion rate of the gaseous fuel. At extremely high supplement ratios, the duration of combustion tends to become even lower compared to the respective one observed under normal diesel operation. The effect becomes more evident at high engine speed where the warmer engine has a positive effect on the existence and spread of the flame front surrounding the burning zone. Thus, at high load and high engine speed, the increase of supplement ratio results to a considerable improvement of the gaseous fuel combustion quality which leads to a shorter duration of combustion compared to the respective one observed under normal diesel operation.

Total Brake Specific Energy Consumption

The variation of the total brake specific energy consumption with diesel fuel supplement ratio is given in figures 8 (a, b and c), for various combinations of engine load (i.e. 2.45 bar, 3.69 bar and 4.92 bar brake mean effective pressure) and engine speed (i.e. 1500, 2000 and 2500 rpm).



(c)

FIGURE 8. Variation of the brake specific energy consumption as function of supplement ratio for 2.45, 3.69 and 4.92 bar brake mean effective pressure at (a) 1500 rpm, (b) 2000 rpm and (c) 2500 rpm engine speed.

It should be stated here that the lower heating value of natural gas is higher compared to the one of diesel fuel used, revealing that the total brake specific fuel consumption observed under dual fuel operation would be even higher if it were corrected (reduced) to the heating value of diesel fuel. Thus, in the present contribution, the total brake specific energy consumption has been used instead of the total brake specific fuel consumption. The experimental total brake specific energy consumption is estimated from the measured brake power output, the measured mass flow rates of diesel and natural gas and their lower heating values. Thus, no correction is made to cater for the difference in the lower heating values between natural gas and diesel fuel. As observed the brake specific energy consumption is affected considerably by the presence of the gaseous fuel in the charge mixture. Examining these figures, it is revealed that for all engine operating points examined the engine efficiency under dual fuel operation is lower compared to the respective one under normal diesel.

At low load, the increase of the supplement ratio results to an increase of the total brake specific energy consumption. The increase becomes more evident at extremely high supplement ratios and for low and intermediate engine speeds, where the extremely low amount of diesel fuel used affects negatively the quality of the diesel fuel spray, resulting in poor diesel fuel preparation, especially during the ignition delay period, a fact that has a negative effect on the gaseous fuel ignition process.

At high load and for all engine speed examined, the increment of the gaseous fuel percentage, keeping engine load constant, leads initially to a slight increase of the total brake specific energy consumption, while a further increase of the gaseous fuel supplement ratio results to a slight improvement of the engine efficiency, which tends to converge to the respective one observed under normal diesel operation. This is the result of the improvement of the gaseous fuel utilization observed at high load. The effect becomes more evident at high engine speed, where the dual fuel operation at high supplement ratios becomes more efficient compared to normal diesel operation revealing thus the considerable improvement of the gaseous fuel utilization.

Nitric Oxide (NO) Emissions

Figures 9 (a, b and c) provide the variation of the specific nitric oxide concentration as a function of the supplement ratio for 2.45, 3.69 and 4.92 bar brake mean effective pressure at 1500, 2000 and 2500 rpm engine speed, respectively. As well recognized [28-32], the formation of nitric oxides is favored, in general, by high oxygen concentration and high charge temperature. Examining these figures, NO emission is affected considerably by the presence of gaseous fuel in the charge mixture. In general, NO concentration observed under dual fuel operating mode are lower compared to the one observed under normal diesel operation at the same engine operating conditions (engine speed, load). Specifically, at low load, there is a slight decrease of NO emissions with the increase of the percentage of liquid fuel replacement. The effect becomes more evident at high supplement ratios and low engine speed.

At high engine load, there is a considerable decrease of NO emissions with increased percentages of the liquid fuel replacement until a certain limit where the trend of nitric oxide reduction tends to decrease. A further increase of the supplement ratio leads to an increase of NO concentration which may in some cases be higher than the one observed under normal diesel operation. This becomes more evident at high engine speed and extremely high supplement ratios.

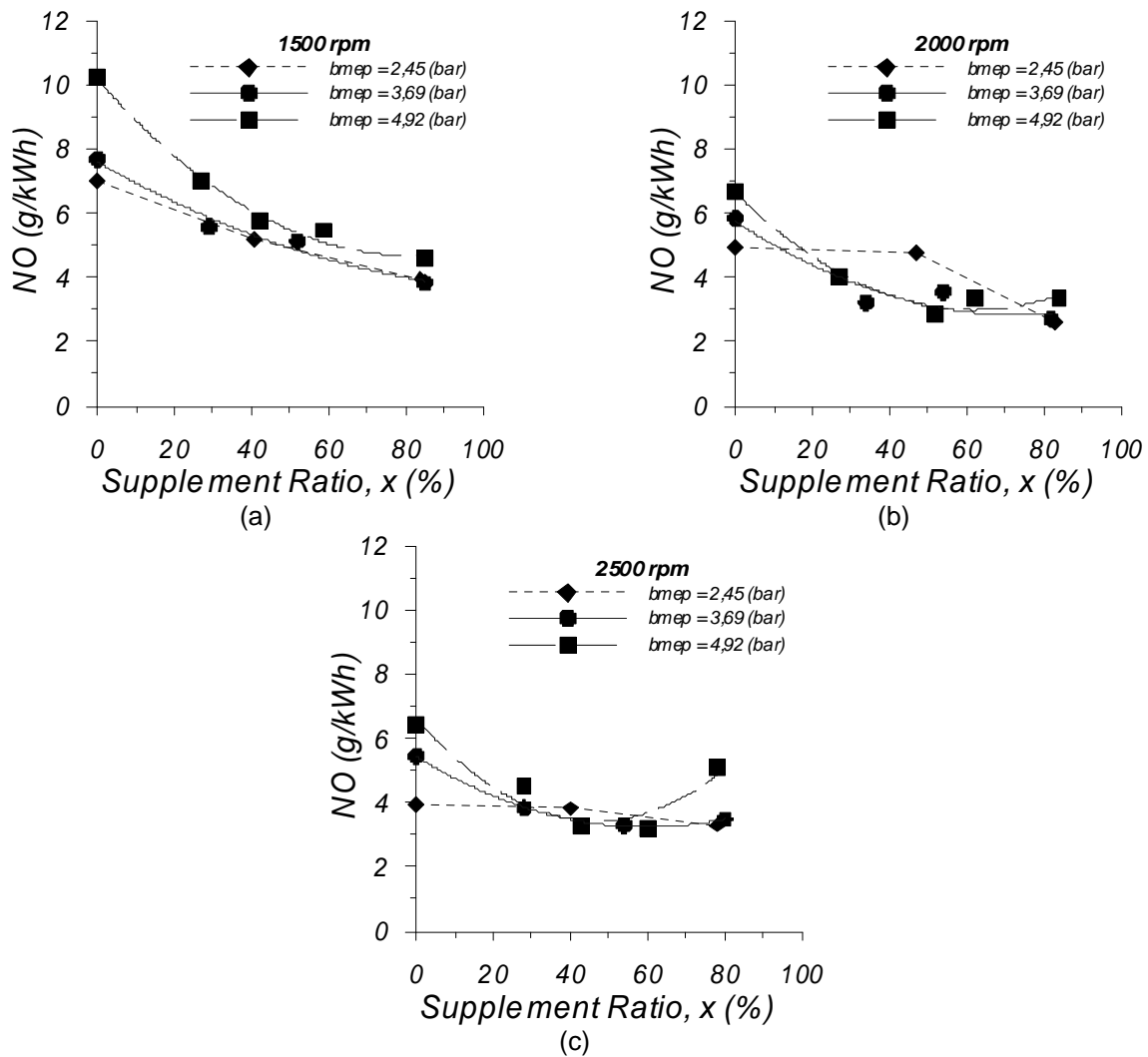


FIGURE 9. Variation of specific NO emissions as function of supplement ratio for 2.45, 3.69 and 4.92 bar brake mean effective pressure at (a) 1500 rpm, (b) 2000 rpm and (c) 2500 rpm engine speed.

Carbon Monoxide (CO) Emissions

Figures 10 (a, b and c) provide the variation of the specific carbon monoxide concentration as a function of the supplement ratio for 2.45, 3.69 and 4.92 bar brake mean effective pressure at 1500, 2000 and 2500 rpm engine speed, respectively. As known [28-32], the rate of CO formation is a function of the relative air/fuel ratio, of the unburned gaseous fuel availability and also of the cylinder charge temperature, both of which control the rate of fuel decomposition and oxidation. Observing these figures, it is revealed that for the same operating point (i.e. engine speed and load) CO emissions under dual fuel operation are significantly higher compared to the respective one under normal diesel operation. Under normal diesel operation and for all engine operating points, the fuel-lean ($\lambda \gg 1$) nature of the mixture leads to extremely low specific CO emissions. Under dual fuel operation and for the same brake mean effective pressure, the increase of the gaseous fuel concentration in the charge results to a decrease of the total air excess ratio favoring thus the CO formation.

At part load, the increase of the gaseous fuel amount, keeping load constant, leads to an increase of carbon monoxide concentration and this becomes more evident at high engine

speed and high supplement ratios. This is due to the slow combustion rate of the gaseous fuel, which maintains the cylinder charge temperature at low levels resulting in a reduction of the oxidation process of carbon monoxide.

At high load, the increase of the supplement ratio causes a more intense increase of CO emissions compared to the one observed at low load, especially for intermediate and high engine speed, while for gaseous fuel concentration values beyond a certain value, the emitted CO starts to decrease probably as a result of improvement of the gaseous fuel combustion. At high load and high engine speed, specific CO emission decreases considerably as supplement ratio increases. This is the result of improvement of the gaseous fuel utilization, especially during the diffused controlled combustion phase.

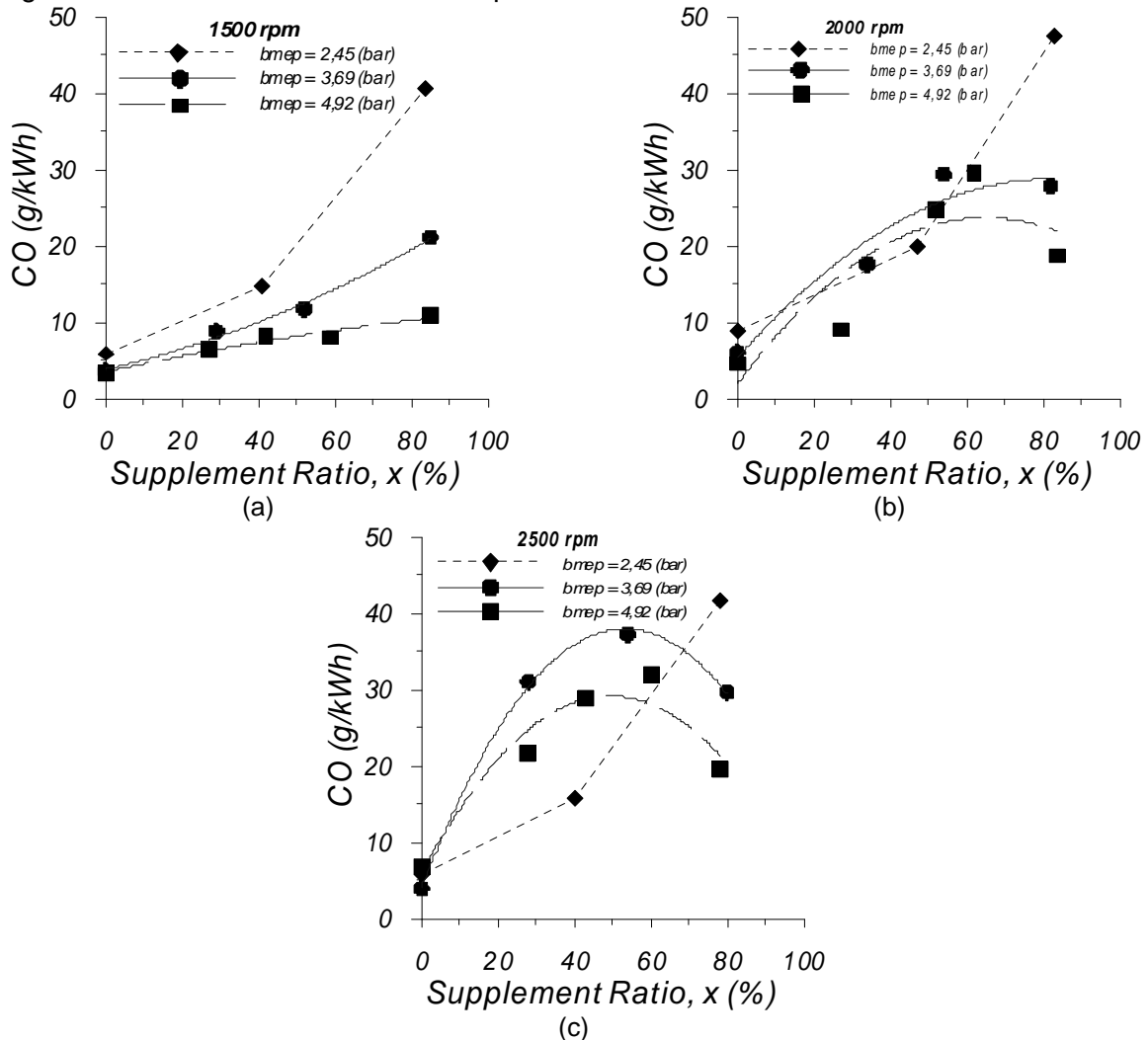


FIGURE 10. Variation of specific CO emissions as function of supplement ratio for 2.45, 3.69 and 4.92 bar brake mean effective pressure at (a) 1500 rpm, (b) 2000 rpm and (c) 2500 rpm engine speed.

Unburned Hydrocarbon (HC) Emissions

The variation of the specific unburned hydrocarbon concentration with diesel fuel supplement ratio is given in figures 11 (a, b and c), for various combinations of engine load (i.e. 2.45 bar, 3.69 bar and 4.92 bar brake mean effective pressure) and engine speed (i.e. 1500, 2000 and 2500 rpm). As known [28-32], the variation of unburned hydrocarbons in the exhaust gases depends on the quality of the combustion process occurring inside the cylinder chamber. Under

dual fuel operating mode, the combustion process is affected considerably by the total air excess ratio (λ) since this specific factor plays a significant role on the flame propagation mechanism. Examining these figures, it is observed that at each combination of load and engine speed, the emitted HC concentration measured under dual fuel operating mode is higher compared to the respective one observed under normal diesel operation, while this difference becomes more intense at low load and high supplement ratios.

At high load, as supplement ratio increases the unburned HC emission increases slightly until a certain limit where the concentration of the emitted unburned HC starts to decrease. This is due to the slight improvement of the gaseous fuel combustion process, since the total air excess ratio tends to stoichiometry favoring, thus, the flame propagation mechanism, which also plays a significant role on the unburned HC oxidation rate. But in any case, HC emission values observed under dual fuel operation are considerably higher compared to normal diesel operation. The increase of engine speed from 1500 to 2500 rpm does not seem to have a significant effect on the emitted HC concentration since similar results are observed.

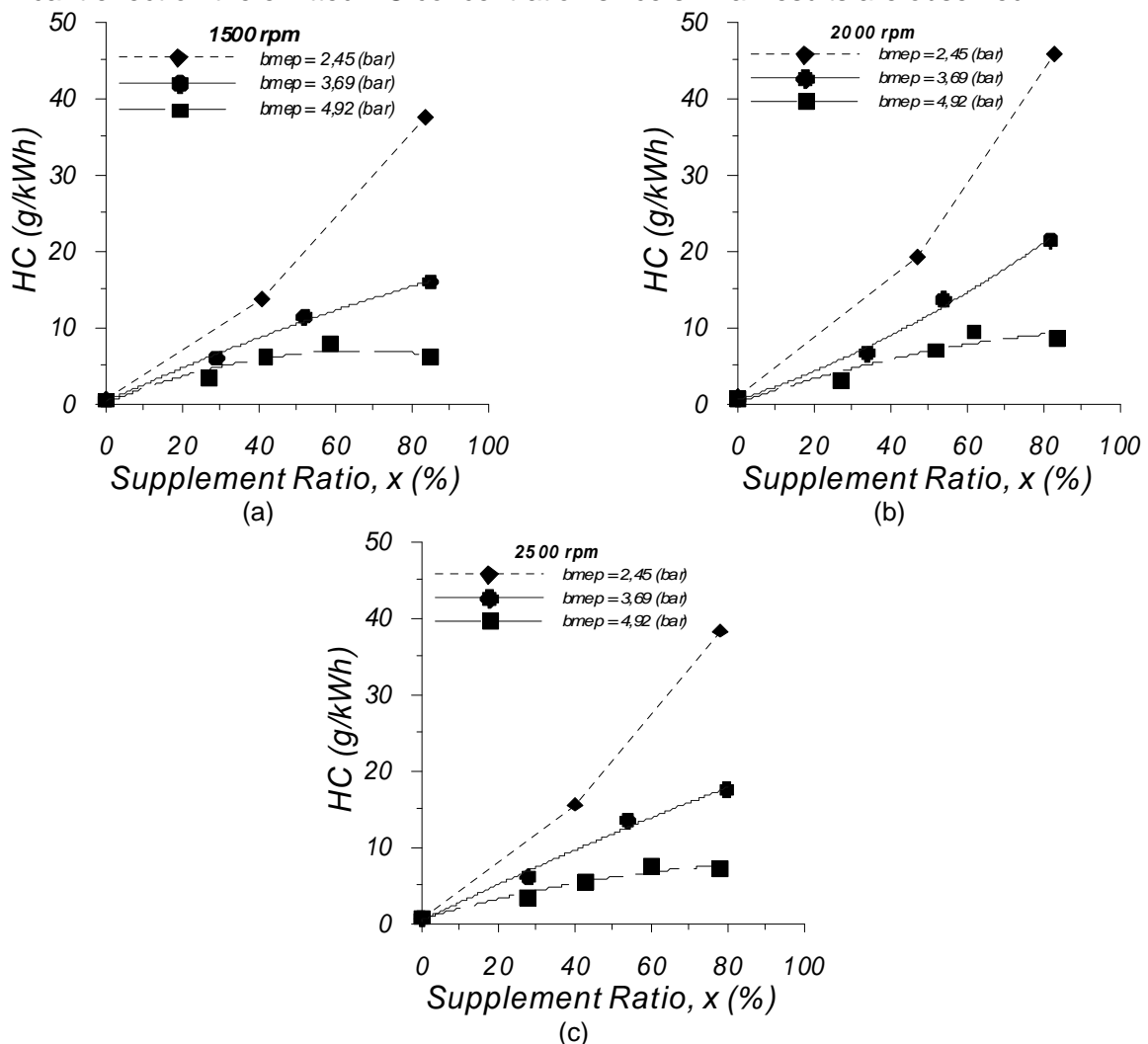


FIGURE 11. Variation of specific HC emissions as function of supplement ratio for 2.45, 3.69 and 4.92 bar brake mean effective pressure at (a) 1500 rpm, (b) 2000 rpm and (c) 2500 rpm engine speed.

Soot Emissions

Figures 12 (a, b and c) provide the measured values of smoke density as function of supplement ratio for 2.45, 3.69 and 4.92 bar brake mean effective pressures at 1500, 2000 and 2500 rpm engine speeds, respectively.

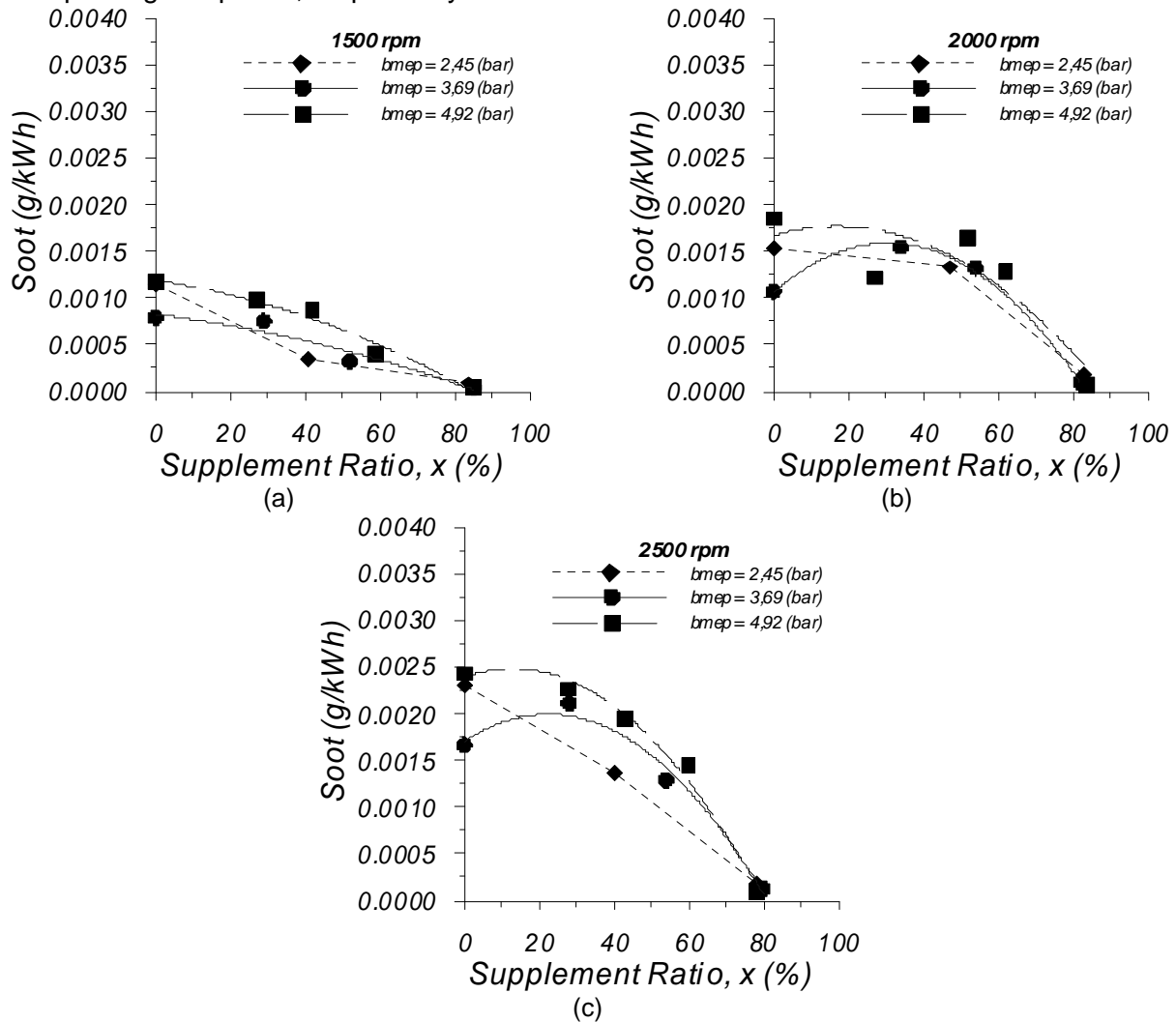


FIGURE 12. Variation of soot density as function of supplement ratio for 2.45, 3.69 and 4.92 bar brake mean effective pressure at (a) 1500 rpm, (b) 2000 rpm and (c) 2500 rpm engine speed.

Examining these figures we observe that dual fuel operation is a potential way of reducing soot emissions. Specifically, for all engine speed examined it is revealed that at low load as the percentage of liquid fuel replacement increases, soot concentration decreases sharply since less liquid fuel is injected on a percentage basis and thus less soot is formed.

At high engine load and low supplement ratios, soot emissions tend to converge to the respective ones under normal diesel operation and in some cases they become even slightly higher. This is due to the fact that, despite the slight improvement of the gaseous fuel combustion rate, the concentration of the soot formed is higher than the one under normal diesel operation due to the lower cylinder charge temperature observed during the premixed controlled combustion phase. As the percentage of the liquid diesel fuel replacement increases, the reduction of soot emission becomes more evident compared to the one observed at low percentages, since the improvement of the gaseous fuel combustion rate results in higher cylinder charge temperature during the expansion stroke, which, eventually, promotes soot oxidation rate contributing, thus, to a further decrease of soot concentration. The reduction of

soot with supplement ratio appears to be steeper at higher engine speeds. In general, dual fuel (natural gas-diesel) operating mode seems to be an efficient way for reducing soot concentration at almost all engine operating conditions. The main reason is probably that natural gas, whose methane is the main constituent, being the lower member in the paraffin family, has very small tendency to produce soot.

CONCLUSIONS

To understand the combustion mechanism under dual fuel operating mode, an extended experimental investigation has been conducted on a high speed, direct injection, single cylinder, test engine located at the author's laboratory. The engine has been properly modified to operate under dual fuel mode without changing its main configuration. Measurements have been taken at various combinations of load and engine speed under both normal diesel and dual fuel operating modes. From the analysis of experimental data it is revealed that in comparison with normal diesel operation, dual fuel operation results to:

- lower burning rate during the premixed controlled combustion phase, which results in lower maximum cylinder pressure. This is extremely encouraging, since the use of dual fuel operating mode on a conventional DI diesel engine does not seem to affect significantly the engine structure.

- longer duration of combustion especially at low and intermediate supplement ratios. At high load, duration of combustion increases when increasing the concentration of the gaseous fuel but at high supplement ratios it converges to the respective one observed under normal diesel operation. At high engine speed and high engine load conditions, the increase of the supplement ratio results to shorter duration of combustion to the respective one observed under normal diesel operation.

- a negligible variation of the exhaust gas temperature, especially at low engine speed. But at high engine speed and for all engine load examined, as supplement ratio increases the exhaust gas temperature increases until a certain limit where it starts to decrease. Thus, at extremely high supplement ratios and for the same engine operating point (i.e. load and engine speed), exhaust gas temperature is slightly lower compared to the respective one under normal diesel operation.

- higher ignition delay period. Under dual fuel operation, increasing the percentage of liquid fuel replacement increases the ignition delay considerably. This is due to the reduction of the cylinder charge temperature close to the point of the liquid fuel injection, since under dual fuel operation the cylinder charge has higher overall specific heat capacity compared to the respective one under normal diesel operation.

- higher total brake specific energy consumption. Concerning engine efficiency it is revealed that for the same engine operating point (i.e. load and engine speed), as supplement ratio increases, engine efficiency becomes inferior compared to the respective one observed under normal diesel operation. This effect becomes more evident at part load, while at high load the increase of gaseous fuel supplement percentage leads to a more slight increase of the brake specific energy consumption compared to the one observed at part load, due to the improvement of the gaseous fuel utilization.

- lower specific NO concentration. At high load and for all engine speed examined, the positive effect of the supplement ratio increment on specific NO emissions becomes more evident compared to the one observed at low load conditions. But, at high load and high engine speed, the increase of supplement ratio to extremely high values leads to an increase of specific NO emissions which may in some cases be higher than the respective one observed under normal diesel operation.

- a substantial increase of the specific CO emissions. At low load the increase becomes more evident compared to the one observed at high load, since at high engine load and high supplement ratios a decrease is observed. But in any test case examined, the specific CO emissions under dual fuel operation are higher compared to the one observed under normal diesel operation.

- an increase of the specific HC emissions. At low load the increase of the gaseous fuel supplement ratio leads to a substantial increase in specific HC emissions. But at high load the specific HC emissions continue to increase with increasing the replacement ratios and beyond a certain value they start to decrease.

- lower soot concentration. The positive effect is stronger at extremely high supplement ratios where it is observed a drastic decrease in soot emissions as compared to normal diesel operation for all engine operating conditions (i.e. load and engine speed) examined.

Taking into account all the above mentioned, it is revealed that dual fuel combustion using natural gas as a supplement for liquid fuel is a promising technique for controlling both NO and Soot emissions on existing DI diesel engines, requiring only slight modifications of the engine structure. This is extremely important, if one considers the difficulties of controlling both pollutants, NO and Soot, in DI diesel engines. The observed disadvantages concerning engine efficiency, HC and CO can be possibly mitigated by applying modifications on the engine tuning, i.e. injection timing of liquid diesel fuel mainly at part loads. Theoretical results for such an investigation have been published in the past by the present research group [24].

NOMENCLATURE

| | |
|-----------|-------------------------------|
| h | specific enthalpy, J/kg |
| m | mass, kg |
| \dot{m} | mass flow rate, kg/s |
| N | engine speed, (rpm) |
| P | pressure, Pa |
| Q | heat transfer to walls, J |
| R | specific gas constant, J/kg K |
| T | absolute temperature, K |
| U | total internal energy, J |
| V | volume, m ³ |
| x | supplement ratio, % |

Greek symbols

| | |
|-----------|--|
| λ | total air excess ratio or thermal conductivity, W/mK |
| ρ | density, kg/m ³ |
| φ | crank angle degrees |

Subscripts

| | |
|----|-------------|
| D | Diesel |
| NG | Natural Gas |
| g | gas |
| w | wall |

Dimensionless number

| | |
|----|----------|
| Re | Reynolds |
|----|----------|

Abbreviations

| | |
|------|---|
| B | before |
| BDC | bottom dead center |
| BSEC | brake specific energy consumption, MJ/kWh |
| bmep | brake mean effective pressure, bar |
| CA | degrees of crank angle |
| COV | coefficient of variance, % |
| D | diesel |
| DI | direct injection |
| deg | degrees of crank angle |
| FNGD | fumigated natural gas diesel engine |
| LHV | lower heating value |
| NDO | normal diesel operation |
| NG | natural gas |
| ROHR | rate of heat release |
| rpm | revolutions per minute |
| TDC | top dead centre |

REFERENCES

1. Rakopoulos, C.D.; Kyritsis, D.C., *Energy*, 2001, 26, pp.705-722.
2. Bridgwater, A.V.; Toft, A.J.; Brammer, J.G., *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2002, 6, pp.181-248.
3. Stone, C.R.; Ladommatos, N., *Energy*, 1991, 64, pp. 202-211.
4. Stone, C.R.; Gould, J.; Ladommatos, N., *Energy*, 1993, 66, pp. 180-187.
5. Karim, G.A., *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2003, 125, pp. 827-836.
6. Karim, G.A., *Prog Energy Combust Sci*, 1980, 6, pp. 277-85.
7. Ishida, M.; Cho, J.J.; Yasunaga, T., *International Symposium FISITA*, 2000, No. F2000-A030.
8. Kusaka, J.; Daisho, Y.; Kihara, R.; Saito, T., *4th International Symposium COMODIA*, 1998, pp. 555-560
9. Poonia, M.P.; Ramesh, A.; Gaur, R.R., *Society of Automotive Engineers*, 1999; No. 1999-01-1123.
10. Singh, S.; Kong, S-C.; Reitz, R.D.; Krishnan, S.R.; Midkiff, K.C., *Society of Automotive Engineers*, 2004; No. 2004-01-0092.
11. Krishnan, S.R.; Biruduganti, M.; Mo, Y.; Bell, S.R.; Midkiff, K.C., *International Journal of Engine Research*, 2002, 3, pp. 171-184.
12. Pirouzpanah, V.; Kashani, B.O., *Society of Automotive Engineers*, 1999; No. 990841.
13. Pirouzpanah, V.; Sarai, R.K., *Proc. of the IMechE – Part D, Journal of Automobile Engineering*, 2003, 217, pp. 719-724.
14. Krishnan S.R.; Srinivasan, K.K.; Singh, S.; Bell, S.R.; Midkiff, K.C.; Gong, W.; Fiveland, S.; Willi, M., *Proceedings of ASME-WA Meeting, ICEF*, 2002; 518(39), pp. 361-367.
15. Ling, S.; Longbao, Z.; Shenghua, L.; Hui, Z., *Proc. of the IMechE – Part D, Journal of Automobile Engineering*, 2005, 219, pp. 1125-1131.
16. Shenghua, L.; Longbao, Z.; Ziyang, W.; Jiang, R., *Proc. of the IMechE – Part D, Journal of Automobile Engineering*, 2003, 217, pp. 833-838.
17. Abd Alla, G.H.; Soliman, H.A.; Badr, M.F.; Abd Rabbo, M.F., *Energy Conversion & Management*, 2002, 43, pp. 269-77.
18. Abd Alla, G.H.; Soliman, H.A.; Badr, M.F.; Abd Rabbo, M.F., *Energy Conversion & Management*, 2000, 41, pp. 559-72.
19. Ishida, M.; Amimoto, N.; Tagai, T.; Sakaguchi, D., *5th International Symposium COMODIA*, 2001, pp. 382-389.
20. Poonia, M.P.; Ramesh, A.; Gaur, R.R., *Society of Automotive Engineers*, 1998; No 982455.
21. Agarwal, A.; Assanis, D.N., *Society of Automotive Engineers*, 1998; No. 980136.
22. Srinivasan, K.K.; Krishnan, S.R.; Midkiff, K.C., *Proc. of the IMechE – Part D, Journal of Automobile Engineering*, 2006, 220, pp. 229-239.
23. Papagiannakis, R.G.; Hountalas, D.T., *Applied Thermal Engng*, 2003, 23, pp. 353-65.

24. Papagiannakis, R.G.; Hountalas, D.T.; Kotsiopoulos, P.N., *Society of Automotive Engineers*, 2005; No. 2005-01-1726.
25. Hountalas, D.T.; Papagiannakis, R.G., *Society of Automotive Engineers*, 2000; No. 2000-01-0286.
26. Hountalas, D.T.; Papagiannakis, R.G., *Society of Automotive Engineers*, 2001; No. 2001- 01-1245.
27. Papagiannakis, R.G.; Hountalas, D.T., *Society of Automotive Engineers*, 2002; No. 2002-01-0868.
28. Heywood, J.B., *Internal Combustion Engine Fundamentals*, New York: McGraw–Hill; 1988.
29. Annand, W.J.D., *Proc Inst Mech Engrs*, 1963, 177, pp. 973-990.
30. Lavoie, G.A.; Heywood, J.B.; Keck, J.C., *Combust Sci Technology*, 1970, 1, pp. 313-26.
31. Ramos, J.I., *Internal Combustion Engine Modeling*, New York: Hemisphere; 1989.
32. Bazari, Z., *Society of Automotive Engineers*, 1992; No. 920462.

Μία Προσεγγιστική Μέθοδος Υπολογισμού Των Καταναλώσεων Εξ΄αιτίας της Εγκατάστασης Αερισμού Στα Νοσοκομεία

Ι. Σ. Κατσάνης και Γ. Ν. Μαλαχίας

Hellenic Naval Academy, 9 Hatzikiriakou str. Piraeus, Greece, Email: katsanis@snd.edu.gr

Summary. During the initial stage of new hospitals construction, the aim is to find the appropriate cogeneration system based on the isolated electrical and thermal loads. Hence, an approximate method is required to determine the energy consumption only because of ventilation system and not in conjunction with air-conditioning. This method should take into consideration the proposed design of such systems, which may vary since various regulations only determine the range of permitted values and not individual values themselves. Moreover, even though regulations allow the use of recycled air in some specific hospital areas such as amphitheatre, library and restaurant, during the last years, some of the hospitals are using 100% of fresh air and for all of their areas. In this manner, possible health implications of both patients and staff are avoided because of the absence of infected air. This method, which aims in the approximate determination of ventilation energy consumption, is based on real data coming from, various, up to date Hellenic hospitals. The method is based on the aggregation of the various hospital areas according to the uniformity of the internal conditions which occur in them and their contribution in the functionality of the hospital as a whole. Finally, the method is based on the assumption that the chosen fans are geometrically similar series.

Περίληψη. Σε περίπτωση κατασκευής καινούργιων νοσοκομείων και στο αρχικό στάδιο όταν γίνεται προσπάθεια εύρεσης του κατάλληλου συστήματος συμπαραγωγής βασισμένη στα μεμονωμένα ηλεκτρικά και θερμικά φορτία απαιτείται μία προσεγγιστική μέθοδος, η οποία μπορεί να προσδιορίσει την ενεργειακή κατανάλωση εξ΄αιτίας μόνο αερισμού και όχι σε συνδιασμό με τον κλιματισμό. Η μέθοδος αυτή θα πρέπει να λάβει υπ΄όψιν της τον τρόπο σχεδίασης τέτοιων συστημάτων, που δεν είναι πάντοτε ο ίδιος, αφού οι διάφοροι κανονισμοί καθορίζουν περιοχές επιτρεπόμενων τιμών και όχι μεμονωμένες τιμές. Επιπρόσθετα αν και οι

κανονισμοί επιτρέπουν χρήση ανακυκλοφορίας αέρα στα νοσοκομεία σε συγκεκριμένες μόνο περιοχές όπως π.χ. αμφιθέατρο, βιβλιοθήκη, εστιατόριο, τα τελευταία χρόνια σε κάποια από αυτά, γίνεται χρήση 100% νωπού για όλες τις περιοχές του νοσοκομείου για την αποφυγή τυχόν επιπτώσεων στους ασθενείς και το προσωπικό που θα οφείλονται στο μολυσμένο αέρα. Η μέθοδος αυτή που στοχεύει στον προσεγγιστικό προσδιορισμό των ενεργειακών καταναλώσεων εξ' αιτίας αερισμού, χρησιμοποιεί πραγματικά στοιχεία παροχών που αντλήθηκαν από διάφορα σύγχρονα ελληνικά νοσοκομεία που θεωρήθηκαν αντιπροσωπευτικά και βασίζεται στην ομαδοποίηση των διαφόρων χώρων του νοσοκομείου με κριτήριο την ομοιομορφία των εσωτερικών συνθηκών που επικρατούν σε αυτούς και τη συμβολή τους στην λειτουργία αυτού καθώς και στη παραδοχή ότι οι ανεμιστήρες που επιλέγησαν ακολουθούν τον νόμο της γεωμετρικής ομοιότητας.

Λέξεις Κλειδιά: Enter Keywords here.

PACS: Replace this text with PACS numbers; choose from this list:

<http://www.aip.org/pacs/index.html>

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στα σύγχρονα νοσοκομεία η ηλεκτρική κατανάλωση από την εγκατάσταση αερισμού μπορεί να αποτελέσει ποσοστό μεγαλύτερο του 30% της συνολικής ηλεκτρικής εγκατάστασης του νοσοκομείου [1].

Αερισμός είναι η διαδικασία αντικατάστασης του αέρα ενός κλειστού χώρου. Κατά την διαδικασία αυτή απάγεται συνεχώς ένα ποσοστό του αέρα του χώρου και αντικαθίσταται από νωπό αέρα που λαμβάνεται από το εξωτερικό περιβάλλον [2].

Στο εσωτερικό περιβάλλον των κτιρίων είναι επιθυμητό να ρυθμίζεται το κλίμα και να ελαχιστοποιούνται οι μεταβολές του μέσα σε προκαθορισμένα όρια που ονομάζονται συνθήκες άνεσης. Οι παράμετροι που επηρεάζουν τις συνθήκες άνεσης και που μπορούν να ρυθμιστούν από ένα σύστημα κλιματισμού είναι: ο αερισμός και η κίνηση του αέρα, η καθαρότητα του αέρα, η θερμοκρασία, η υγρασία και ο θόρυβος.

Οι παράμετροι αυτές βρίσκονται σε αλληλοεξάρτηση μεταξύ τους, αλλά και με αντίστοιχες εξωτερικές παραμέτρους και δημιουργούν συνθήκες άνεσης, όταν βρίσκονται σε ισορροπία και έχουν ορισμένες τιμές.

Η παροχή νωπού αέρα σε ένα χώρο είναι αναγκαία για την ανανέωση του οξυγόνου και την αραίωση οσμών, καπνού από κάπνισμα και διοξειδίου του άνθρακα που παράγουν οι άνθρωποι. Η απαραίτητη ποσότητα νωπού αέρα για τον παραπάνω σκοπό είναι σκόπιμο να ανάγεται συνήθως σε παροχή αέρα ανά άτομο και εξαρτάται από την πυκνότητα των ατόμων μέσα στον χώρο και από το είδος της δραστηριότητας που κάνουν. Η ποσότητα νωπού αέρα μπορεί να αυξάνεται (πέρα από την τιμή της, την απαραίτητη για τους ανθρώπους) ώστε να αφαιρεί από το χώρο θερμότητα, να παραλαμβάνει και να απορρίπτει μέρος του λαμβάνοντος φορτίου (υδρατμοί που παράγονται στο χώρο) κλπ. Η διαδικασία όμως αυτή πρέπει να λαμβάνει υπόψη της και όλους τους άλλους παράγοντες του προβλήματος. [2]

Γενικά με στόχο την οικονομικότερη λειτουργία ενός συστήματος κλιματισμού, αποφασίζεται η βέλτιστη ποσότητα νωπού αέρα που θα εισαχθεί στο χώρο με κριτήρια αφ' ενός τις ανάγκες αερισμού (αναπνοη-αραίωση) και αφ' ετέρου το ισοζύγιο θερμότητας και υγρασίας του χώρου.

Ανεμιστήρας είναι το μηχάνημα εκείνο που προσδίδει στον αέρα την απαιτούμενη ενέργεια για την κίνηση του. Οι ανεμιστήρες ανάλογα με την κατασκευή τους και τον τρόπο που προσδίδουν την κίνηση στον αέρα διακρίνονται στους εξής βασικούς τύπους: φυγοκεντρικοί ανεμιστήρες, αξονικοί ανεμιστήρες, ελικοειδείς ανεμιστήρες και ανεμιστήρες μικτής ροής.

Κλιματισμός είναι η διαδικασία ελέγχου και ρύθμισης εντός προκαθορισμένων ορίων, της θερμοκρασίας και της υγρασίας του αέρα μέσα σε ένα κτίριο. Κατά τη διαδικασία του κλιματισμού, ο αέρας του κτιρίου υφίσταται με ελεγχόμενο τρόπο κατάλληλη επεξεργασία που περιλαμβάνει καθαρισμό, θέρμανση ή ψύξη, ύγρανση ή αφύγρανση. Οι παραπάνω επεξεργασίες του αέρα είναι δυνατόν να συμβαίνουν στο σύνολο ή μερικά, ανάλογα με τις ανάγκες. [2]

Οι κεντρικές κλιματιστικές μονάδες είναι εκείνες οι μονάδες που μετά από την επεξεργασία του αέρα χρησιμοποιούν αεραγωγούς για την διανομή του στους κλιματιζόμενους χώρους.

Σ'αυτές πραγματοποιούνται οι εξής βασικές λειτουργίες: α) Η θερμική επεξεργασία του αέρα (ψύξη ή/και θέρμανση), β) Ο καθαρισμός (φιλτράρισμα) του αέρα, γ) Η ύγρανση (αύξηση της σχετικής υγρασίας) του αέρα, δ) Η αφύγρανση (μείωση της σχετικής υγρασίας) του αέρα, ε) Η ανανέωση του αέρα (προσθήκη νωπού αέρα και απόρριψη).

Για να πραγματοποιούνται οι παραπάνω λειτουργίες οι κεντρικές κλιματιστικές μονάδες συγκροτούνται από διάφορα επιμέρους τμήματα [2]: α) Το τμήμα θερμικής επεξεργασίας και ρύθμισης της υγρασίας του αέρα, β) Το τμήμα ή τα τμήματα των ανεμιστήρων (ή του ανεμιστήρα), γ) Το κιβώτιο μίξης που περιέχει και τα φίλτρα.

Τα διάφορα τμήματα συναρμολογούνται και συνδιάζονται έτσι ώστε να ικανοποιούν τις ανάγκες του έργου σύμφωνα με την μελέτη.

Όπως ελέγχθη προηγουμένως ο αερισμός είναι η διαδικασία αραίωσης των ρύπων που μπορεί να λαμβάνει και πρόνοια για ανεκτές συνθήκες θερμοκρασίας-υγρασίας του χώρου, χωρίς να αποτελεί διαδικασία πλήρους κλιματισμού. Υπάρχουν 3 συστήματα αερισμού με τη χρήση μηχανικών μέσων [2]: α) Μηχανική απαγωγή-φυσική προσαγωγή, β) Μηχανική προσαγωγή-φυσική απαγωγή, γ) Μηχανική προσαγωγή-μηχανική απαγωγή.

Το τελευταίο σύστημα αποτελεί σύνθεση των δύο προηγούμενων συστημάτων και περιλαμβάνει ένα σύστημα μηχανικής προσαγωγής στο χώρο του νωπού αέρα και ένα σύστημα μηχανικής απαγωγής του αέρα του χώρου. Το σύστημα αυτό αερισμού είναι το καταλληλότερο για όλους τους μεγάλους χώρους (π.χ. νοσοκομεία, ξενοδοχεία, κτίρια γραφείων κλπ) και μπορεί να επιτύχει τον καλύτερο έλεγχο της κίνησης του αέρα και τις καλύτερες συνθήκες άνεσης.

Η επιλογή του τύπου του ανεμιστήρα (π.χ. αξονικός, φυγοκεντρικός) πρέπει να βασίζεται στις ιδιαίτερες απαιτήσεις κάθε εγκατάστασης, σε συνδιασμό με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε ανεμιστήρα ώστε σε κάθε περίπτωση να έχουμε την βέλτιστη δυνατή λύση. [2]. Οι φυγοκεντρικοί ανεμιστήρες είναι οι πιο κατάλληλοι για εγκαταστάσεις κλιματισμού άνεσης, που απαιτούν σχετικά χαμηλές στάθμες θορύβου, όπως αυτές των νοσοκομείων, ενώ οι αξονικοί ανεμιστήρες χρησιμοποιούνται περισσότερο σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις, όπου οι επιτρεπόμενες στάθμες θορύβου είναι πιο ψηλές.

Οι διάφοροι χώροι ενός νοσοκομείου εμφανίζουν διαφορετικές απαιτήσεις (φωτισμού, αερισμού, δροσίσιμου κλπ). Για το λόγο αυτό, στα πλαίσια της προτεινόμενης μεθόδου υπολογισμού, οι διάφοροι χώροι ενός νοσοκομείου ομαδοποιήθηκαν, με κριτήριο την ομοιομορφία των εσωτερικών συνθηκών που επικρατούν σε αυτούς καθώς και τη συμβολή τους στη λειτουργία του νοσοκομείου. Οι διάφοροι χώροι ενός νοσοκομείου διακρίνονται βασικά σε τέσσερις κατηγορίες Ειδικούς χώρους (χειρουργεία, μονάδες εντατικής παρακολούθησης (ΜΕΠ), μονάδες εντατικής θεραπείας (ΜΕΘ) κλπ), Δωμάτια ασθενών, Μονάδες νοσηλείας Βοηθητικές μονάδες, μαγειρεία και πλυντήρια.

Η ΜΕΘΟΔΟΣ

Στα σύγχρονα νοσοκομεία η ηλεκτρική κατανάλωση από την εγκατάσταση Στα πλαίσια της εργασίας αυτής και προκειμένου να ευρεθούν οι ενεργειακές καταναλώσεις του αερισμού γίνεται χρήση των νόμων που διέπουν τους ανεμιστήρες (fan laws) και δίδονται στη βιβλιογραφία [3]. Οι νόμοι αυτοί συσχετίζουν τις μεταβλητές απόδοσης για κάθε γεωμετρική όμοια σειρά ανεμιστήρων. Οι μεταβλητές που συσχετίζονται είναι το μέγεθος του ανεμιστήρα d , η ταχύτητα περιστροφής n , η πυκνότητα του αερίου ρ , η ογκομετρική παροχή Q , η πίεση p_t , η πίεση p_s , η ισχύς στον άξονα P και η μηχανική απόδοση η . [3]

Οι νόμοι αυτοί εκφράζουν μαθηματικά το γεγονός ότι όταν δύο ανεμιστήρες είναι και οι δύο μέλη μίας γεωμετρικής όμοιας σειράς, οι αποδόσεις τους είναι ομόλογες. Στο ίδιο σημείο λειτουργίας (ήτοι στο ίδιο σχετικό σημείο της καμπύλης απόδοσης του ανεμιστήρα), οι αποδόσεις είναι ίδιες. Τα στοιχεία που καθορίζουν την απόδοση του ανεμιστήρα βασίζονται σε καθορισμένη πυκνότητα του αέρα $1,2 \text{ kg/m}^3$.

$$\text{Η σχέση } P_{\text{ανεμ},1} = P_{\text{ανεμ},2} \cdot \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^4 \left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^3 \left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right) \quad (1)$$

όπου ο δείκτης 1 συμβολίζει τα μεγέθη για τον υπό εξέταση ανεμιστήρα και ο δείκτης 2 τα μεγέθη για τον ανεμιστήρα του οποίου τα στοιχεία είναι γνωστά.

$P_{\text{ανεμ},1}, P_{\text{ανεμ},2}$ Ισχύς ανεμιστήρα σε kW

d_1, d_2 Διαμέτρος πτερωτής σε m

Q_1, Q_2 Ογκομετρική παροχή σε m^3/h

ρ_1, ρ_2 Πυκνότης των αερίων εντός των οποίων λειτουργούν οι ανεμιστήρες 1 και 2

Από την (1) προκύπτει ότι με σταθερό μέγεθος και ταχύτητα, η ισχύς μεταβάλλεται όπως ο λόγος της πυκνότητας του αερίου προς τη καθορισμένη πυκνότητα του αέρα.

Για $\rho_1 = \rho_2$ (αέρας) και $d_1 = d_2$ προκύπτει:

$$P_{\text{ανεμ},1} = P_{\text{ανεμ},2} \cdot \left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^3 \quad \text{σε kW} \quad (2)$$

Η σχέση αυτή επιτρέπει τον υπολογισμό της ισχύος των ανεμιστήρων $P_{\text{ανεμ},i}$ προσαγωγής/απαγωγής του υπό εξέταση νοσοκομείου, εάν είναι γνωστές οι ογκομετρικές παροχές αέρα Q_i προσαγωγής/απαγωγής σε αυτό με βάση την ισχύ των ανεμιστήρων $P_{\text{ανεμ},i}^{\text{αναφ}}$ προσαγωγής/απαγωγής και των ογκομετρικών παροχών αναφοράς $Q_i^{\text{αναφ}}$ του νοσοκομείου αναφοράς που εξετάστηκε στα πλαίσια της εργασίας αυτής

$$P_{\text{ανεμ},i} = P_{\text{ανεμ},i}^{\text{αναφ}} \left(\frac{Q_i}{Q_i^{\text{αναφ}}}\right)^3 \Rightarrow P_{\text{ανεμ},i} = \frac{P_{\text{ανεμ},i}^{\text{αναφ}}}{A_i^{\text{αναφ}} \cdot Q_i^{\text{αναφ}}} A_i^{\text{αναφ}} \frac{Q_i^3}{(Q_i^{\text{αναφ}})^3} \quad (3)$$

$$\text{Για } Q_i = Q_{i,\text{προσ}}, \quad Q_i^{\text{αναφ}} = Q_{i,\text{προσ}}, \quad P_{\text{ανεμ},i} = P_{\text{ανεμ},\text{προσ},i}, \quad P_{\text{ανεμ},i}^{\text{αναφ}} = P_{\text{ανεμ},\text{προσ},i}^{\text{αναφ}} \quad \text{και}$$

$$K_i = \frac{P_{\text{ανεμ},\text{προσ},i}^{\text{αναφ}}}{A_i^{\text{αναφ}} \cdot Q_{i,\text{προσ}}^{\text{αναφ}}} \left(\frac{\text{kW}}{\frac{\text{m}^3 \text{m}^3}{\text{h}}}\right)$$

όπου K_i ο δείκτης ισχύος προσαγωγής αέρα ανηγμένος στη μονάδα ογκομετρικής παροχής και μονάδα επιφάνειας δαπέδου.

Η τελευταία γράφεται:

$$P_{\text{ανεμ.προσ},i} = K_i A_{i,\text{αναφ.}} \frac{Q_{i,\text{προσ.}}^3}{(Q_{i,\text{προσ.}}^{\text{αναφ.}})^2} \quad (\text{kW}) \quad (4)$$

Η ηλεκτρική κατανάλωση $W_{\text{προσ.}}^{\text{AEP}}$ για την προσαγωγή του αέρα για τις έξι κατηγορίες χώρων του νοσοκομείου όπως αυτές αναφέρθηκαν στην εισαγωγή θα δίδεται από τη σχέση:

$$W_{\text{προσ.}}^{\text{AEP}} = \sum_{i=1}^6 (P_{\text{ανεμ.προσ},i} \cdot H_{\text{προσ},i}) = \sum_{i=1}^6 (V_i \cdot H_{\text{προσ},i}) \quad (\text{kWh}) \quad (5)$$

$$\text{όπου } V_i = K_i A_{i,\text{αναφ.}} \frac{Q_{i,\text{προσ.}}^3}{(Q_{i,\text{προσ.}}^{\text{αναφ.}})^2} \quad (\text{kW}) \quad (6)$$

και αντίστοιχα για την απαγωγή αέρα

$$W_{\text{απαγ.}}^{\text{AEP}} = \sum_{i=1}^6 (P_{\text{ανεμ.απαγ},i} \cdot H_{\text{απαγ},i}) = \sum_{i=1}^6 (Z_i \cdot H_{\text{απαγ},i}) \quad (\text{kWh}) \quad (7)$$

$$\text{όπου } Z_i = \Lambda_i \cdot A_{i,\text{αναφ.}} \frac{Q_{i,\text{απαγ.}}^3}{(Q_{i,\text{απαγ.}}^{\text{αναφ.}})^2} \quad (8)$$

όπου Λ_i δείκτης ισχύος κινητήρα απαγωγής αέρα ανηγμένος στη μονάδα ογκομετρικής παροχής και μονάδα επιφάνειας δαπέδου.

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής και προκειμένου να ευρεθούν οι ενεργειακές καταναλώσεις του αερισμού έγινε χρήση του δείκτη ισχύος κινητήρα για προσαγωγή (K_i) σχέση (3) ή απαγωγή αέρα (Λ_i) σχέση (4) προκειμένου να προσδιοριστούν οι συντελεστές ισχύος ανεμιστήρων προσαγωγής (V_i) σχέση (6) και απαγωγής (Z_i) σχέση (8).

Η συνολική ημερήσια ηλεκτρική ενεργειακή κατανάλωση για αερισμό δίδεται από τη σχέση:

$$W_{\text{AEP.}} = W_{\text{προσ.}}^{\text{AEP}} + W_{\text{απαγ.}}^{\text{AEP}} = \left[\sum_{i=1}^6 (V_i \cdot H_{\text{προσ},i}) + \sum_{i=1}^6 (Z_i \cdot H_{\text{απαγ},i}) \right] \cdot \tau \quad (\text{kWh}) \quad (9)$$

ΠΙΝΑΚΑΣ 1. Τιμές του $A_{i,\text{αναφ.}}$, $Q_{i,\text{αναφ.προσ.}}$ και δείκτη ισχύος κινητήρων K_i ανηγμένου στη μονάδα ογκομετρικής παροχής και στη μονάδα επιφάνειας δαπέδου για τους κινητήρες ανεμιστήρων προσαγωγής νωπού αέρα και $Q_{i,\text{αναφ.απαγ.}}$ και δείκτη ισχύος κινητήρα Λ_i ανηγμένου στη μονάδα παροχής και στη μονάδα επιφάνειας δαπέδου για τους κινητήρες ανεμιστήρων απαγωγής αντίστοιχα των χώρων της κατηγορίας i καθώς και τα χρονικά διαστήματα λειτουργίας $H_{\text{προσ},i}$, $H_{\text{απαγ},i}$ των ανεμιστήρων προσαγωγής και απαγωγής των χώρων της κατηγορίας i .

| ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΧΩΡΩΝ | | | | | | |
|---------------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------|----------------------------|----------------------------|
| (1) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| ΧΩΡΟΙ | Ειδικοί Χώροι | Δωμάτια Ασθενών | Μονάδες Νοσηλείας | Βοηθητικές Μονάδες | Μαγειρείο | Πλυντήριο |
| $A_{i,αναφ.} (m^2)$ | 7594 | 14382 | 17209 | 3484 | 647 | 631 |
| $Q_{i,αναφ.προσ.} (m^3/h)$ | 207366 | 130560 | 456948 | 50588 | 59700 | 16550 |
| $K_i (kW/((m^3/h) \times m^2))$ | 7,789 ($\times 10^{-8}$) | 2,924 ($\times 10^{-8}$) | 3,289 ($\times 10^{-8}$) | αμελητέο | 1,000 ($\times 10^{-6}$) | 7,000 ($\times 10^{-7}$) |
| $Q_{i,αναφ.απαγ.} (m^3/h)$ | 166195 | 97590 | 386985 | 27594 | 59490 | 18500 |
| $\Lambda_i (kW/((m^3/h) \times m^2))$ | 2,594 ($\times 10^{-8}$) | 1,231 ($\times 10^{-8}$) | 1,370 ($\times 10^{-8}$) | αμελητέο | 4,000 ($\times 10^{-7}$) | 3,000 ($\times 10^{-7}$) |
| $H_{προσ,i} (h)$ | 16 | 24 | 10 | - | 8 | 8 |
| $H_{απαγ,i} (h)$ | 16 | 24 | 10 | - | 8 | 8 |

Όπου W_{AEP} είναι η ηλεκτρική κατανάλωση για αερισμό σε kWh/ημέρα, $W_{προσ.}^{AEP}$, $W_{απαγ.}^{AEP}$ η ηλεκτρική κατανάλωση για αερισμό και εξαερισμό αντίστοιχα, V_i και Z_i η ισχύς των ανεμιστήρων προσαγωγής και απαγωγής αντίστοιχα των χώρων της κατηγορίας i του υπό εξέταση νοσοκομείου, $A_{i,αναφ.}$ το συνολικό εμβαδόν των χώρων της κατηγορίας i για το νοσοκομείο, που επιλέχθηκε στα πλαίσια της εργασίας αυτής ως νοσοκομείο αναφοράς και που δίδεται στο πίνακα 1, $Q_{i,αναφ.προσ.}$ και $Q_{i,αναφ.απαγ.}$ η ογκομετρική παροχή των ανεμιστήρων προσαγωγής και απαγωγής αέρα αντίστοιχα των χώρων της κατηγορίας i για το νοσοκομείο αναφοράς και δίδονται στο πίνακα 1, $Q_{i,προσ.}$ και $Q_{i,απαγ.}$ η παροχή των ανεμιστήρων προσαγωγής και απαγωγής αέρα αντίστοιχα των χώρων της κατηγορίας i του υπό εξέταση νοσοκομείου και οι οποίες βρίσκονται από τη μελέτη εφαρμογής του νοσοκομείου, K_i , Λ_i οι δείκτες ισχύος κινητήρων ανηγμένων στη μονάδα παροχής και στη μονάδα επιφάνειας δαπέδου για τους κινητήρες της προσαγωγής και της απαγωγής αέρα αντίστοιχα των χώρων της κατηγορίας i οι οποίοι προσδιορίστηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας και δίδονται στον πίνακα 1 και $H_{προσ,i}$, $H_{απαγ,i}$ τα χρονικά διαστήματα λειτουργίας των ανεμιστήρων προσαγωγής νωπού αέρα και απαγωγής των χώρων της κατηγορίας i ανά τυπική ημέρα τα οποία προσδιορίστηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας και δίδονται στον πίνακα 1 και το συντελεστής ταυτοχρονισμού.

Ο χρόνος στη σχέση 9 εμφανίζεται ως παράμετρος σε τρόπο ώστε να είναι δυνατή η εξέταση διαφορετικών προγραμμάτων αερισμού και οι ενεργειακές καταναλώσεις αυτών στο υπό εξέταση νοσοκομείο.

Ο συντελεστής ταυτοχρονισμού για τους κινητήρες που σχετίζονται με τον κλιματισμό λαμβάνεται συνήθως 0,9 [4].

Η διαδικασία η οποία ακολουθήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας για τον προσδιορισμό δεικτών ισχύος κινητήρων ανηγμένων στη μονάδα παροχής αέρα και στη μονάδα επιφάνειας δαπέδου K_i, Λ_i για τους κινητήρες προσαγωγής και απαγωγής αντίστοιχα των χώρων της κατηγορίας i καθώς και τα χρονικά διαστήματα λειτουργίας $H_{\text{προσ},i}, H_{\text{απαγ},i}$ των ανεμιστήρων προσαγωγής και απαγωγής των χώρων της κατηγορίας i περιγράφεται κατωτέρω.

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία από τρία αντιπροσωπευτικά νοσοκομεία, ευρισκόμενα στις κλιματικές ζώνες Α, Β και Γ αντίστοιχα [5]., προκειμένου να διερευνηθεί το κατά πόσον η παροχή νωπού αέρα σχετίζεται με την κλιματική ζώνη. Κατ' αρχάς βρίσκεται η παροχή νωπού αέρα στις τέσσερις μεγάλες κατηγορίες χώρων, οι οποίες εμφανίζουν παρόμοιες συνθήκες λειτουργίας ήτοι ειδικό χώρο, δωμάτια ασθενών, μονάδες νοσηλείας και βοηθητικές μονάδες. Στη συνέχεια η παροχή νωπού αέρα ανάγεται στη μονάδα επιφάνειας δαπέδου προκειμένου να είναι δυνατή η σύγκριση των παροχών. Κατόπιν και για τις τέσσερις κατηγορίες χώρων, βρίσκεται η παροχή μονάδων αέρα απαγωγής για τα ίδια νοσοκομεία καθώς και ο λόγος της παροχής νωπού αέρα προς τον αέρα απαγωγής. Αυτός ευρέθη σύμφωνος με τις προδιαγραφές [4]. Για τον χρόνο λειτουργίας των ανεμιστήρων προσαγωγής και απαγωγής $H_{\text{προσ},i}$ και $H_{\text{απαγ},i}$ στους ειδικούς χώρους έγιναν οι ακόλουθες παραδοχές καθ' όσον δεν ευρέθησαν βιβλιογραφικά δεδομένα. Για τα χειρουργεία λαμβάνονται 8 ώρες λειτουργίας σε πλήρη ισχύ και τις υπόλοιπες 16 ώρες στη μισή ισχύ (ανεμιστήρες 2 ταχυτήτων). Για τους χώρους ΜΕΠ, ΜΕΘ, εντατική καρδιολογίας, πρόωρων, λαμβάνονται 12 ώρες λειτουργίας σε πλήρη ισχύ και 12 ώρες λειτουργίας στη μισή ισχύ (να ληφθεί υπ' όψιν ότι οι περισσότεροι ανεμιστήρες και στους χώρους αυτούς είναι διπλής ταχύτητας). Για τα δωμάτια ασθενών λαμβάνονται 24 ώρες λειτουργίας (ανεμιστήρες μίας ταχύτητας) και για τις μονάδες νοσηλείας 10 ώρες λειτουργίας κατά την διάρκεια των εργασιμων ωρών (στη πλειονότητα τους ανεμιστήρες μόνης ταχύτητας).

Οι προτεινόμενες ώρες λειτουργίας απαγωγής νωπού αέρα ελήφθησαν ίδιες με αυτές των ωρών προσαγωγής. Σημειώνεται ότι οι χώροι των μαγειρειών και του πλυντηρίου επειδή έχουν ιδιαίτερες απαιτήσεις εξετάζονται ιδιαίτερα ως προς την προσαγωγή και την απαγωγή του αέρα.

Ο Πίνακας 2 δίνει την παροχή νωπού αέρα στις διάφορες κατηγορίες χώρων του πρώτου εκ των τριών εξετασθέντων νοσοκομείων (νοσοκομείο 700 κλινών στη Ζώνη Γ) από τα οποία αντλήθηκαν στοιχεία.

Ο Πίνακας 4 δίνει την παροχή νωπού αέρα στις διάφορες κατηγορίες χώρων του δευτέρου εκ των τριών εξετασθέντων νοσοκομείων (νοσοκομείο 650 κλινών στη Ζώνη Β).

ΠΙΝΑΚΑΣ 2. Παροχή νωπού αέρα και παροχή νωπού αέρα ανά μονάδα επιφάνειας δαπέδου για τις διάφορες κατηγορίες χώρων ενός νοσοκομείου 700 κλινών στη Ζώνη Γ.

| Χώρος | Συνολική Επιφάνεια (m^2) | Παροχή Νωπού Αέρα (m^3/h) | Παροχή Νωπού Αέρα Ανα Μονάδα Επιφάνειας ($m^3/h/m^2$) |
|-------------|---------------------------------|-------------------------------------|--|
| Ειδικό χώρο | 5128 | 158100 | 30,829 |

| | | | |
|--------------------|-------|--------|--------|
| Δωμάτια ασθενών | 15958 | 123250 | 7,723 |
| Μονάδες νοσηλείας | 16482 | 342380 | 20,772 |
| Βοηθητικές μονάδες | 1445 | 20825 | 14,405 |
| Σύνολο | 39014 | 644555 | 16,521 |

Για το ίδιο νοσοκομείο ο Πίνακας 3 δίνει την παροχή των μονάδων απαγωγής αέρα καθώς και την παροχή μονάδων απαγωγής αέρα ανά μονάδα επιφάνειας καθώς και τον λόγο παροχής αέρα απαγωγής προς την παροχή νωπού. Σημειώνεται ότι στις βοηθητικές μονάδες δεν περιλαμβάνεται μαγειρείο και πλυντήριο επειδή αυτοί οι χώροι εξετάζονται στα πλαίσια της εργασίας ιδιαίτερα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3. Παροχή των μονάδων απαγωγής αέρα και παροχή των μονάδων απαγωγής αέρα ανά μονάδα επιφάνειας δαπέδου για τις διάφορες κατηγορίες χώρων ενός νοσοκομείου 700 κλινών στη Ζώνη Γ .

| Χώρος | Συνολική Επιφάνεια (m ²) | Παροχή Μονάδων Απαγωγής Αέρα (m ³ /h) | Παροχή Μονάδων Απαγωγής Αέρα Ανα Μονάδα Επιφάνειας (m ³ /h/m ²) | Λόγος Παροχής Αέρα Απαγωγής Προς Παροχή Νωπού |
|--------------------|--------------------------------------|--|--|---|
| Ειδικοί χώροι | 5128 | 131274 | 25,599 | 0,830 |
| Δωμάτια ασθενών | 15958 | 86870 | 5,446 | 0,705 |
| Μονάδες νοσηλείας | 16482 | 304827 | 18,494 | 0,890 |
| Βοηθητικές μονάδες | 1445 | 9928 | 6,870 | 0,477 |
| Σύνολο | 39014 | 532899 | 13,659 | 0,827 |

ΠΙΝΑΚΑΣ 4. Παροχή νωπού αέρα και παροχή νωπού αέρα ανά μονάδα επιφάνειας δαπέδου για τις διάφορες κατηγορίες χώρων ενός νοσοκομείου 650 κλινών στη Ζώνη Β.

| Χώρος | Συνολική Επιφάνεια (m ²) | Παροχή Νωπού Αέρα (m ³ /h) | Παροχή Νωπού Αέρα Ανά Μονάδα Επιφάνειας (m ³ /h/m ²) |
|--------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|---|
| Ειδικοί χώροι | 7594 | 207366 | 27,306 |
| Δωμάτια ασθενών | 14382 | 130560 | 9,078 |
| Μονάδες νοσηλείας | 17209 | 456948 | 26,553 |
| Βοηθητικές μονάδες | 3484 | 50588 | 14,519 |
| Σύνολο | 42670 | 845462 | 19,814 |

Η διαφοροποίηση στις ποσότητες νωπού αέρα μεταξύ αυτού του νοσοκομείου και του προηγούμενα εξετασθέντος, οφείλεται αφ' ενός στην διαφορετική εσωτερική δομή των νοσοκομείων, και αφ' ετέρου στον σχεδιασμό αφού, σε χώρους που επιτρέπεται η ανακυκλοφορία του αέρα βάσει των προδιαγραφών [4] π.χ. αμφιθέατρο, εστιατόριο, αίθουσες διδασκαλίας – βιβλιοθήκης κλπ, στο νοσοκομείο αυτό, προβλέπεται κλιματισμός με 100% νωπό αέρα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5. Παροχή των μονάδων απαγωγής αέρα και παροχή των μονάδων απαγωγής αέρα ανά μονάδα επιφάνειας για τις διάφορες κατηγορίες χώρων ενός νοσοκομείου 650 κλινών στη Ζώνη Β.

| Χώρος | Συνολική Επιφάνεια (m ²) | Παροχή Μονάδων Απαγωγής Αέρα (m ³ /h) | Παροχή Μονάδων Απαγωγής Αέρα Ανα Μονάδα Επιφάνειας (m ³ /h/m ²) | Λόγος Παροχής Αέρα Απαγωγής Προς Παροχή Νωπού Αέρα |
|--------------------|--------------------------------------|--|--|--|
| Ειδικοί χώροι | 7594 | 166195 | 21,885 | 0,801 |
| Δωμάτια ασθενών | 14382 | 97590 | 6,785 | 0,733 |
| Μονάδες νοσηλείας | 17209 | 386985 | 22,487 | 0,847 |
| Βοηθητικές μονάδες | 3484 | 27594 | 7,920 | 0,545 |
| Σύνολο | 42670 | 678364 | 15,898 | 0,802 |

ΠΙΝΑΚΑΣ 6. Παροχή νωπού αέρα και παροχή νωπού αέρα ανά μονάδα επιφάνειας δαπέδου για τις διάφορες κατηγορίες χώρων ενός νοσοκομείου 450 κλινών στην Ζώνη Α.

| Χώρος | Συνολική Επιφάνεια (m ²) | Παροχή Νωπού Αέρα (m ³ /h) | Παροχή Νωπού Αέρα Ανα Μονάδα Επιφάνειας (m ³ /h/m ²) |
|--------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|---|
| Ειδικοί χώροι | 4785 | 95000 | 19,853 |
| Δωμάτια ασθενών | 9903 | 105588 | 10,662 |
| Μονάδες νοσηλείας | 9951 | 150644 | 15,138 |
| Βοηθητικές μονάδες | 1883 | 38700 | 20,55 |
| Σύνολα | 26522 | 389932 | 14,702 |

ΠΙΝΑΚΑΣ 7. Παροχή μονάδων απαγωγής αέρα και παροχή των μονάδων απαγωγής αέρα ανά μονάδα επιφάνειας για τις διάφορες κατηγορίες χώρων ενός νοσοκομείου 450 κλινών στην Ζώνη Α.

| Χώρος | Συνολική Επιφάνεια (m ²) | Παροχή Νωπού Αέρα (m ³ /h) | Παροχή Νωπού Αέρα Ανα Μονάδα Επιφάνειας (m ³ /h/m ²) |
|--------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|---|
| Ειδικοί χώροι | 4785 | 95000 | 19,853 |
| Δωμάτια ασθενών | 9903 | 105588 | 10,662 |
| Μονάδες νοσηλείας | 9951 | 150644 | 15,138 |
| Βοηθητικές μονάδες | 1883 | 38700 | 20,55 |
| Σύνολα | 26522 | 389932 | 14,702 |

Ο Πίνακας 5 δίνει την παροχή μονάδων απαγωγής αέρα για το ίδιο νοσοκομείο 650 κλινών στη Ζώνη Β .

Ο Πίνακας 6 δίνει την παροχή νωπού αέρα στις διάφορες κατηγορίες χώρων του τρίτου εκ των τριών εξετασθέντων νοσοκομείων (νοσοκομείο 450 κλινών στην Ζώνη Α).

Ο Πίνακας 7 δίνει την παροχή μονάδων απαγωγής αέρα για το τρίτο νοσοκομείο (νοσοκομείο 450 κλινών στην Ζώνη Α).

ΠΙΝΑΚΑΣ 8. Παροχή νωπού αέρα και παροχή μονάδων απαγωγής αέρα σε μαγειρείο και πλυντήριο σε νοσοκομείο 700 κλινών στη Ζώνη Γ.

| Χώρος | Επιφάνεια m ² | Παροχή Νωπού Αέρα (m ³ /h) | Παροχή Νωπού Αέρα Ανα Μονάδα Επιφάνεια ς (m ³ /h/m ²) | Παροχή Μονάδων Απαγωγής Αέρα (m ³ /h) | Παροχή Αέρα Απαγωγής Ανα Μονάδα Επιφάνειας (m ³ /h/m ²) | Λόγος Παροχής Αέρα Απαγωγής Προς Παροχή Νωπού |
|-----------|-----------------------------|--|--|--|--|---|
| Μαγειρείο | 839 | 49810 | 59,4 | 65790 | 78,4 | 1,32 |
| Πλυντήριο | 669 | 29750 | 44,5 | 32640 | 48,8 | 1,1 |

Ο Πίνακας 8 δίνει την παροχή νωπού αέρα και την παροχή μονάδων απαγωγής αέρα στο μαγειρείο και το πλυντήριο του νοσοκομείου 700 κλινών στη Ζώνη Γ.

Ο Πίνακας 9 δίνει την παροχή νωπού αέρα και την παροχή μονάδων απαγωγής αέρα στο μαγειρείο και το πλυντήριο του νοσοκομείου 650 κλινών στη Ζώνη Β.

ΠΙΝΑΚΑΣ 9. Παροχή νωπού αέρα και παροχή μονάδων απαγωγής αέρα σε μαγειρείο και πλυντήριο σε νοσοκομείο 650 κλινών στη Ζώνη Β.

| Χώρος | Επιφάνεια m ² | Παροχή Νωπού Αέρα (m ³ /h) | Παροχή Νωπού Αέρα Ανα Μονάδα Επιφανείας (m ³ /h/m ²) | Παροχή Μονάδων Απαγωγής Αέρα (m ³ /h) | Παροχή Αέρα Απαγωγής Ανά Μονάδα Επιφάνειας (m ³ /h/m ²) | Λόγος Παροχής Αέρα Απαγωγής Προς Παροχή Νωπού |
|-----------|-----------------------------|--|--|---|---|---|
| Μαγειρείο | 647 | 59700 | 92,27 | 59490 | 91,4 | 1,00 |
| Πλυντήριο | 631 | 16550 | 26,22 | 18500 | 29,32 | 1,12 |

ΠΙΝΑΚΑΣ 10. Παροχή νωπού αέρα και παροχή μονάδων απαγωγής αέρα σε μαγειρείο και πλυντήριο σε νοσοκομείο 450 κλινών στη Ζώνη Α.

| Χώρος | Επιφάνεια m ² | Παροχή Νωπού Αέρα (m ³ /h) | Παροχή Νωπού Αέρα Ανά Μονάδα Επιφανείας (m ³ /h/m ²) | Παροχή Μονάδων Απαγωγής Αέρα (m ³ /h) | Παροχή Αέρα Απαγωγής Ανά Μονάδα Επιφανείας (m ³ /h/m ²) | Λόγος Παροχής Αέρα Απαγωγής Προς Παροχή Νωπού |
|-----------|-----------------------------|--|--|--|---|---|
| Μαγειρείο | 652 | 21750 | 33,358 | 39875 | 61,158 | 1,83 |

| | | | | | | |
|-----------|-----|-------|-------|-------|-------|------|
| Πλυντήριο | 413 | 16950 | 41,04 | 20000 | 46,51 | 1,13 |
|-----------|-----|-------|-------|-------|-------|------|

ΠΙΝΑΚΑΣ 11. Παροχή νωπού αέρα, ισχύς ανεμιστήρων κυρίων κλιματιστικών μονάδων (ΚΚΜ), ισχύς ανεμιστήρων ανηγμένη στη μονάδα παροχής νωπού αέρα και δείκτης ισχύος ανεμιστήρων ανηγμένος στη μονάδα επιφανείας δαπέδου και στη μονάδα παροχής νωπού αέρα.

| Χώρος | Συνολική Επιφάνεια (m ²) | Ισχύς Ανεμιστήρων ΚΚΜ (kW) | Παροχή Νωπού Αέρα (m ³ /h) | Ισχύς Ανεμιστήρων Ανηγμένη Στη Μονάδα Παροχής Νωπού Αέρα | | Δείκτης Ισχύος Παροχής Νωπού Αέρα ΚΚΜ Ανά Μονάδα Επιφανείας Και Ανά Μονάδα Παροχής | |
|--------------------|--------------------------------------|----------------------------|---------------------------------------|--|-----------|--|---------------------------|
| | | | | [kW/(m ³ /h)] | [W/(l/s)] | [kW/(m ³ /h m ²)] | [W/(l/s m ²)] |
| Ειδικοί χώροι | 7594 | 122,65 | 207366 | 5,915 × 10 ⁻⁴ | 2,129 | 7,789 × 10 ⁻⁸ | 2,804 × 10 ⁻⁴ |
| Δωμάτια ασθενών | 14382 | 54,90 | 130560 | 4,205 × 10 ⁻⁴ | 1,513 | 2,924 × 10 ⁻⁸ | 1,052 × 10 ⁻⁴ |
| Μονάδες νοσηλείας | 17209 | 258,70 | 456948 | 5,661 × 10 ⁻⁴ | 2,038 | 3,289 × 10 ⁻⁸ | 1,911 × 10 ⁻⁴ |
| Βοηθητικές μονάδες | 3484 | - | 50588 | - | - | - | - |
| Σύνολο | 42670 | 436,25 | 845462 | 5,16 × 10 ⁻⁴ | 1,857 | 1,209 × 10 ⁻⁸ | 4,35 × 10 ⁻⁵ |

ΠΙΝΑΚΑΣ 12. Παροχή Παροχή μονάδων αέρα απαγωγής, ισχύς φυγοκεντρικών ανεμιστήρων, ισχύς φυγοκεντρικών ανεμιστήρων ανηγμένη στη μονάδα παροχής αέρα των μονάδων απαγωγής και δείκτης ισχύος φυγοκεντρικών ανεμιστήρων ανηγμένος στη μονάδα επιφανείας δαπέδου και στη μονάδα παροχής αέρα των μονάδων απαγωγής.

| Χώρος | Συνολική Επιφάνεια (m ²) | Ισχύς Φυγοκεντρικών Ανεμιστήρων (kW) | Παροχή Μονάδων Αέρα Απαγωγής (m ³ /h) | Ισχύς Φυγοκεντρικών Ανεμιστήρων Ανηγμένη Στη Μονάδα Παροχής Αέρα Απαγωγής | | Δείκτης Ισχύος Φυγοκεντρικών Ανεμιστήρων Μονάδων Απαγωγής Ανά Μονάδα Επιφανείας Και Ανά Μονάδα Παροχής Αέρα | |
|--------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--|---|-----------|---|---------------------------|
| | | | | [kW/(m ³ /h)] | [W/(l/s)] | [kW/(m ³ /hm ²)] | [W/(l/s m ²)] |
| Ειδικοί χώροι | 7594 | 32,74 | 166195 | 1,97 × 10 ⁻⁴ | 0,709 | 2,594 × 10 ⁻⁸ | 9,34 × 10 ⁻⁵ |
| Δωμάτια ασθενών | 14382 | 17,28 | 97590 | 1,771 × 10 ⁻⁴ | 0,637 | 1,231 × 10 ⁻⁸ | 4,43 × 10 ⁻⁵ |
| Μονάδες νοσηλείας | 17209 | 91,24 | 386985 | 2,358 × 10 ⁻⁴ | 0,848 | 1,370 × 10 ⁻⁸ | 4,93 × 10 ⁻⁵ |
| Βοηθητικές μονάδες | 3484 | - | 27594 | - | - | - | - |
| Σύνολο | 42670 | 141,26 | 678364 | 2,082 × 10 ⁻⁴ | 0,749 | 4,880 × 10 ⁻⁹ | 1,76 × 10 ⁻⁵ |

Ο Πίνακας 10 δίνει την παροχή νωπού αέρα και την παροχή μονάδων απαγωγής αέρα στο μαγειρείο και το πλυντήριο στο νοσοκομείο 450 κλινών στην Ζώνη Α. Όπως φαίνεται και από τα στοιχεία των προηγούμενων πινάκων η παροχή νωπού αέρα είναι ανεξάρτητη της κλιματικής ζώνης. Επομένως για τον προσδιορισμό του δείκτη ισχύος ανά μονάδα παροχής νωπού αέρα / αέρα απαγωγής, αρκούν τα στοιχεία ισχύος των ανεμιστήρων

προσαγωγής/απαγωγής ενός νοσοκομείου. Επιλέγη το νοσοκομείο της ζώνης Β, ως περισσότερο αντιπροσωπευτικό.

Αρχικά ευρέθη η ισχύς των ανεμιστήρων των κυρίων κλιματιστικών μονάδων για την προσαγωγή νωπού αέρα καθώς και ο δείκτης ισχύος ανά μονάδα παροχής νωπού αέρα ήτοι $\text{kW}/(\text{m}^3/\text{h})$ για κάθε μία από τις τέσσερις κύριες κατηγορίες χώρων, ο δείκτης $\text{kW}/((\text{m}^3/\text{h}) \cdot \text{m}^2)$ της ισχύος ανά μονάδα παροχής νωπού αέρα και μονάδα επιφάνειας καθώς και σε $(\text{W}/(\text{lit}/\text{s}) \cdot \text{m}^2)$, καθ' όσον η μονάδα αυτή προτείνεται στη βιβλιογραφία [6]. Τα ανωτέρω στοιχεία παρατίθενται στον πίνακα 11.

Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε βρίσκοντας την ισχύ των φυγοκεντρικών ανεμιστήρων απαγωγής σε $\text{kW}/(\text{m}^3/\text{h})$ καθώς και το δείκτη της ισχύος ανά μονάδα παροχής αέρα απαγωγής και μονάδα επιφάνειας σε $\text{kW}/((\text{m}^3/\text{h}) \cdot \text{m}^2)$ και σε $(\text{W}/(\text{lit}/\text{s}) \cdot \text{m}^2)$. Τα στοιχεία αυτά παρατίθενται στον πίνακα 12.

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία ένα μέτρο της απόδοσης ενός συστήματος διανομής αέρα, είναι η ειδική ισχύς του ανεμιστήρα που δίνεται συνήθως σε $\text{W}/(\text{lit}/\text{s})$ [6].

Οι υπολογισθείσες τιμές για τις παραπάνω ειδικές ισχύς ανεμιστήρων που δίδονται στον πίνακα 12 εναρμονίζονται με τις αναφερόμενες στη βιβλιογραφία [6,7].

Σύμφωνα ακόμη με άλλη βιβλιογραφία [8] ο δείκτης παροχής αέρα σε m^3/min ανηγμένος στη μονάδα της επιφάνειας κυμαίνεται από 0,15 έως 0,45 με μέσο όρο 0,3. Οι ευρεθείσες τιμές όπως αυτές εμφανίζονται στους Πίνακες 2, 4 και 6 κυμαίνονται για τη συνολική παροχή από 0,24 έως 0,33 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$ για τους ειδικούς χώρους, από 0,13 έως 0,18 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$ για τα δωμάτια ασθενών, από 0,25 έως 0,44 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$ για τις μονάδες νοσηλείας και 0,24 έως 0,34 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$ για τις βοηθητικές μονάδες.

ΕΝΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

Η προτεινόμενη μέθοδος εφαρμοζόμενη για προσαγωγή προκλιματισμένου νωπού αέρα σύμφωνα με τον Πίνακα 2 και τις σχέσεις (5), (6) δίνει για το προτεινόμενο πρόγραμμα λειτουργίας: $V_1 = 54,35 \text{ kW}$, $V_2 = 46,12 \text{ kW}$, $V_3 = 108,79 \text{ kW}$, $V_4 = 0$, $V_5 = 22,43 \text{ kW}$, $V_6 = 42,46 \text{ kW}$, $W_{\text{πρσ}}^{\text{ΑΕΡ}} = 3225 \text{ kWh/ημέρα}$

Η ίδια μέθοδος αυτή εφαρμοζόμενη για απαγωγή αέρα σύμφωνα με τον Πίνακα 3 και τις σχέσεις (7), (8) δίνει για το προτεινόμενο πρόγραμμα λειτουργίας: $Z_1 = 16,13 \text{ kW}$, $Z_2 = 12,16 \text{ kW}$, $Z_3 = 44,59 \text{ kW}$, $Z_4 = 0$, $Z_5 = 20,82 \text{ kW}$, $Z_6 = 19,23 \text{ kW}$, $W_{\text{πρσ}}^{\text{ΑΕΡ}} = 1185 \text{ kWh/ημέρα}$.

Η συνολική ετήσια ενεργειακή κατανάλωση λόγω αερισμού ανηγμένη στη μονάδα επιφάνειας δαπέδου δίνει 40 kWh/m^2 έτος που είναι σύμφωνη με τα βιβλιογραφικά δεδομένα [9] για τα νοσοκομεία αυτού του μεγέθους.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Στην εργασία αυτή προτείνεται μία προσεγγιστική μέθοδος για τον προσδιορισμό της ηλεκτρικής ενεργειακής κατανάλωσης της ηλεκτρικής εγκατάστασης αερισμού στα ελληνικά νοσοκομεία.

Η μέθοδος αυτή βασισμένη σε πραγματικά στοιχεία παροχών που αντλήθηκαν από σύγχρονα ελληνικά νοσοκομεία και στην παραδοχή ότι οι ανεμιστήρες ακολουθούν τους νόμους της γεωμετρικής ομοιότητας είναι απλή και τα αποτελέσματα που δίνει συμφωνούν με τα αποτελέσματα που παρέχονται από τη διεθνή βιβλιογραφία.

Η μέθοδος μπορεί να συμβάλλει στην επιλογή του κατάλληλου συστήματος συμπαραγωγής που βασίζεται στον υπολογισμό των μεμονωμένων ηλεκτρικών και θερμικών φορτίων ενός καινούργιου νοσοκομείου στο αρχικό στάδιο μελέτης αυτού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Electricity Savings in Hospitals- A Guide for Energy and Estate Managers Good Practice Guide 54, Crown, (January 1993).
- [2] ΤΕΧΝΙΚΗ ΟΔΗΓΙΑ Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 2425/86, “Εγκαταστάσεις σε κτίρια: Κλιματισμός κτιριακών χώρων”, Β. Έκδοση, Τεχνικό Επιμετήριο Ελλάδος, Αθήνα, (Ιούνιος 2002).
- [3] Sauer H. J., Howell R. H. and Coad W. J., “Principles of Heating Ventilating and Air Conditioning”, American Society of Heating Refrigerating and Air – Conditioning Engineers Inc, Atlanta, Georgia, (2001).
- [4] Υπουργείο Υγείας και Πρόνοιας, “Προδιαγραφές Ηλεκτρομηχανολογικών Εγκαταστάσεων Νοσοκομείων”, Γενική Διεύθυνση Διοικητικής Υποστήριξης και Τεχνικών Υποδομών, Διεύθυνση Τεχνικών Υπηρεσιών, Τμήμα Μελετών και Προδιαγραφών, Γ' Έκδοση, (Ιούλιος 2001).
- [5] Σελλούντος Β. Η., “Θέρμανση – Κλιματισμός”, Εκδόσεις ΤεΚΔΟΤΙΚΗ-ΣΕΛΚΑ-4Μ ΕΠΕ, Αθήνα, (2005)
- [6] British Government’s Energy Efficiency Best Practice Programme “Energy Consumption in Hospitals”, Energy Consumption Guide 72, Watford, UK, (June 1996).
- [7] Best Practice Programme, “An introduction to absorption cooling”, Good Practice Guide 256, Crown, London, (2001).
- [8] “Methods & Applications of Air Conditioning Systems”, Hitachi Plant engineering & Construction Co., Ltd, Tokyo, Japan.
- [9] Commission of the European Communities, Directorate-General for Energy (DG XVII), “Energy Efficiency in Hospitals and Clinics”, A Thermie Action Programme, Paris, (May 1993).

Ναυτιλιακά Καύσιμα – Προδιαγραφές και Προοπτικές

Σ. Καλλίγερος^a, Π. Αντωνάκος^a, Ν. Μελανίτης^a, Γ. Αναστόπουλος^b, Υ. Ζαννίκου^b, Φ. Ζαννίκος^b

a Σχολή Ναυτικών Δοκίμων, Εργαστήριο Τεχνολογίας Καυσίμων & Λιπαντικών, Τέρμα Χατζηκυριακού, Χατζηκυριάκειο, 18539 Πειραιάς, Τηλ: 2104581656, email: sskalligeros@hna.gr

b Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εργαστήριο Τεχνολογίας Καυσίμων & Λιπαντικών, Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, 15780 Ζωγράφου, Τηλ: 2107723143, email: george.anastopoulos@gmail.com

Abstract. This study examines the changes in marine fuel specifications imposed by the new ISO 8217:2010 standard which will replace the standard ISO 8217:2005. Marine and shipping community has focused their attention in fuel specifications following the International Maritime Organization (IMO) approval of a new schedule of gradual in time but drastic in effect reduction of sulphur oxide emissions from ships. The control and measurement of gaseous emissions from ships is addressed by the International Convention for the prevention of pollution from ships (MARPOL 73/78 - Annex VI). This document, which entered into force in May 2005, aims to limit emissions of sulfur oxides (SO_x) by reducing the sulfur content in marine fuel.

Keywords: Marine fuel, Residual Marine fuel, Distillate Marine Fuel, Ash, Sulfur, Emissions.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια σε συνδυασμό με την συνεχή μεταβολή στην Ευρωπαϊκή νομοθεσία για τα ενεργειακά προϊόντα, τα ναυτιλιακά καύσιμα βρίσκονται πάντα στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος. Ειδικά τα τελευταία χρόνια παρατηρείται αυξημένο ενδιαφέρον για την ποιότητα των ναυτιλιακών καυσίμων, με αποκορύφωμα την έγκριση από τον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (International Maritime Organization - IMO), ενός χρονοδιαγράμματος προοδευτικής αλλά και ταυτόχρονα δραστικής μείωσης των εκπομπών οξειδίων του θείου από τα πλοία. Ο έλεγχος και η μέτρηση των αέριων εκπομπών από τα πλοία καλύπτεται από το Παράρτημα VI της Διεθνούς Σύμβασης για την πρόληψη της ρύπανσης από πλοία (MARPOL 73/78 – Annex VI). Το συγκεκριμένο παράρτημα τέθηκε σε ισχύ τον Μάιο του 2005 και το οποίο με τον κανονισμό 14 (Regulation 14) προσπαθούσε να περιορίσει τις εκπομπές οξειδίων του θείου (SO_x) μέσω της μείωσης του θείου στα ναυτιλιακά καύσιμα.

Η παρούσα μελέτη εξετάζει τις αλλαγές στις προδιαγραφές των ναυτιλιακών καυσίμων με την εφαρμογή του νέου προτύπου ISO 8217:2010 το οποίο θα αντικαταστήσει το πρότυπο ISO 8217:2005 και το οποίο με την σειρά του είχε αντικαταστήσει το ISO 8217:1996.

ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

Το διεθνές πρότυπο ISO 8216-1:2010 κατηγοριοποιεί τα ναυτιλιακά καύσιμα ακολουθώντας την εξής κωδικοποίηση. Το λατινικό γράμμα «D» είναι το αρχικό της λέξης «Distillate - Αποσταγμένο» ενώ το λατινικό γράμμα «R» είναι το αρχικό της λέξης «Residual - Υπολειμματικό». Στη συνέχεια ακολουθεί το λατινικό γράμμα «M» αρχικό της λέξης «Marine - Ναυτιλιακό» που δηλώνει την οικογένεια του καυσίμου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι το ναυτιλιακό καύσιμο. Ακολουθούν τα γράμματα «X, A, Z, B, κ.λ.π.) χωρίς καμία ιδιαίτερη βαρύτητα στην κατηγοριοποίηση. Τα υπολειμματικά ναυτιλιακά καύσιμα συνοδεύονται και από έναν αριθμό ο οποίος εκφράζει το μέγιστο κινηματικό ιξώδες αυτών, στους 50°C σε mm²/sec. Αναλυτικά η κατηγοριοποίηση παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Κατηγοριοποίηση των Ναυτιλιακών καυσίμων

| Οικογένεια Υποκατηγορία ανάλογα με το είδος του καυσίμου | Κατηγορία Υποκατηγορίες ανάλογα με την εφαρμογή και τις ιδιότητες | ISO-F | | Παρατηρήσεις |
|--|---|---|----------------------|--|
| | | Μέγιστο κινηματικό Ιξώδες στους 50°C | mm ² /sec | |
| Κλάσματα | DMX | - | - | Χρησιμοποιείται σε έκτακτες καταστάσεις |
| | DMA | - | - | Χρησιμοποιείται σε γενικές εφαρμογές δεν πρέπει να περιέχει υπολλειμματικά κλάσματα |
| | DMZ | - | - | Χρησιμοποιείται σε γενικές εφαρμογές δεν πρέπει να περιέχει υπολλειμματικά κλάσματα |
| | DMB | - | - | Χρησιμοποιείται σε γενικές εφαρμογές μπορεί να περιέχει ανιχνεύσιμα ποσοστά υπολλειμματικών κλασμάτων. |
| | RMA | 10 | 10 | |
| | RMB | 30 | 30 | |
| | RMD | 80 | 80 | |
| | RME | 180 | 180 | |
| | RMG | 180 | 180 | |
| | Υπολειμματικά | RMG | 380 | 380 |
| | RMG | 500 | 500 | |
| | RMG | 700 | 700 | |
| | RMK | 380 | 380 | |
| | RMK | 500 | 500 | |
| | RMK | 700 | 700 | |

Σε σχέση με την προηγούμενη κατηγοριοποίηση η οποία είχε εφαρμοσθεί με την έκδοση του 2005 οι διαφορές της τρέχουσας έκδοσης είναι ότι προστέθηκε μια καινούργια κατηγορία η DMZ. Η κατηγορία αυτή όπως φαίνεται στον πίνακα 2 έχει ελάχιστο κινηματικό ιξώδες στους 40°C, 3,0 mm²/sec. Η κατηγορία DMC που υπήρχε στην έκδοση του 2005 έχει τροποποιηθεί και έχει μεταφερθεί στα υπολλειμματικά ναυτιλιακά καύσιμα με την ονομασία RMA 10, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 3. Αυξήθηκε στα 2,0 mm²/sec η ελάχιστη απαίτηση για το

κινηματικό ιξώδες της κατηγορίας DMA, ενώ ταυτόχρονα οριοθετήθηκε ως ελάχιστο κινηματικό ιξώδες για την κατηγορία DMB το όριο των 2,0 mm²/sec.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2 προστέθηκαν για πρώτη φορά όρια στην περιεκτικότητα σε υδροθείο, στον αριθμό οξύτητας, στην οξειδωτική σταθερότητα και στην λιπαντική ικανότητα των αποσταγμένων ναυτιλιακών καυσίμων.

Πίνακας 2. Αποσταγμένα Ναυτιλιακά Καύσιμα

| Ιδιότητα | Μονάδα | Όριο | Κατηγορία ISO-F- | | | | Μέθοδος Ελέγχου | |
|--|----------------------|------|------------------------------------|-------|-------|------------------|-----------------------|----------|
| | | | DMX | DMA | DMZ | DMB | | |
| Κινηματικό Ιξώδες στους 40°C | mm ² /s | max. | 5,500 | 6,000 | 6,000 | 11,00 | ISO 3104 | |
| | | min. | 1,400 | 2,000 | 3,000 | 2,000 | | |
| Πυκνότητα στους 15°C | kg/m ³ | max. | - | 890,0 | 890,0 | 900,0 | ISO 3675 ή ISO 12185 | |
| Δείκτης Κετανίου | | min. | 45 | 40 | 40 | 35 | ISO 4264 | |
| Θείο | κ.β. % | max. | 1,00 | 1,50 | 1,50 | 2,00 | ISO 8754 ISO 14596 | |
| Σημείο Ανάφλεξης | °C | min. | 43 | 60 | 60 | 60 | ISO 2719 | |
| Υδροθείο | mg/kg | max. | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | IP 570 | |
| Οξύτητα | mg KOH/g | max. | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | ASTM D664 | |
| Ολικό Υπόλειμμα μέσω ζεστού φιλτραρίσματος | κ.β. % | max. | - | - | - | 0,10 | ISO 10307-1 | |
| Οξειδωτική Σταθερότητα | g/m ³ | max. | 25 | 25 | 25 | 25 | ISO 12205 | |
| Ανθρακούχο Υπόλειμμα – μικρομέθοδος στο 10% (V/V) του υπολείμματος απόσταξης | κ.β. % | max. | 0,30 | 0,30 | 0,30 | - | ISO 10370 | |
| Ανθρακούχο Υπόλειμμα – μικρομέθοδος | κ.β. % | max. | - | - | - | 0,30 | ISO 10370 | |
| Σημείο Θάλωσης | °C | max. | -16 | - | - | - | ISO 3015 | |
| Σημείο Χειμερινή Ροής (Ανώτερο) | °C | max. | -6 | -6 | -6 | 0 | ISO 3016 | |
| | Καλοκαιρινή Ποιότητα | °C | max. | 0 | 0 | 0 | 6 | ISO 3016 |
| Οπτικός Έλεγχος | | | Καθαρό & Διαυγές Clear & Bright | | | | | |
| Νερό | κ.ο. % | max. | - | - | - | 0,30 | ISO 3733 | |
| Τέφρα | κ.β. % | max. | 0,010 | 0,010 | 0,010 | 0,010 | ISO 6245 | |
| Λιπαντική Ικανότητα, Διορθωμένη φθοράς (wsd 1,4) στους 60 °C | μm | max. | 520 | 520 | 520 | 520 ^g | ISO 12156 | |

Όσον αφορά τα υπολειμματικά ναυτιλιακά καύσιμα όπως παρουσιάζονται και στον Πίνακα 1 αυτά χωρίζονται σε έντεκα (11) κατηγορίες. Πιο συγκεκριμένα προστέθηκε η κατηγορία RMA10, η κατηγορία RMG χωρίστηκε σε τέσσερις υποκατηγορίες με διαφορετικό όριο κινηματικού ιξώδους η κάθε μια και τέλος η κατηγορία RMK η οποία με την σειρά της χωρίστηκε σε τρεις υποκατηγορίες με διαφορετικό ιξώδες η κάθε μια. Σε σχέση με την προηγούμενη

κατηγοριοποίηση της έκδοσης του 2005 οι κατηγορίες των υπολειμματικών καυσίμων RMF και RMH καταργήθηκαν. Όπως παρουσιάζονται αναλυτικά οι ιδιότητες των υπολειμματικών ναυτιλιακών καυσίμων στον πίνακα 3, διαπιστώνεται η μείωση σε πολλές κατηγορίες της περιεκτικότητας σε τέφρα σε σχέση με ότι είχε θεσμοθετηθεί στην προηγούμενη έκδοση του προτύπου. Επίσης μειώθηκαν τα όρια της περιεκτικότητας σε βανάδιο σε όλες σχεδόν της κατηγορίες εκτός από τις κατηγορίες RMB 30 στην οποία έμεινε αμετάβλητο και στην κατηγορία RMG 380 στην οποία αυξήθηκε ελάχιστα. Μειώθηκαν τα όρια περιεκτικότητας του αθροίσματος των στοιχείων αλουμινίου και πυριτίου. Επίσης επανεξετάστηκε η περιεκτικότητα των χρησιμοποιημένων λιπαντικών ελαίων εντός των υπολειμματικών ναυτιλιακών καυσίμων.

Η αναγκη για νεο προτυπο

Τέφρα

Η βασική αιτία που οδήγησε στην εκπόνηση και υιοθέτηση του νέου προτύπου είναι η ανάγκη για περιορισμό των προβλημάτων που παρουσιάζονται από την χρήση των ναυτιλιακών καυσίμων στους ναυτικούς κινητήρες. Όλα τα υπολειμματικά ναυτιλιακά καύσιμα περιέχουν μεταλλικά στοιχεία. Αυτά, μπορεί να περιέχονται λόγω της προέλευσης του καυσίμου, όπως το βανάδιο, το νάτριο, το ασβέστιο, το νικέλιο ή μπορεί να εισάγονται από εξωτερικές πηγές, όπως το επιπλέον νάτριο, το αλουμίνιο, το πυρίτιο και ο σίδηρος. Όταν ένα καύσιμο καίγεται στον κινητήρα, κάποια από αυτά τα μέταλλα μετατρέπονται σε στερεά σωματίδια όπως οξειδία, θειώδη, ή πιο σύνθετες ενώσεις, κοινώς γνωστά ως τέφρα. Σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες αυτά τα σωματίδια στερεής τέφρας γίνονται εν μέρει ρευστά και σε αυτή την κατάσταση έρχονται σε επαφή με τα επιμέρους κατασκευαστικά στοιχεία του συστήματος καύσης, ειδικά εάν οι θερμοκρασίες στην επιφάνεια αυτών είναι αρκετά υψηλή. Οι εν λόγω επικαθίσεις τέφρας, μπορεί να προκαλέσουν ζημίες σε κατασκευαστικά στοιχεία όπως στις κορώνες των εμβόλων, στις βαλβίδες εξαγωγής, στις επιφάνειες του υπερσυμπιεστή (turbocharger) και γενικότερα στους ναυτικούς κινητήρες.

Αυτό γίνεται είτε μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται «εν θερμώ διάβρωση – hot corrosion» είτε μέσω άλλων μηχανισμών. Η θερμοκρασία στην οποία τα σωματίδια της τέφρας αρχίσουν να γίνονται ρευστά και να επικολούνται στις επιφάνειες, συχνά αναφέρεται ως θερμοκρασία επικόλλησης «stiction». Η θερμοκρασία αυτή είναι χαμηλότερη για τις τέφρες που είναι πλούσιες σε συγκεντρώσεις βαναδίου και/ή νατρίου. Για τον λόγο αυτό είναι ιδιαίτερη η προσοχή που αποδίδεται στις συγκεντρώσεις αυτών των μετάλλων στα ναυτιλιακά καύσιμα.

Τα σημεία τήξης της τέφρας διαφέρουν σημαντικά και εξαρτώνται ανάλογα από τα συστατικά της τέφρας. Για παράδειγμα ένωση του βαναδίου-νατρίου έχει ως σημείο τήξης τους 535 C. Ωστόσο, αυτό το σημείο μπορεί να υποβαθμιστεί από την τήξη άλλων μεταλλικών οξειδίων που προέρχονται από διαβρωμένες επιφάνειες. Για αυτό το λόγο θερμοκρασίες τήξης της τέφρας αρκετά πιο χαμηλά από τους 400 C είναι θεωρητικά δυνατό να επιτευχθούν. Ο λόγος νάτριο προς βανάδιο όταν είναι ένα προς τρία υποστηρίζεται ότι αποδίδει τη χαμηλότερη θερμοκρασία τήξης της τέφρας. Αυτό ισχύει για μια τέφρα που προέρχεται από ένα σύμπλεγμα δύο συστατικών ($\text{Na}_2\text{SO}_4/\text{V}_2\text{O}_5$). Ωστόσο οι τέφρες που προέρχονται από την καύση υπολειμματικών καυσίμων είναι μείγματα σύνθετων ενώσεων, οι οποίες αντιδρούν με ενώσεις του ασβεστίου, του νικελίου, του πυριτίου και του αλουμινίου, αλλά και με πολλά άλλα μέταλλα σε διάφορες συγκεντρώσεις. Όλα αυτά τα επιπρόσθετα μέταλλα τείνουν να επηρεάζουν τις θερμοκρασίες τήξης της τέφρας. Σε ορισμένες περιπτώσεις μάλιστα ασκούν ευεργετική επίδραση, καθιστώντας την τέφρα λιγότερο επιρρεπή στην τάση που έχει να προσκολλάται σε επιφάνειες, ενώ σε άλλες περιπτώσεις έχουν αντίθετο αποτέλεσμα. Ο λόγος νάτριο προς βανάδιο 1 προς 3 αποκτά όλο και μεγαλύτερη σημασία όσο η περιεκτικότητα σε βανάδιο του καυσίμου αυξάνεται, επειδή η τέφρα γίνεται ολοένα και πιο πλούσια σε βανάδιο. Ενώ τα επίπεδα περιεκτικότητας του

βαναδίου σε ορισμένα υπολειμματικά καύσιμα μπορεί να πλησιάζουν και τα 600mg/kg, τα υπόλοιπα μέταλλα δεν φθάνουν συνήθως αυτά τα επίπεδα συγκέντρωσης. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο η επίδρασή τους στη θερμοκρασία επικόλλησης «stiction» είναι περιορισμένη. Επίσης, υψηλά επίπεδα βαναδίου σημαίνουν και αύξηση της συνολικής επιβάρυνσης σε τέφρα, κατ' επέκταση αύξηση των προβλημάτων που προκύπτουν από την εναπόθεση αυτής.

Ένας πρακτικός κανόνας που συνήθως ακολουθείται είναι αυτός που λέει ότι το ανώτατο επίπεδο περιεκτικότητας του καυσίμου σε νάτριο πρέπει να είναι το ένα τρίτο της πραγματικής περιεκτικότητας σε βανάδιο. Είναι προφανές από τα προαναφερθέντα, ότι ένας τέτοιος περιορισμός δεν είναι επιστημονικά απόλυτα θεμελιωμένος και αυτό συμβαίνει κυρίως για χαμηλές περιεκτικότητες σε βανάδιο (μικρότερες από 150 mg/kg). Το Βανάδιο είναι ένα φυσικό συστατικό του καυσίμου και είναι παρόν σε χημικά μόρια που περιέχουν και άλλα στοιχεία. Τέτοιες χημικές ενώσεις είναι διαλυμένες στα υπολειμματικά καύσιμα. Για τον λόγο αυτό δεν υπάρχουν πρακτικές μέθοδοι με τις οποίες μπορεί να διαχωριστεί το βανάδιο από το καύσιμο μετά την τροφοδοσία του σκάφους. Ο μόνος πρακτικός τρόπος για να περιοριστεί το βανάδιο είναι να περιοριστεί η περιεκτικότητα του στο καύσιμο. Αυτό που πραγματικά συνιστά μια ρεαλιστική λύση στο ζήτημα, είναι η επιχειρησιακή εμπειρία στην ευαισθησία ή όχι των διαφόρων τύπων ναυτικών μηχανών στα προβλήματα που σχετίζονται με τον σχηματισμό τέφρας.

Όσον αφορά την παρουσία νατρίου στο καύσιμο, πρέπει να τονιστεί ότι η συνήθης πηγή νατρίου είναι η επιμόλυνσή του από το θαλασσινό νερό. Θεωρητικά 1% θαλασσινού νερού προσθέτει περίπου 100 mg/kg νατρίου στην ήδη υπάρχουσα περιεκτικότητα του καυσίμου σε νάτριο. Τα ναυτιλιακά καύσιμα που είναι ελεύθερα νερού συνήθως έχουν περιεκτικότητα σε νάτριο η οποία κυμαίνεται μεταξύ 10 mg/kg και 50 mg/kg, σπάνια είναι σημαντικά υψηλότερη. Σε αντίθεση με το βανάδιο, το νάτριο δεν είναι συνήθως παρόν στο καύσιμο σε διαλυτή μορφή. Στις περισσότερες των περιπτώσεων, τα υψηλά επίπεδα νατρίου συνδέονται με τη επιμόλυνση του καυσίμου από το θαλασσινό νερό. Ως εκ τούτου, το ποσοστό μείωσης του νατρίου σχετίζεται άμεσα με την ποσότητα του νερού που μπορεί να αφαιρεθεί μέσω των δεξαμενών καθίζησης και από την φυγοκέντριση του καυσίμου.

Επίσης το υδροξείδιο του νατρίου που χρησιμοποιείται κατά την διαδικασία της διύλισης μπορεί να είναι μια επιπρόσθετη πηγή επιμόλυνσης. Ένα ποσοστό του νατρίου μπορεί να είναι σε διαλυτή μορφή πάνω στο καύσιμο και για τον λόγο αυτό να μην μπορεί να απομακρυνθεί από τα συστήματα που διαθέτει το σκάφος. Για όλους τους παραπάνω λόγους οι μοντέρνες σχεδιάσεις των ναυτικών κινητήρων έχουν ως στόχο την αποφυγή σχηματισμού τέφρας στα κρίσιμα στοιχεία του κινητήρα.

ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΛΙΠΑΝΤΙΚΑ ΈΛΑΙΑ (Χ.Λ.Ε.)

Τα χρησιμοποιημένα λιπαντικά έλαια, είναι κυρίως λάδια που προέρχονται από τους στραφαλοφόρους άξονες των οχημάτων. Αυτά προστίθενται στα ναυτιλιακά καύσιμα για περισσότερο από 25 χρόνια σε ορισμένα μέρη του κόσμου. Η προσθήκη τους ως συστατικό που αναμειγνύεται στο ναυτιλιακό καύσιμο δείχνει κατ' αρχήν ανεπαρκή περιβαλλοντική συνείδηση από αυτούς που πραγματοποιούν τις αναμειξεις και δείχνει τον δρόμο για την εισαγωγή και άλλων αποβλήτων στα ναυτιλιακά καύσιμα (π.χ. βιομηχανικοί διαλύτες).

Τα έλαια αυτά περιέχουν σημαντικές ποσότητες απορρυπαντικών και αντιδιαβρωτικών προσθέτων. Τα απορρυπαντικά πρόσθετα βασίζονται κυρίως στο ασβέστιο. Τα αντιδιαβρωτικά πρόσθετα από την πλευρά τους είναι ενώσεις ψευδαργύρου–φωσφόρου και σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να μην περιέχουν και καθόλου ψευδάργυρο. Για τον λόγο αυτό τα πρότυπα

των ναυτιλιακών καυσίμων θέτουν όρια περιεκτικότητας αυτών των μετάλλων, είτε μόνα τους είτε σε συνδυασμό.

Υδρόθειο

Το υδρόθειο (H_2S) είναι ένα ιδιαίτερα τοξικό αέριο και η έκθεση σε υψηλές συγκεντρώσεις των ατμών του είναι επικίνδυνη. Σε ακραίες περιπτώσεις μπορεί να είναι θανατηφόρα. Σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις το αέριο έχει τη χαρακτηριστική μυρωδιά του κλούβιου αυγού. Ωστόσο, σε υψηλότερες συγκεντρώσεις προκαλεί απώλεια της όσφρησης, πονοκεφάλους και ζάλη, και σε πολύ υψηλές συγκεντρώσεις είναι άμεσα θανατηφόρο. Το υδρόθειο μπορεί να σχηματίζεται κατά τη διαδικασία της διύλισης και μπορεί να αναπτυχθεί από τα ναυτιλικά καύσιμα κατά την παραμονή τους στις δεξαμενές αποθήκευσης, στις φορτηγίδες φόρτωσης και στις δεξαμενές του σκάφους. Είναι δυνατόν να είναι παρόν και σε υγρή και σε αέρια φάση. Ο βαθμός και η ταχύτητα διαχωρισμού μεταξύ της υγρής και αέριας φάσης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η χημική σύσταση του καυσίμου, η θερμοκρασία, το κινηματικό ιξώδες, το επίπεδο της ανάδευσης, ο χρόνος αποθήκευσης, η εφαρμοζόμενη προθέρμανση, οι συνθήκες του περιβάλλοντος, το σχήμα της δεξαμενής, ο υπάρχων κενός χώρος και ο εξαερισμός.

Η επαφή με τους ατμούς H_2S μπορεί να συμβεί όταν το προσωπικό είναι εκτεθειμένο στους ατμούς των ναυτιλιακών καυσίμων. Αυτό μπορεί να συμβεί, κατά την εμβάπτιση των δεξαμενών, κατά το άνοιγμα των θυρών των δεξαμενών, κατά την είσοδο σε κενές δεξαμενές, αλλά και από τους σωλήνες εξαερισμού, όταν οι δεξαμενές είναι ήδη γεμάτες και θερμαίνονται. Επίσης σε χώρους καθαρισμού, κατά την αποσύνδεση των γραμμών των καυσίμων και κατά τη διάρκεια εργασιών αλλαγής φίλτρων.

Πρέπει να τονιστεί ιδιαίτερα ότι τα διάφορα όρια τα οποία κατά καιρούς εφαρμόζονται δεν μπορούν από μόνα τους να οριοθετήσουν ένα επίπεδο ασφάλειας ή να εξαλείψουν τον κίνδυνο από την υψηλή συγκέντρωση ατμών υδροθείου σε μικρό και κλειστό χώρο. Αυτό σημαίνει ότι πάντα πρέπει να υπάρχει εγρήγορση στο προσωπικό που απασχολείται με την χρήση των ναυτιλιακών καυσίμων.

ΥΠΟΛΟΓΙΖΟΜΕΝΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΡΩΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΆΝΘΡΑΚΑ

(CALCULATED CARBON AROMATICITY INDEX - CCAI)

Οι επιδόσεις στην ανάφλεξη και στην καύση των υπολειμματικών ναυτιλιακών καυσίμων σε κινητήρες πετρελαίου εξαρτώνται από το είδος του κινητήρα, τον σχεδιασμό, την λειτουργία και την λειτουργική του κατάσταση, το φορτίο που ασκείται και τις χημικές ιδιότητες του καυσίμου.

Ο δείκτης αρωματικότητας του άνθρακα με την ονομασία CCAI (Calculated Carbon Aromaticity Index) υπολογίζεται με βάση την πυκνότητα και το ιξώδες του καυσίμου, και παρέχει μια εκτίμηση για την καθυστέρηση ανάφλεξης του καυσίμου. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι καύσιμα με παρόμοια πυκνότητα και ιξώδες μπορεί να έχουν σημαντικά διαφορετικές ιδιότητες ανάφλεξης. Ενώ ο Δείκτης CCAI εκτιμά την καθυστέρηση ανάφλεξης, δεν παρέχει αυτόχρονα πληροφορίες σχετικά με τα χαρακτηριστικά του υπολειμματικού ναυτιλιακού καυσίμου, η οποία γίνεται σήμερα όλο και πιο σημαντική με τις αλλαγές που συνετλούνται και αφορούν την περιβαλλοντική διάσταση.

Για την αντιμετώπιση τόσο της εκτίμησης της ποιότητας ανάφλεξης όσο και των χαρακτηριστικών της καύσης, τα τελευταία χρόνια έχουν επιτευχθεί σημαντικές εξελίξεις, όπως η χρήση οργάνων με θάλαμο καύσης σταθερού όγκου (Constant Volume Combustion Chamber).

Πίνακας 3. Υπολειμματικά Ναυτιλιακά καύσιμα

| Ιδιότητα | Μονάδα | Όριο | Κατηγορία ISO-F- | | | | | | | | | | | Μέθοδος Ελέγχου |
|---------------------------------|------------------------------|------|---|-------|-------|-------|------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|-----------------------|-------------------------------|
| | | | RMA | RMB | RMD | RME | RMG | | | RMK | | | | |
| | | | 10 | 30 | 80 | 180 | 180 | 380 | 500 | 700 | 380 | 500 | 700 | |
| Κινηματικό στους 50°C | Ιξώδες mm ² /s | max. | 10,00 | 30,00 | 80,00 | 180,0 | 180,0 | 380,0 | 500,0 | 700,0 | 380,0 | 500,0 | 700,0 | ISO 3104 |
| Πυκνότητα στους 15°C | kg/m ³ | max. | 920,0 | 960,0 | 975,0 | 991,0 | | 991,0 | | | | 1010,0 | | ISO 3675 ή ISO 12185 |
| CCAI | | max. | 850 | 860 | 860 | 860 | | 870 | | | | 870 | | |
| Θείο | κ.β. % | max. | | | | | Νομοθετικές Απαιτήσεις | | | | | | ISO 8754 ISO 14596 | |
| Σημείο Ανάφλεξης | °C | min. | 60,0 | 60,0 | 60,0 | 60,0 | | 60,0 | | | | 60,0 | | ISO 2719 |
| Υδρόθειο | mg/kg | max. | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | | 2,00 | | | | 2,00 | | IP 570 |
| Οξύτητα | mg KOH/g | max. | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | | 2,5 | | | | 2,5 | | ASTM D664 |
| Total sediment aged | κ.β. % | max. | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | | 0,10 | | | | 0,10 | | ISO 10307-2 |
| Carbon residue – micro method | κ.β. % | max. | 2,50 | 10,00 | 14,00 | 15,00 | | 18,00 | | | | 20,00 | | ISO 10370 |
| Σημείο (Υψηλότερο) | Ροής °C | | | | | | | | | | | | | |
| - Χειμερινή ποιότητα | | max. | 0 | 0 | 30 | 30 | | 30 | | | | 30 | | ISO 3016 |
| - Καλοκαιρινή Ποιότητα | | max. | 6 | 6 | 30 | 30 | | 30 | | | | 30 | | ISO 3016 |
| Νερό | κ.ο. % | max. | 0,30 | 0,50 | 0,50 | 0,50 | | 0,50 | | | | 0,50 | | ISO 3733 |
| Τέφρα | κ.β. % | max. | 0,040 | 0,070 | 0,070 | 0,070 | | 0,100 | | | | 0,150 | | ISO 6245 |
| Βανάδιο | mg/kg | max. | 50 | 150 | 150 | 150 | | 350 | | | | 450 | | IP 501, IP 470 ή ISO 14597 |
| Νάτριο | mg/kg | max. | 50 | 100 | 100 | 50 | | 100 | | | | 100 | | IP 501, IP 470 |
| Αλουμίνιο + πυρίτιο | mg/kg | max. | 25 | 40 | 40 | 50 | | 60 | | | | 60 | | IP 501, IP 470 ή ISO 10478 |
| Χρησιμοποιημένα Λιπαντικά Λάδια | | | Το καύσιμο πρέπει να είναι ελεύθερο από χρησιμοποιημένα λιπαντικά έλαια. Το καύσιμο θα θεωρείται ότι περιέχει χρησιμοποιημένα λιπαντικά έλαια όταν μια από τις παρακάτω συνθήκες ισχύουν: | | | | | | | | | | | |
| Ασβέστιο | και | | | | | | | | | | | | | IP 501 ή |
| Ψευδάργυρος | mg/kg | | Ασβέστιο > 30 και Ψευδάργυρος > 15 | | | | | | | | | | | IP 470 |
| ή | | | | | | | | | | | | | | IP 500 |
| Ασβέστιο | και | | Ασβέστιο > 30 και Φώσφορος > 15 | | | | | | | | | | | |
| Φώσφορος | | | | | | | | | | | | | | |

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Οι προδιαγραφές των ναυτιλιακών καυσίμων γίνονται όλο και πιο αυστηρότερες για να επιτύχουν τους στόχους που έχει θέσει η παγκόσμια ναυτιλιακή κοινότητα. Πιο συγκεκριμένα ο στόχος είναι ασφαλείς και περιβαλλοντικά πιο φιλικές θαλάσσιες εμπορευματικές μεταφορές.

Τα ναυτιλιακά καύσιμα αποτελούν τον πιο σημαντικό παράγοντα για την επίτευξη των προαναφερθέντων στόχων.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς ευχαριστούν τους κ.κ Φρ. Κρόκο και Ι. Σαριδάκη για την αμέριστη βοήθεια και συμπαράσταση τους.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

30. Revised MARPOL Annex VI, International Maritime Organization, Protocol of 1997, as amended by resolution MEPC, 176(58), 2008, to amend the International Convention for the Prevention of Pollutions from Ships, 1973, as modified by the protocol of 1978.
31. International Safety Guide for Oil Tankers and Terminals (ISGOTT), 5th edition, ISBN 978-1-85609-291-3.
32. ISO 8217:2010, International Organization for Standardization (ISO), 1 ch. de la Voie-Creuse, Case postale 56, CH-1211 Geneva 20, Switzerland.
33. ISO 8216-1:2010, International Organization for Standardization (ISO), 1 ch. de la Voie-Creuse, Case postale 56, CH-1211 Geneva 20, Switzerland.
5. ISO 8217:2005, International Organization for Standardization (ISO), 1 ch. de la Voie-Creuse, Case postale 56, CH-1211 Geneva 20, Switzerland.

Μελέτη Αστοχίας Οχετών Εισαγωγής Κυρίων Μηχανών Αρματαγωγού

Δ.Γ. Κάραλης, Ν.Ε. Μελανίτης

Πολεμικό Ναυτικό, Σχολή Ναυτικών Δοκίμων, Τομέας Εφαρμοσμένης Μηχανικής & Ναυτικών Υλικών, Εργαστήριο Τεχνολογίας Ναυτικών Υλικών (ETNY)
Τέρμα Λεωφ. Χατζηκυριακού, Πειραιάς 185 39

Abstract. Forensic engineering and failure analysis study is carried out on a broken intake air drain obtained from the internal combustion engine of a navy ship. Current investigation is realized on the basis of the standardized failure analysis techniques including study of the operational history of the failed parts, macroscopic observations, material chemical analysis, material microstructural characterization and fractography of the fractured surfaces. The present investigation conducted in the Hellenic Naval Academy Laboratory of Marine Materials Technology, incorporates forensic engineering principles and pursues the identification of the causes of the structural failure, and the establishment of the relationship between the causes and consequences of failure, within the specific operational environment.

Περίληψη. Στην παρούσα εργασία γίνεται διερεύνηση των αιτιών αστοχίας Οχετού Εισαγωγής Κυρίων Μηχανών Αρματαγωγού πλοίου. Η μελέτη αστοχίας πραγματοποιείται σύμφωνα με τις διεθνώς αναγνωρισμένες τεχνικές που απαιτούνται σε τέτοιου είδους αναλύσεις και αφορούν στη μελέτη του ιστορικού της αστοχίσασας κατασκευής, μακροσκοπικές παρατηρήσεις, μελέτη μικροδομής του υλικού, χημικές αναλύσεις, όπως επίσης και μελέτη των επιφανειών αστοχίας. Η παρούσα εργασία εντάσσεται στην επιστημονική περιοχή του *forensic engineering*, που υπηρετεί το Εργαστήριο Τεχνολογίας Ναυτικών Υλικών, με την οποία επιχειρείται μια ολιστική προσέγγιση των ζητημάτων αστοχίας εξαρτημάτων και κατασκευών και επιδιώκεται η σύνδεση αιτίου και αποτελέσματος.

Λέξεις κλειδιά: Μελέτη Αστοχίας, Διάβρωση Εκτριβής, Μηχανική Κόπωση, Θερμομηχανική Προσομοίωση, Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων, Forensic Engineering

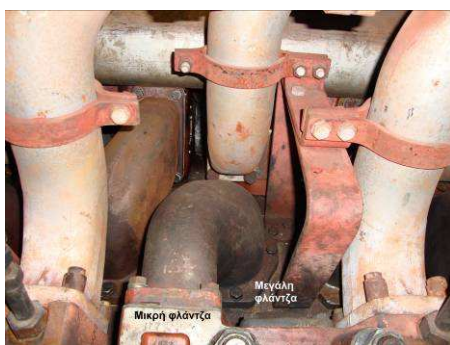
ΓΕΝΙΚΑ

Παρελήφθησε στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Ναυτικών Υλικών (ETNY) της Σχολής Ναυτικών Δοκίμων (ΣΝΔ), ένας ρωγματωμένος οχετός εισαγωγής αέρα κατασκευής Nohab, από την κύρια μηχανή ενός αρματαγωγού (ΑΓ), προς διερεύνηση των αιτιών αστοχίας του. Ο εν λόγω οχετός εισαγωγής εικονίζεται στο σχήμα 1.



ΣΧΗΜΑ 64. Ο οχετός εισαγωγής όπως παρελήφθησε στο ETNY

Ο εν λόγω οχετός, φέρει δύο φλάντζες, μία μεγάλης επιφάνειας και μία μικρότερης. Από επιτόπια παρατήρηση της μηχανής του αρματαγωγού, προέκυψε, πως η μικρή φλάντζα κοχλιώνεται στην κεφαλή της μηχανής, ενώ η μεγάλη φλάντζα κοχλιώνεται στο σώμα της μηχανής και πιο συγκεκριμένα στην έξοδο του ψύκτη αέρα από τον στρόβιλο (intercooler). Η πιο πάνω εγκατάσταση εικονίζεται στο σχήμα 2. Και στους δύο οχετούς, η αστοχία επικεντρωνόταν στις μικρές φλάντζες, η πρόσβαση στις οποίες είναι εγγύτερη και ευκολότερη.



ΣΧΗΜΑ 2. Ο οχετός εισαγωγής κοχλιωμένος στη μηχανή

Το ιστορικό της αστοχίας του εν λόγω οχετού, όπως αυτό κοινοποιήθηκε στο ETNY συνοψίζεται πιο κάτω:

1. Μετά την ολοκλήρωση της επισκευής του Α/Γ και κατά την εκτέλεση δοκιμών εν όρμω και εν πλώ, παρατηρήθηκαν διαφυγές καυσαερίων στις φλάντζες των οχετών,
2. Για την αποφυγή των διαφυγών αυτών, έγιναν επανειλημμένα αλλαγές στα σταθεροποιητικά παρεμβύσματα και επανασυσφίξεις των οχετών από τα στελέχη του πλοίου,
3. Κατά τη διάρκεια των επεμβάσεων αυτών παρουσιάστηκε μία θραύση ενός τμήματος οχετού εξαγωγής καυσαερίων, ενώ μετά από δοκιμές εν πλώ παρουσιάστηκαν επιπλέον ρωγματώσεις σε οκτώ οχετούς εισαγωγής στην μηχανή Νο1 και τέσσερις ρωγματώσεις σε οχετούς εισαγωγής στη μηχανή Νο2,
4. Οι κοχλιώσεις συσφίγγονται από Τεχνικό Προσωπικό του Α/Γ κατά κανόνα με χρήση λάμας αποστάσεως όπως προβλέπεται και από τις οδηγίες του κατασκευαστή,

5. Οι ώρες λειτουργίας των μηχανών ήταν της τάξης των 10000 ωρών. Οι ρωγματοωμένοι οχετοί λειτουργούσαν υπό εσωτερική θερμοκρασία $\sim 70^{\circ}\text{C}$, ενώ γειτνιάζαν με οχετούς που μετέφεραν καυσαέρια θερμοκρασίας $\sim 470^{\circ}\text{C}$ (βλέπε και σχήμα 2),
6. Σύμφωνα με τις πρώτες εκτιμήσεις αρμοδίων στελεχών του πλοίου, πιθανά αίτια για τις διαφυγές των καυσαερίων θα μπορούσαν να θεωρηθούν: α) η υπερφόρτωση των μηχανών, β) η υψηλή θερμοκρασία των καυσαερίων που συνεπάγεται τη μείωση της ζωής των στεγανοποιητικών και γ) οι επανειλημμένες αρμόσεις – εξαρμόσεις των οχετών που προκαλούν παραμορφώσεις στα στεγανοποιητικά παρεμβύσματα,
7. Σύμφωνα με τις βασικές αρχές της θραυστομηχανικής, πιθανά αίτια για τις ρωγματώσεις αποτελούν: α) η κόπωση του υλικού, β) οι θερμικές καταπονήσεις, γ) η ακατάλληλη σύσφιξη, δ) οι πολλαπλές εξαρμόσεις των φλαντζών και στ) ο υπερβάλλων ζήλος του προσωπικού για την ελαχιστοποίηση των διαφυγών,
8. Προς αποφυγή του προβλήματος στο μέλλον, η κατασκευάστρια εταιρεία της μηχανής, πρότεινε να χρησιμοποιούνται: α) ειδικά στεγανοποιητικά παρεμβύσματα, β) να ελέγχεται η επιφάνεια συνδέσμου της φλάντζας προκειμένου να επιτυγχάνεται πλήρης στεγανοποίηση και γ) να εξασφαλίζεται ότι οι οχετοί εισαγωγής και τα πώματα των κυλίνδρων τοποθετούνται με τον ενδεικνυόμενο τρόπο.

Επιπλέον, κατά την επίσκεψη στο Α/Γ, παρατηρήθηκαν τα εξής:

1. Οι περιοχές των ρωγματώσεων εστιάζονται σε εκείνα τα μέρη των φλαντζών των οχετών στα οποία είναι ευκολότερη η πρόσβαση και κατά συνέπεια η σύσφιξη των κοχλιών,
2. Από παρατήρηση στεγανοποιητικού παρεμβύσματος, παρόμοιου αυτών που χρησιμοποιούνται για τη στεγανοποίηση των εν λόγω οχετών, προέκυψε, ότι αυτό παρουσίαζε μη συμμετρική πλαστική παραμόρφωση-συμπίεση, γεγονός που υποδηλώνει εν γένει μη ομοιόμορφη σύσφιξη των φλαντζών ή/και ατελή τοποθέτηση του παρεμβύσματος,
3. Δεν κατέστη δυνατή η ταυτοποίηση των κοχλιών σύμφωνα και με την εργοστασιακή οδηγία,
4. Για τη σύσφιξη των ανωτέρω φλαντζών μέσω κοχλιών, δεν χρησιμοποιήθηκαν δυναμόκλειδα, ούτε υπάρχει προτεινόμενη από τον κατασκευαστή τιμή της ροπής σύσφιξης.

Με βάση τα ανωτέρω, οι προβλεπόμενες εργασίες του ETNY αφορούν σε:

- Μακροσκοπική παρατήρηση του ρωγματοωμένου τεμαχίου και καθαρισμός επιφανειών,
- Οπτικές παρατηρήσεις, με χρήση οπτικού στερεοσκοπίου, επί των επιφανειών του οχετού, κυρίως στην περιοχή αστοχίας αλλά και σε άλλα επιλεγμένα σημεία,
- Θραυστογραφία με χρήση οπτικής και ηλεκτρονικής μικροσκοπίας,
- Μεταλλογραφική ανάλυση της μικροδομής του υλικού σε επιλεγμένα σημεία,
- Μελέτη σκληρότητας και μικροσκληρότητας του υλικού,
- Βιβλιογραφική μελέτη των μηχανισμών αστοχίας.

ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

1. Ο οχετός, φέρει τόσο στην εσωτερική όσο και στην εξωτερική του επιφάνεια σκουρόχρωμες αποθέσεις, αποτέλεσμα της μακρόχρονης λειτουργίας του πάνω στη μηχανή.

2. Ο οχετός δε φέρει μακροσκοπικά πλαστικές παραμορφώσεις ή στρεβλώσεις.
3. Ο οχετός φέρει μεγάλης εκτάσεως διαμπερή ρωγμή. Η ρωγμή βρίσκεται στη μικρή φλάντζα και αναπτύσσεται πάνω στο ράδιο που σχηματίζει η εν λόγω φλάντζα με το κυρίως σώμα του οχετού. Η ρωγμή αυτή, έχει μήκος περίπου 90 mm και εικονίζεται στο σχήμα 3.



ΣΧΗΜΑ 3. Η ρωγμή όπως φαίνεται από την εξωτερική επιφάνεια

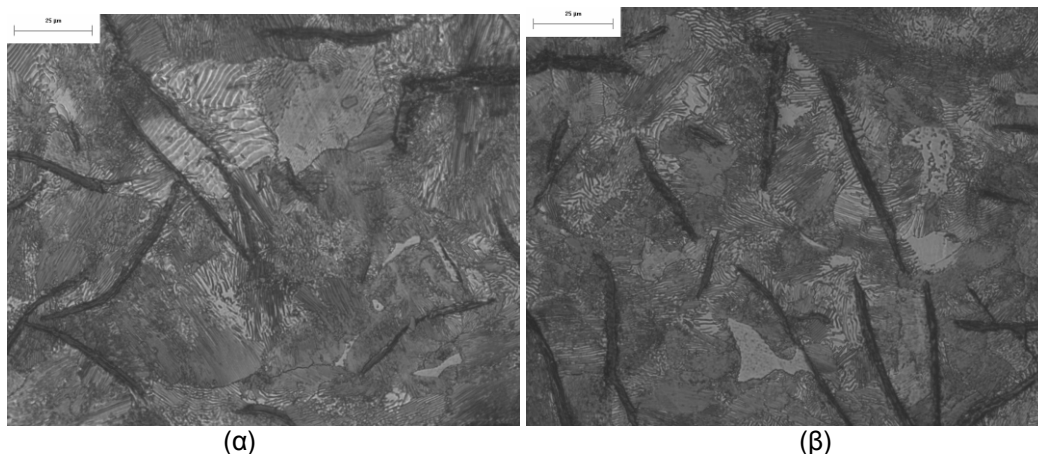
ΜΕΛΕΤΗ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ

Για τη μελέτη της μικροδομής ο εν λόγω οχετός κόπηκε σε επιμέρους κομμάτια με τη βοήθεια βιομηχανικού πριονιού που διαθέτει το ETNY. Μετά το πέρας της κοπής, προέκυψε αποχωρισμός των επιμέρους τεμαχίων επιβεβαιώνοντας το διαμπερή χαρακτήρα της ρωγμής (βλέπε σχήμα 4).



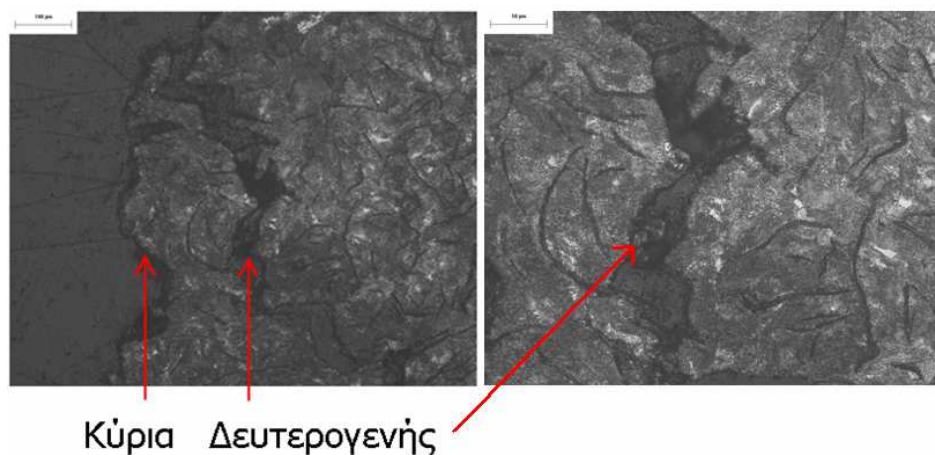
ΣΧΗΜΑ 4. Μέρος της επιφάνειας αστοχίας του οχετού

Για τη μελέτη της μικροδομής έγινε εν συνεχεία, κατάλληλη μεταλλογραφική προετοιμασία των δοκιμίων. Χρησιμοποιήθηκε ρητίνη Struers για τον εγκιβωτισμό των δειγμάτων και οι λειαντικές μηχανές MetaServ (Λείανση & Στίλβωση). Τα λειαντικά χαρτιά μάρκας Struers που χρησιμοποιήθηκαν διαδοχικά ήταν τα 120/220/350/500/800/1200/2400. Ακολούθησαν δύο επίπεδα στίλβωσης με βελούδο και διάλυμα Al_2O_3 . Για τη χημική προσβολή χρησιμοποιήθηκε χημικό αντιδραστήριο Nital 4%. Για τη μελέτη της μικροδομής χρησιμοποιήθηκε οπτικό μικροσκόπιο της εταιρείας ausJENA, κάμερα τύπου FlexCam και το λογισμικό μεταφοράς εικόνας DSCaler v.4.1.15. Η μικροδομή του θραυσμένου οχετού εικονίζεται στο σχήμα 5.



ΣΧΗΜΑ 5. Η μικροδομή του οχετού, κοντά (α) και μακριά (β) από την επιφάνεια αστοχίας

Από το σχήμα 5 προκύπτει ότι το υλικό του οχετού είναι χυτοσίδηρος φυλλοειδούς γραφίτη. Η μήτρα του χυτοσιδήρου αποτελείται από λεπτόκοκκο και χοντρόκοκκο πλακοειδή περλίτη. Επιπλέον, παρατηρείται η ύπαρξη στεαδίτη και καρβιδίων σεμεντίτη. Τοπικά και σε πολύ περιορισμένη έκταση παρατηρήθηκε και γραφίτης μη φυλλοειδούς γεωμετρίας. Η μικροσκληρότητα κοντά στην επιφάνεια αστοχίας μετρήθηκε ίση με 198 ± 8 HV ενώ μακριά από αυτήν ίση 204 ± 8 HV. Πλησίον της κυρίας επιφάνειας αστοχίας παρατηρήθηκε και δευτερογενής μη διαμπερής ρωγμή, πλάτους περίπου 25 μm, όπως εικονίζεται στο σχήμα 6.



ΣΧΗΜΑ 6. Κύρια και δευτερογενής ρωγμή μεγάλου πλάτους

Η ύπαρξη δευτερογενούς-μη διαμπερούς ρωγμής, που αναπτύσσεται προς την εσωτερική επιφάνεια του οχετού, σε μεγάλο βάθος και βρίσκεται πλησίον της κυρίας επιφάνειας αστοχίας, υποδηλώνει ότι, στην περιοχή αστοχίας (ράδιο οχετού) δημιουργήθηκαν κατά τη λειτουργία, ευνοϊκές συνθήκες έναρξης πολλαπλών ρωγμών, μία εκ των οποίων διαδόθηκε σε όλο το πάχος του τεμαχίου οδηγώντας στην τελική αστοχία.

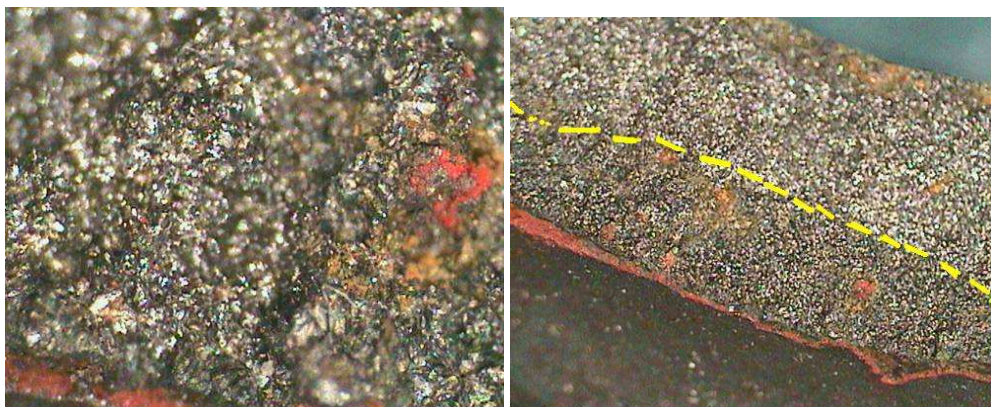
ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΟΧΕΤΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΟΠΤΙΚΟΥ ΣΤΕΡΕΟΣΚΟΠΙΟΥ

Για τη μελέτη των επιφανειών αστοχίας χρησιμοποιήθηκε οπτικό στερεοσκόπιο της εταιρείας Leica, που διατέθηκε από το Εργοστάσιο Τηλεπικοινωνιακών-Ηλεκτρονικών Μέσων (ΕΤΗΜ-ΚΕΤΑ) της Πολεμικής Αεροπορίας μετά από αίτημα του ΕΤΝΥ. Η μελέτη της επιφάνειας θραύσης του οχετού εστιάστηκε στην περιοχή του ραδίου πλησίον της οπής κοχλίωσης της φλάντζας, δεδομένου ότι εκεί παρατηρήθηκαν τα πιο αξιόλογα θραυστογραφικά χαρακτηριστικά. Η εν λόγω περιοχή μελέτης εικονίζεται στο σχήμα 7.



ΣΧΗΜΑ 7. Η περιοχή μελέτης της επιφάνειας αστοχίας

Η επιφάνεια αστοχίας παρουσιάζεται στο σχήμα 8.



ΣΧΗΜΑ 8. Η επιφάνεια αστοχίας

Από τα σχήματα 7 και 8 προκύπτει ότι:

- Η επιφάνεια αστοχίας έχει ψαθυρά χαρακτηριστικά απουσία πλαστικής παραμόρφωσης (σχήματα 7, 8),
- Η επιφάνεια είναι τραχεία, φέρουσα σφαιρικές προεξοχές που παραπέμπουν σε μορφολογία δενδρίτη, αποτέλεσμα των παραμέτρων χύτευσης (σχήμα 8),

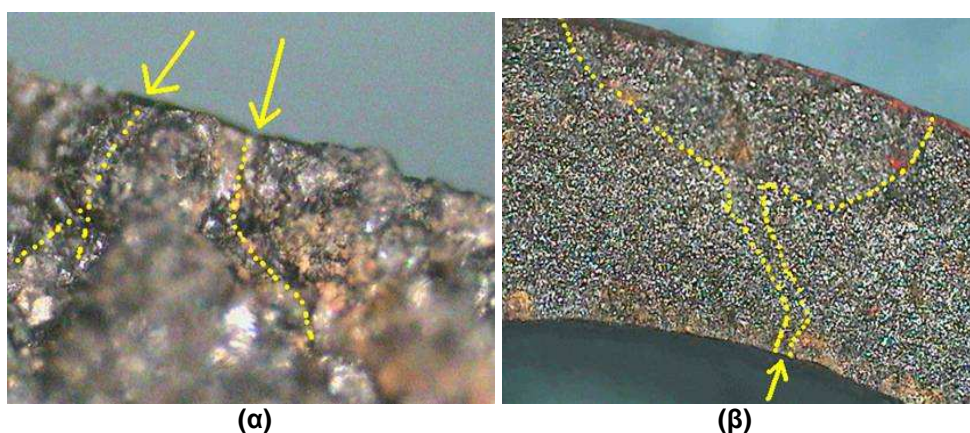
- Η ύπαρξη σκουρόχρωμου μηνίσκου (που οριοθετείται από την εξωτερική επιφάνεια και την κίτρινη καμπύλη, βλέπε και σχήμα 8, κίτρινο όριο), υποδηλώνει ότι η περιοχή του μηνίσκου ήταν εκτεθειμένη για χρονικό διάστημα (που δεν μπορεί να προσδιοριστεί) σε περιβάλλον ατμόσφαιρας. Η περιοχή αυτή του μηνίσκου, αποτελεί την περιοχή, όπου πραγματοποιήθηκε η έναρξης της αστοχίας, το δε σχήμα αυτού παραπέμπει σε αστοχία που οφείλεται σε κόπωση.

Επιπλέον, στην εσωτερική πλευρά του οχετού παρατηρήθηκε εκτεταμένο δίκτυο βελονισμών (οπές αναπτυσσόμενες κάθετα στην επιφάνεια αστοχίας), όπως αυτό εικονίζεται στο σχήμα 9.



ΣΧΗΜΑ 9. Βελονισμοί στην εσωτερική επιφάνεια του οχετού

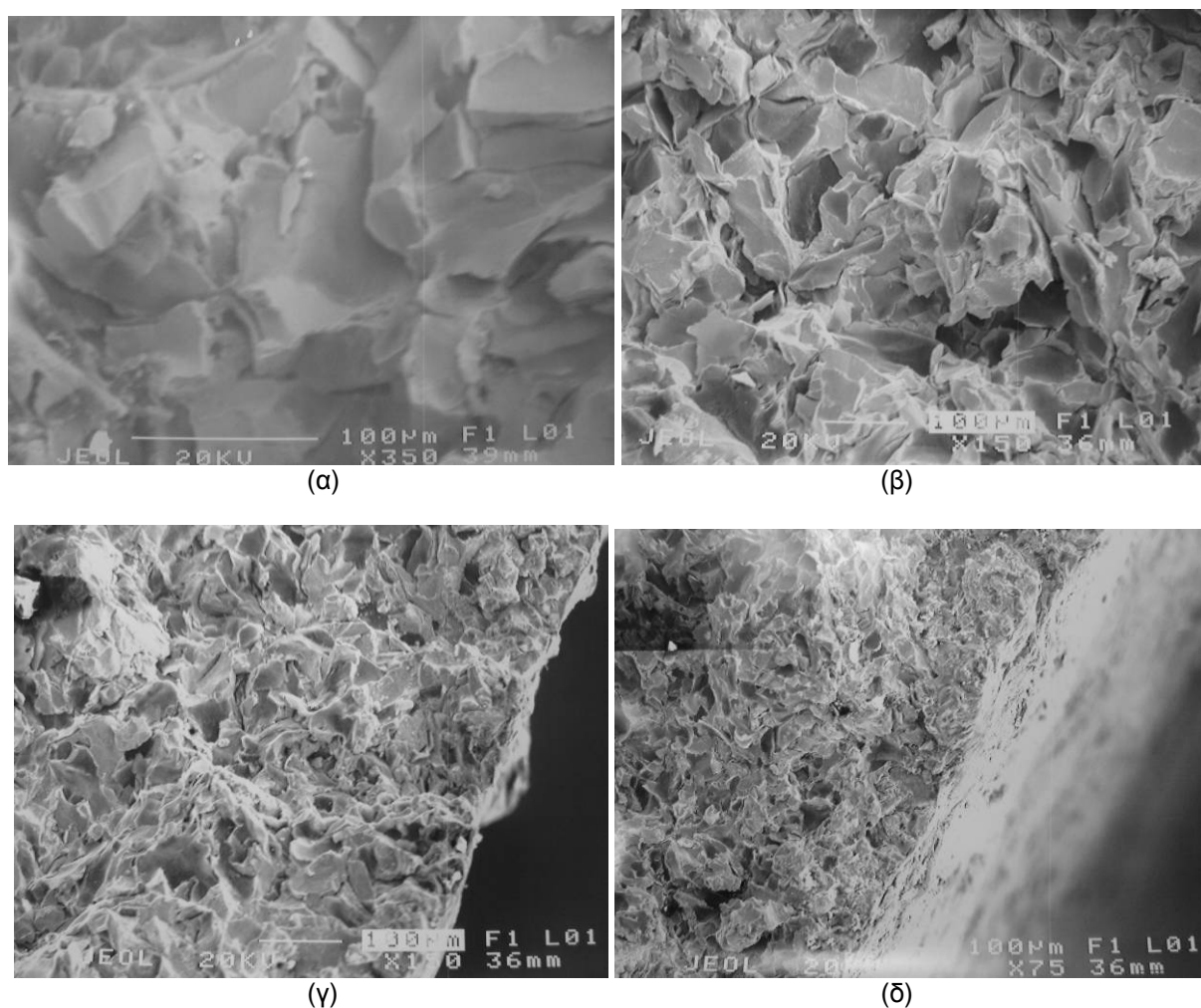
Από παρατήρηση της επιφάνειας αστοχίας (σχήμα 7) προκύπτει, ότι οι βελονισμοί που εκκινούν από την εσωτερική πλευρά του οχετού, διατρέχουν σταδιακά τον οχετό σε όλο του το πλάτος (κατά μήκος της επιφάνειας αστοχίας). Οι βελονισμοί αυτοί εν συνεχεία, συναντούν το μέτωπο αστοχίας που αναπτύσσεται παράλληλα από την εξωτερική επιφάνεια (βλέπε σχήμα 10), συμβάλλοντας έτσι στην αστοχία της διατομής και του οχετού γενικότερα. Η συμβολή των δύο αυτών μετώπων, όταν πραγματοποιηθεί, προκαλεί διαρροή αέρα από τα μέσα προς τα έξω (προς την πλευρά της υποπίεσης). Η πιο πάνω παρατήρηση παρουσιάζεται στο σχήμα 10. Οι βελονισμοί αυτοί οφείλονται σε αποσάθρωση του μετάλλου λόγω της αλληλεπίδρασης του κινούμενου τυρβώδους αέρα με την μεταλλική επιφάνεια του οχετού (erosion – ρευστομηχανική φθορά ή φθορά εκτριβής).



ΣΧΗΜΑ 10. (α) Δίκτυα βελονισμών και (β) συμβολή βελονισμών και μηνίσκου μετώπου αστοχίας (δεξιά)

ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΟΧΕΤΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑΣ

Για τη μελέτη των επιφανειών αστοχίας χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο της εταιρείας Jeol, του Εργοστασίου Τηλεπικοινωνιακών-Ηλεκτρονικών Μέσων (ΕΤΗΜ-ΚΕΤΑ) της Πολεμικής Αεροπορίας μετά από αίτημα του ΕΤΝΥ. Η μελέτη της επιφάνειας θραύσης του οχετού, εστιάστηκε στην περιοχή του ραδίου, πλησίον της σπής κοχλίωσης της φλάντζας, δεδομένου ότι εκεί παρατηρήθηκαν τα πιο αξιόλογα θραυστογραφικά χαρακτηριστικά (όπως και στην §4). Τα αποτελέσματα της μελέτης εικονίζονται στο σχήμα 11.



ΣΧΗΜΑ 11. (α) Εξωτερική επιφάνεια. Διαβρωμένοι κόκκοι και ύπαρξη «οροπεδίων», (β) Μέσον της επιφάνειας αστοχίας, (γ) Εσωτερική επιφάνεια με εκτεταμένο δίκτυο βελονισμών, (δ) Παράπλευρη εσωτερική επιφάνεια φέρουσα βελονισμούς

Από το σχήμα 11 προκύπτουν τα εξής:

- Η επιφάνεια αστοχίας πλησίον της εξωτερικής επιφάνειας, είναι διαβρωμένη, ενώ οι κόκκοι του υλικού έχουν σχήμα «οροπεδίου». Αυτό υποδηλώνει α) επαναληπτική καταπόνηση που οδηγεί σε «άνοιγμα – κλείσιμο» της ρωγμής προκαλώντας

«σμίλευση» των κόκκων που προεξέχουν αλλά και β) έκθεση της εν λόγω επιφάνειας σε διαβρωτικό περιβάλλον (σχήμα 11α). Οι παρατηρήσεις αυτές συνδέονται άμεσα με φαινόμενα κόπωσης,

- Από τα ευρήματα στο κέντρο της επιφάνειας αστοχίας (σχήμα 11β) προκύπτει, πως η διάδοση της ρωγμής είναι μικτού τύπου (περικρυσταλλική και ενδοκρυσταλλική), ενώ η καθαυτού επιφάνεια αστοχίας έχει ψαθυρά χαρακτηριστικά σχισμού,
- Η επιφάνεια αστοχίας κοντά στην εσωτερική πλευρά του οχető, όπως επίσης και η ίδια η εσωτερική επιφάνεια, φέρουν πληθώρα βελονισμών, οι οποίοι αρχόμενοι από την εσωτερική πλευρά, αναπτύσσονται προς την εξωτερική επιφάνεια οχető (σχήματα 11γ-11δ), όπου συμβάλλουν με το μέτωπο κόπωσης που αναπτύσσεται κατά την αντίθετη κατεύθυνση.

Επιπλέον των ανωτέρω παρατηρήσεων, από τη χημική ανάλυση της επιφάνειας αστοχίας με χρήση SEM-EDS προέκυψε ότι ο οχető περιέχει 1.96% κ.β. πυρίτιο (Si) και 0.94% κ.β. μαγγάνιο (Mn). Δεν ανιχνεύτηκε η ύπαρξη χλωρίου (Cl) στην επιφάνεια αστοχίας, στοιχείο που θα μπορούσε να συνδεθεί με μηχανισμό διάβρωσης υπό μηχανική καταπόνηση που οδηγεί σε ρωγμάτωση (stress corrosion cracking).

ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΕΘΝΟΥΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

Διάβρωση εκτριβής (Ρευστομηχανική διάβρωση)

Η διάβρωση εκτριβής ή ρευστομηχανική διάβρωση, ορίζεται ως η προοδευτική απώλεια υλικού από μία στερεή επιφάνεια εξαιτίας της μηχανικής αλληλεπίδρασης μεταξύ της επιφάνειας αυτής και ενός ρευστού. Για το λόγο αυτό, όλα τα στοιχεία μηχανών που είναι εκτεθειμένα σε κινούμενα ρευστά μπορεί να εμφανίσουν διάβρωση εκτριβής. Η διάβρωση εκτριβής, γενικά επιταχύνεται όταν η πίεση, η ταχύτητα και η θερμοκρασία του ρευστού αυξάνονται. Ειδικότερα, η διάβρωση μέσω εκτριβής (ή πρόσκρουσης) οφείλεται κατά κύριο λόγο στις μεγάλες ταχύτητες τυρβώδους ροής του ρευστού. Πράγματι, όταν η ροή του ρευστού είναι μεγάλης ταχύτητας ή η τύρβη τοπικά είναι σημαντική, αυτό έχει ως αποτέλεσμα την καταστροφή των προστατευτικών παθητικών οξειδίων στην επιφάνεια των μετάλλων (εφόσον αυτά υπάρχουν), επιτρέποντας έτσι την περαιτέρω διάβρωσή τους. Εάν το φαινόμενο αυτό διαρκέσει για αρκετό διάστημα, μπορεί να προσκαλέσει τοπική προσβολή και διάβρωση του υλικού σε σημαντικό βαθμό. Η πραγματική προσβολή στο μέταλλο, πραγματοποιείται εξαιτίας τόσο της διαβρωτικής δράσης του ρευστού αλλά και της μηχανικής φθοράς που προκαλείται στο προστατευτικό οξείδιο ή στο μέταλλο λόγω της ίδιας της ροής. Η διάβρωση μέσω εκτριβής, προκαλεί χαρακτηριστικούς βελονισμούς, που στο σύνολό τους θυμίζουν γήινη επιφάνεια, που έχει οργωθεί με αλέτρι ή επιφάνεια που έχει ποδοπατηθεί από άλογα. Η έκταση της διάβρωσης μπορεί εν γένει να είναι ιδιαίτερα μεγάλη. Τα άκρα της περιοχής αυτής εμφανίζουν συνήθως κοιλότητες που δημιουργούνται λόγω του στροβιλισμού της ροής που προκαλείται τοπικά. Η διάβρωση εκτριβής έχει παρατηρηθεί σε συστήματα εξαναγκασμένης ροής ρευστών (με αντλίες ή κυκλοφορητές) τόσο σε υψηλές όσο και χαμηλές θερμοκρασίες ρευστών. Οι δευτερεύοντες παράγοντες που επηρεάζουν το φαινόμενο και την εξέλιξή του είναι η χημική σύσταση του ρευστού και η ύπαρξη κατασκευαστικών χαρακτηριστικών που ευνοούν την ανάπτυξη στροβιλισμών-δινών. Στις περισσότερες εγκαταστάσεις οι ταχύτητες ροής πρέπει είναι γενικά χαμηλές, ώστε τα παθητικά οξείδια στην επιφάνεια του μετάλλου ή και το ίδιο το μέταλλο να μην καταστρέφονται. Καταστροφή όμως μπορεί τοπικά να παρατηρηθεί σε μεγάλο βαθμό στην περίπτωση απότομης αλλαγής της ροής του ρευστού όπως για παράδειγμα σε γωνίες 90 μοιρών ή διασταυρώσεις τύπου Ταυ.

Επιπλέον, οι συνήθεις κατασκευαστικές ατέλειες (κενά μεταξύ συγκολλήσεων, υπολείμματα κατεργασίας, απόβλιττα (γρέζι), αλλαγές διαμετρήματος στις συνδέσεις, νεύρα χύτευσης) έχουν ως αποτέλεσμα την έντονη ανάπτυξη στροβιλισμών με άμεσο αποτέλεσμα τη διαβρωτική φθορά εκτριβής. Μέτρα προστασίας κατά της φθοράς εκτριβής, αφορούν σε μετατροπές στο σύστημα ώστε να μειωθεί η μέση ταχύτητα ροής αλλά και η πιθανότητα ανάπτυξης τύρβης και η χρήση υλικών που είναι ανθεκτικά σε διαβρωτική φθορά εκτριβής. Όσον αφορά στις χυτοσιδηρές κατασκευές, η ροή ρευστού μπορεί να προκαλέσει φθορά εκτριβής. Δύο είναι οι τρόποι για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα αυτό:

1. Να χρησιμοποιηθεί χυτοσίδηρος υψηλής σκληρότητα μέσω δημιουργίας στερεού διαλύματος ή μέσω δημιουργίας σκληρών φάσεων (μαρτενιτικοί χυτοσίδηροι ή λευκοί χυτοσίδηροι). Για παράδειγμα, προσθήκη Πυριτίου (Si) σε επίπεδα 14.5% κ.β. προκαλεί σημαντική αύξηση της σκληρότητας της μήτρας του χυτοσιδήρου. Σε αντίθετη περίπτωση, όπου χρησιμοποιηθεί μαλακός χυτοσίδηρος, η αστοχία είναι αναμενόμενη και επέρχεται σύντομα,
2. Να χρησιμοποιηθεί χυτοσίδηρος με υψηλή αντιδιαβρωτική συμπεριφορά. Αυτή επιτυγχάνεται με προσθήκη Νικελίου (Ni) στο κράμα.

Μηχανική κόπωση

Η αστοχία από κόπωση οφείλεται στη μεταβαλλόμενη καταπόνηση που υφίσταται μια μεταλλική κατασκευή. Η αστοχία, στην περίπτωση αυτή, μπορεί να προέλθει για τιμές της μέγιστης μηχανικής τάσης πολύ χαμηλότερες αυτής της διαρροής του υλικού. Κατά το φαινόμενο της κόπωσης, πραγματοποιείται ρωγμάτωση και εν συνεχεία αστοχία της κατασκευής, μετά από ένα συγκεκριμένο αριθμό εναλλαγών της φόρτισης. Η έναρξη της ρωγμάτωσης προκαλείται συνήθως σε περιοχές όπου το τασικό πεδίο παρουσιάζει τη μέγιστη μεταβολή με τη μέση τάση να παίζει εξίσου σημαντικό ρόλο. Ευνοϊκά σημεία έναρξης ρωγμάτωσης αποτελούν τόσο οι φυσικές ατέλειες της επιφάνειας του υλικού, όπως επίσης και οι κατασκευαστικές ατέλειες, στις οποίες παρατηρείται συγκέντρωση τάσεων. Η συχνότητα της αλλαγής του φορτίου, το περιβάλλον, το μέγεθος και το σχήμα του στοιχείου που παραλαμβάνει τη φόρτιση και οι παραμένουσες τάσεις επηρεάζουν επίσης σημαντικά το φαινόμενο της κόπωσης. Αρχικά, στις πιο ευαίσθητες περιοχές της κατασκευής, αναπτύσσονται εμβρυακές μορφές ρωγμών. Υπό την επίδραση μικρών εφελκυστικών τάσεων «ανοίγουν» και μετατρέπονται σε μικρορωγμές. Στη συνέχεια, λαμβάνει χώρα η επέκταση της ρωγμής, κάθετα στον άξονα εφαρμογής της μέγιστης εφελκυστικής τάσης. Οι διαδοχικές θέσεις του μετώπου της διαδιδόμενης ρωγμής, αντιστοιχούν σε ένα κύκλο κόπωσης, το δε ίχνος που παραμένει στην επιφάνεια αστοχίας αποτελεί το ίχνος κόπωσης (ραβδώσεις). Το τελικό στάδιο αστοχίας συμβαίνει όταν η ρωγμή αποκτήσει επαρκές μήκος, με αποτέλεσμα η διατομή του υλικού να είναι αδύνατο να αντέξει την εφαρμογή του φορτίου. Όταν συμβεί αυτό, η ρωγμή διαδίδεται ακαριαία και το υλικό οδηγείται στην τελική θραύση, που εμφανίζεται στην περιοχή αυτή, σαν όγκιμη (παρασιάζεται σημαντική πλαστική παραμόρφωση). Η τελική επιφάνεια θραύσης είναι πολύ στενή και εμφανίζει την χαρακτηριστική μορφολογία που καλείται «χείλος διάτμησης». Για να διασφαλιστεί η διαρκής αντοχή ενός χυτοσιδηρού τεμαχίου, θα πρέπει τόσο η μεταβολή της τάσης όσο και η μέση τιμή της να βρίσκονται εντός συγκεκριμένων ορίων. Από τα παραπάνω είναι προφανές πόσο επιζήμια μπορεί να είναι η επίδραση της εσφαλμένης σύσφιξης στις κοχλιώσεις, δεδομένου ότι υπέρμετρη σύσφιξη αυξάνει τη μέση (μόνιμη) τάση στον κοχλία και στις συνεργαζόμενες φλάντζες. Στην περίπτωση αυτή, η επιβολή του σταθερού πλάτους τάσης, προερχόμενο από τη λειτουργία της μηχανής, μπορεί να οδηγήσει σε πρόωρη αστοχία από κόπωση των συνεργαζόμενων στοιχείων.

ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα όσα παρουσιάστηκαν πιο πάνω προκύπτει, ότι η αστοχία του οχετού ξεκίνησε από την εξωτερική του επιφάνεια, στην περιοχή του ραδίου, πλησίον των οπών σύσφιξης, εξαιτίας του φαινομένου της κόπωσης. Η κόπωση φαίνεται να προήλθε από μηχανικές ταλαντώσεις στην εν λόγω περιοχή.

Η τυρβώδης ροή του θερμού αέρα στον οχετό προκάλεσε ρευστομηχανική φθορά εκτριβής στα εσωτερικά του τοιχώματα. Η φθορά αυτή αναπτύχθηκε με τη μορφή βελονισμών από την εσωτερική προς την εξωτερική πλευρά του οχετού.

Κάθε βελονισμός αποτελεί εγκοπή, στο βάθος της οποίας λαμβάνει χώρα συγκέντρωση τάσεων. Το αποτέλεσμα είναι, αφενός μεν να αυξάνεται η τοπική τάση, αφετέρου να μειώνεται η άθικτη επιφάνεια του υλικού που παραλαμβάνει τα φορτία, εξαιτίας της επιφάνειας που καταλαμβάνεται από τους ίδιους τους βελονισμούς (αύξηση μέσης τάσης).

Η τελική αστοχία προήλθε από τη συνεργιστική δράση των δύο πιο πάνω φαινομένων (μηχανική κόπωση και φθορά εκτριβής).

Η ενδεχόμενη υπέρμετρη σύσφιξη των κοχλιώσεων, όπως πιθανολογείται ότι πραγματοποιήθηκε αυξάνει την μέση τιμή της μηχανικής καταπόνησης επιταχύνοντας έτσι την αστοχία λόγω κόπωσης, ιδίως δε όταν αυτό συνοδεύεται με ατελή τοποθέτηση παρεμβύσματος. Χαλαρότερη σύσφιξη των κοχλιώσεων δικαιολογεί τις διαφυγές από την περιοχή του παρεμβύσματος, ενώ παράλληλα προκαλεί κακή συνεργασία φλάντζας – κοχλία με ενδεχόμενο αποτέλεσμα, πάλι την εκκίνηση κόπωσης.

Από τα όσα παρουσιάστηκαν στην εν λόγω μελέτη προκύπτει ότι η αστοχία του οχετού προήλθε εξαιτίας της συνεργιστικής δράσης της μηχανικής κόπωσης λόγω μηχανικών ταλαντώσεων και της φθοράς εκτριβής του θερμού αέρα στα εσωτερικά τοιχώματα του αγωγού.

Η εν λόγω μελέτη αστοχίας έχει πλαισιωθεί από πλήρες τρισδιάστατο θερμομηχανικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, που αναπτύχθηκε στο ETNY, το οποίο προσομοιάζει το θραυσμένο οχετό κατά τη λειτουργία, προκειμένου να προσεγγιστεί το επίπεδο των αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών και εναλλαγών των μηχανικών τάσεων. Τα αποτελέσματα του μοντέλου αυτού θα παρουσιαστούν σε μελλοντική ανακοίνωση.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν τον κ. Ι. Σπύρογλου του Εργοστασίου Τηλεπικοινωνιακών-Ηλεκτρονικών Μέσων (ΕΤΗΜ-ΚΕΤΑ) της Πολεμικής Αεροπορίας για τη συμβολή του στη μελέτη των επιφανειών αστοχίας με χρήση οπτικής και ηλεκτρονικής μικροσκοπίας.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. ASM Handbook, Volume 13, Corrosion, © 1987 by ASM International
2. ASM Handbook, Volume 11, Failure Analysis and Prevention, © 2002 by ASM International

3. ASM Handbook, Volume 12, Fractography, © 1987 by ASM International

Πειραματική Διερεύνηση της Επίδρασης των Ιδιοτήτων του Καυσίμου στη Λειτουργία και στις Εκπομπές Ρύπων Κινητήρων Diesel

Θεόδωρος Ζάννης^a

^a*Εργαστήριο Ναυτικών Μηχανών Εσωτερικής Καύσεως, Τομέας Ναυπηγικής και Ναυτικής Μηχανολογίας, Σχολή Ναυτικών Δοκίμων, Τέρμα Λεωφ. Χατζηκυριακού 18539 Πειραιάς*

Abstract. An experimental investigation was performed to identify the effect of diesel fuel synthesis and its physical and chemical properties on DI diesel engine performance characteristics and pollutant emissions. Engine tests were made on a single cylinder naturally aspirated DI diesel engine (Lister LV1) at various operating conditions using nine conventional diesel fuels. The test fuels indicate variable hydrocarbon composition, physical and chemical properties and they were prepared under a European research program aiming to identify future fuel formulations for use in modern DI diesel engines. Emphasis was given to the examination of the effect of diesel fuel density, viscosity and compressibility factor on fuel injection system, engine combustion characteristics and diesel emitted pollutants. The evaluation of experimental results showed that reductions of soot and NO emissions can be attained with reduction of distillation temperature and increase of paraffinics to naphthenics ratio, which provide mainly reduction of fuel viscosity and secondarily, decrease of density and increase of compressibility factor.

Περίληψη. Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται μια λεπτομερής πειραματική διερεύνηση με σκοπό τον προσδιορισμό της επίδρασης της χημικής σύνθεσης και των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων του καυσίμου στα χαρακτηριστικά λειτουργίας και στις εκπομπές ρύπων κινητήρων diesel άμεσης έγχυσης. Πειραματικές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε ένα μονοκύλινδρο κινητήρα άμεσης έγχυσης και φυσικής αναπνοής (Lister LV1) σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας χρησιμοποιώντας εννέα διαφορετικά καύσιμα. Τα καύσιμα δοκιμής εμφανίζουν μεταβλητή σύνθεση σε υδρογονάνθρακες και διαφορετικές φυσικές και χημικές ιδιότητες και παρασκευάστηκαν στα πλαίσια ενός Ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος. Το ερευνητικό πρόγραμμα είχε ως σκοπό τον προσδιορισμό της χημικής σύστασης και των

ιδιοτήτων των καυσίμων που θα χρησιμοποιηθούν στο άμεσο μέλλον στους σύγχρονους κινητήρες diesel. Κατά την διερεύνηση δόθηκε έμφαση στην μελέτη της επίδρασης της πυκνότητας, της συνεκτικότητας και του συντελεστή συμπίεστικότητας στο σύστημα έγχυσης, στα χαρακτηριστικά της καύσης και στους εκπεμπόμενους ρύπους. Η αξιολόγηση των πειραματικών αποτελεσμάτων φανέρωσε ότι μπορούν να επιτευχθούν μειώσεις στις εκπομπές αιθάλης και NO με μείωση της θερμοκρασίας απόσταξης και αύξηση του λόγου παραφινών προς ναφθένες, οι οποίες οδηγούν κυρίως σε μείωση της συνεκτικότητας του καυσίμου και δευτερευόντως, σε μείωση της πυκνότητας και αύξηση του συντελεστή συμπίεστικότητας.

Λέξεις - κλειδιά: diesel, ιδιότητες καυσίμου, λειτουργικές επιδόσεις, εκπομπές ρύπων.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η επιδείνωση του φαινομένου του θερμοκηπίου σε συνδυασμό με τις υψηλές τιμές του πετρελαίου απαιτούν την λήψη δραστικών μέτρων για την περαιτέρω μείωση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου (bsfc) και των εκπομπών ρύπων που εκπέμπονται από πετρελαιοκινητήρες. Μια πολλά υποσχόμενη τεχνική για τη μείωση των αέριων και σωματιδιακών ρύπων είναι η βελτιστοποίηση της χημικής σύνθεσης και των φυσικών ιδιοτήτων των συμβατικών καυσίμων diesel [1,3]. Με τη χρήση αυτής της τεχνικής είναι δυνατή η επίτευξη σημαντικών βελτιώσεων στην περιβαλλοντική συμπεριφορά του στόλου τόσο των νέων όσο και των υφιστάμενων πετρελαιοκίνητων οχημάτων.

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία [1,2,4-23], οι φυσικές και χημικές ιδιότητες του καυσίμου επηρεάζουν με διαφορετικό τρόπο καθένα από τους αερίους και σωματιδιακούς ρύπους που εκπέμπονται από πετρελαιοκινητήρες. Για παράδειγμα έχει αναφερθεί ότι οι εκπομπές CO, HC και αλδευδών εξαρτώνται από τον αριθμό κετανίου του καυσίμου, οι εκπομπές NOx εξαρτώνται κυρίως από την πυκνότητα του καυσίμου ενώ οι πολυαρωματικοί υδρογονάνθρακες και η αιθάλη σχετίζονται άμεσα με το αρωματικό περιεχόμενο του καυσίμου [4,9]. Η σύσταση του καυσίμου diesel σε μονοαρωματικούς, διαρωματικούς και τριαρωματικούς υδρογονάνθρακες όπως επίσης και σε αρωματικές ενώσεις επηρεάζει άμεσα τις φυσικές και χημικές ιδιότητες και έτσι διαμορφώνει την τάση του για παραγωγή αερίων και σωματιδιακών ρύπων κατά την καύση του σε πετρελαιοκινητήρες [1,2,4-9,13,14,16,17,24-26]. Γενικά, υπάρχει μια αλληλεπίδραση μεταξύ της μοριακής δομής (παραφίνες, ολεφίνες, ναφθένες και αρωματικοί υδρογονάνθρακες), των χημικών (αριθμός κετανίου, σημείο ανάφλεξης κ.λ.π.) και των φυσικών ιδιοτήτων (πυκνότητα, συνεκτικότητα, επιφανειακή τάση κ.λ.π.) του καυσίμου diesel [1,2,4-9,13,14,16,17,24-27]. Συνεπώς είναι αρκετά δύσκολο – αν όχι αδύνατο – να αποδοθούν οι μεταβολές που παρατηρούνται στη λειτουργική συμπεριφορά και στις εκπομπές ρύπων κατά την αντικατάσταση ενός καυσίμου diesel από ένα άλλο, στη μεταβολή μιας και μόνο παραμέτρου του καυσίμου.

Στο παρελθόν έχουν πραγματοποιηθεί διάφορες θεωρητικές και πειραματικές διερευνήσεις με σκοπό την εξέταση της επίδρασης των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων των συμβατικών καυσίμων στις εκπομπές ρύπων, οι οποίες εκπέμπονταν από διάφορους τύπους πετρελαιοκινητήρων και πετρελαιοκίνητων οχημάτων [1,2,4-26]. Η εξέταση αυτών των διερευνήσεων κατέληξε στην διατύπωση των ακόλουθων γενικών συμπερασμάτων σχετικά με την επίδραση των ιδιοτήτων των καυσίμων στις εκπομπές ρύπων:

- a. Η μείωση του ποσοστού σε θείο και του αρωματικού περιεχομένου (ειδικά των πολυαρωματικών υδρογονανθράκων) οδήγησε σε σημαντική μείωση των εκπεμπόμενων σωματιδίων.

- b. Οι εκπομπές NOx εμφάνισαν χαμηλή ευαισθησία στις μεταβολές των ιδιοτήτων του καυσίμου.

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία [1,2,4-26], το είδος και ο βαθμός επίδρασης του καυσίμου στα χαρακτηριστικά λειτουργίας και στις εκπομπές ρύπων πετρελαιοκινητήρων μεταβάλλεται σημαντικά ανάλογα με τον τύπο του κινητήρα που χρησιμοποιείται στα πειράματα, την πειραματική διαδικασία που ακολουθείται και την μέθοδο που χρησιμοποιείται για την παρασκευή των καυσίμων. Ακόμη σε προηγούμενες διερευνήσεις χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές μέθοδοι για την στατιστική συσχέτιση των εκπεμπόμενων ρύπων και των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων του καυσίμου [24,27]. Παρολαυτά, αυτές οι προσεγγίσεις δεν κατάφεραν να περιγραφούν επαρκώς τις συσχετίσεις μεταξύ των εκπομπών ρύπων και της χημικής σύστασης και των ιδιοτήτων του καυσίμου.

Για το λόγο αυτό, πραγματοποιείται μια αναλυτική πειραματική διερεύνηση με σκοπό την εξέταση της επίδρασης της χημικής σύνθεσης και των ιδιοτήτων του καυσίμου στις λειτουργικές επιδόσεις και στις εκπομπές ρύπων κινητήρων diesel άμεσης έγχυσης. Στα πλαίσια αυτής της διερεύνησης πραγματοποιήθηκαν πειραματικές δοκιμές σε ένα μονοκύλινδρο κινητήρα φυσικής αναπνοής (Lister LV1) στις 2500 σαλ και σε διάφορα φορτία χρησιμοποιώντας εννέα διαφορετικά καύσιμα. Τα καύσιμα δοκιμής παρασκευάστηκαν στα πλαίσια ενός Ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος το οποίο είχε στόχο την εξέταση της επίδρασης των φυσικών ιδιοτήτων του καυσίμου στα χαρακτηριστικά λειτουργίας και στις εκπομπές ρύπων κινητήρων diesel άμεσης έγχυσης. Τα εννέα αυτά καύσιμα εμφανίζουν διαφορετική επιφανειακή τάση, πυκνότητα, συνεκτικότητα και συντελεστή συμπίεσότητας. Η αξιολόγηση των πειραματικών ευρημάτων έδειξε ότι είναι εφικτή η ταυτόχρονη μείωση της αιθάλης, του μονοξειδίου του αζώτου (NO) και του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) με μείωση της συνεκτικότητας του καυσίμου και ταυτόχρονη αύξηση του συντελεστή συμπίεσότητας.

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Διατάξεις για την παρακολούθηση και τον έλεγχο των παραμέτρων λειτουργίας εγκαταστάθηκαν σε ένα μονοκύλινδρο πειραματικό κινητήρα Lister LV1. Αυτός είναι ένας τετράχρονος, αερόψυκτος κινητήρας φυσικής αναπνοής και άμεσης έγχυσης με θάλαμο καύσης του οποίου το έμβολο φέρει κοίλη διαμόρφωση. Ο κινητήρας έχει διάμετρο κυλίνδρου 85.73 mm, διαδρομή εμβόλου 82.55 mm και λόγος μήκους διωστήρα προς ακτίνα στροφάλου 3.6. Η σχέση συμπίεσης του κινητήρα είναι 18:1 και το ονομαστικό εύρος στροφών κυμαίνεται από 1000 έως 3000 σαλ. Το καύσιμο εγχύεται στον κύλινδρο μέσω ενός εγχυτήρα τριών οπών (διάμετρος οπής 250 μm), ο οποίος βρίσκεται κοντά στο κέντρο του θαλάμου καύσης και έχει πίεση ανοίγματος 180 bar. Ο κινητήρας είναι συνεζευγμένος με ένα υδραυλικό δυναμόμετρο Heenan & Froude [3,26].

Τα βασικά μετρητικά όργανα ήταν: ένα παροχόμετρο αέρα Alcock (ιξώδους τύπου), δεξαμενές και ροόμετρα για το καύσιμο, αισθητήρες θερμοκρασίας για την μέτρηση της θερμοκρασίας καυσαερίων, αέρα εισαγωγής, λιπαντικού λαδιού και νερού ψύξης, ένας μαγνητικός ενδείκτης άνω νεκρού σημείου, ένας ενδείκτης ταχύτητας περιστροφής και ένας πιεζοηλεκτρικός μετατροπέας για την μέτρηση της πίεσης στο θάλαμο καύσης [3,26]. Ένας παρόμοιος πιεζοηλεκτρικός μετατροπέας τοποθετήθηκε στο σωλήνα υψηλής πίεσης του καυσίμου (μεταξύ αντλίας και εγχυτήρα) πλησίον του εγχυτήρα. Ακόμη χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα ταχείας δειγματοληψίας για την καταγραφή των σημάτων πίεσης από τους πιεζοηλεκτρικούς μετατροπείς.

Επιπρόσθετα, χρησιμοποιήθηκαν αναλυτές καυσαερίων για την μέτρηση της αιθάλης, του μονοξειδίου του αζώτου (NO), των ακαύστων υδρογονανθράκων (HC) (ισοδύναμο προπάνιο) και του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) στην εξαγωγή του κινητήρα. Ένας αναλυτής τύπου Bosch RTT100 χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση των επιπέδων αιθάλης στα καυσαέρια ενώ οι

εκπομπές NO μετρήθηκαν με έναν αναλυτή χημικοφωταύγειας τύπου Signal και οι εκπομπές HC μετρήθηκαν με έναν αναλυτή ιονισμού φλόγας. Οι δυο τελευταίες συσκευές ήταν εξοπλισμένες με θερμοστατικά ελεγχόμενες θερμαινόμενες γραμμές. Τέλος, οι εκπομπές CO μετρήθηκαν με έναν αναλυτή υπέρυθρης ακτινοβολίας τύπου Signal.

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

Τα καύσιμα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη παρασκευάστηκαν στα πλαίσια ενός Ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος το οποίο είχε ως σκοπό τον προσδιορισμό καυσίμων, τα οποία θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν από μελλοντικούς πετρελαιοκινητήρες [28]. Ο βασικός σκοπός του προγράμματος ήταν ο προσδιορισμός των βέλτιστων φυσικών ιδιοτήτων καυσίμου έτσι ώστε να επιτευχθεί περαιτέρω μείωση των εκπομπών ρύπων χωρίς παράλληλα να επηρεασθεί ή αν είναι δυνατό να μειωθεί περαιτέρω η ειδική κατανάλωση καυσίμου στους σύγχρονους κινητήρες diesel.

Κατά συνέπεια, παρασκευάστηκαν επτά καύσιμα με διαφορετικό μοριακό τύπο με κύριο σκοπό την μελέτη της επίδρασης της επιφανειακής τάσης, της πυκνότητας, της συνεκτικότητας και του συντελεστή συμπίεστικότητας στα χαρακτηριστικά λειτουργίας και στις εκπομπές ρύπων κινητήρων diesel. Αρχικά, επιλέγησαν οι προδιαγραφές ενός καυσίμου αναφοράς, το οποίο ονομάστηκε «βασικό καύσιμο». Αυτό το καύσιμο χρησιμοποιήθηκε και για την παρασκευή και των υπολοίπων καυσίμων. Τα βασικά χαρακτηριστικά του «βασικού καυσίμου», το οποίο επιλέχθηκε να είναι πετρέλαιο που διατίθεται εμπορικά στις πόλεις της Φινλανδίας κατά τους θερινούς μήνες (Finnish summer grade city diesel) είναι τα εξής:

- Πυκνότητα: 820 – 840 kg/m³.
- Συνεκτικότητα: 2 – 4 mm²/s.
- Αριθμό Κετανίου: μεγαλύτερο από 55.
- Συνολικό Αρωματικό Περιεχόμενο: γύρω στο 20%κ.β.
- Πολυαρωματικό Περιεχόμενο: λιγότερο από 5%κ.β.
- Ποσοστό σε Θείο: 20 ppm.
- Θερμοκρασία Απόσταξης Καυσίμου 50%κ.ο: περί τους 265°C.
- Θερμοκρασία Απόσταξης Καυσίμου 95%κ.ο: περί τους 360°C.
- Είδους Πρόσθετου: Μόνο πρόσθετο αύξησης αριθμού κετανίου και βελτιωτικό λιπαντικής ικανότητας καυσίμου.

Κατόπιν παρασκευάστηκε μια σειρά από οκτώ συμβατικά καύσιμα με τιμές πυκνότητας που κυμαίνονταν από 800 ως 850 kg/m³, τιμές συνεκτικότητας που κυμαίνονταν από 1.5 ως 5 mm²/s και τιμές συντελεστή συμπίεστικότητας που κυμαίνονταν από 6.6 ως 7.05x10⁻⁵ bar⁻¹. Η χημική σύνθεση, οι χημικές και οι φυσικές ιδιότητες των καυσίμων δοκιμής παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Σε αυτό το σημείο είναι απαραίτητο να εντοπίσουμε τις βασικές διαφορές στη χημική σύνθεση και στις φυσικοχημικές ιδιότητες μεταξύ των καυσίμων D11 – D13, D14-D15, D16-D17 και D18-D19:

- 1) Τα καύσιμα D12 και D13 (συμπεριλαμβανομένου του βασικού καυσίμου) παρασκευάστηκαν με σκοπό την εξέταση της επίδρασης της επιφανειακής τάσης στη λειτουργία και στις εκπομπές ρύπων κινητήρων diesel. Τα δυο νέα καύσιμα θα προέκυπταν από την ανάμιξη του βασικού καυσίμου με το ειδικό πρόσθετο, το οποίο προκαλεί μείωση της επιφανειακής τάσης.
- 2) Σύμφωνα με το σχεδιασμό του ερευνητικού προγράμματος “NEDENEF”, τα καύσιμα D14 και D15 ονομάζονται «Καύσιμα Μεταβλητής Πυκνότητας» (“Density Fuels”) διότι παρασκευάστηκαν κατά τρόπο ώστε να μεταβάλλεται η πυκνότητα τους και οι υπόλοιπες φυσικές και χημικές τους ιδιότητες να παραμένουν σταθερές. Παρολαυτά, όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.1, η αύξηση της πυκνότητας συνοδεύτηκε από αύξηση της συνεκτικότητας και μείωση του συντελεστή συμπίεστικότητας. Υπεύθυνες για τις προαναφερθείσες μεταβολές των τριών φυσικών ιδιοτήτων είναι η αντικατάσταση ενός

ποσοστού των παραφινών του καυσίμου D14 από ναφθένες (καύσιμο D15) και η αύξηση της θερμοκρασίας απόσταξης (distillation temperature) μέσω προσθήκης κατάλληλου πρόσθετου στο καύσιμο D14.

- 3) Τα καύσιμα D16 και D17 ονομάζονται «Καύσιμα Μεταβλητής Συνεκτικότητας» (“Viscosity Fuels”) διότι παρασκευάστηκαν ώστε να μεταβάλλεται μόνο η συνεκτικότητα τους. Παρολαυτά, και σε αυτή την περίπτωση, η αύξηση της συνεκτικότητας συνοδεύτηκε από αύξηση της πυκνότητας και μείωση του συντελεστή συμπίεστικότητας. Υπεύθυνη για τις προαναφερθείσες μεταβολές των τριών φυσικών ιδιοτήτων είναι η αύξηση της θερμοκρασίας απόσταξης αφού η μερική υποκατάσταση του παραφινικού περιεχομένου του καυσίμου D16 από ναφθένες ήταν πολύ πιο περιορισμένη (3% κ.β.) σε σχέση με εκείνη του ζεύγους καυσίμων D14 & D15 (19% κ.β.).
- 4) Τα καύσιμα D18 και D19 ονομάζονται «Καύσιμα Μεταβλητής Συμπίεστικότητας» (“Compressibility Fuels”) διότι παρασκευάστηκαν με γνώμονα να μεταβάλλεται μόνο ο συντελεστής συμπίεστικότητας τους. Εντούτοις, οι τιμές συμπίεστικότητας και πυκνότητας των καυσίμων D18 & D19 είναι σχεδόν ίδιες. Η μετάβαση από το καύσιμο D18 στο D19 συνοδεύεται από μείωση της συνεκτικότητας κατά 8% περίπου και μερική αντικατάσταση κατά 6%κ.β του ποσοστού παραφινών από ναφθένες.

Επομένως, τα ζεύγη καυσίμων D14 – D15 και D16 – D17 μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξέταση της συνδυασμένης επίδρασης της πυκνότητας, της συνεκτικότητας και του συντελεστή συμπίεστικότητας στη λειτουργική συμπεριφορά και στις εκπομπές ρύπων αξιοποιώντας σχετικές πειραματικές μετρήσεις από τον κινητήρα Lister LV1. Η εξέταση των πειραματικών ευρημάτων για το ζεύγος καυσίμων D18 – D19 θα βοηθήσει στην κατανόηση της επίδρασης που έχει η μικρή μείωση της συνεκτικότητας λόγω της μερικής υποκατάστασης των παραφινών από ναφθένες.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1. Χημική σύνθεση και φυσικοχημικές ιδιότητες συμβατικών καυσίμων με μεταβλητές φυσικές ιδιότητες

| Καύσιμο | | DI1 | DI2 | DI3 | DI4 | DI5 | DI6 | DI7 | DI8 | DI9 |
|--|------------------|------------------|-----------------------------|-----------------------------|--|--|---|---------------------------------------|--|---|
| Περιγραφή | Μέθοδος Μέτρησης | «Βασικό» καύσιμο | «Βασικό» καύσιμο + πρόσθετο | «Βασικό» καύσιμο + πρόσθετο | Παραφίνες + Πρόσθετο χαμηλής θερμ. απόσταξης | Ναφθениκοί + Πρόσθετο υψηλής θερμ. απόσταξης | «Βασικό» καύσιμο + Πρόσθετο χαμηλής θερμ. απόσταξης | Καύσιμο υψηλής θερμοκρασίας απόσταξης | «Βασικό» καύσιμο + Πρόσθετο πλούσιο σε παραφίνες | «Βασικό» καύσιμο + Πρόσθετο πλούσιο σε ναφθένες |
| Μονοαρωματικοί Y/A [%κ.β] | Τροπ. IP 391/95 | 19.9 | 19.9 | 19.9 | 15.3 | 14.6 | 15.7 | 14.4 | 14.8 | 14.4 |
| Διαρωματικοί Y/A [%κ.β] | Τροπ. IP 391/95 | 2.2 | 2.2 | 2.2 | 1.1 | 1.3 | 0.7 | 1.3 | 1.7 | 1.7 |
| Πολυαρωματικοί Y/A [%κ.β] | Τροπ. IP 391/95 | 2.4 | 2.4 | 2.4 | 1.2 | 1.5 | 0.8 | 1.7 | 1.8 | 1.9 |
| Συνολικοί Αρωματικοί Y/A [%κ.β] | Τροπ. IP 391/95 | 22.3 | 22.3 | 22.3 | 16.5 | 16.0 | 16.5 | 16.1 | 16.6 | 16.3 |
| Παραφίνες [%κ.β] | ASTM D2425 | 40.1 | 40.1 | 40.1 | 53.0 | 33.5 | 40.7 | 37.5 | 46.2 | 40.8 |
| Ναφθένες [%κ.β] | ASTM D2425 | 40.1 | 40.1 | 40.1 | 32.2 | 52.7 | 45.3 | 48.6 | 39.1 | 44.6 |
| Αρωματικοί Y/A [%κ.β] | ASTM D2549 | 19.8 | 19.8 | 19.8 | 14.8 | 13.8 | 14.0 | 13.9 | 14.7 | 14.6 |
| Πυκνότητα, 15°C, [kg/m ³] | ISO 3675 | 833.7 | 833.7 | 833.7 | 817.2 | 839.3 | 818.8 | 837.7 | 827.7 | 830.0 |
| Θερμ. Απόσταξης 5%κ.ο [°C] | ISO 3405 | 208.0 | 208.0 | 208.0 | 208.7 | 219.9 | 194.1 | 227.2 | 210.8 | 210.5 |
| Θερμ. Απόσταξης 50%κ.ο [°C] | ISO 3405 | 270.2 | 270.2 | 270.2 | 246.0 | 299.1 | 223.2 | 319.4 | 273.4 | 261.3 |
| Θερμ. Απόσταξης 95%κ.ο [°C] | ISO 3405 | 347.9 | 347.9 | 347.9 | 311.8 | 347.2 | 301.1 | 380.2 | 340.5 | 344.1 |
| Αριθμός Κετανίου | ISO 5165 | 53.3 | 54.4 | 54.5 | 53.3 | 56.1 | 50.9 | 57.5 | 54.8 | 54.7 |
| Συνεκτικότητα, 40°C, [mm ² /s] | ISO 3104 | 2.94 | 2.94 | 2.94 | 2.22 | 3.88 | 1.80 | 4.81 | 2.97 | 2.74 |
| Επιφανειακή Τάση, 20°C, [mN/m] | ASTM D 971 | 28.0 | 26.5 | 25.1 | 28.1 | 29.4 | 28.1 | 29.7 | 28.8 | 28.9 |
| Θερμογόνος Δύναμη [MJ/kg] | ISO 1928 | 43.03 | 43.03 | 43.03 | 43.41 | 43.00 | 42.92 | 43.22 | 43.31 | 43.22 |
| Συμπιεστότητα. 490 bar, [x10 ⁻⁵ bar ⁻¹] | IFP | 6.22 | - | 6.15 | 6.41 | 6.00 | 6.49 | 5.93 | 6.23 | 6.23 |
| Συμπιεστότητα, 60 bar, 20°C [x10 ⁻⁵ bar ⁻¹] | FEV | 6.81 | 6.75 | 6.75 | 7.04 | 6.62 | 7.04 | 6.60 | 6.81 | 6.80 |
| Λόγος C/H | ASTM D5291 | 6.1 | 6.1 | 6.1 | 6.0 | 6.14 | 6.14 | 6.14 | 6.04 | 6.07 |

Διαδικασία εκτέλεσης πειραματικών μετρήσεων

Πραγματοποιήθηκαν πειραματικές δοκιμές σε σταθερή ταχύτητα περιστροφής ίση με 2500 σαλ και σε τέσσερα διαφορετικά φορτία (20, 40, 60 και 80% του πλήρους φορτίου). Όλες οι μετρήσεις ελήφθησαν διατηρώντας σταθερή στατική προπορεία έγχυσης. Επίσης κατεβλήθη προσπάθεια να πραγματοποιηθούν τα πειράματα χωρίς σημαντικές διακυμάνσεις στην θερμοκρασία του αέρα εισαγωγής και στην θερμοκρασία του λιπαντικού ελαίου ως μια μέθοδος αποφυγής της εμφάνισης διακυμάνσεων στη λειτουργία του κινητήρα και κυρίως, στην φόρτιση του κινητήρα. Η πειραματική διαδικασία αποτελείται από τα ακόλουθα δυο βήματα:

- 1) Αρχικά πραγματοποιήθηκαν δοκιμές στις 2500 σαλ και σε όλα τα φορτία που εξετάζονται εδώ χρησιμοποιώντας μόνο το «βασικό καύσιμο». Σε κάθε σημείο λειτουργίας, καταγράφονταν οι τιμές διαφόρων παραμέτρων λειτουργίας του κινητήρα όπως η κατανάλωση καυσίμου, οι πιέσεις καύσης και έγχυσης όπως επίσης και οι εκπομπές ρύπων. Κατά αυτό τον τρόπο διαμορφώθηκε η «καμπύλη αναφοράς λειτουργίας» του κινητήρα (engine baseline operation).
- 2) Η προηγούμενη διαδικασία επαναλήφθηκε για τις ίδιες συνθήκες λειτουργίας με τον κινητήρα να τροφοδοτείται σταδιακά με τα καύσιμα DI2 έως DI9.

Κατά τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών, καταγράφονταν σε κάθε σημείο λειτουργίας οι ακόλουθες παράμετροι:

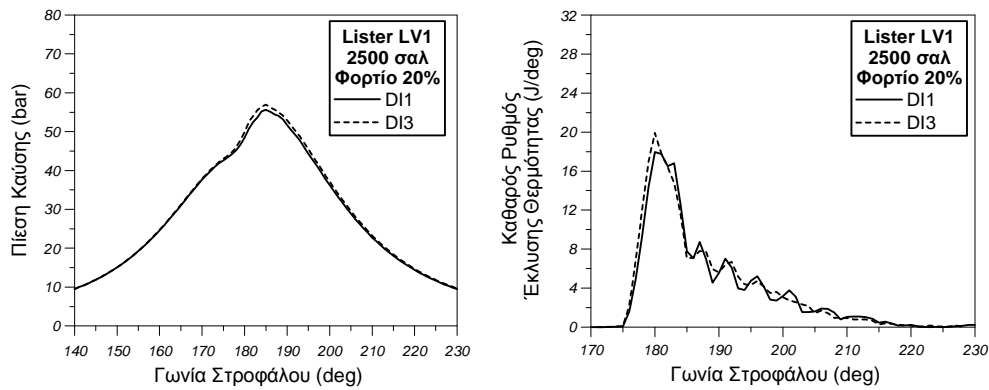
- Πίεση καύσης.
- Πίεση έγχυσης στο σωλήνα υψηλής πίεσης του καυσίμου.
- Θερμοκρασία καυσαερίων.
- Κατανάλωση καυσίμου.
- Εκπομπές αιθάλης, NO, CO και HC.

Οι μετρήσεις πίεσης καύσης (πολλοί επαναλαμβανόμενοι κύκλοι) και πίεσης έγχυσης αναλύθηκαν χρησιμοποιώντας ένα υπολογιστικό κώδικα επεξεργασίας, ο οποίος έχει αναπτυχθεί από τον συγγραφέα [3,26]. Η ανάλυση των προαναφερθέντων μετρήσεων πίεσης παρείχε πληροφορίες σχετικά με την μέγιστη πίεση καύσης, τον ρυθμό έκλυσης θερμότητας, το σημείο ανάφλεξης και τη διάρκεια της καύσης.

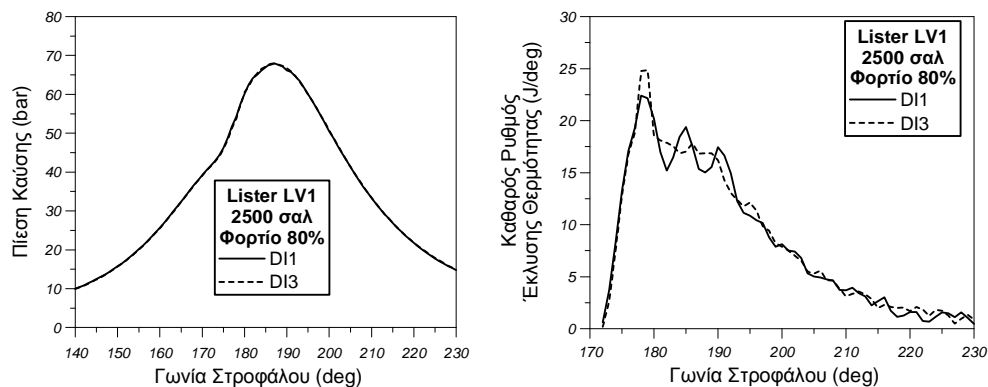
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

Επίδραση της Επιφανειακής Τάσης του Καυσίμου στη Λειτουργία & στις Εκπομπές Ρύπων Κινητήρων Diesel

Για να εξετασθεί η επίδραση της επιφανειακής τάσης καυσίμου, αξιοποιούνται πειραματικά αποτελέσματα που ελήφθησαν για τα καύσιμα DI1, DI2 και DI3. Αυτά τα καύσιμα εμφανίζουν διαφορετικές τιμές επιφανειακής τάσης (28.0, 26.5 και 25.1 mN/m αντίστοιχα) ενώ η χημική τους σύσταση (αναλογία παραφινικών, ναφθενικών και αρωματικών υδρογονανθράκων) είναι ίδια και διατηρούν σταθερές τις υπόλοιπες φυσικές τους ιδιότητες. Στα Σχήματα 1(α) και 1(β) παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα για την πίεση καύσης και τον καθαρό ρυθμό έκλυσης θερμότητας (net heat release rate) στις 2500 σαλ και στο 40% και 80% του πλήρους φορτίου για τα καύσιμα DI1 και DI3, τα οποία και εμφανίζουν τις ακραίες τιμές επιφανειακής τάσης. Όπως παρατηρείται, η επίδραση της επιφανειακής τάσης στην πίεση καύσης και στο ρυθμό καύσης του καυσίμου είναι σχεδόν αμελητέα.

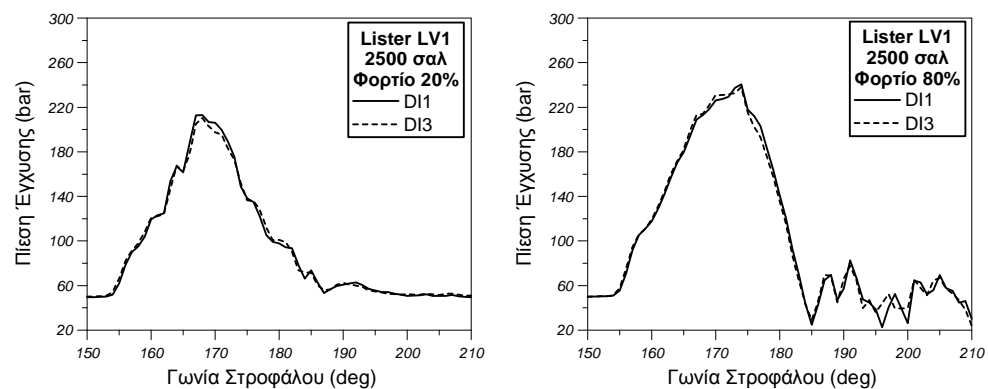


ΣΧΗΜΑ 1(α). Επίδραση της επιφανειακής τάσης καυσίμου στην μετρημένη πίεση καύσης και στον ρυθμό έκλυσης θερμότητας. Τα πειραματικά αποτελέσματα ελήφθησαν από τον κινητήρα Lister LV1 στις 2500 σαλ και στο 20% του πλήρους φορτίου.

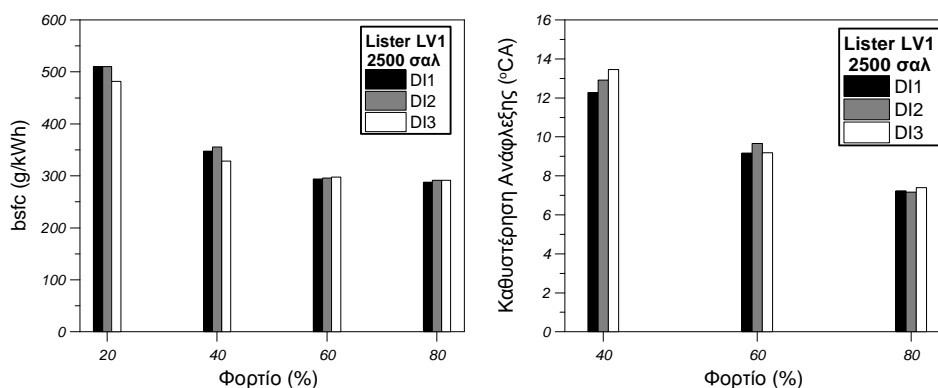


ΣΧΗΜΑ 1(β). Επίδραση της επιφανειακής τάσης καυσίμου στην μετρημένη πίεση καύσης και στο ρυθμό έκλυσης θερμότητας. Τα πειραματικά αποτελέσματα ελήφθησαν από τον κινητήρα Lister LV1 στις 2500 σαλ και στο 80% του πλήρους φορτίου.

Στο Σχήμα 1(γ) δίνονται πειραματικά αποτελέσματα για την πίεση έγχυσης στις 2500 σαλ και σε δυο διαφορετικά φορτία του κινητήρα (20% και 80% του πλήρους φορτίου). Όπως διαπιστώνεται η επιφανειακή τάση του καυσίμου δεν έχει σημαντική επίδραση στη μετρημένη πίεση έγχυσης. Η επίδραση της επιφανειακής τάσης στην ειδική κατανάλωση καυσίμου και στην καθυστέρηση ανάφλεξης παρουσιάζεται στο Σχήμα 1(δ). Παρατηρείται μια μικρή μείωση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου με τη μείωση της επιφανειακής τάσης κυρίως στα χαμηλά φορτία του κινητήρα ενώ για υψηλότερες τιμές του φορτίου του κινητήρα (60% και 80%) η επίδραση γίνεται αμελητέα. Όσον αφορά την καθυστέρηση ανάφλεξης, μπορεί να λεχθεί ότι η διαφορά μεταξύ των καυσίμων DI1 και DI3 μειώνεται προοδευτικά καθώς το φορτίο του κινητήρα αυξάνεται.

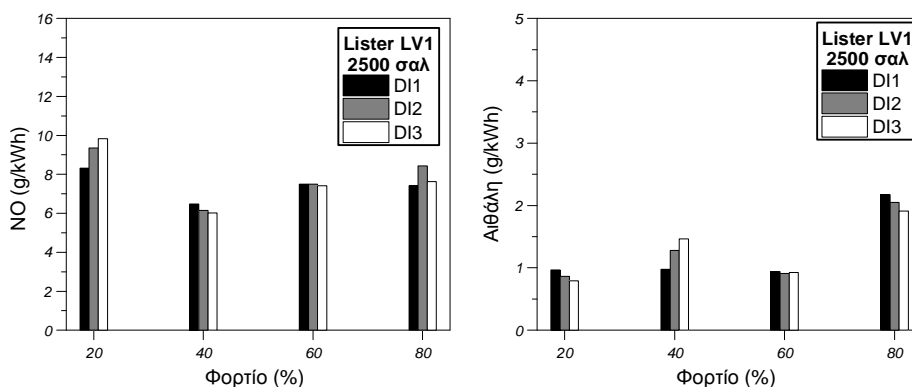


ΣΧΗΜΑ 1(γ). Επίδραση της επιφανειακής τάσης καυσίμου στη μετρημένη πίεση έγχυσης. Τα πειραματικά αποτελέσματα ελήφθησαν από τον κινητήρα Lister LV1 στις 2500 σαλ και στο 20% και 80% του πλήρους φορτίου.

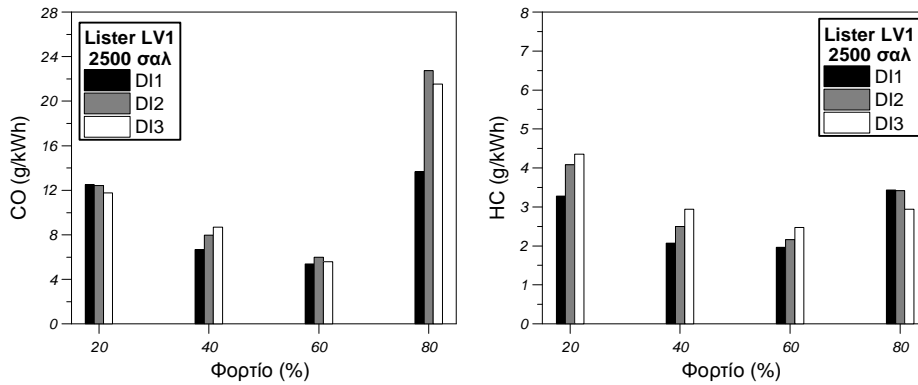


ΣΧΗΜΑ 1(δ). Επίδραση της επιφανειακής τάσης στην ειδική κατανάλωση καυσίμου και στην καθυστέρηση ανάφλεξης. Τα πειραματικά αποτελέσματα ελήφθησαν από τον κινητήρα Lister LV1 στις 2500 σαλ και στο 20%, 40%, 60% και 80% του πλήρους φορτίου (στην περίπτωση της καθυστέρησης ανάφλεξης παρουσιάζονται αποτελέσματα στο 40%, 60% και 80% του πλήρους φορτίου).

Τα Σχήματα 1(ε) και 1(στ) χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της επίδρασης της επιφανειακής τάσης στις μετρημένες εκπομπές ρύπων. Όπως φαίνεται, δεν υπάρχει σημαντική επίδραση της επιφανειακής τάσης του καυσίμου στις εκπομπές NO, CO και αμαύρωσης αιθάλης. Παρολαυτά, η μείωση της επιφανειακής τάσης οδηγεί σε αύξηση των εκπομπών HC για όλα τα φορτία που εξετάζονται εκτός από την περίπτωση του 80% του φορτίου, όπου η χαμηλότερη τιμή εκπομπών HC παρατηρείται για το καύσιμο με τη μικρότερη τιμή επιφανειακής τάσης (DI3).



ΣΧΗΜΑ 1(ε). Επίδραση της επιφανειακής τάσης στις εκπομπές NO και αιθάλης. Τα πειραματικά αποτελέσματα ελήφθησαν από τον κινητήρα Lister LV1 στις 2500 σαλ και στο 20%, 40%, 60% και 80% του πλήρους φορτίου.



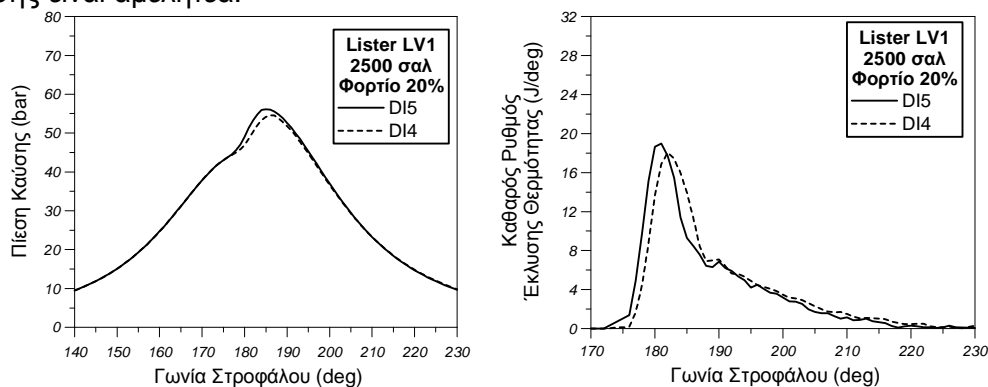
ΣΧΗΜΑ 1(στ). Επίδραση της επιφανειακής τάσης στις εκπομπές CO και HC. Τα πειραματικά αποτελέσματα ελήφθησαν από τον κινητήρα Lister LV1 στις 2500 σαλ και στο 20%, 40%, 60% και 80% του πλήρους φορτίου.

Επίδραση της Πυκνότητας, της Συνεκτικότητας & του Συντελεστή Συμπίεστικότητας του Καυσίμου στη Λειτουργία & στις Εκπομπές Ρύπων Κινητήρων Diesel

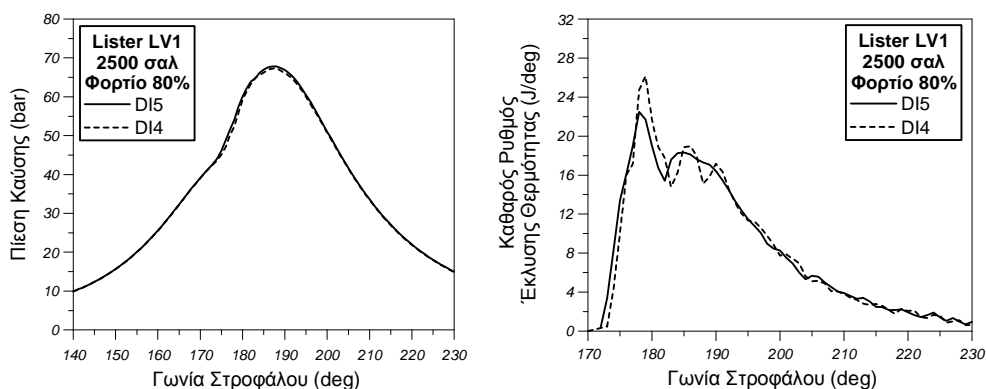
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΙΝΗΤΗΡΑ LISTER LV1 ΓΙΑ ΤΑ ΚΑΥΣΙΜΑ DI4 & DI5

Τα Σχήματα 2(α) και 2(β) παρατίθενται με σκοπό την εξέταση της συνδυασμένης επίδρασης της πυκνότητας, συνεκτικότητας και του συντελεστή συμπίεστικότητας στην πίεση καύσης και στο ρυθμό έκλυσης θερμότητας. Η μετάβαση από το καύσιμο DI4 στο DI5 συνοδεύεται από πιο έντονη αύξηση της πίεσης καύσης κοντά στο Α.Ν.Σ.

Σύμφωνα με τα Σχήματα 2(α) και 2(β), παρατηρείται νωρίτερη ανάφλεξη για το καύσιμο με την υψηλότερη πυκνότητα καυσίμου (DI5) λόγω του υψηλότερου του αριθμού κετανίου σε σύγκριση με το DI4. Στο 20% του πλήρους φορτίου (Σχήμα 2(α)), η υποκατάσταση του καυσίμου DI4 από το DI5 συνοδεύεται από πιο έντονη προαναμεμειγμένη καύση και μικρή αύξηση της πίεσης καύσης στην περιοχή γύρω από το Α.Ν.Σ. Αντίθετα, στο 80% του φορτίου, η αντίστοιχη επίδραση στην πίεση καύσης είναι αμελητέα.

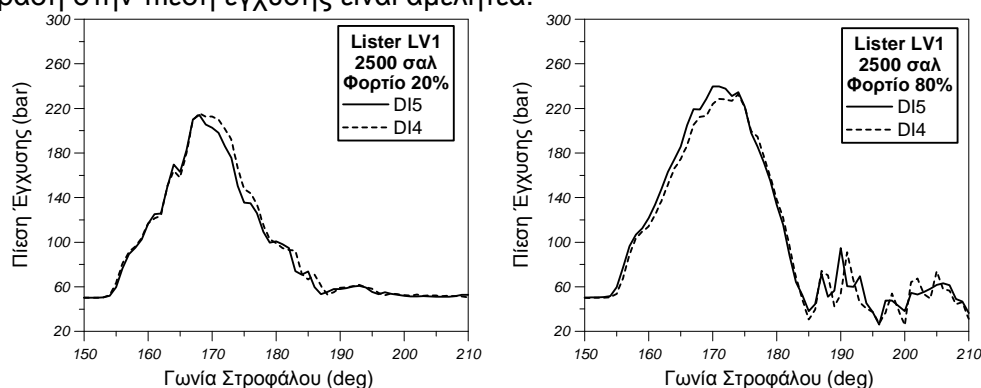


Σχήμα 2(α). Σύγκριση της πίεσης καύσης και του ρυθμού έκλυσης θερμότητας για τα καύσιμα DI4 & DI5. Τα πειραματικά αποτελέσματα ελήφθησαν από τον κινητήρα Lister LV1 στις 2500 σαλ και στο 20% του πλήρους φορτίου.



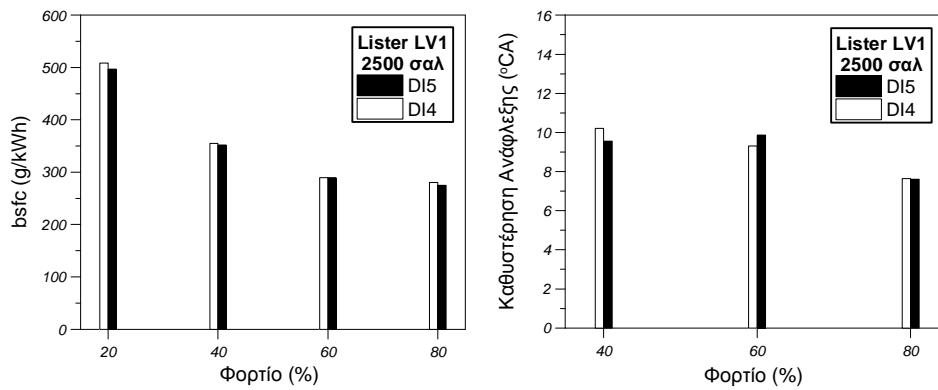
ΣΧΗΜΑ 2(β). Σύγκριση της πίεσης καύσης και του ρυθμού έκλυσης θερμότητας για τα καύσιμα D14 & D15. Τα πειραματικά αποτελέσματα ελήφθησαν από τον κινητήρα Lister LV1 στις 2500 σαλ και στο 80% του πλήρους φορτίου.

Στο Σχήμα 2(γ) γίνεται σύγκριση πειραματικών τιμών πίεσης έγχυσης για τα καύσιμα D14 και D15 στις 2500 σαλ και στο 20% και στο 80% του πλήρους φορτίου αντίστοιχα. Στο 80% του φορτίου, παρατηρείται αύξηση του ρυθμού ανόδου της πίεσης έγχυσης κατά την μετάβαση από το καύσιμο D14 στο D15, η οποία οδηγεί σε αύξηση της μέγιστης πίεσης έγχυσης. Αντίθετα, στο 20% του πλήρους φορτίου, η επίδραση στην πίεση έγχυσης είναι αμελητέα.

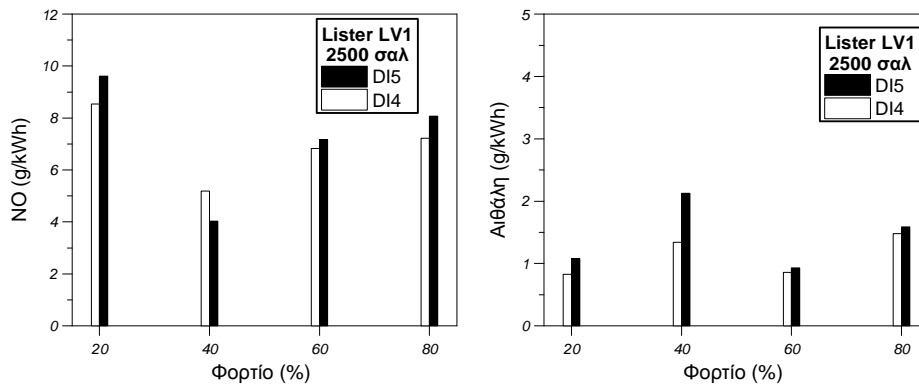


ΣΧΗΜΑ 2(γ). Σύγκριση της πίεσης έγχυσης για τα καύσιμα D14 & D15. Τα πειραματικά αποτελέσματα ελήφθησαν από τον κινητήρα Lister LV1 στις 2500 σαλ και στο 20% και στο 80% του πλήρους φορτίου αντίστοιχα.

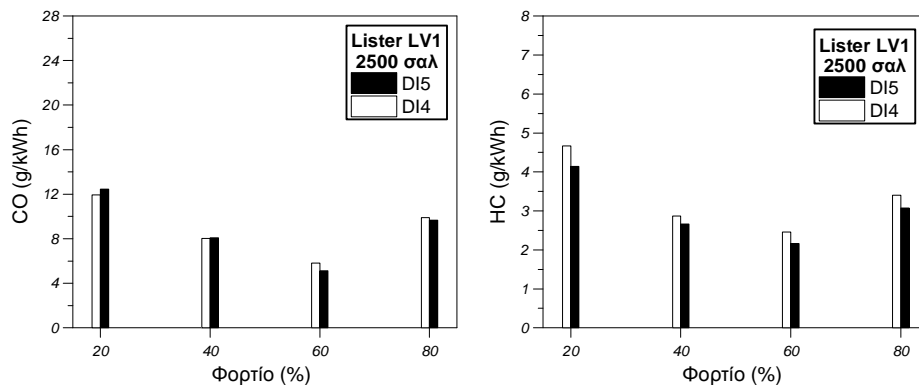
Στα Σχήματα 2(δ) – 2(στ) γίνεται σύγκριση των τιμών ειδικής κατανάλωσης καυσίμου, καθυστέρησης ανάφλεξης, NO, αιθάλης, CO και HC για τα καύσιμα D14 και D15 στις 2500 σαλ και στο 20%, 40%, 60% και 80% του πλήρους φορτίου. Όπως παρατηρείται, η ειδική κατανάλωση καυσίμου μειώνεται ελαφρώς καθώς αυξάνεται η πυκνότητα του καυσίμου. Παρατηρείται επίσης μείωση της καθυστέρησης ανάφλεξης κατά τη μετάβαση από το καύσιμο D14 στο καύσιμο D15 λόγω της αύξησης του αριθμού κετανίου. Οι εκπομπές NO και οι τιμές αιθάλης τείνουν να αυξηθούν με την αύξηση της πυκνότητας και της συνεκτικότητας του καυσίμου (D14→D15) ενώ οι εκπομπές ακαυστών υδρογονανθράκων μειώνονται κατά τη μετάβαση από το καύσιμο D14 στο D15. Οι εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα (CO) δεν επηρεάζονται από τη μεταβολή της πυκνότητας και της συνεκτικότητας του καυσίμου για αυτό το ζεύγος καυσίμων.



ΣΧΗΜΑ 2(δ). Σύγκριση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου και της καθυστέρησης ανάφλεξης για τα καύσιμα DI4 & DI5. Τα πειραματικά αποτελέσματα ελήφθησαν από τον κινητήρα Lister LV1 στις 2500 σαλ και στο 20%, 40%, 60% και 80% του πλήρους φορτίου (στην περίπτωση της καθυστέρησης ανάφλεξης παρουσιάζονται αποτελέσματα στο 40%, 60% και 80% του πλήρους φορτίου).



ΣΧΗΜΑ 2(ε). Σύγκριση των εκπομπών NO και αιθάλης για τα καύσιμα DI4 & DI5. Τα πειραματικά αποτελέσματα ελήφθησαν από τον κινητήρα Lister LV1 στις 2500 σαλ και στο 20%, 40%, 60% και 80% του πλήρους φορτίου.

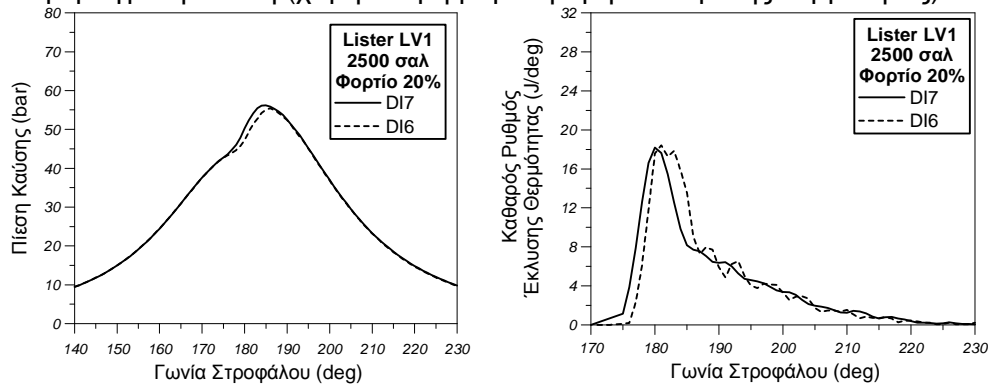


ΣΧΗΜΑ 2(στ). Σύγκριση των εκπομπών CO και HC για τα καύσιμα DI4 & DI5. Τα πειραματικά αποτελέσματα ελήφθησαν από τον κινητήρα Lister LV1 στις 2500 σαλ και στο 20%, 40%, 60% και 80% του πλήρους φορτίου αντίστοιχα.

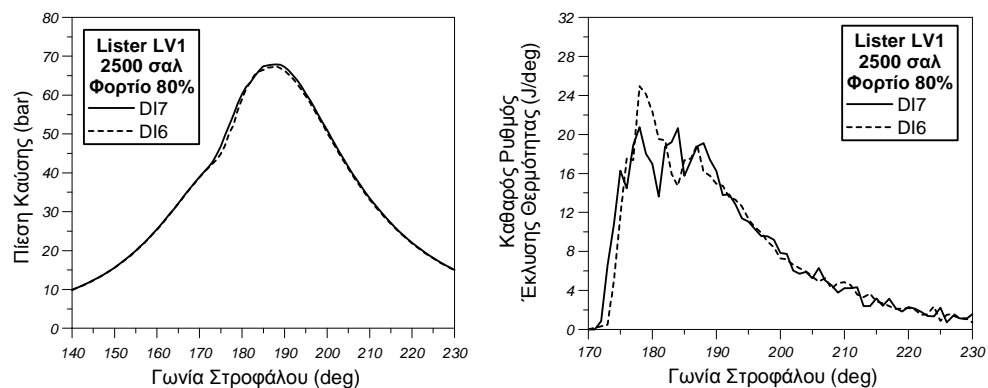
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΙΝΗΤΗΡΑ LISTER LV1 ΓΙΑ ΤΑ ΚΑΥΣΙΜΑ DI6 & DI7

Η συνδυασμένη επίδραση της πυκνότητας, συνεκτικότητας και συμπιεστότητας του καυσίμου στην πίεση καύσης και στο ρυθμό έκλυσης θερμότητας προσδιορίζεται από την εξέταση των πειραματικών αποτελεσμάτων που εικονίζονται στα Σχήματα 3(α) και 3(β) και έχουν ληφθεί χρησιμοποιώντας τα καύσιμα DI6 και DI7. Σύμφωνα με

το Σχήμα 3(α), η αύξηση της συνεκτικότητας (DI6→DI7) (συνεπακόλουθη αύξηση της πυκνότητας και μείωση της συμπιεστότητας) του καυσίμου οδηγεί σε πιο έντονη αύξηση της πίεσης καύσης και έτσι σε υψηλότερες μέγιστες πιέσεις καύσης. Όμως, η αύξηση της συνεκτικότητας του καυσίμου φαίνεται να επηρεάζει λιγότερο την πίεση καύσης στα υψηλά φορτία σύμφωνα με το Σχήμα 3(β). Επίσης η μεγάλη αύξηση του αριθμού κετανίου κατά την μετάβαση από το καύσιμο DI6 στο DI7 οδηγεί σε νωρίτερη έναρξη της καύσης. Παρολαυτά, παρατηρώντας τα Σχήματα 3(α) και 3(β), προκύπτει ότι η μετάβαση από το καύσιμο DI6 στο DI7 οδηγεί σε λιγότερο έντονη προαναμεμειγμένη καύση (χαμηλότερη μέγιστη τιμή εκλυόμενης θερμότητας).

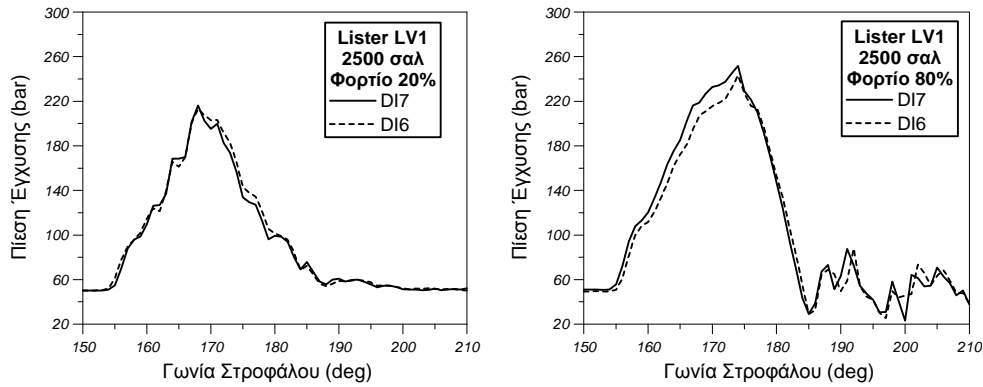


ΣΧΗΜΑ 3(α). Σύγκριση της πίεσης καύσης και του ρυθμού έκλυσης θερμότητας για τα καύσιμα DI6 & DI7. Τα πειραματικά αποτελέσματα ελήφθησαν από τον κινητήρα Lister LV1 στις 2500 σαλ και στο 20% του πλήρους φορτίου.



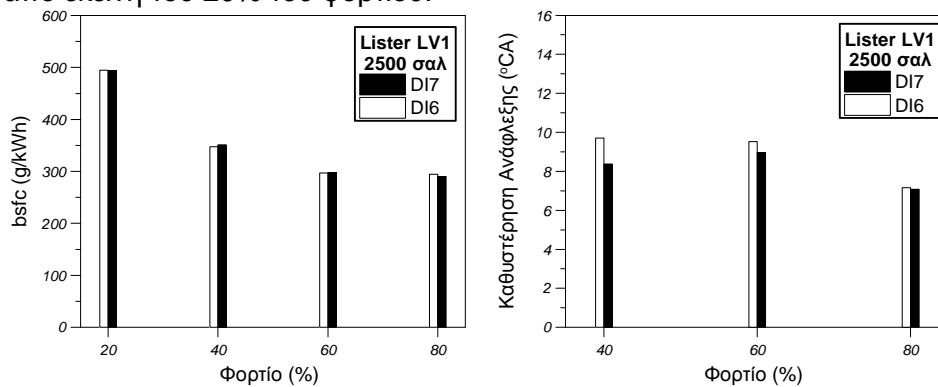
ΣΧΗΜΑ 3(β). Σύγκριση της πίεσης καύσης και του ρυθμού έκλυσης θερμότητας για τα καύσιμα DI6 & DI7. Τα πειραματικά αποτελέσματα ελήφθησαν από τον κινητήρα Lister LV1 στις 2500 σαλ και στο 80% του πλήρους φορτίου.

Το Σχήμα 3(γ) βοηθά στην κατανόηση της συνδυασμένης επίδρασης της συνεκτικότητας, της πυκνότητας και της συμπιεστότητας του καυσίμου στην πίεση έγχυσης. Η αύξηση της συνεκτικότητας και η συνεπακόλουθη μείωση της συμπιεστότητας οδηγεί σε πιο έντονη αύξηση της πίεσης έγχυσης και αντίστοιχα, σε υψηλότερες τιμές μέγιστης πίεσης έγχυσης. Η επίδραση που έχει η αύξηση της συνεκτικότητας εντείνεται με την αύξηση του φορτίου του κινητήρα.

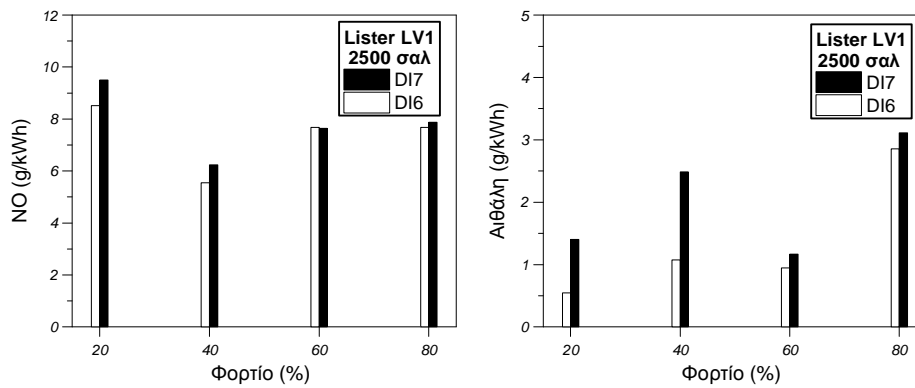


ΣΧΗΜΑ 3(γ). Σύγκριση της πίεσης έγχυσης για τα καύσιμα DI6 & DI7. Τα πειραματικά αποτελέσματα ελήφθησαν από τον κινητήρα Lister LV1 στις 2500 σαλ και στο 20% και στο 80% του πλήρους φορτίου αντίστοιχα.

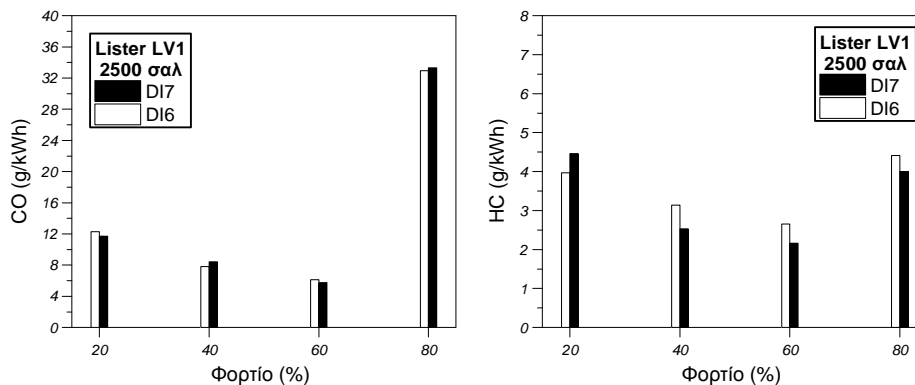
Στα Σχήματα 3(δ) – 3(στ) παρουσιάζονται πειραματικές τιμές ειδικής κατανάλωσης καυσίμου, καθυστέρησης ανάφλεξης, NO, αιθάλης, CO και HC για τα καύσιμα DI6 και DI7 στις 2500 σαλ για όλα τα φορτία που εξετάστηκαν στον κινητήρα Lister LV1. Σύμφωνα με το Σχήμα 3(δ), η ειδική κατανάλωση καυσίμου δεν μεταβάλλεται σημαντικά με την αύξηση της συνεκτικότητας. Η καθυστέρηση ανάφλεξης εμφανίζει πτωτική τάση με την αύξηση της συνεκτικότητας καυσίμου λόγω της συνεπακόλουθης αύξησης του αριθμού κετανίου. Όπως προκύπτει από το Σχήμα 3(ε), οι εκπομπές NO και η συγκέντρωση αιθάλης αυξάνονται με την αύξηση της συνεκτικότητας του καυσίμου. Αντίθετα, σύμφωνα με το Σχήμα 3(στ), οι εκπομπές CO παραμένουν σχεδόν ανεπηρέαστες με την αλλαγή της συνεκτικότητας (DI6→DI7) ενώ οι εκπομπές HC παρουσιάζουν μια ελαφρά μείωση με την αύξηση της συνεκτικότητας και του αριθμού κετανίου σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν εκτός από εκείνη του 20% του φορτίου.



ΣΧΗΜΑ 3(δ). Σύγκριση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου και της καθυστέρησης ανάφλεξης για τα καύσιμα DI6 & DI7. Τα πειραματικά αποτελέσματα ελήφθησαν από τον κινητήρα Lister LV1 στις 2500 σαλ και στο 20%, 40%, 60% και 80% του πλήρους φορτίου ((στην περίπτωση της καθυστέρησης ανάφλεξης παρουσιάζονται αποτελέσματα στο 40%, 60% και 80% του πλήρους φορτίου).



ΣΧΗΜΑ 3(ε). Σύγκριση των εκπομπών NO και αιθάλης για τα καύσιμα DI6 & DI7. Τα πειραματικά αποτελέσματα ελήφθησαν από τον κινητήρα Lister LV1 στις 2500 σαλ και στο 20%, 40%, 60% και 80% του πλήρους φορτίου.



ΣΧΗΜΑ 3(στ). Σύγκριση των εκπομπών CO και HC για τα καύσιμα DI6 & DI7. Τα πειραματικά αποτελέσματα ελήφθησαν από τον κινητήρα Lister LV1 στις 2500 σαλ και στο 20%, 40%, 60% και 80% του πλήρους φορτίου.

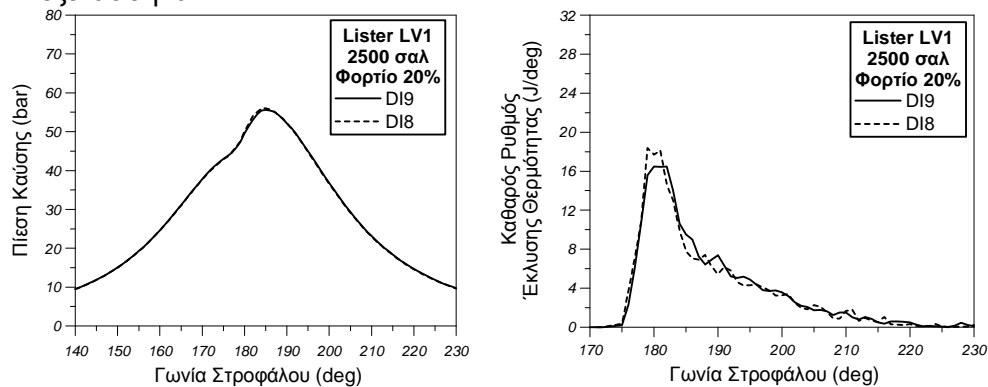
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΙΝΗΤΗΡΑ LISTER LV1 ΓΙΑ ΤΑ ΚΑΥΣΙΜΑ DI8 & DI9

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα καύσιμα DI8 και DI9 είχαν αρχικά σχεδιασθεί ώστε να χρησιμοποιηθούν για την εξέταση της συμπίεστικότητας στη λειτουργία και στις εκπομπές ρύπων κινητήρων diesel. Αλλά όπως διαπιστώθηκε από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο IFP και στο FEV τα καύσιμα DI8 και DI9 δεν παρουσιάζουν ουσιαστικές διαφορές στη συμπίεστικότητα. Τα καύσιμα με τη μεγαλύτερη διαφορά στο συντελεστή συμπίεστικότητας είναι τα καύσιμα DI6 και DI7. Έτσι οι παρατηρούμενες μεταβολές στα πειραματικά αποτελέσματα για τις παραμέτρους λειτουργίας και τις εκπομπές ρύπων κατά τη μετάβαση από το καύσιμο DI8 στο DI9 μπορούν να αποδοθούν στη μικρή μείωση της συνεκτικότητας (περίπου 6%) αφού σύμφωνα με τον Πίνακα 7.1 όλες οι υπόλοιπες φυσικοχημικές τους ιδιότητες είναι σχεδόν ίδιες. Η μικρή μείωση της συνεκτικότητας οφείλεται στη μερική αντικατάσταση του παραφινικών από ναφθενικούς υδρογονάνθρακες.

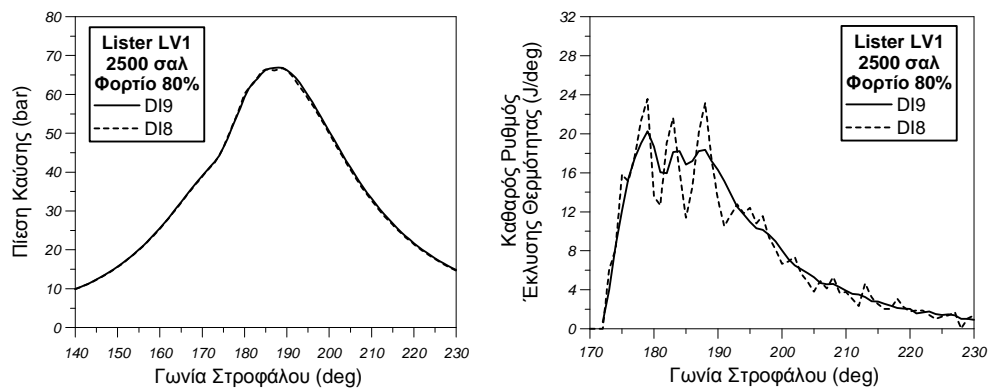
Από τα Σχήματα 7.38 – 7.42 όπου παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα για την πίεση καύσης, τον ρυθμό έκλυσης θερμότητας, την πίεση έγχυσης, την ειδική κατανάλωση καυσίμου, την καθυστέρηση ανάφλεξης, τις εκπομπές αιθάλης, NO, CO και HC προκύπτει ότι η μετάβαση από το καύσιμο DI8 στο DI9 οδηγεί σε:

- Μη ουσιαστική μεταβολή της πίεσης καύσης, της πίεσης έγχυσης, της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου.
- Λιγότερο έντονη προαναμεμειγμένη καύση.

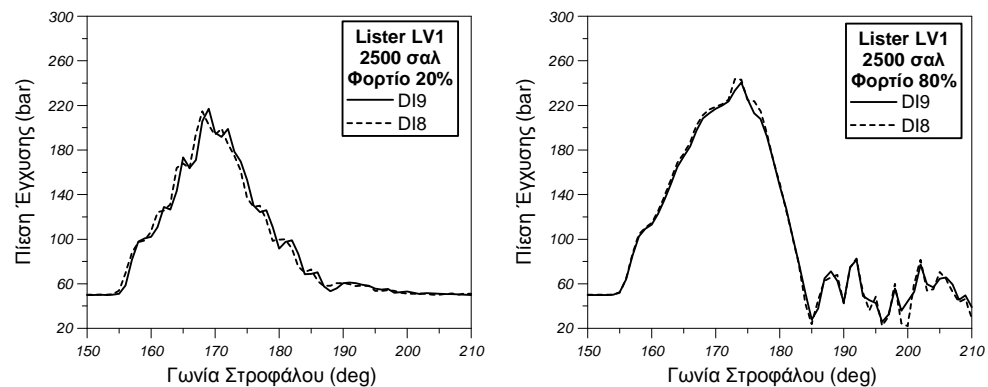
- Τάση για αύξηση των εκπομπών NO.
- Τάση για μείωση της αιθάλης και των εκπομπών CO.
- Μείωση των ακαύστων υδρογονανθράκων σε όλα τα φορτία που εξετάστηκαν.



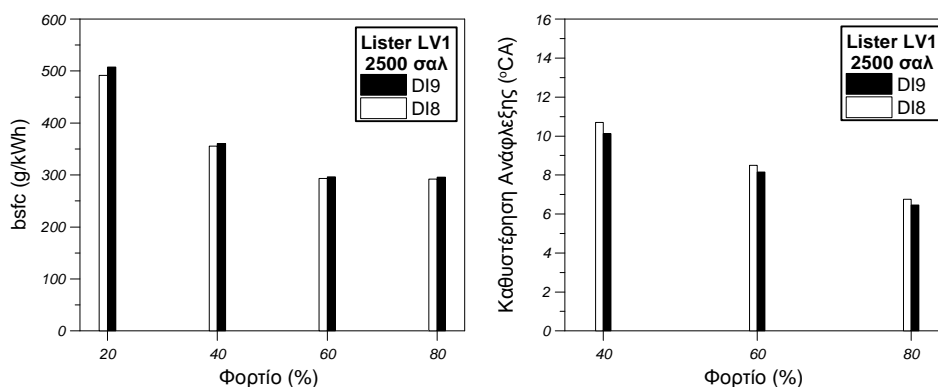
ΣΧΗΜΑ 4(α). Σύγκριση της πίεσης καύσης και του ρυθμού έκλυσης θερμότητας για τα καύσιμα DI8 & DI9. Τα πειραματικά αποτελέσματα ελήφθησαν από τον κινητήρα Lister LV1 στις 2500 σαλ και στο 20% του πλήρους φορτίου.



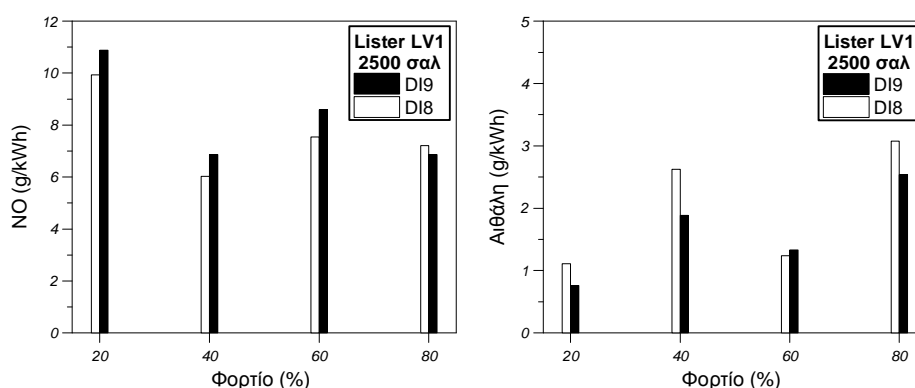
ΣΧΗΜΑ 4(β). Σύγκριση της πίεσης καύσης και του ρυθμού έκλυσης θερμότητας για τα καύσιμα DI8 & DI9. Τα πειραματικά αποτελέσματα ελήφθησαν από τον κινητήρα Lister LV1 στις 2500 σαλ και στο 80% του πλήρους φορτίου.



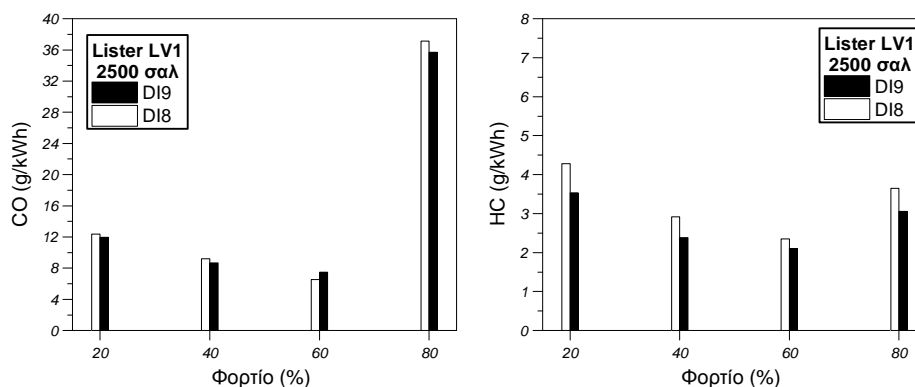
ΣΧΗΜΑ 4(γ). Σύγκριση της πίεσης έγχυσης για τα καύσιμα DI8 & DI9. Τα πειραματικά αποτελέσματα ελήφθησαν από τον κινητήρα Lister LV1 στις 2500 σαλ και στο 20% και στο 80% του πλήρους φορτίου αντίστοιχα.



ΣΧΗΜΑ 4(δ). Σύγκριση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου και της καθυστέρησης ανάφλεξης για τα καύσιμα D18 & D19. Τα πειραματικά αποτελέσματα ελήφθησαν από τον κινητήρα Lister LV1 στις 2500 σαλ και στο 20%, 40%, 60% και 80% του πλήρους φορτίου (στην περίπτωση της καθυστέρησης ανάφλεξης παρουσιάζονται αποτελέσματα στο 40%, 60% και 80% του πλήρους φορτίου).



ΣΧΗΜΑ 4(ε). Σύγκριση των εκπομπών NO και αιθάλης για τα καύσιμα D18 & D19. Τα πειραματικά αποτελέσματα ελήφθησαν από τον κινητήρα Lister LV1 στις 2500 σαλ και στο 20%, 40%, 60% και 80% του πλήρους φορτίου αντίστοιχα.



ΣΧΗΜΑ 4(στ). Σύγκριση των εκπομπών CO και HC για τα καύσιμα D18 & D19. Τα πειραματικά αποτελέσματα ελήφθησαν από τον κινητήρα Lister LV1 στις 2500 σαλ και στο 20%, 40%, 60% και 80% του πλήρους φορτίου αντίστοιχα.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε μια λεπτομερής πειραματική διερεύνηση με σκοπό την εξέταση της επίδρασης των ιδιοτήτων του καυσίμου στα χαρακτηριστικά λειτουργίας και στις εκπομπές ρύπων κινητήρων diesel. Στα πλαίσια της διερεύνησης πραγματοποιήθηκαν πειραματικές δοκιμές σε έναν μονοκύλινδρο κινητήρα άμεσης έγχυσης (Lister LV1) σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας χρησιμοποιώντας εννιά διαφορετικά καύσιμα τα οποία είχαν μεταβλητή σύσταση και

μεταβλητές φυσικές και χημικές ιδιότητες. Κατά την ανάλυση των αποτελεσμάτων δόθηκε έμφαση στην επίδραση των φυσικών ιδιοτήτων του καυσίμου όπως η πυκνότητα, η συνεκτικότητα και ο συντελεστής συμπιεστότητας στα χαρακτηριστικά λειτουργίας και στις εκπομπές ρύπων. Αξιοποιώντας τα πειραματικά αποτελέσματα εξήχθησαν τα ακόλουθα συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση των ιδιοτήτων του καυσίμου στη λειτουργία και στις εκπομπές ρύπων κινητήρων diesel:

- 1) Η αύξηση της θερμοκρασίας απόσταξης και η μερική αντικατάσταση των παραφινών από ναφθένες οδήγησε κυρίως σε αύξηση της συνεκτικότητας και του αριθμού κετανίου και δευτερευόντως, σε αύξηση της πυκνότητας και μείωση του συντελεστή συμπιεστότητας.
- 2) Η μεταβολή της επιφανειακής τάσης του καυσίμου δεν προκαλεί αξιοσημείωτες μεταβολές στις παραμέτρους λειτουργίας και στις εκπομπές ρύπων κινητήρων diesel αμέσου έγχυσης.
- 3) Η αύξηση της συνεκτικότητας και της πυκνότητας σε συνδυασμό με την μείωση του συντελεστή συμπιεστότητας οδήγησε σε:
 - i. Νωρίτερη έναρξη της καύσης.
 - ii. Μείωση της καθυστέρησης ανάφλεξης εξαιτίας της αύξησης του αριθμού κετανίου.
 - iii. Αύξηση του ρυθμού ανόδου της πίεσης έγχυσης και σε ελαφρώς υψηλότερες μέγιστες τιμές της πίεσης έγχυσης στα υψηλά φορτία.
 - iv. Μικρή αύξηση της μέγιστης πίεσης καύσης στα χαμηλά φορτία του κινητήρα.
 - v. Αύξηση των εκπομπών αιθάλης.
 - vi. Μείωση των εκπομπών ακαύστων υδρογονανθράκων.
 - vii. Μικρή αύξηση των εκπομπών NO.
 - viii. Μικρή μείωση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου.

Κατά συνέπεια, είναι εφικτή η ταυτόχρονη μείωση των εκπομπών αιθάλης και NO χωρίς σημαντικές αρνητικές επιδράσεις στην ειδική κατανάλωση καυσίμου μέσω της μείωσης της θερμοκρασίας απόσταξης και της αύξησης του λόγου παραφινικών προς ναφθενικούς υδρογονάνθρακες, οι οποίες όπως αποδείχθηκε οδηγούν σε μείωση της πυκνότητας και της συνεκτικότητας και αύξηση του συντελεστή συμπιεστότητας των συμβατικών καυσίμων diesel.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ο συγγραφέας θα ήθελε να εκφράσει την ευγνωμοσύνη του προς την Ευρωπαϊκή Επιτροπή για την χρηματοδότηση του ερευνητικού προγράμματος “NeDeNeF” στα πλαίσια του οποίου πραγματοποιήθηκε η παρούσα πειραματική διερεύνηση και προς το Ινστιτούτο Πετρελαίων της Γαλλίας (Institut Francais du Petrole (IFP)) για τον συντονισμό του προγράμματος. Επίσης θα ήθελε να ευχαριστήσει την εταιρεία Fortum Oil & Gas Oy για την παρασκευή των καυσίμων δοκιμής και την χορήγηση πειραματικών τιμών για τις ιδιότητες των καυσίμων.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. G. Lepperhoff, G.; Baecker, H.; Pungs, A.; Petters, K-D. 9th Int. Symposium for Transport and Air Pollution, Avignon, France, 2000.
2. Baecker, H.; Pungs, A.; Pischinger, S.; Petters, K-D.; Lepperhoff, G. 3rd Int. Fuels Colloquium, Esslingen, Germany, 2001.
3. Zannis, T.C.; Hountalas, D.T. *Energy & Fuels* 2004, 18(3), 659-666.
4. B. Martin, P. Aakko, D. Beckman, N. Del Giacomo and F. Giavazzi, F. *Society of Automotive Engineers*, No. 972966 (1997).
5. K. Nakakita, H. Ban, S. Takasu, Y. Hotta, K. Inagaki, W. Weissman and J.T. Farrell, *Society of Automotive Engineers*, No. 2003-01-1914 (2003).

6. K. Nakakita, S. Takasu, H. Ban, T. Ogawa, H. Naruse, Y. Tsukasaki and L.I. Yeh, *Society of Automotive Engineers*, No. 982494 (1998).
7. Y. Takatori, Y. Mandokoro, K. Akihama, K. Nakakita, Y. Tsukasaki, S. Igushi, L.I. Yeh and A.M. Dean, *Society of Automotive Engineers*, No. 982495 (1998).
8. S. Kobayashi, T. Nakajima and M. Hori, *Society of Automotive Engineers*, No. 945121 (1994).
9. M. Hublin, P.G. Gadd, D.E. Hall and K.P. Schindler, *Society of Automotive Engineers*, No. 961073, 1996.
10. C.J.J. Den Ouden, W.W. Lange, C. Maillard, R.H. Clark, L.T. Cowley and R.J. Strandling, *Society of Automotive Engineers*, No. 942022 (1994).
11. C. Beatrice, C. Bertoli, N. Del Giacomo, M. na Migliaccio and C. Guido, *Society of Automotive Engineers*, No. 2002-01-2826 (2002).
12. C. Morley, R.J. Price and N.P. Tait and C.R. McDonald, 4th International Symposium COMODIA, 17-24, (1998).
13. T.L. Ullman, R.L. Mason and D.A. Montalvo, *Society of Automotive Engineers*, No. 902171 (1990).
14. N. Miyamoto, H. Ogawa, M. Shibuya, K. Arai and O. Esmilaire, *Society of Automotive Engineers*, No. 940676, 1994.
15. Y. Kidoguchi, C. Yang and K. Miwa, *Society of Automotive Engineers*, No. 2000-01-1851 (2000).
16. Y. Kidoguchi, C. Yang, R. Kato and K. Miwa, *JSAE Review* **21**, 469-475 (2000).
17. E.J. Sienicki, R.E. Jass, W.J. Slodowske, C.I. McCarthy and A.L. Krodel, *Society of Automotive Engineers*, No. 902172 (1990).
18. N. Miyamoto, H. Ogawa, M. Shibuya, and T. Suda, *Society of Automotive Engineers*, No. 922221 (1992).
19. M. Arai, *Society of Automotive Engineers*, No. 920556 (1992).
20. S. Kobayashi, K. Akiyama, T. Nakajima and S. Sasaki, *Japan Society of Automotive Engineers*, No. 9433588 (1994).
21. T. Ogawa, T. Araga, M. Okada and Y. Fujimoto, *Society of Automotive Engineers*, No. 952351 (1995).
22. Y. Kwon, N. Mann, D.J. Rikeard, R. Haugland, K.A. Ulvund, F. Kvinge and G. Wilson, *Society of Automotive Engineers*, No. 2001-01-3522 (2000).
23. T.L. Ullman, *Society of Automotive Engineers*, No. 892072 (1989).
24. N. Ladommatos, Z. Xiao and H. Zhao, *Proc. Instn. Mech. Engrs, J. of Automobile Engineering*, **214(D)**, 779-794 (2000).
25. H. Richter and J.B. Howard, *Prog. Energy Combust. Sci.* **26**, 565-608 (2000).
26. T.C. Zannis and D.T. Hountalas, *J. Energy Institute* **77**, 16-25 (2004).
27. D. Karonis, E. Lois, S. Stournas and F. Zannikos, *Energy & Fuels* **12**, 230-238 (1998).
28. NEDENEF, "New Diesel Engines and New Diesel Fuels", GROWTH Programme, Final Technical Report, (2003).

Section D: MATHEMATICS AND NATURAL SCIENCES

Resonances in Symmetric and Asymmetric Semiconductor Laser Structures.

V.N. Stavrou^{a,b}, G.P. Veropoulos^a and A. Markopoulos^a

^a*Division of Academic Studies, Hellenic Navy Petty Officers Academy, Skaramagkas, T.K. 12400, Greece*

^b*Department of Physics and Astronomy, University of Iowa, Iowa City, IA 52242, USA*

Abstract. We have theoretically and numerically investigated the symmetric and asymmetric quantum well (QW) laser structures. Semiconductor structures made with symmetric QW (e.g. ZnSe/CdSe) and asymmetric QW (e.g. ZnS/ZnSe/CdSe) have been used several times due to their ability of lasing emission in the blue region of the electromagnetic spectrum. We have investigated the above mentioned QWs structures which are confined between metallic barriers in order to discretize the electron states with energies larger than the depth of the well. The phonon modes are described by the bulk phonon approximation and the DC model. In these structures, electron resonances appear when electrons drop to energies smaller than the depth of the well. In addition, further results are provided for another type of resonances named phonon resonance which emerges when the electron energy difference becomes equal to phonon mode energy. The two different phonon models predict almost the same scattering magnitude but the resonances appear at different well widths. Lastly, in contrast to the symmetric QWs, the asymmetric QWs cause smooth scattering rates close to resonance and antiresonance values.

Keywords: QW Laser structures, DC phonons, Bulk phonon approximation, scattering rates, II-VI's semiconductors.

PACS: 63.20.Dj, 72.10.Di, 72.20.Jv

INTRODUCTION

The use of II-VI compounds has been motivated by the possibility of generating quantum well lasers in the visible region of the electromagnetic spectrum. However, until recently, material properties have limited the performance of devices, but the significant improvements in the doping of these materials have made the possibility of optimum device performance better than before. Akira [1] announced that Sony were able to design a II-VI laser that operated for

more than 100 hours [2]. The indication of a great device performance is therefore stronger and research towards a fuller exploitation of II-VI semiconductor quantum wells [3] will continue. A theoretical study of electron-phonon interactions in these quantum wells is therefore timely. More significantly, a study of the characteristic process of capture of electrons into II-VI quantum wells would be useful.

Electron-phonon interactions in such an asymmetric II-VI heterostructure can fortunately be studied using continuum models and bulk phonon approximation for optical phonons [4] and the effective mass approximation for electrons. Studies of electron-phonon interaction in III-V heterostructure have led to the conclusion that, concerning the total transition rate by emission of optical phonons, the dielectric continuum (DC) and bulk phonon approximation model [4-8] are adequate for the evaluation of such rates using the Fermi golden rule. For studies of processes involving individual optical phonons, such as Raman scattering, the DC model should not be used and a description of the modes using the hybrid model [9] would be appropriate. Since our aim is to calculate total rates, we can use the DC and bulk phonons despite their shortcomings in Raman processes.

ELECTRONS AND PHONONS IN ASYMMETRIC QWS.

Let us consider the semiconductor heterostructure made with ZnS/ZnSe/CdSe, as it is illustrated in Figure 1. The size of the QW is L with barrier size D and the total structure size is $L+2D$. Using the boundary conditions [4-5] a) continuity of the electron wavefunctions (Ψ), b) continuity of $\frac{1}{m^*} \frac{d\Psi}{dz}$ at the interfaces ($z=0$ and $z=L$) and c) the vanishing of the wavefunctions at the metallic barriers ($z=-D$ and $z=D+L$) [9-11], the electron dispersion relations for the initial and final electron states are respectively given by

$$\tan(k_1 L) = \frac{b + a \cot(k_2 D) \tanh(k_3 D)}{\tanh(k_3 D) - ab \cot(k_2 D)}, \quad \text{with } V_2 < E(k_{\parallel} = 0) < V_3 \quad (1)$$

$$\tan(k_1 L) = \frac{b + a \coth(k_2 D) \tanh(k_3 D)}{\tanh(k_3 D) - ab \coth(k_2 D)}, \quad \text{with } E(k_{\parallel} = 0) < V_2$$

where $a = \frac{k_2 m_1^*}{k_1 m_2^*}$ and $b = \frac{k_3 m_1^*}{k_1 m_3^*}$. The effective masses m_i^* and the electron wavevectors k_i

($i = 1, 2, 3$) correspond to each region as presented in Figure 1.

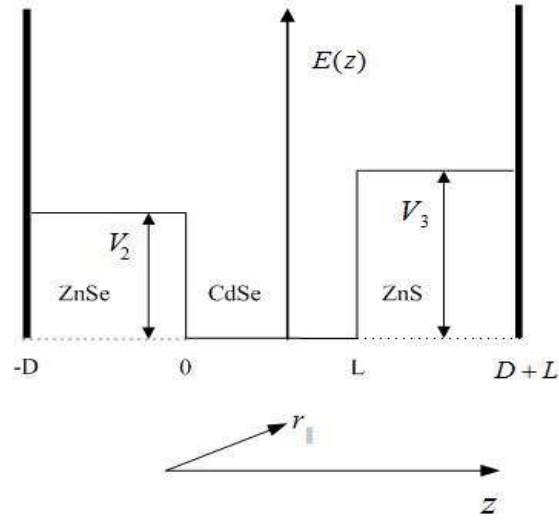


FIGURE 1. A typical asymmetric QW heterostructure with metallic barriers at $-D$ and $D+L$.

The relative ionic displacement field vector $\mathbf{u}(\mathbf{r}, t)$ is defined as the displacement of the positive ions relative to the negative ions multiplied by the square root of the reduced mass per unit volume [6]. The reduced mass of the positive and negative ions is defined by $\bar{M} = M_+ M_- / (M_+ + M_-)$. The displacement is coupled to the electric field \mathbf{E} and polarization field \mathbf{P} by the equations

$$\ddot{\mathbf{u}}(\mathbf{r}, t) = b_{11}\mathbf{u} + b_{12}\mathbf{E} \quad (2)$$

$$\mathbf{P} = b_{12}\mathbf{u} + b_{22}\mathbf{E}$$

where the coefficients are defined by

$$b_{11} = -\omega_T^2 \quad (3)$$

$$b_{12} = b_{21} = [\varepsilon_0(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)]^{\frac{1}{2}} \omega_T$$

$$b_{22} = \varepsilon_0(\varepsilon_\infty - 1)$$

Below, we introduce the theoretical frame for the bulk phonon approximation and DC model which are used to describe the longitudinal optical phonons (LO). The above mentioned phonon models are based on the Born and Huang theory (eq. 2).

The bulk phonon approximation considers that there is only one phonon mode which propagates with the LO frequency of the well material. The quantized bulk LO phonons are described by the scalar quantised field

$$\hat{\Phi}(\mathbf{r}, t) = -\int d^3\mathbf{q} \frac{i}{|\mathbf{q}|} \left[\frac{\hbar\omega}{2\varepsilon_0(2\pi)^3} \left(\frac{1}{\varepsilon_\infty} - \frac{1}{\varepsilon_s} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \left(e^{i(\mathbf{q}\mathbf{r} - \omega t)} a_{\mathbf{q}} + \text{H.C.} \right) \quad (4)$$

where H.C. stands for ‘‘Hermitian conjugate’’.

The DC model makes use of the theoretical framework given by Born and Huang as earlier described. The DC model consists of the following two types of phonons: a) confined

modes and b) interface (IP) modes. The model assumes the existence of the dielectric function $\varepsilon(\omega)$ for each material. However, it states quasistate limit for the outset. The field is therefore also described by a scalar potential Φ (eq. 4) and, because of the absence of spatial dispersion, the boundary conditions applicable to the layer interfaces are only electromagnetic boundary conditions. Since all adjacent materials in the asymmetric quantum well are different, the values of ω_{Li} are different. This means that oscillations of frequency ω_{Li} in material i cannot be sustained by the adjacent material (confined modes). It follows that the oscillations for the confined modes must vanish at the boundary for each material. We therefore set Φ to be zero at all boundaries.

$$\Phi(\mathbf{r}_{\parallel}, z, t) = \sum_j \int d^2 \mathbf{q}_{\parallel} \left(\phi_j(z) e^{i(\mathbf{q}_{\parallel} \cdot \mathbf{r}_{\parallel} - \omega_j(\mathbf{q}_{\parallel})t)} a(\mathbf{q}_{\parallel}, j) + H.C. \right) \quad (5)$$

For the IP modes, at the interfaces Φ also has to be continuous at $z=0$, $z=L$ and its derivative with respect to z multiplied by the dielectric function should be continuous at these interfaces. It is worth mentioning that the IP modes have potential maxima at the QW region and should vanish at the outer interfaces. As a result, the dispersion relation for the IP modes [10] is given by

$$\frac{\varepsilon_1(\varepsilon_2 + \varepsilon_3)}{\varepsilon_1^2 \tanh(q_{\parallel}D) + \varepsilon_2 \varepsilon_3 \coth(q_{\parallel}D)} = -\tanh(q_{\parallel}L) \quad (6)$$

In the case in which materials 2 and 3 are the same, the dispersion relation gets the corresponding IP dispersion of the symmetric QWs with metallic barriers [11].

Scattering mechanism and conclusions

In this section, we have studied the quantum capture mechanism. The total capture rate is the sum of the transition rates for the initial state to all possible bound states by emission of one of the possible polar optical modes. If $|\mathbf{k}_{\parallel}^i\rangle$ is an initial quantum well electronic state, $|\mathbf{k}_{\parallel}^f\rangle$ one of the possible final states and $|\{\mathbf{q}_{\parallel}, j\}\rangle$ a possible polar mode state with one quantum, then the total transition rate for all possible branches j is given by:

$$\Gamma_{total} = \sum_{j=1}^N \Gamma_j \quad (7)$$

where Γ_j is the contribution due to polar branch j . The rates are calculated using the Fermi golden rule (assuming that only emission is possible)

$$\Gamma_j(\mathbf{k}_{\parallel}^i) = \frac{2\pi}{\hbar} \int d^2 \mathbf{k}_{\parallel}^f \int d^2 \mathbf{q}_{\parallel} \left| \langle \mathbf{k}_{\parallel}^i; 0 | e\Phi | \mathbf{k}_{\parallel}^f; \{\mathbf{q}_{\parallel}, j\} \rangle \right|^2 \delta(E_i - E_f - \hbar\omega_j(\mathbf{q}_{\parallel})) \quad (8)$$

In the above equation, E_i and E_f stand for electronic energy initial and final state respectively.

\mathbf{k}_{\parallel}^i and \mathbf{k}_{\parallel}^f are the wave vectors for the initial and final state respectively and $\omega_j(\mathbf{q}_{\parallel})$ is the mode frequency of the emitted polar mode of branch j . The interaction Hamiltonian which couples the electrons to the polar optical modes is given by

$$\begin{aligned}
H_{\text{int}} &= e\Phi(\mathbf{r}_{\parallel}, z, t) \\
&= e \sum_j \int d^2 \mathbf{q}_{\parallel} \left(\phi_j(z) e^{i(\mathbf{q}_{\parallel} \cdot \mathbf{r}_{\parallel} - \omega(\mathbf{q}_{\parallel}, j)t)} + H.C. \right)
\end{aligned} \tag{9}$$

where e is the electronic charge.

Figure 2 shows the total bulk-phonon-mediated and the DC-phonon-mediated capture rate against L calculated for the electrons at the bottom of the first subband above the well which drop in all possible states within the QW. The capture rates are evaluated by the eq. 7 using numerical integration techniques (e.g. Monte Carlo integration). The rate shows regular peaks with an overall approximately linear increase as L increases. The peaks are associated with two distinct physical characteristics of the system: the onset of electron resonances and the threshold emission of phonons. The electron resonances are distinguished by a sharp drop, while the phonon peaks have sudden thresholds as L increases. The electron resonances arise when the initial subband enters the well which occurs at regular intervals of L [9-11]. At these points the highest probability distribution of the electrons shifts from the barrier regions to the well, thus increasing the overlap integrals in the matrix elements between this state and the states already in the well. Since the scattering into each subband is about the same for any L at an electron resonance, the rate is proportional to the number of subbands in the well. Hence, the height of the electron resonance peaks increases linearly with QW width. The sudden drop occurs because the new initial subband is higher in energy and one of the characteristics of this state is that the highest electron probability is in the barriers; the matrix elements decrease and so does the total capture rate. The other set of peaks is due to the possibility of scattering into a new subband by emitting phonons. This threshold appears for a larger QW width than each electron resonance and occurs when the previous initial state is in the well and also when the energy conservation requirements with $q_{\parallel} = 0$ are met. This gives a sudden increase but only depends on the scattering into one subband which decreases as the energy difference between the initial and the final subband increases with increasing well width. These peaks also have approximately the same height because not all subbands in the well but only one subband is involved. These are also generally smaller than the electron resonance peaks because the overlap integral is highest in the barrier regions leading to smaller transition matrix elements.

The electron capture rates via the emission of bulk phonons have the same electron resonance magnitude due to the fact that the electron resonance is independent of the phonon model. The positions (well widths) where the phonon resonances appear and the size of the peaks are different for DC and bulk phonons because of the different phonon frequencies which are predicted by different models.

Lastly, Figure 3 illustrates the electron capture rates in the case of the symmetric QW made with CdSe/ZnSe (II-VI semiconductor compounds) assisted by DC and Bulk phonons. Resonance peaks emerge in regular intervals because of the earlier mentioned conditions which give rise to electron and phonon resonances. As it is obvious, the asymmetry of the structure does not allow the antiresonances to be very sharp as in the case of the symmetric QW. Furthermore, concerning the antiresonance magnitude between the symmetric and asymmetric heterostructures, the order of magnitude difference is either one or two and the resonances for the case of asymmetric QW are larger than for the case of the symmetric QW.

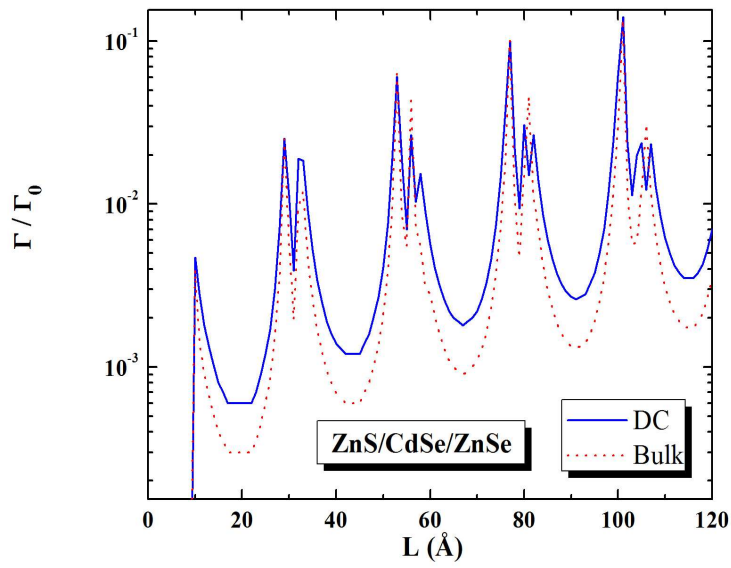


FIGURE 2. The electron capture rates for an asymmetric QW (with $D = 200 \text{ \AA}$).

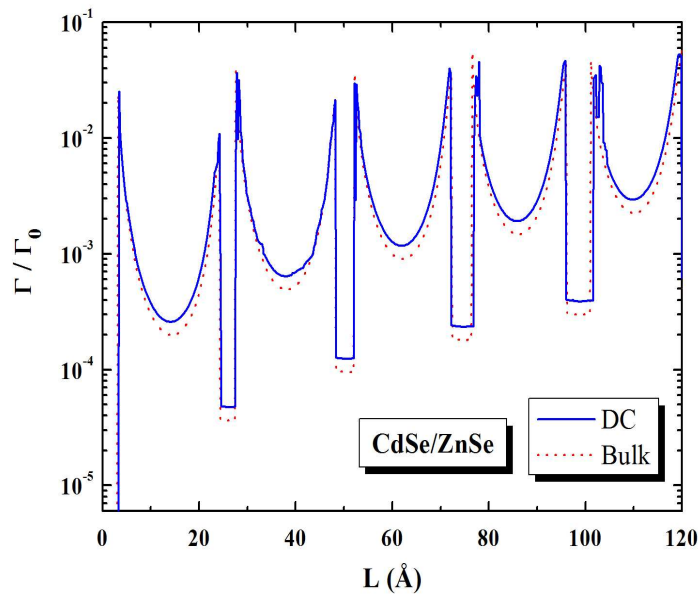


FIGURE 3. The electron capture rates for a symmetric QW (with $D = 200 \text{ \AA}$).

Summing over all, we have theoretically and numerically investigated the electron capture mechanism by considering only emission of LO phonons. The electron capture rates

assisted by the DC and bulk phonons are in a very good agreement (Figure 2 &3). Furthermore, the asymmetry of the heterostructure and the use of II-VI semiconductor compounds could be important parameters for both controlling the electron capture mechanism and studying semiconductor lasers which can operate in short wavelength regime of the electromagnetic spectrum [3] (e.g. blue-green region).

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank Prof. M. Babiker, Prof. B.K. Ridley for useful discussions and Lt. Commander of the Hellenic Navy D. Filinis for his support. The author V.N.S. would like also to acknowledge the financial support given by the Training Mobility of Researchers (TMR), NSA and ARDA under ARO Contract No. DAAD19-03-1-0128. and the University of Iowa under the grand No. 52570034.

REFERENCES

1. I. Akira, International II-VI conference, Edinburgh 1995 (III-V's Review Vol.9, No.1, page 66, 1996).
2. W. Meredith, III-V's Review, Vol.9, No.3, page 56, June 1996.
3. W.P. Risk, T.R. Gosnell and A.V. Nurmikko "Compact Blue-Green Lasers" (Cambridge University Press, 2003); Agrawal G. "Semiconductor lasers, past, present and future" (AIP Press, 1995).
4. Ridley B. K. 1982 "Quantum Processes in Semiconductors" 2nd edn (Oxford University Press).
5. Bastard G. 1992 "Wave mechanics applied to semiconductor heterostructure" (Wiley-Interscience).
6. Born M. and Huang K. 1968 Dynamic Theory of Crystal Lattices (Oxford : Clarendon).
7. Fuchs R. and Kliewer K. L., Phys. Rev. **140A**, 2076 (1965).
8. Kliewer K.L. and Fuchs R. Phys. Rev. **144**, 495 (1966).
9. V.N. Stavrou, C.R. Bennett, O.M.M. Al-Dossary and M. Babiker, Phys. Rev. B **63**, 205304 (2001).
10. V.N. Stavrou, M. Babiker and C.R. Bennett, J. Phys.: Condens. Matter **13** (2001) 6489-6498.
11. V.N. Stavrou, C.R. Bennett, M. Babiker, N.A. Zakhleniuk and B. K. Ridley, Phys Low-Dimens. Str., **1-2** (1998) 23-32; V.N. Stavrou and G.P Veropoulos, Semicond. Sci. Technol., 2009, **24**(9) 095014.

Prospects of Measuring High Energy Cosmic Rays and Neutrinos Using Radio Antenna Arrays

K. Papageorgiou^a and I. Gkialas^a

^a*University of the Aegean, Department of Financial and Management Engineering, 41 Kountouriotou Str., 82100, Chios, Greece*

Abstract. The earth is continuously bombarded by highly energetic particles, the cosmic radiation. The origin and the acceleration mechanism of the highest energy particles are still remain unknown. Understanding the origin of the ultra-high energy cosmic rays (UHECR), the highest energy particles observed in nature, is of great importance as it may impact our understanding of particle physics, fundamental cosmology, and extremely energetic phenomena in the Universe. We explore the possibilities of detecting the radio emission from cosmic ray air showers using a digital radio telescope in a form of an array of low-frequency antennas operating at 10-90 MHz. We discuss the system design requirements, calculated sensitivities and count rates.

Additionally we review several detection strategies including co-operation with particle detectors arrays consisting of large plastic scintillation counters and equipped with GPS, trigger, digitization and slow control electronics and a computer based data acquisition system, in order to provide a unique tool for the study of the energy spectrum and composition of cosmic rays and the determination of their nature and origin.

Combination of the non-ionizing electromagnetic radiation measurements in the environment with the ionization caused in the scintillation counters can lead to the calculation of the cosmic rays flux and shed some light in the study of their relation with several climatic factors like nebulosity. Finally we report on the operation status of a single low frequency radio antenna installed on Chios Island and we address the scientific perspectives of such an undertaking and effort.

Keywords: Air showers radio emission, Low frequency antennas, Radio frequency arrays, Cosmic rays

INTRODUCTION

Charged particles that continuously impinge on the earth's atmosphere are called "cosmic rays" and constitute an important astronomical window. They mainly consist of protons and ionized atomic nuclei of elements in the range from hydrogen to iron. The origin of cosmic rays is still a matter of scientific debate and many fundamental questions are remaining unanswered. Possible sources are supernova remnants, pulsars, quasars, active galactic nuclei, or other exotic particles. Due to their wide range in energy spectrum, different emission mechanisms are also possible. Since these charged particles are deflected in the interstellar magnetic fields, important information about their origin can be extracted from their energy and mass.

High energy cosmic rays hitting the earth's atmosphere undergo nuclear reactions with atmospheric nuclei, producing elementary secondary particles in an extensive air shower propagating towards the ground with almost the speed of light. This interaction processes fall into the realm of particle physics and consequently cosmic rays form one of the most important links between the two fields and their study is at the centre of the "astroparticle" physics. Furthermore, the secondary electrons and positrons in the particle cascade are then deflected by the earth's magnetic field producing dipole radiation in the frame of the shower as in synchrotron radiation. This radio emission from cosmic ray air showers can be detected using an array of low-frequency antennas. Because a significant fraction of the natural radioactivity on earth is caused by the fragments of cosmic ray induced extensive air showers, cosmic ray related effects have significance in our every day life. Additionally, strong evidence for a direct link between the cosmic ray flux reaching the earth and several climate factors like nebulosity have also been reported [1].

Direct measurements of cosmic rays are only possible above the earth. Due to their low flux, cosmic rays at energies above 1 PeV cannot be effectively measured by direct measurements. A standard method to observe these cosmic rays is to measure the secondary particles of an extensive air shower with an array of particle detectors on the ground. As the state of an air shower at the ground level depends on many factors, like primary particle energy and type, atmospheric conditions and statistical fluctuations, the determination of primary particle energy and type from the measured particles is not straightforward. Very useful information for the determination of primary particle energy and type can be obtained by additionally observing the air shower as it evolves.

Measuring radio emission from air showers might be an alternative method for such observations, providing a much better efficiency. This becomes particularly relevant since a new generation of digital radio telescopes – designed primarily for astronomical purposes – promises a new way of measuring air showers.

Emission Process

Experiments have clearly established that cosmic ray air showers produce radio pulses. Two main emission mechanisms have been proposed in the past for radio emission from Extensive Air Showers (EAS). The original motivation suggested by Askaryan [2] was that the annihilation of positrons would lead to a negative charge excess in the shower and therefore can produce Cherenkov radiation as it moves through the atmosphere with a velocity higher than the speed of light in that traversed medium.

At radio frequencies the wavelength of the emission is larger than the size of the emitting region and the emission should be coherent. The radio flux would then grow quadratically with the number of particles rather than linearly and thus would be greatly enhanced. This effect is

important in dense media where it was already experimentally verified [3] and is important for detecting radio emission from neutrino showers in ice or on the moon.

However, the dependence of the emission on the geomagnetic field detected in several later experiments indicates that another process may be important. The basic view according to the other proposed mechanism by Kahn and Lerche [4] was that the continuously created electron-positron pairs were then separated by the Lorentz force in the geomagnetic field which led to a transverse current in the shower. If one considers a frame moving along with the shower, one would observe electrons and positrons drifting in opposite directions impelled by the transverse electric field induced by the changing geomagnetic flux swept out by the shower front. This transverse current then produces dipole (or Larmor) radiation in the frame of the shower. When such radiation is Lorentz-transformed to the lab frame, the boost then produces strongly forward beamed radiation, compressed in time into an electro-magnetic pulse.

An equivalent scenario to that of the transverse currents is the coherent geosynchrotron emission [5] from highly relativistic electron-positron pairs gyrating in the earth's magnetic field. Coherence is achieved since the shower in its densest regions is not wider than a wavelength around 100 MHz and at a few kilometer height the phase shift due to the lateral extent of the shower for an observer on the ground is similarly less than a wavelength even out to some 100 m from the core. The proposed coherent geosynchrotron process is derived from the basic formula for dipole radiation but does not require a consideration of charge separation. The different sign of the charges of electrons and positrons in the shower is almost completely canceled by the opposite signs of the Lorentz force acting on electrons and pairs. Hence both populations will contribute in roughly the same way to the total flux and will not interfere destructively.

To an observer at the ground the acceleration vectors of electrons and positrons projected on the sky point in opposite directions and hence the systems resembles a radiating dipole, with electrons going in one direction and holes going in the other direction.

RADIO PROPERTIES OF EXTENSIVE AIR SHOWERS

Radio emission from cosmic ray Extensive Air Showers (EAS) was discovered for the first time by Jelley [6] in 1965 at a frequency of 44 MHz, using an array of dipole antennas in coincidence with Geiger counters. The results were soon verified and emission from 2 up to 520 MHz was found in the late 1960s. Due to the difficulty with radio interference, the uncertainty about the interpretation of experimental results and the success of other cheaper experimental techniques for air shower measurements, these activities almost completely ceased in the subsequent years.

The radio properties of air showers are summarized in an extensive review by Allan [7]. The main result of this analysis led to the following approximate formula relating the received time-integrated voltage of air shower radio pulses with other various parameters,

$$\varepsilon_\nu = 13 \mu V m^{-1} MHz^{-1} \left(\frac{E_p}{10^{17} eV} \right) \left(\frac{\sin a \cdot \cos \theta}{\sin 45^\circ \cdot \cos 30^\circ} \right) \exp \left(\frac{-R}{R_0(\nu, \theta)} \right) \left(\frac{\nu}{50 MHz} \right)^{-1}$$

where E_p is the primary particle energy, R is the offset from the shower center and R_0 is around 110 m at 50 MHz, θ is the zenith angle, a is the angle of the shower axis with respect to the geomagnetic field, and ν is the observing frequency. Some discrepancies in the frequency scaling factor may be due to the systematic errors in the determination of the primary particle energy E_p which was used to normalize the results.

DETECTING EXTENSIVE AIR SHOWER RADIO EMISSION

Conceptual Design of a Cosmic Rays Radio Detector

The basic idea is to build an array of four quasi-omnidirectional low frequency dipole antennas (RF Station) distributed at the site of the HELYCON (Hellenic Lyceum Cosmic Observatories Network) experiment in Chios Island, Greece, in order to investigate the properties of the radio component of an extensive air shower. Upon global trigger arrival from a pre-defined number of particle detector stations, the received waves from the low frequency antennas are then digitized and sent to a central cluster of computers, taking advantage from an interesting feature of the experimental design to store the entire data stream for a certain period of time.

HELYCON [8] consists of four detector stations, each one equipped with three large plastic Scintillation Counters for Extensive Air Shower detection. It also includes a Global Positioning System (GPS) device, trigger and digitization electronics, slow control electronics and a computer based data acquisition system. The time synchronization between the detector stations rely on the timing signals from the GPS navigation satellites. The first installed RF antenna was designed and developed by ASTRON [9] as prototype for the HELYCON experiment and it is very similar to those used in LOFAR experiment [10], a large array for astronomical purposes. At low frequencies the RF station has the ability to monitor a large fraction of the sky at once. This can be used to look for astrophysical transients, such a gamma ray bursts, X-ray binary flares and other interesting phenomena, opening a completely new window for radio astronomy.

From a scientific point of view the aim of such a prototype station of cosmic rays radio detector is to correlate the observables of the radio emission measurements with the shower properties provided by the array of the particle detectors of HELYCON experiment. Due to the fact that the prototype cosmic rays radio detector is triggered by the HELYCON particle detectors, the reconstructed shower data can be used initially as starting values in the development of a standalone reconstruction algorithm of the radio signals in a self-triggering antennas scheme. Therefore the unique combination of an established and well understood air shower together with a new detection technique offers the best opportunity to study the radio emission in extensive air showers.

THE HARDWARE OF THE COSMIC RAYS RADIO DETECTOR

Scintillation Counters

The HELYCON charged particle detector is a scintillation counter of 1 m² active area. It is made of two layers of polystyrene scintillation tiles, adjusted on a wooden

frame. Each layer consists of 25 tiles (tile dimensions: 200x200x5 mm³) wrapped in reflective paper. The scintillation light is collected by 40 in total wavelength shifting optical fibers (Bicron BCF-91A), embedded inside the grooves of the scintillating tiles and it is detected by an FEU-115M [11] photomultiplier tube (PMT). The efficiency of the scintillation counters is better than 99% for minimum ionizing particles. A Cockcroft-Walton voltage multiplier mounted on the wooden frame of the detector, supplies high voltage (HV) to the photomultiplier tube with low voltage external feeding of 18 V. Finally, the whole construction is enclosed inside a water resistant wooden box. A Scintillation Counter of the HELYCON experiment is shown in figure 1.

The electrical pulses of each PMT are carried to the digitization electronics by a long (~200 m) RG58 cable. The control and monitor signals are transmitted through standard UTP cables. The Readout system is based on a High Precision Time to Digital Converter (HPTDC) chip, designed at CERN, whilst a 12-bit multifunction USB data acquisition card (National Instruments USB-6008) is used for the slow controls. The synchronization between the HELYCON stations relies on the GPS (Motorola M12+) time signal.

The Readout card for HELYCON was designed and developed in the Detector Instrumentation Laboratory of the Nuclear Physics Institute at “DEMOKRITOS” [12] and offers up to 5 analogue inputs, each one for a scintillation detector. The input signals are amplified and compared to six predefined and remotely adjustable thresholds. The corresponding times of the PMT waveform-threshold crossings are digitized with an accuracy of 100 ps by the HPTDC, along with the 1 PPS output of the GPS receiver. A first level trigger is formed as the fast hardware coincidence between two of the PMT inputs. Second level triggers are realized in the Field Programmable Gate Array (FPGA) of the Readout card, requiring a certain time relation between the input signals. Both the first and the second level triggers are provided as NIM and as TTL card outputs. The FPGA is also responsible for formatting the data and for communicating with the station (local) PC through the USB or/and the Ethernet ports of the card. The data are saved on the hard disk of the local computer and transmitted on request, via the Internet, to the central server of the HELYCON telescope.



FIGURE 65. A Scintillation Counter of the HELYCON experiment

The RF Station

The RF station operates in the frequency range of (10–90) MHz. This is a band where there are few strong man made radio transmitters, as it lies between the short-wave- and the FM-band. Also the frequency is low enough, that the emission from air showers is strong, while it is still high enough, so that the background emission from the galactic plane is still low.

The basic element of the RF station is a Low Band antenna (LBA) originally developed by ASTRON for HELYCON experiment in Chios Island. It consists of two perpendicular inverted-V shaped dipole antennas and two active baluns, integrated on a single board, to provide amplification and impedance transformation.

Mechanically, the antenna consists of a centre pole that is kept upright by four wires. The top part of each wire is made of copper and these wires form the four dipole arms. The lower parts of two (perpendicular) wires consist of rubber springs. The height of the antenna feed point is governed by the radiation pattern at the highest frequency and the sensitivity at the lowest frequency. A higher antenna will increase the sensitivity at lower frequencies, but will degrade the pattern (the sensitivity towards zenith) for the highest frequencies (optimum height $\sim 3/8$ of the shortest wavelength). A photograph of the LBA antenna is depicted in figure 2.



FIGURE 2. The Low Frequency Antenna used in the Cosmic Rays Radio Detector experiment.

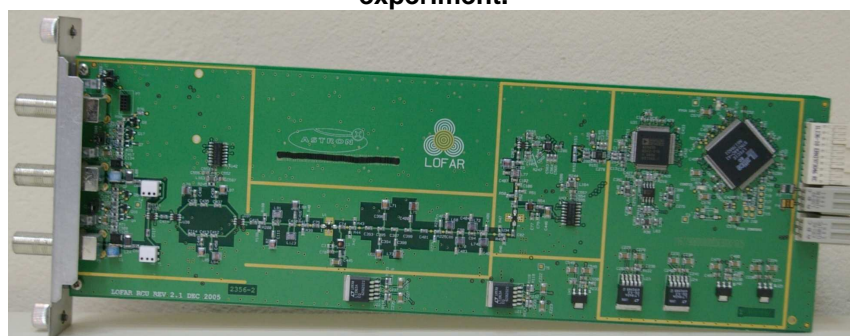


FIGURE 3. The Receiver Unit (RCU)

Received radiation is converted into electrical signals. The analogue signals are then transported over coaxial cables toward the Receiver Unit (see figure 3). The receiver converts the signals into the digital domain and once digital, the filter block takes care of representing the broad band signal at the input of the filter. The radio frequency signal is sampled without the use of a local oscillator inside the receiver module. The necessary dynamic range to detect weak pulses while not saturating the ADC with radio interference is achieved by using 12-bit ADCs. The sampling rate is 200 MHz. The sample clock for the ADC's is generated on a central clock module, the Time Distribution board (TDS) shown in figure 4a and is then distributed to all boards. This allows us to combine the data from all antennas as a phased array and thus enhance the sensitivity.

From the Receiver Modules (RCU's) the signals are fed to the Remote Station Processing (RSP) board, shown in figure 4b, where they are filtered and beam formed. After a trigger signal is received, the data is read out and sent to a central DAQ-PC, the Local Control Unit (LCU), where it can be analyzed online or stored on hard disk. The LCU is a 19 inch rack PC with Redhat Linux operating system. This system can be accessed locally via keyboard and mouse and remotely via the switch with an SSH link. The LCU controls all the boards in the sub-racks, it receives the timing signal and can be also used to monitor the temperature inside the station or read alarm contacts. All the specialized hardware for the RF station in Chios Island was developed at ASTRON in Dwingeloo, Netherlands in the frame of INTERREG IIIA program.

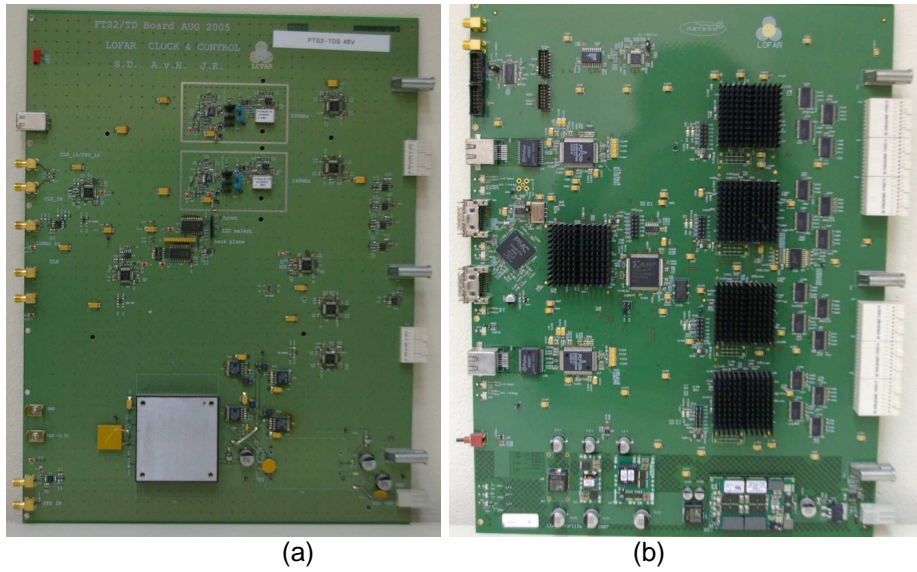


FIGURE 4. (a) The Time Distribution Board (TDS) and (b) The Remote Station Processing (RSP) board

CURRENT STATUS AND FIRST RESULTS

The first stage of the Cosmic Rays Radio Detector located in Chios Island is nearly complete. The sub-rack for the RF system (see figure 5) and one antenna is set up at the HELYCON experiment site, where all the twelve scintillation counters have already been deployed. At the time of writing the low frequency antenna is taking air shower data.



FIGURE 5. The Receiver Unit (RCU)

A preliminary analysis of the first data has already been performed. A power spectrum received from the single operating low frequency antenna during a data taking phase is reconstructed using an offline reconstruction algorithm, running on the data set stored in the hard disc of the DAQ-PC and the results are depicted in figures 6a and 6b for X and Y polarity respectively.

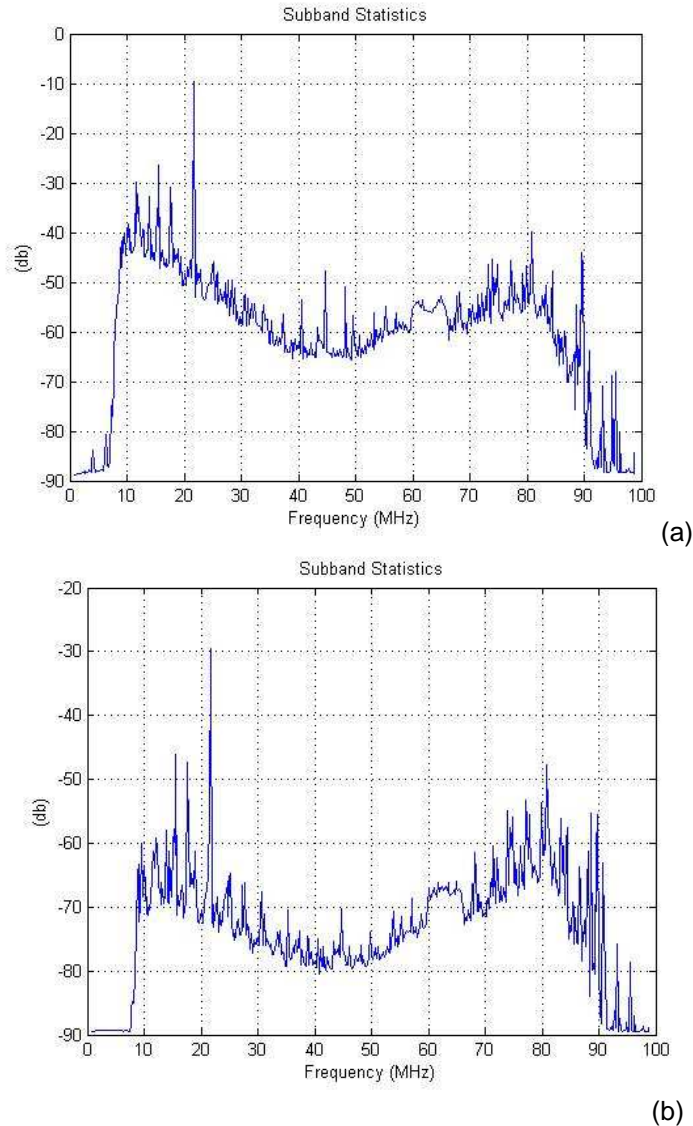


FIGURE 6. (a) Left Panel: Offline reconstruction of a power spectrum received from the single RF antenna during an online data taking phase, (b) Right Panel: Offline reconstruction for Y-polarity and for the same data set

OUTLOOK AND DETECTION STRATEGIES

Currently we are working on the development of reconstruction algorithms for data analysis and for the improvement of the system for the second stage. As it is already pointing out the detection of astrophysical transient events could benefit from the current design (using an external trigger from particle detectors) of the Cosmic Rays Radio Detector, although the development of a standalone piece of software to detect radio emission from extensive air showers is mandatory for self-triggering antennas scheme. The basic idea behind is to correctly combine the signals from all the different dipoles of the telescope array by beam forming, thus taking into account the appropriate time delay in signal reception due to the distances between the antennas. This technique is expected to increase the sensitivity and to further suppress the radio frequency interference.

By applying different shifts to the many antenna signals, someone can point the telescope virtually anywhere, because the individual elements don't need to be pointed. One data set for a certain period of time contains data of the entire sky.

In conclusion state of the art electronics and information technology can be used to digitally form multiple beams in almost any desired direction. With such a technology one can adaptively form beams in any shape and even look back in time using buffered data and taking advantage from this interesting feature of the telescope design.

REFERENCES

34. Henrik Svensmark and Eigil Friis-Christensen, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Vol 59, No. 11, pp. 1225-1232, 1997
2. G.A. Askaryan, Sov. Phys., J.E.T.P. 14 (1962) 441.
3. D. Saltzberg, P. Gorham, D. Walz, et al., Phys. Rev. Lett. 86 (2001) 2802.
4. F.D. Kahn, I. Lerche, Proc. R. Soc. London A-289 (1966) 206.
5. Falcke, H., Gorham, P., 2003. Astropart. Phys. 19, 477.
6. Jelly J.V. et al. (1965), Nature 205, 327
7. Allan H.R. (1971), Prog. in Elem. part. and Cos. Ray Phys., Vol 10, 171
8. S. Tzamarias et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 595 (2008) 80–83
9. R. Halfwerk, ASTRON (private communication)
10. A. Horneffer et al., Proceedings of the 31st ICRC, LODZ 2009
11. V. Brekhovskikh et al., LHCb CALO 2000-040, 26 Apr 2000
12. D. Loukas, Institute of Nuclear Physics, DEMOKRITOS (private communication)

Evaluation of Compton scattering sequence reconstruction algorithms for a portable position sensitive radioactivity detector based on pixelated Cd(Zn)Te crystals

K. Karafasoulis^{a,b}, K. Zachariadou^{c,d}, C. Potiriadis^b, S. Seferlis^b, I. Kaissas^b, D. Loukas^d, C. Lambropoulos^e

a. Hellenic Army Academy, 16673 Vari, Greece

b. Greek Atomic Energy Commission, Patriarxou Grigoriou & Neapoleos Aghia Paraskevi Athens P.O Box 60092 Postal Code 15310

c. Hellenic Naval Academy, Xatzikiriakio, 18539 Piraeus, Greece

d. Institute of Nuclear Physics, National Center for Scientific Research Demokritos, P.O Box60228

e. Technological Educational Institute of Chalkida (TEI of Chalkida), Psachna Evias Postal Code 34400 Greece

Abstract. We present extensive simulation studies on the performance of algorithms for the Compton sequence reconstruction used for the development of a portable spectroscopic instrument (COCAE), with the capability to localize and identify radioactive sources, by exploiting the Compton scattering imaging. Various Compton Sequence reconstruction algorithms have been compared using a large number of simulated events. These algorithms are based on Compton kinematics, as well as on statistical test criteria that exploit the redundant information of events having two or more photon interactions in the active detector's volume. The efficiency of the best performing technique is estimated for a wide range of incident gamma-ray photons emitted from point-like gamma sources.

Keywords: Monte Carlo simulations, Semiconductor detectors, Gamma-ray spectroscopy, Compton camera.

PACS: 24.10.Lx, 29.40.Wk, 29.30.Kv, 42.79.Pw

INTRODUCTION

COCAE is a portable spectroscopic system under development within the framework of the COCAE¹⁶ project aimed to be used for the accurate localization and identification of radioactive sources and radioactively contaminated spots, in a broad energy range up to 2MeV.

The proposed portal instrument can be used for security inspections at the borders (airports, seaports etc) such as the determination of the position and the strength of

¹⁶ The project is funded under the European Community's FP7 -Program- Theme Security. Web Site [http:// www.cocae.eu](http://www.cocae.eu)

potential radioactive sources. It can also be used at recycling factories for the detection of possible radioactive sources into scrap metals. Furthermore, the COCAE instrument could improve a lot the existing procedures at the nuclear waste management facilities as well as provide fast and accurate information during the response after a nuclear emergency situation.

For the source localization task, COCAE exploits the Compton scattering imaging, a technique widely used in many fields such as nuclear medicine, astrophysics and recently for counterterrorism. Among the main advantages of the proposed system is its enhanced efficiency and high energy resolution in combination with its independency of any cryogenic system.

COCAE is schematically shown in Figure 1.

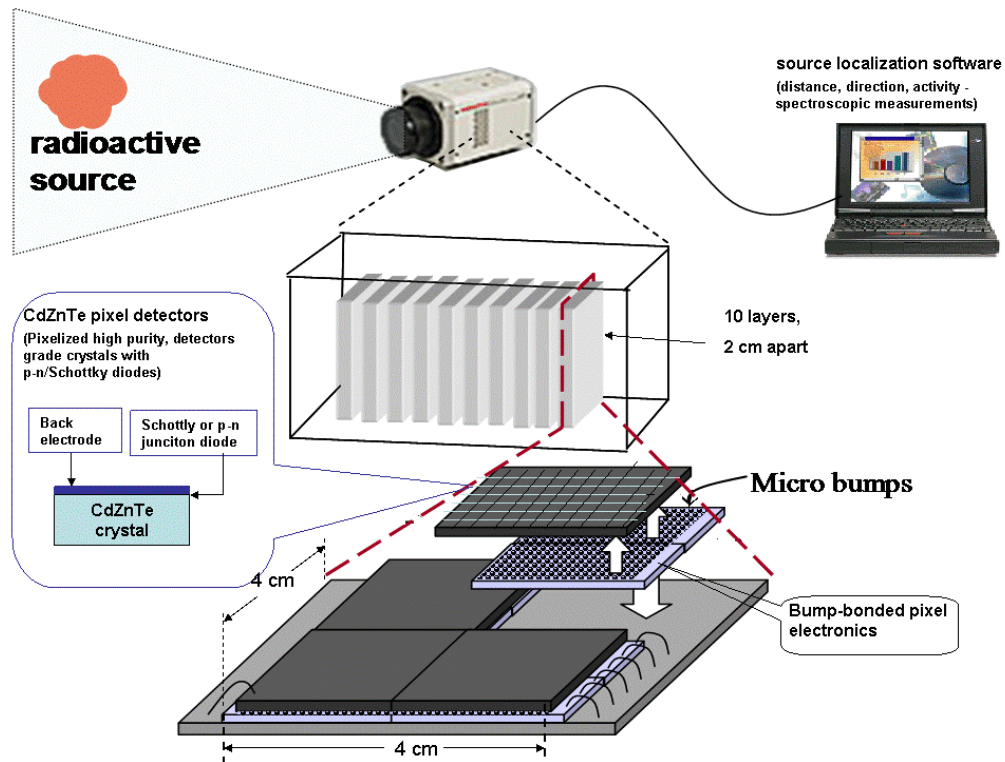


FIGURE 66. Schematic illustration of the COCAE instrument configuration

The proposed instrument consists of ten parallel planar layers, placed 2cm apart, and made of pixelated 2mm thick Cadmium Telluride (CdTe) crystals occupying an area of 4cmx4cm.

Each detector's layer consists of a two dimensional array of pixels (100x100) of 400µm pitch, bump-bonded on a two dimensional array of silicon readout CMOS circuits of 300µm thickness. Both pixels and readout arrays are on top of an Al₂O₃ supporting printed circuit board layer.

The most crucial parameters of the detector for the source localization are its detection efficiency and energy resolution, which influence the event statistics and the uncertainty of the Compton scattering angle determination

As to the detection efficiency, CdTe semiconductor crystals compared to Germanium (Ge) and Sodium Iodide (NaI) detectors have in principle higher efficiency due to the higher atomic number. In order to achieve even better efficiency, a thick CdTe detector of several mm would be needed, but an increase of the crystal thickness would deteriorate the detector energy resolution due to the effect of incomplete charge collection of CdTe semiconductors. To bypass this restriction

COCAE instrument is designed as system of ten 2mm stacked detectors, instead of one thick mono-crystal.

As to the energy resolution, even not very high quality CdTe crystals exhibit better energy resolution than NaI detectors. On the other hand the Doppler broadening effect (see section C) is higher for CdTe detectors compared to NaI and Ge detectors. The challenge for the COCAE instrument is to achieve an energy resolution comparable to the one of high purity Germanium detectors, without the need of cryogenics (CdTe semiconductors can be operated at room temperature due to their high energy bandwidth).

PRINCIPLE OF COMPTON RECONSTRUCTION

Instruments like COCAE that exploit the Compton imaging technique deduce the energy of the incident gamma ray photons as well as their origin within a cone, by measuring the energy depositions and the positions of the Compton scattering interactions recorded in the detector. A typical design of such an instrument consists of two types of detectors, the scatter detector with relatively low atomic number, where the Compton scattering occurs, and the absorber with relatively high atomic number, in which the scattered photon is ideally totally absorbed. The COCAE instrument's CdTe detectors work both as a scatter, thanks to their arrangement into thin layers, and as an absorber, due to the large atomic numbers of Cd ($Z=48$) and Te ($Z=52$), resulting into a high photo-absorption efficiency.

Figure 2 illustrates the schematic of the Compton reconstruction principle [1]. Considering a photon with energy E_0 incident on the detector's sensitive area that undergoes a Compton scattering, it will create a recoil electron of energy E_e , quickly absorbed and measured by the detector, and a scattered photon of energy E_g . The scattered photon ideally deposits its energy in the detector in a series of one or more interactions and is finally absorbed via a photoelectric interaction. The photon scatter angle ϕ is related to the measured energy depositions according to the Compton formula:

$$\cos \phi = 1 - m_0 c^2 \left(\frac{1}{E_g} - \frac{1}{E_g + E_e} \right) \quad (98)$$

where $m_0 c^2$ is the rest energy of the electron.

In addition the initial gamma ray direction \hat{r}_0 (unit vector) is geometrically related to the photon scatter angle ϕ :

$$\cos \phi = \hat{r}_0 \cdot \hat{u} \quad (99)$$

where

$$\hat{u} = \frac{\vec{r}_2 - \vec{r}_1}{|\vec{r}_2 - \vec{r}_1|} \quad (100)$$

and \vec{r}_1, \vec{r}_2 are the positions of the interactions.

By measuring the energy depositions (E_e, E_g) as well as the positions of the interactions (\vec{r}_1, \vec{r}_2), the incident gamma ray photon direction is restricted to a cone, the opening angle of which is the Compton scatter angle ϕ .

Successive interactions of the emitted gamma rays create overlapping cones according to equation (2) and the source location is the intersection of all measured cones (Figure 2b). In principle, three cones are sufficient to reconstruct the image of a point source. In practice, due to measurement errors and incomplete photon

absorption, a large number of reconstructed cones are needed to derive the source location accurately.

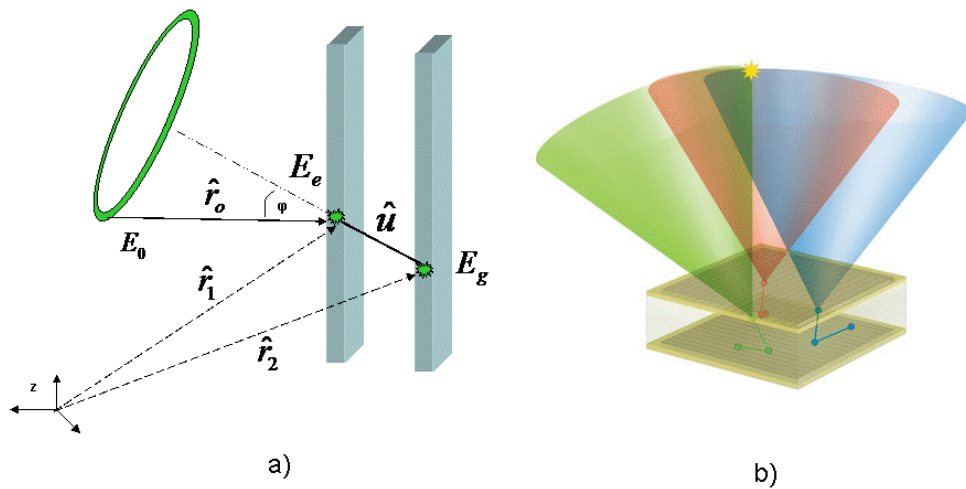


FIGURE 2. The principle of Compton reconstruction a) kinematics of Compton scattering b) Illustration of Compton imaging

The instrument's ability to localize radioactive sources accurately depends on the efficient reconstruction of the incident direction of the photons emitted by the source that interact through Compton scattering with the detector. Thus, the determination of the correct sequence of photon interactions in the detector is crucial. It has to be noted that in a real detector, an energy deposition is recorded only if its value is above a minimum threshold, therefore it is called "a hit". The importance of the determination of the correct sequence can be easily visualized in the case of a fully absorbed photon interacting in the active parts of the detector via a Compton scattering (dual hit event), as is illustrated in Figure 3.

Since the distance between the layers is very small in a portable instrument such as COCAE, it is impossible to have a timing tag for each hit, thus for a dual hit event, there are two possible hit orderings, each one resulting in a different direction for the initial photon.

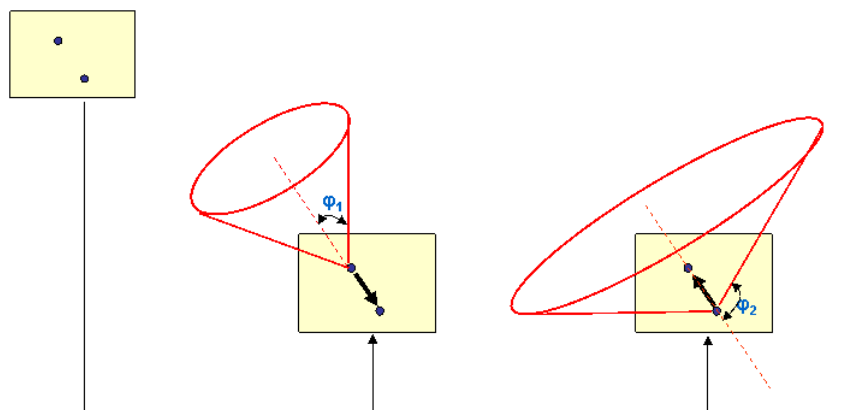


FIGURE 3. Compton sequence reconstruction of an event having two hits in the active detector's volume. An incorrect determination of the hit sequence results in an estimation of the Compton angle that could largely deviate from the correct value.

The algorithms for the Compton scattering sequence reconstruction aim at identifying the hit order in absence of timing information by exploiting the kinematical and geometrical information of the event as well as statistical considerations.

The main task of the present work is to compare the performance of different Compton sequence reconstruction algorithms, tested on a large number of Monte Carlo simulated events interacting with the model of the COCAE detector, in order to select the best performing one for the reconstruction procedure of a Compton event.

MONTE CARLO SIMULATION

The COCAE instrument is modelled by an open-source object-oriented software library (MEGAlib [2]) which comprises detector geometry construction tools, reconstruction methods and high level data analysis tools. For the Monte Carlo studies, MEGAlib provides interface to the Geant4 [3] simulation toolkit. In Geant4, the Low Energy Compton Scattering (G4LECS [4]) package is used to accurately model the Compton scattering by including Compton cross sections modified for bound electron momentum, as well as corrections on the resulting changes in the scattered particle energies (known as Doppler broadening)¹⁷.

The Monte Carlo simulation study encompasses the following steps:

A) At the first step, the exact COCAE detector geometry is modelled. Since Compton scatterings can occur in both sensitive and non-sensitive materials of the detector, so resulting into incomplete energy measurements, special care has been taken to incorporate an accurate geometric and physical description of the detector's passive materials. This is a precondition along with the implementation of the correct isotopic composition of all detectors' materials as well as of all the corresponding particle cross sections in order to ensure an accurate simulation of the real detectors' performance.

B) At the second step, a point gamma ray source with isotropic emission is modelled, emitting photons in an energy range from 60keV up to 2000keV. The gamma ray source is placed in front of the detector, on its axis of symmetry and at a distance of 40cm from the first detecting layer. A very large number of photons ($\sim 2 \times 10^9$) are generated and are allowed to interact with the COCAE model. For accurate simulation of the detector response the simulation is ensured to take into account all relevant physical processes (low energy electromagnetic processes including Doppler broadening).

The output of this simulation step is a collection of hits consisting of energies highly idealized and positions limited by the pixel's dimensions. In order to adapt the ideal simulated data to realistic energy measurements, the simulated photon energies are blurred according to Gaussian distributions with a FWHM that varies from 3.5% at energies around 100keV down to 1% at energies above 662keV, assumed to be in accordance with realistic energy measurements.

C) The third step of the simulation is the process of event reconstruction at which dedicated algorithms are used in order to group together the individual simulated hits into events and to identify their original interaction process. Thus, at the end of the event reconstruction process the data are represented by event types (e.g. Compton scattering or photo-effect event) and their associated information (e.g. energy and direction of the Compton scattered gamma ray and of the recoil electron).

The event reconstruction is split into two steps:

- a) Clustering (blobbing adjacent hits into one larger hit, called from now on an Energy Cluster or simply a cluster), and
- b) Compton sequence reconstruction (identifying the sequence of Compton interactions).

¹⁷ However, as for GEANT4.9.2 the G4LowEnergyCompton physics package includes a treatment of Doppler broadening very similar to that provide by G4LECS package.

For the clustering, the energy of the eight closest neighbor pixels to a hit combine to form a cluster (Figure 4-a). The energy of the cluster is the total energy of its pixels and its position is calculated via an energy-based center of gravity [5]. Figure 4-b shows the average number of hits in a cluster, for fully absorbed events, as a function of the incident photon energy. As it is expected, the mean value of hits combined into a cluster increases with the energy, since at higher energies the scattered electrons travel longer distances in the detector's material, thus they activate more pixels.

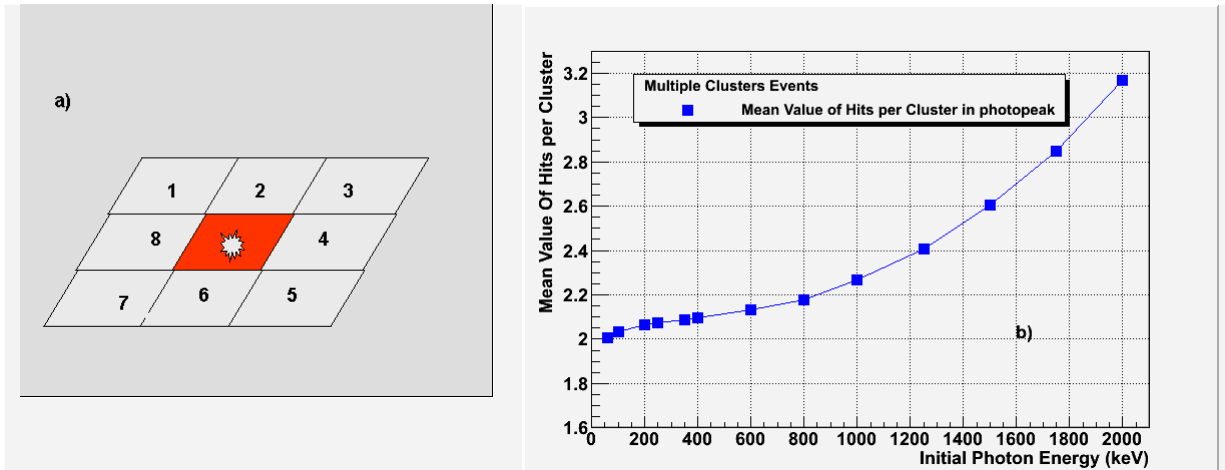


FIGURE 4. a) Clustering adjacent hits into a larger hit b) Average number of hits per cluster, as a function of the incident photon energy

For the sequence reconstruction, the clusters must be sorted in the order in which the interactions of the original particles occurred inside the detector. Since the distance between successive interactions is short, time of flight measurements are not possible. Thus, the interaction sequence cannot be determined directly. Consequently, if N clusters are recorded in the detector, there are $N!$ possible sequences, of which only one is the correct one, whereas the rest form a combinatorial background. The objective of the sequence reconstruction algorithms is to select the most probable sequence among all possible ones and to eliminate the combinatorial.

In order to achieve efficient reconstruction of events a sufficient understanding of the gamma ray interactions with the detector's materials is necessary. Thus, simulation studies have been performed to understand the detector response under different radiation fields.

In the sub-MeV to MeV energy range, the four dominating interactions of photons with matter are the photoelectric absorption, the Compton scattering, the pair production and the Rayleigh scattering mechanisms. The shape of the spectrum of the energy deposited on the detector depends largely on the mechanism via which the incident photon primarily interacts with the detector. Figure 5 shows the simulated relative contribution of the photon's first interaction in the detector's sensitive areas as a function of the incident photon energy. It can be noticed that the probability that the first interaction of the incident photon is a photoelectric effect dominates at low energies whereas the probability that the first interaction is a Compton scattering dominates for photons more energetic than 200keV (~30%), reaching ~90% at energies above 800keV.

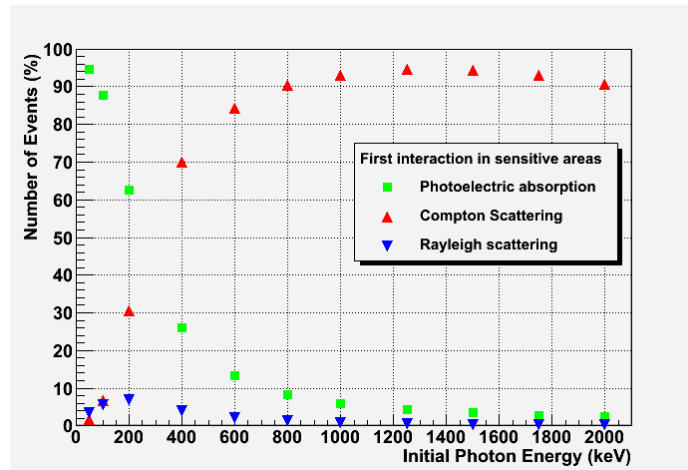


FIGURE 5. Relative contribution of the photon's first interaction in the detector's sensitive areas as a function of the incident photon energy.

Shown in Figure 6 is the spectrum of the simulated energy deposition on the detector's active volume, of different mono-energetic incident gamma ray energies varying from 200keV up to 1500keV.

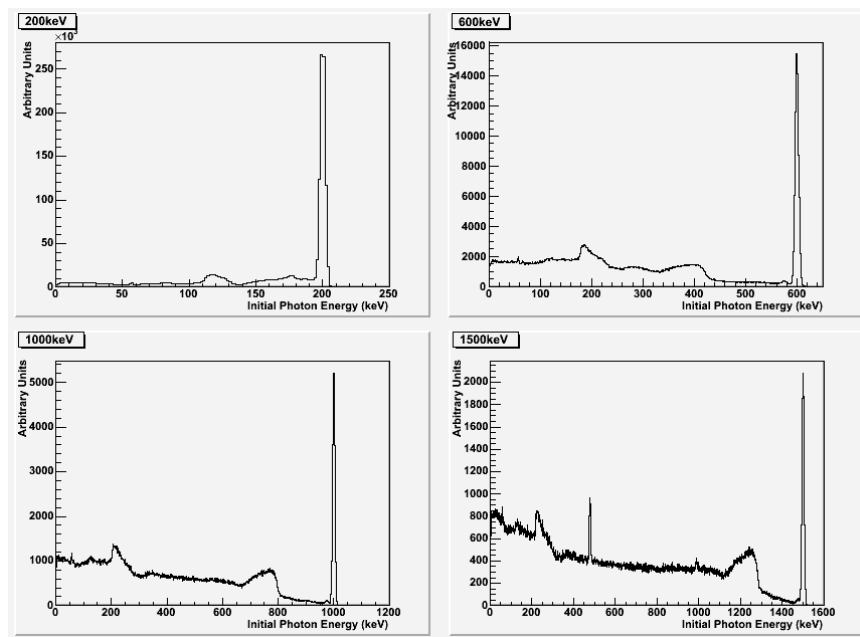


FIGURE 6. Typical energy deposition spectra for various incident gamma rays energies illustrating the photo-peak and the Compton plateau.

Interactions via a photoelectric effect result in full energy absorption and contribute to the full energy peak (photo-peak). In the Compton scattering interactions, the scattered electron carries a fraction of the initial gamma ray photon, whereas the scattered photon is either absorbed or escapes the detector. Figure 7 shows the ratio of events that are completely absorbed in the detector over the total number of events that interact with the detector's active volume and give a measured energy deposition.

Notice that in the following studies the events are considered to be fully absorbed when the photon's energy is within $\pm 3\sigma$ from the incident photon's energy.

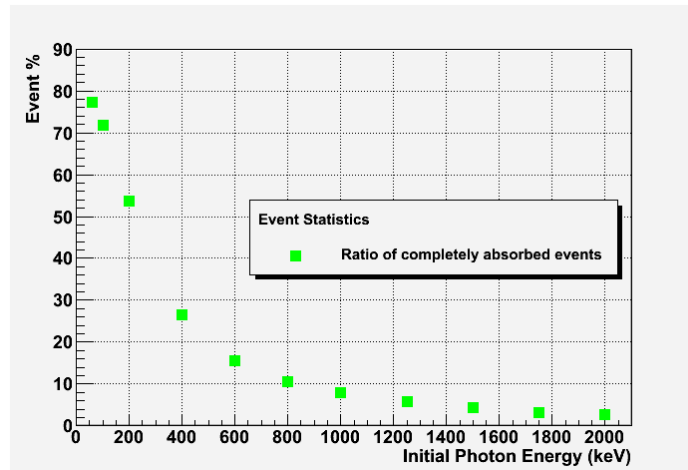


FIGURE 7. Percentage of fully absorbed events over the total number of events having energy depositions in the detector’s active volume, as a function of the initial photon’s energy.

In the energy spectrum (Figure 6), the full energy peak originates from two different types of events: a) events having one cluster in the detector; these are events for which the total energy of the photon is transferred to the detector’s electrons at once due to photoelectric effect, and b) multiple cluster events for which the total energy of the photon is transferred to the detector’s electrons after a sequence of Compton scatterings followed by a photoelectric interaction. It is evident that only Compton scattering events that are fully absorbed are useful for the Compton scattering reconstruction. Figure 8 summarizes the simulation results for the contribution to the photo-peak part of the energy spectrum of events that have multiple clusters (mainly events that undergo multiple Compton scattering, which in turn gets photo-absorbed).

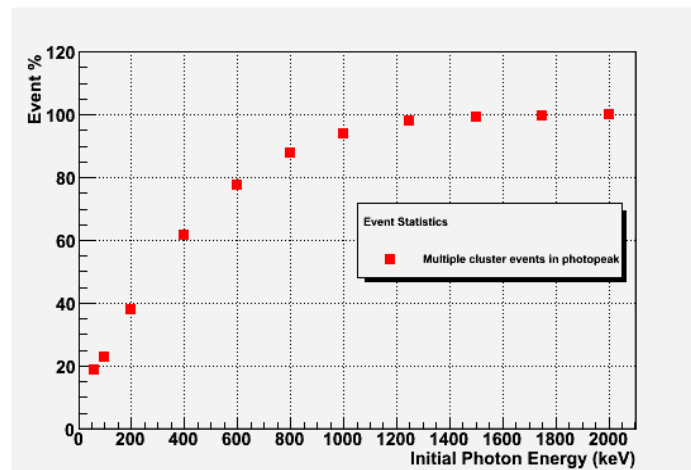


FIGURE 8. Percentage of fully absorbed multiple cluster events as a function of the incident gamma-ray energy.

Furthermore, it has been verified that the average number of Compton interactions (events having more than one cluster) contributing to the photo-peak increases as the incident photon energy increases (Figure 9). The available information from multiple cluster events is crucial for the reconstruction of the initial photon direction, thus the number of events suitable for reconstruction becomes higher as the photon’s initial energy increases.

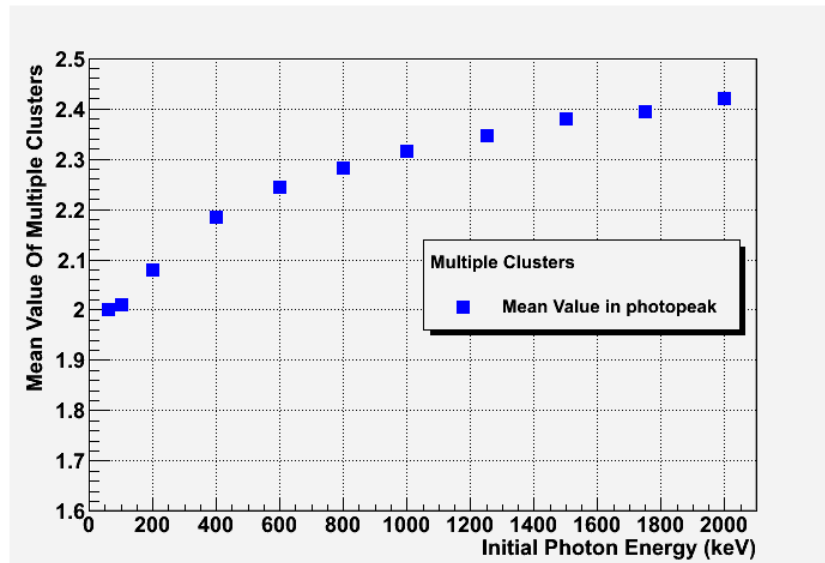


FIGURE 9. The mean value of clusters of multiple-cluster events totally absorbed, as a function of the incident photon energy.

However, the complexity of the sequence reconstruction algorithms goes with the factorial of the number of interactions (see section D2), thus reconstructing events with more than seven clusters is getting difficult. Therefore, such events are rejected from our study. Fortunately, the number of the rejected events is extremely limited for energies up to 2000keV, as indicated in Figure 9, where the highest value of the average of multiple clusters in the totally absorbed events is just over 2.4.

SEQUENCE COMPTON RECONSTRUCTION

As it has been mentioned in the introduction, in order to reconstruct the Compton scattering events accurately, the order of the photon interactions in the COCAE instrument must be correctly determined.

Two different techniques for the sequence reconstruction have been exploited: the Dual Cluster Sequence reconstruction (DCS) applied on events with only two interactions in the detector's active volume and the Multiple Cluster Sequence reconstruction (MCS) applied on events with more than two interactions.

Figure 10 shows the percentage of fully absorbed events having two or more clusters in the detector, as a function of the initial photon energy. It is evident that the case of two-cluster events is predominant at all energies. The case of events having more than two clusters becomes more frequent in higher energies, reaching about ~40%, at photon energies of 2MeV.

Notice that in the following plots all errors are of the order of 1%, thus they are not visible.

Presented in the following sections are the different algorithms for the sequence reconstruction, extensively studied using a very large number ($\sim 2 \times 10^9$) of simulated events interacting with the model of the COCAE detector. The flow-cart of the reconstruction algorithms used is depicted in Figure 11.

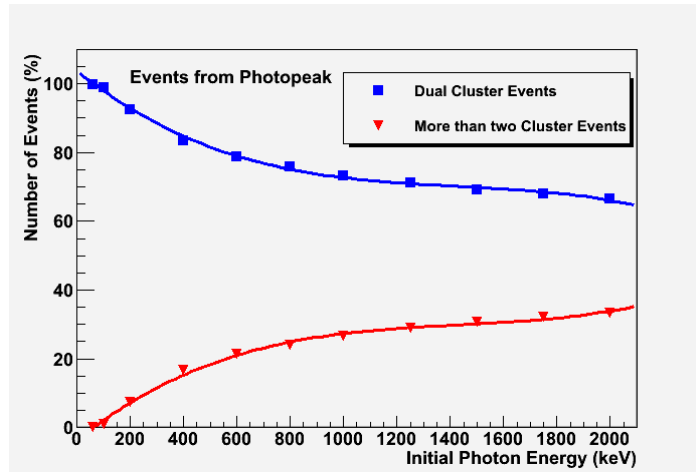


FIGURE 10. Photo-peak events: Percentage of two-cluster and more than two cluster events as a function of the incident gamma-rays energy.

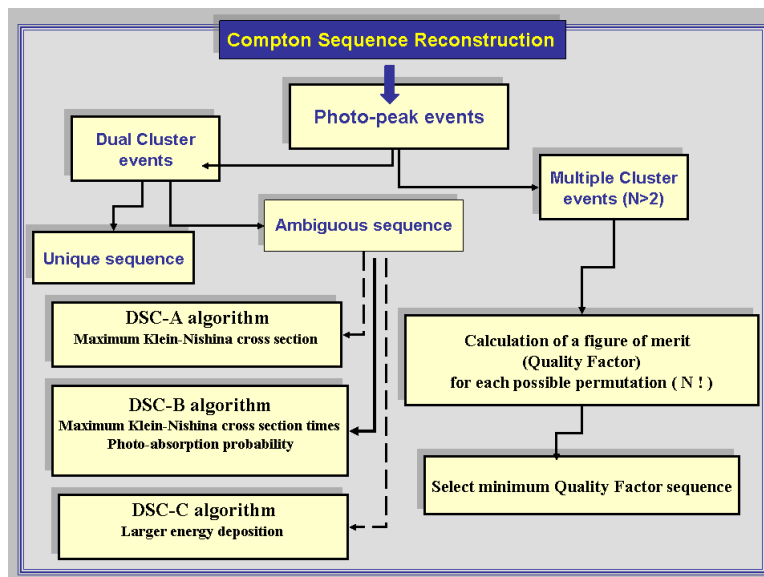


FIGURE11. Compton sequence reconstruction algorithms layout.

Dual Cluster Sequence reconstruction (DCS)

The first step of the sequence reconstruction of dual cluster Compton events is to apply the Compton kinematics in order to reject the non-physical sequences, i.e. to test whether the possible cluster sequences are compatible with the requirement that $\cos \phi \leq 1$ (equation (1)), namely, whether the electron (E_e) and photon (E_g) energies satisfy the following constrains, respectively:

$$\frac{m_0 c^2 E_0}{2m_0 c^2 + E_0} < E_g < E_0$$

$$0 < E_e < \frac{m_0 c^2 E_0^2}{2m_0 c^2 + E_0}$$
(101)

where m_0c^2 is the rest energy of the electron and E_0 the energy of the initial gamma ray.

Figure 12 presents the fraction of fully absorbed two-cluster events which have a unique or ambiguous ordering, as a function of the incident photon energy, along with the fraction of the events for which both sequences are not allowed by Compton kinematics. It is evident that for incident photon energies below 200keV all of the dual cluster Compton events in the photo-peak have a unique ordering. It can also be noticed that for photon energies below 100keV both sequences are restricted. This can be attributed to the fact that at low energies, the two clusters originate from X-rays produced during the de-excitation of Cd and Te atoms internal excitation, emitted in any direction and interacting with the detector, thus they do not obey the Compton kinematics.

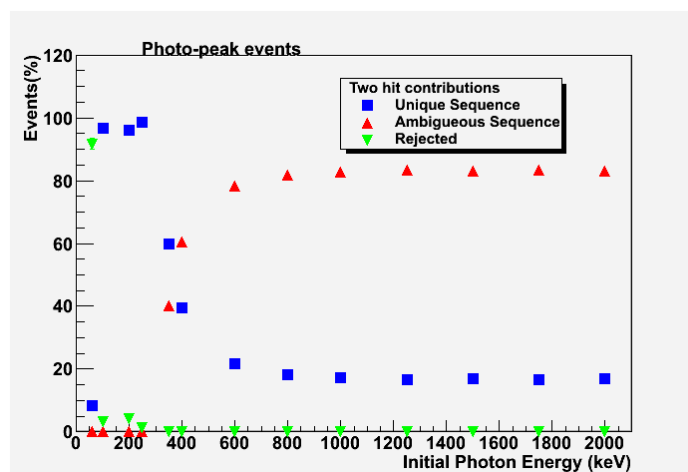


FIGURE 12. Dual cluster Compton events in the photo-peak as a function of the incident photon energy. The percentage of events with a unique possible ordering as well as those with ambiguous ordering is shown. Also shown is the fraction of events for which both orderings are restricted.

Furthermore, the photo-peak events having a unique sequence have been further studied in order to investigate whether their unique sequence is indeed the true sequence of the interactions (Figure 13). The true sequence has been derived directly from the Monte Carlo simulation where it is known a-priori.

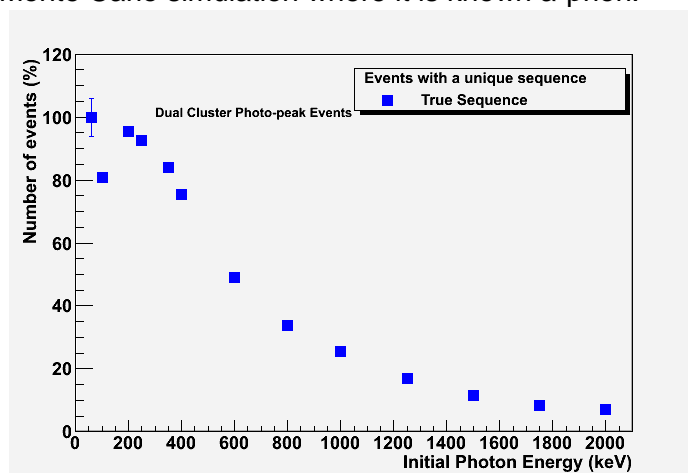


FIGURE 13. Two-cluster events for which their unique sequence compatible with Compton kinematics is indeed the true sequence of interactions.

For handling the ambiguous ordering events, three algorithms have been evaluated [5]:

A) According to the DSC-A algorithm, the Klein-Nishina differential Compton cross-section $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ for un-polarized photons scattering off unbound electrons, is calculated for each of the two possible cluster sequences:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r_e^2}{2} \left(\frac{E_g}{E_0} \right)^2 \left(\frac{E_g}{E_0} + \frac{E_0}{E_g} - \sin^2 \phi \right) \quad (102)$$

where r_e is the classical electron radius.

The sequence with the higher Klein-Nishina cross-section is assumed to be the correct one.

B) DCS-B algorithm calculates for the Klein-Nishina differential cross-section multiplied to the probability for absorption via a photoelectric effect and assumes that the sequence with the higher product probability is the correct one.

C) Finally according to DCS-C algorithm, the cluster that has the larger energy deposition is assumed to be the first Compton scattering.

Figure 14 shows the fraction of dual Compton events in the photo-peak that are correctly ordered, by applying the DCS-A, DCS-B and DCS-C algorithms, as a function of the incident photon energy.

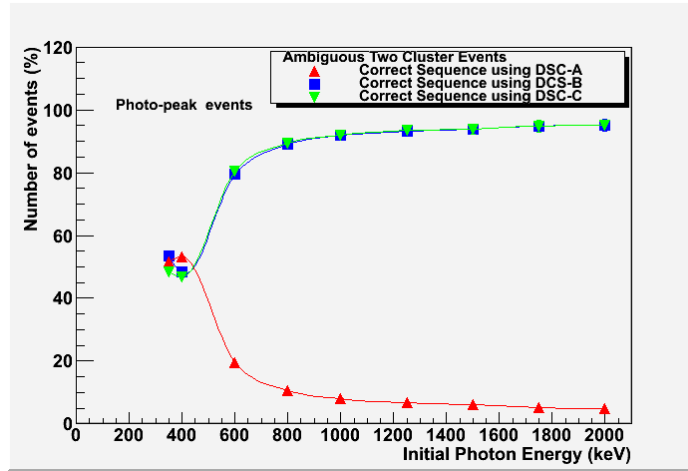


FIGURE 14. Compton sequence reconstruction efficiency for dual cluster Compton events in the photo-peak as a function of the incident photon for different reconstruction algorithms.

It can be noticed that the algorithms DCS-B and DCS-C similar performance, being able to identify the correct Compton sequence with an efficiency of about 95% for incident gamma energies above 800keV.

Multiple Cluster Sequence reconstruction (MCS)

For the sequence reconstruction of events with multiple clusters (at least two Compton interactions and one final complete absorption via a photoelectric effect), a technique has been proposed in [5], according to which a figure of merit (quality

factor, QF) based on a generalized χ^2 approach, is calculated for each one of the possible N! sequences, according to the following equation :

$$QF = \sum_{i=2}^{N-1} \frac{(\cos \phi_i^{kin} - \cos \phi_i^{geo})^2}{\sigma_{\cos \phi_i^{kin}}^2 + \sigma_{\cos \phi_i^{geo}}^2} \quad (103)$$

where ϕ_i^{kin} is the Compton scatter angle at the i^{th} scattering, calculated by the measured energy depositions according to a formula similar to equation (1), whereas ϕ_i^{geo} is the Compton scatter angle at the i^{th} scattering calculated by the measured directions of the photons before and after the i^{th} scattering, according to a formula similar to equation (2). The measurement errors $\sigma_{\cos \phi_i^{kin}}^2$ and $\sigma_{\cos \phi_i^{geo}}^2$ are due to the detector's energy and spatial resolution respectively.

Ideally the quality factor equals zero for the correct cluster sequence of Compton events, in the case where the photon is fully absorbed. Although measurement errors result in a quality factor greater than zero, the correct sequence is still most likely to correspond to its minimum value.

The distribution of the QF value is shown in Figure 15-a, for an incident photon with energy 600keV. Three cases are depicted in the same plot: the QF distribution for the false sequences, for the true sequences and for the sequences having the lowest QF value. It can be noticed that the efficiency of the MCS algorithm can be improved by applying upper thresholds on the value of QF (Figure 15-b), and by demanding that the distance between the first and the second interaction (known as lever arm) is more than 2cm (that is, the first two interactions are not in the same detecting layer).

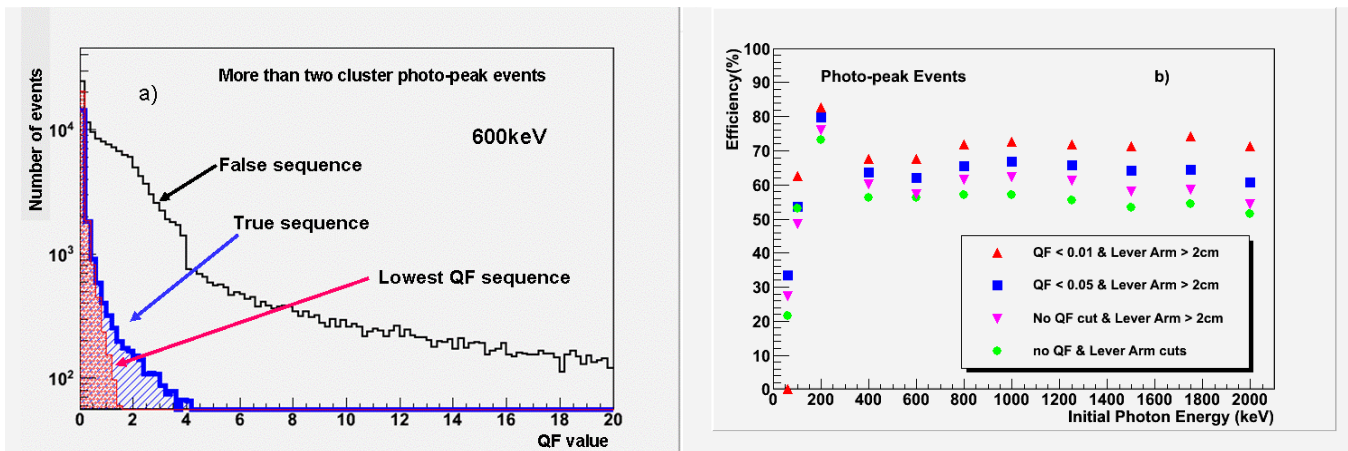


FIGURE 15. a) Multiple cluster photo-peak events at 600keV: QF distributions for the false and the true sequence of interactions, as well as for the interactions which have the lowest QF value. b) Efficiency as a function of initial photon energies, for different upper thresholds on the QF value and on the minimum distance between the two first interactions (lever arm).

It can be noticed that an upper threshold on the QF value improves the MCS algorithm's efficiency on the cost of a lower event statistics. Figure 16-a depicts both the efficiency and the event reduction as a function of the QF cut value, for multiple cluster photo-peak events with lever arm above 2 cm. For instance, only ~40% of the events have a QF value less than 0.01 (Figure 16-b)).

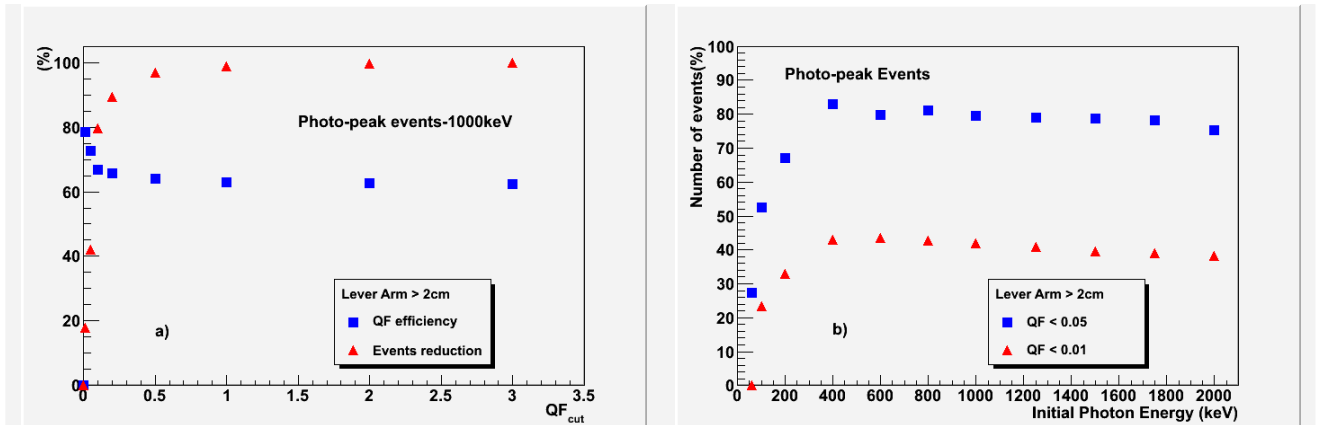


FIGURE 16. Photo-peak events having a lever-arm above 2cm: a) Multiple cluster photo-peak events at 1000keV: Efficiency and percentage of events reduction as a function of an upper threshold on the QF value. b) Percentage of events reduction as a function of initial photon's energy for different upper thresholds on the QF value.

CONCLUSIONS

In the current study the performance of different algorithms for the Compton Sequence reconstruction has been assessed, using a large number of simulated events interacting with the model of the COCAE detector.

Specifically, two different such algorithms have been exploited: the Dual Cluster Sequence reconstruction (DCS) and the Multiple Cluster Sequence reconstruction (MCS). Among the DCS algorithms, the DCS-B and DCS-C have been proved to have similar performance, varying from $\sim 50\%$ up to $\sim 90\%$ (Figure 14). On the other hand the MCS algorithm correctly reconstructs the Compton sequences of more than two cluster events with an efficiency reaching $\sim 55\%$ at energies above 600keV (Figure 15-b). The MCS algorithm's performance can be improved up to $\sim 70\%$ by implying additional constraints on the minimum QF value and on the lever arm parameter, on the cost of lower event statistics.

The overall efficiency for the Compton sequence reconstruction including both the dual, as well as the multiple cluster fully absorbed events, using the DCS-B algorithm and the MCS without any constrain respectively, is summarized in Figure 17.

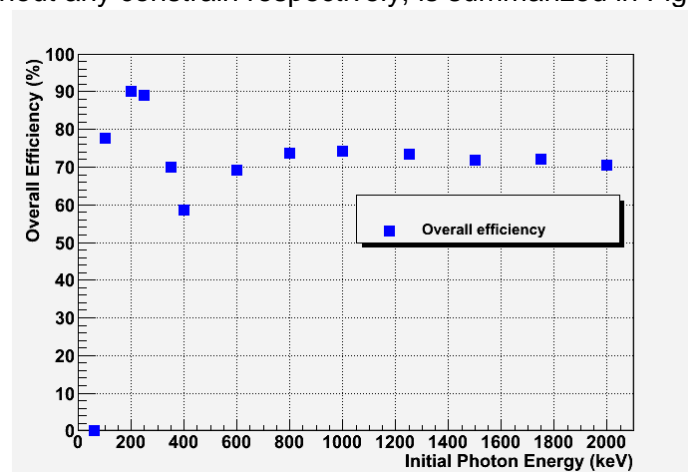


FIGURE 17 Overall Compton sequence reconstruction efficiency using the DCS-B and MCS without constraints algorithms, as a function of the initial photon energy.

Although the above figure indicates that the sequence reconstruction efficiency is very high at low energies (below 300 keV), we do not expect this effect to be mirrored in the event reconstruction efficiency as well, since in this area of the spectrum the Compton kinematics are masked by the Doppler broadening effect.

ACKNOWLEDGMENTS

This work is supported by the European Community's Seventh Framework Program FP7-SEC-2007-01.

REFERENCES

1. T. Kamae, R. Enomoto, and N. Hanada, A new method to measure energy, direction, and polarization of gamma rays, *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research*, A260 (1987) 254-257
2. Zoglauer, R. Andritschke, F. Schopper: "MEGALib - The Medium Energy Gamma-ray Astronomy Library", *New Astronomy Reviews*, Volume 50, Issues 7-8, Pages 629-632, October 2006
3. Geant4: A toolkit for the simulation of the passage of particles through matter, <http://geant4.web.cern.ch/geant4/>
4. G4lecs: A Low-Energy Compton Scattering Package, <http://public.lanl.gov/mkippen/actsim/g4lecs>
5. Andreas Christian Zoglauer, "First Light for the Next Generation of Compton and Pair Telescopes", Ph.D. Thesis, Max-Planck-Institute, 2005

Prediction of Autoignition Temperature for Diverse Organic Compounds using In Silico Methods and Molecular Descriptors

Georgia Melagraki^a, Antreas Afantitis^b, and Olga Igglessi - Markopoulou^b

^a*Hellenic Naval Academy, Pireaus, Greece*

^b*School of Chemical Engineering, National Technical University of Athens, Athens, Greece*

Abstract. A large dataset of 446 structurally diverse organic compounds has been used to develop mathematical models that relate the structures within this heterogeneous group of compounds to their autoignition temperature (AIT) values. For the development of such Quantitative Structure Property (QSPR) models, the molecular structure of each compound was represented by calculated molecular descriptors which encode their topological, electronic and geometric features. Correlation Feature Selection method combined with Best First evaluator was used to select the most significant descriptors that were used as inputs for the development of several models. Different modeling methodologies such as kNN, SVM and MLR were then applied and the ability of the new models to predict AIT was assessed and compared to available experimental data. The accuracy and robustness of the produced models was based on validation principles as described by the Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD). The kNN model was proven to be the most accurate model. Moreover the applicability domain of the models based on similarity measurements has been defined to indicate reliable predictions. For structures that fall within the domain of applicability, the proposed models can be used to predict AIT values based solely on their structure.

Keywords: chemoinformatics, QSPR, molecular descriptors, autoignition temperature

INTRODUCTION

Reliable and accurate data of physicochemical properties are always required and even considered to be absolutely necessary before making a decision and investment to formulate, synthesize, scale-up, test and manufacture a new material for use in both military and civilian applications. The knowledge of autoignition temperature of toxic, volatile, explosive and radioactive compounds is essential in

risk assessment calculation. The autoignition temperature (AIT) is defined as the lowest temperature at which a substance in air will ignite in the absence of a spark or flame [1] and as proposed in literature, the AIT of a compound is strongly depended upon its structure. Since AIT gives an indication of the temperature at which a material will spontaneously burst into flames when exposed to the atmosphere, it is an important fire performance parameter in process design and operational procedures. In many common situations, such as the manufacture, handling, transport, and storage of combustible materials, the AIT has been widely used to characterize the hazard potential of chemicals.

A valuable tool for developing quantitative relationships between structural characteristics of a compound and its properties is Quantitative Structure Property Relationships (QSPR). Multiple QSPRs can be developed for predicting a material's physical/chemical properties and environmental effects. The molecular structures of the compounds are represented by calculated numerical descriptors which encode their topological, electronic, and geometric features. The availability of large numbers of theoretical descriptors that provide diverse sources of chemical information are useful to better understand relationships between molecular structure and experimental evidence, also taking advantage of more and more powerful methods, computational algorithms, and fast computers. Many different physicochemical properties have been studied in the context of QSPR [2-4]. Different approaches to predict AIT values of organic compounds have been previously reported in literature [5-8]. Among the various methods proposed, QSPR modeling has also been used in order to derive models that predict AIT values from the molecular structure and therefore have the potential to provide information on hazards of chemicals, while reducing time and cost required.

Models reported in literature have been developed using different modeling workflows and although they have been shown to accurately predict AIT values they have several limitations such as the following: (i) the models are targeting a narrow structural space by i.e. focusing in a limited number of similar compounds and therefore cannot be used for generalization purposes, (ii) the models lack internal and external validation that would propose significant accuracy and robustness or they have not been properly validated following well established validation criteria, (iii) the models lack a well defined applicability domain that indicates which predictions could be considered reliable and (iv) the models rely on parameters which are not easily available for every compound or can not be accurately measured.

In this work, a quantitative structure–property relationship study is performed to develop mathematical models that relate the structures of a large heterogeneous group of organic compounds to their autoignition temperature values. The molecular structures of the compounds are represented by calculated numerical descriptors which encode their topological, electronic, and geometric features. These descriptors can be easily calculated solely from the molecular structure. Selected descriptors are used to develop several models that predict AIT based on various modelling techniques, such as k Nearest Neighbor (kNN) Support Vector Machines (SVMs), and Multiple Linear Regression (MLR). The ability of the new models to predict AIT is assessed and compared to available experimental data. All models are internally and externally validated paying special attention to the principles of model validation for accepting QSAR models as described by the Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD). Moreover the applicability domain of the models has been defined to indicate reliable predictions.

MATERIALS AND METHODS

Data Set

The dataset that was used for this study initially includes a diverse set of 446 organic compounds and their corresponding experimental values for autoignition temperature (AIT) [8]. The dataset includes hydrocarbons, halogenated compounds, alcohols, ethers, esters, aldehydes, ketones, carboxylic acid, amines, amides, nitriles, nitro compounds and compounds with multiple functional groups. The observed AIT values for these compounds were found in the range of 170 to 680°C. A few representative organic compounds included in the dataset are shown in Figure 1.

Each compound was represented by a 2D structure using MarvinSketch provided by ChemAxon [9]. For each compound in the dataset, different descriptors could be calculated to account for different structural characteristics. In this work almost 780 descriptors were calculated using Mold2 [10]. After removing useless descriptors, i.e. descriptors with no variation, by using the unsupervised attribute filter provided by Weka [11] in total 500 physicochemical constants, topological and structural descriptors were finally considered as possible input candidates to the model. Before the calculation of the descriptors, the structures were fully optimized using PM6 method in MOPAC2007 suite which, as proposed in literature, offers a good balance between computational speed and accuracy [12].

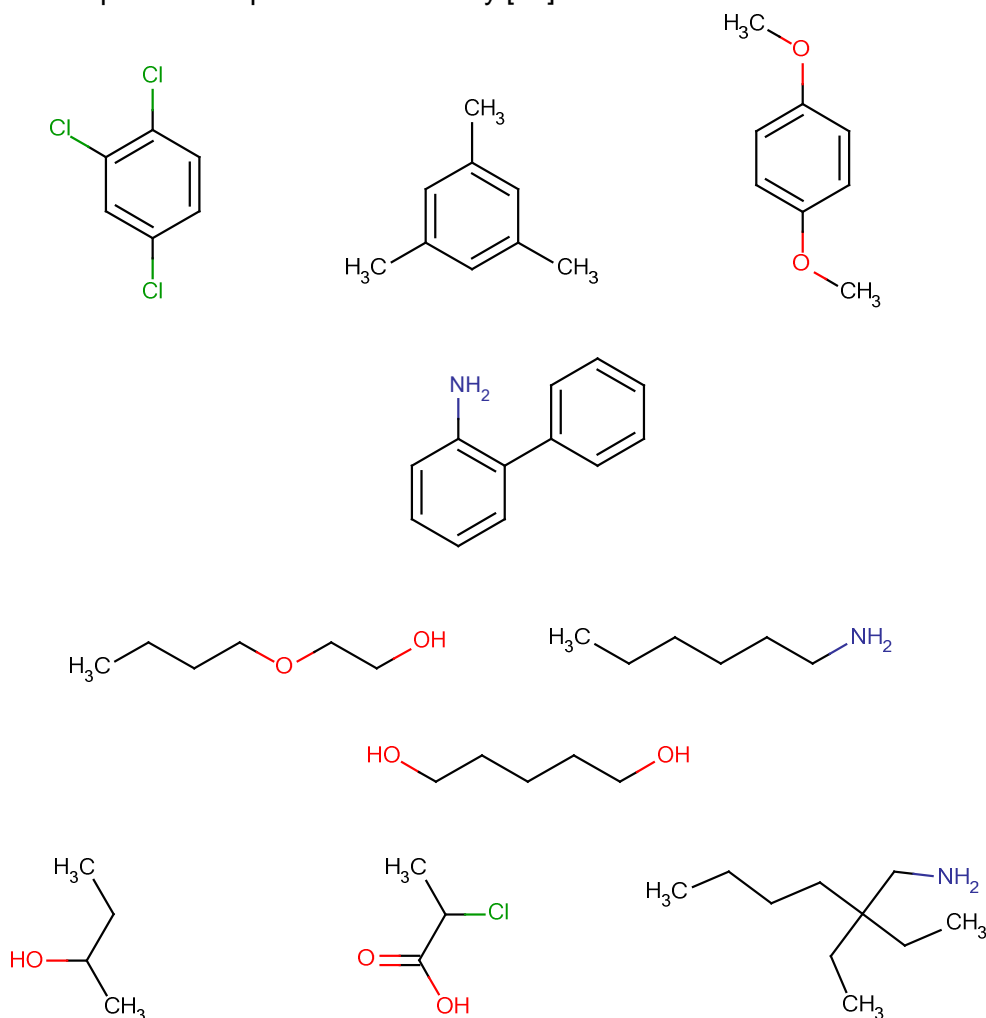


FIGURE 1. Organic compounds included in the dataset

Modeling Methodology

Variable Selection

Before running the modeling methodology the most significant attributes among the 500 available were preselected by using Correlation – based feature subset selection (CfsSubset) variable selection and BestFirst evaluator which are included in Weka [11]. CfsSubset algorithm evaluated the worth of a subset of attributes by considering the individual predictive ability of each feature along with the degree of redundancy between them. Subsets of features that were highly correlated with the class while having low inter-correlation were preferred. The attribute selection mode was set to 10 fold cross validation.

Machine Learning Method

For preprocessing, cleansing, attribute selection, modeling and validation of our data we have created a KNIME [13] workflow suitable to run step by step all the aforementioned tasks simultaneously for each of the described modeling methodologies. KNIME is a very popular modular data exploration platform that enables the user to visually create data flows (often referred to as pipelines), selectively execute some or all analysis steps, and later investigate the results through interactive views on data and models. KNIME is a very powerful tool for data analysis which also integrates all analysis modules of the well known Weka data mining.

A great variety of machine learning methods have been applied in QSAR studies [14-16] and the best approach for a specific problem needs to be explored. In this work we have used KNIME platform in order to simultaneously run and compare three different modeling methodologies and explore which of the available methods (or combination) best suites our data.

We have considered the following machine learning methods available in KNIME for performing regression to our available dataset: k Nearest Neighbor (kNN), Support Vector Machines (SVM) and Multiple Linear Regression (MLR). The kNN and SVM modeling methodologies used are briefly described below:

k-Nearest neighbors (kNN) algorithm [17] is a method for classifying objects based on closest training examples in the feature space and belongs to instance-based (or lazy) learning. Based on the kNN algorithm an object is classified by a majority vote of its neighbors, with the object being assigned to the class most common amongst its k nearest neighbors (where k is a positive integer, typically small). If $k = 1$, then the object is simply assigned to the class of its nearest neighbor. In this work we have used automatic selection of the optimal k value based on the internal cross-validation procedure. Euclidean distance was used with all descriptors and contributions of neighbors are weighted by the inverse of distance.

Support Vector Machines (SVM) was proposed in 1963 by Vapnik et al., [18] and was shown as an effective tool for solving classification and regression problems. For a given regression problem the goal of SVM is to find the optimal hyperplane for which the distance to all data points is minimum. A detailed presentation of the theory behind the SVM technique can be found in several books and tutorials [19]. For this work we have used Support Vector Machine regression (SVMreg) methodology using the RBF kernel with the complexity parameter c equal to 1000. The training data were normalized and as the learning algorithm RegSMOimproved was chosen [20].

Model Validation

The internal performance, as represented by goodness-of-fit and robustness, and the predictivity of a model, as determined by external validation, needs to be evaluated. The produced models were validated using external validation and cross validation methods [21]. External validation was applied, by randomly splitting the dataset into training and validation set in a proportion of 70:30. The 134 compounds that constituted the test set were not involved by any means in the training procedure. The following statistical criteria were used to assess the robustness, reliability and predictive activity of the model: the coefficient of determination between experimental values and model predictions (R^2), Mean Absolute Error (MAE) and Root Mean Square Error (RMS). These measurements are used in the context of statistical models whose main purpose is the prediction of future outcomes on the basis of other related information. Coefficient of determination accounts for the percentage of variation of the dependent value that is explained by the descriptors. Regarding cross validation, both 10-fold cross validation and Leave-One-Out (LOO) cross validation methods were applied. Cross-validation is a popular technique used to explore the reliability of statistical models. Based on this technique, a number of modified data sets are created by deleting in each case one or a small group (leave-some-out) of objects. For each data set, an input-output model is developed, based on the utilized modeling technique. The model is evaluated by measuring its accuracy in predicting the responses of the remaining data (the ones that have not been utilized in the development of the model). In particular, the leave-one-out (LOO) and the 10-fold (10fCV) cross-validation procedures were utilized in this study, which produce a number of models, by deleting one or several objects, respectively, from the training set.

Applicability Domain

The need to define an applicability domain expresses the fact that QSPRs are models which are inevitably associated with limitations in terms of the types of chemical structures, physicochemical properties and mechanisms of action for which the models can generate reliable predictions.

In this work similarity measurements were used to define the domain of applicability of the models based on the Euclidean distances among all training compounds and the test compounds [22]. The distance of a test compound to its nearest neighbor in the training set was compared to the predefined applicability domain (APD) threshold. The prediction was considered unreliable when the distance was higher than APD. APD was calculated as follows:

$$APD = \langle d \rangle + Z\sigma$$

Calculation of $\langle d \rangle$ and σ was performed as follows: First, the average of Euclidean distances between all pairs of training compounds was calculated. Next, the set of distances that were lower than the average was formulated. $\langle d \rangle$ and σ were finally calculated as the average and standard deviation of all distances included in this set. Z was an empirical cutoff value and for this work, it was chosen equal to 0.5.

RESULTS AND DISCUSSION

The original dataset of 446 diverse organic compounds was randomly partitioned into training and validation set consisting of 312 and 134 compounds respectively. The training set was used to develop the QSPR models as described below whereas the test set was not involved by any means in the model development. For each compound 777 descriptors were calculated using Mold2 software which account for the topological, geometric and structural characteristics of compounds. As some of the descriptors do not have any discrimination power (i.e. they have no variation) a

filter was applied for their removal. In total 500 descriptors remained to be used as possible inputs during the QSPR model development.

The CfsSubset variable selection with BestFirst evaluator method was then applied on the training data to select the most significant, among the 500 available descriptors. Nine descriptors were selected as the most important to describe the relationship between structural characteristics of compounds and AIT. The selected descriptors are mean atomic van der Waals Carbon-scale (D144), average valence vertex connectivity order-4 Index (D222), average valence vertex connectivity order-5 Index (D223), structure centric index (D252), Moran topological structure autocorrelation length-1 weighted by atomic Sanderson electronegativities (D495), Moran topological structure autocorrelation length-3 weighted by atomic Sanderson Electronegativities (D496), number of Csp² (D606), number of group CH₂RX (D719), number of group =CHR (D729) and number of group R~CR~R (D738).

The chemical meaning of the descriptors used in the development of each model is briefly discussed below [23, 24]. The combination of these descriptors have several advantages such as unique representation of the compound and high discriminating power.

To account for steric effects in molecule interactions, the weighted information indices by volume have been selected by the algorithm (Descriptor D144). These molecular descriptors are calculated in the same way as the indices of neighborhood symmetry using the atomic van der Waals volumes to get the probabilities of the equivalence classes. In other words, the van der Waals volumes of the atoms belonging to each equivalent class are summed up to give a molecule subvolume then divided by the total molecule volume. The effective van der Waals volume of an atom is defined as the van der Waals volume of the atom minus half the sphere overlapping of the atom due to covalent bonding of the adjacent atoms in the molecule.

Descriptors, D222 and D223 account for the topological characteristics of compounds and more specifically for the connectivity between atoms within the molecule. In general topological indices such as D222 and D223 are based on the two-dimensional representation of the molecule and give information about the atomic composition of a compound, the presence and character of chemical bonds and the connectivity between atoms. D222 is the average valence vertex connectivity order-4 Index and D223 is the average valence vertex connectivity order-5 Index.

Centric indices (D252) are molecular descriptors that quantify the degree of compactness of molecules based on the recognition of the graph center centric indices. These descriptors quantify the degree of compactness of molecules by distinguishing between molecular structures organized differently with respect to their centers. Based on the recognition of the graph center, these indices are mainly defined by the information theory concepts applied to a partition of the graph vertices made according to their positions relative to the center.

Descriptors D495 and D497 encode information related to Sanderson Electronegativities combined with Moran topological index of spatial autocorrelation. Moran coefficient is related to atomic properties, the number of atoms and the topological distance between specific atoms. Electronegativity is a property of the state of the system; electrons tend to flow from a region of low electronegativity to a region of high electronegativity. With the formation of a molecule, electronegativities of the constituent atoms or fragments equalize, all becoming equal to the electronegativity of the final state of the molecule.

Descriptors D606, D719, D729 and D738 are indicators that account for the presence or absence of a specific atom or structural group. More specifically D606 is the number of secondary carbon (sp²) that are included in the compound. Descriptors D719, D729 and D738 are the number of the following groups respectively CH₂RX, =CHR, R~CR~R which might be present in the compound.

The aforementioned descriptors have different weights that influence the increase or decrease of AIT values among different compounds. Based on the previous discussion and the positive or negative influence of each descriptor, new derivatives with desired properties can be designed.

We have used a KNIME workflow in order to compare different methodologies and explore which of the available methods best suites our data. As described above three different methodologies have been used, kNN, SVM and MLR.

By applying on our training data, k Nearest Neighbors (kNN) methodology with automatic selection of the optimal k value based on the internal cross-validation procedure, a k value of 4 was selected. Euclidean distance was used with all nine descriptors and contributions of neighbors weighted by the inverse of distance.

A comparison between the three modeling methodologies has been carried out (Table 1). All methodologies were employed to describe the relation between AIT and the selected descriptors. The same descriptors and training set have been used for the all three methodologies. Validation of the models was performed using the techniques mentioned in the previous section. The corresponding statistics for the three methodologies are presented in Table 1, illustrating the accuracy, significance and robustness of the produced models. As it can be derived from the Table amongst the different models the kNN model is the one that outperforms all other alternatives in external validation prediction. As can be seen from Table 1, kNN methodology results in a mean average error (MAE) as low as the experimental error of AIT determination, which is around $\pm 30^{\circ}\text{C}$ for both training and test sets. We can conclude that the selected descriptors selected by CfsSubset and BestFirst algorithm can encode the structural features of the compounds related to AIT. Based on the produced statistics SVM model is the second best model followed by MLR.

TABLE 1. Statistical Results

| | kNN | SVMreg | MLR |
|-----------------------------|------------|---------------|------------|
| R^2_{train} | 0.9978 | 0.6854 | 0.6519 |
| $\text{MAE}_{\text{train}}$ | 2.9304 | 43.5838 | 47.4394 |
| $\text{RMS}_{\text{train}}$ | 5.1559 | 58.8778 | 61.742 |
| R^2_{LOO} | 0.6170 | 0.6159 | 0.6354 |
| MAE_{LOO} | 48.8984 | 50.407 | 48.6178 |
| RMS_{LOO} | 65.4826 | 65.2544 | 63.383 |
| $R^2_{10\text{fCV}}$ | 0.6093 | 0.6197 | 0.6277 |
| $\text{MAE}_{10\text{fCV}}$ | 50.9991 | 49.5706 | 48.8874 |
| $\text{RMS}_{10\text{fCV}}$ | 65.8018 | 64.9972 | 63.9038 |
| R^2_{test} | 0.8653 | 0.7881 | 0.7487 |
| MAE_{test} | 31.0896 | 39.9065 | 41.8626 |
| RMS_{test} | 38.9867 | 49.2699 | 53.1411 |

Figures 2 and 3 present a plot of experimental versus predicted values of AIT for compounds in the test set for the best two models, kNN and SVM model respectively.

The applicability domain was defined for all compounds that constituted the training set for AIT models as described in the Materials and Methods section. The applicability domain limit value was equal to 7.6995 and all compounds in the test set had values in the range of 0-4.0002. Since all validation compounds fell inside the domain of applicability, all model predictions for the external test set were considered reliable.

The proposed method, due to the high predictive ability and the fact that it requires information related only to the 2D structure of a compound, could be a useful aid to the costly and time consuming experiments for determining the AIT. The method can also be used to screen existing databases or virtual chemical structures to identify organic compounds with desired properties. In this case, the applicability domain will serve as a valuable tool to filter out “dissimilar” chemical structures.

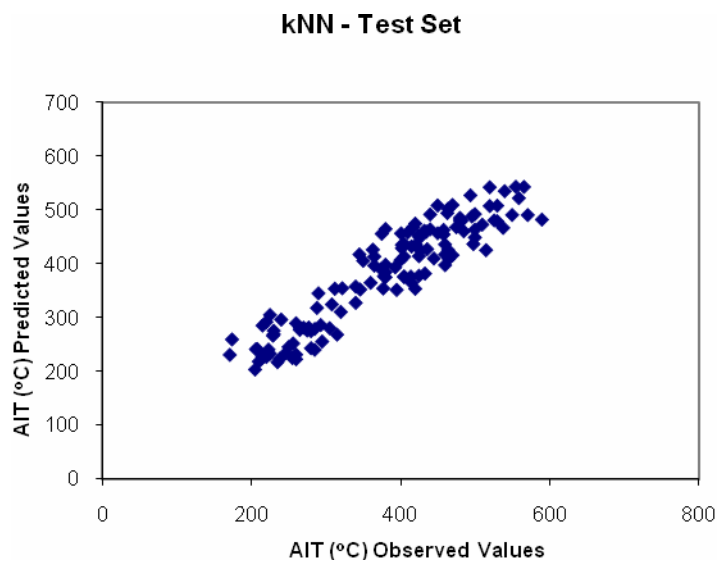


FIGURE 2. kNN model: Experimental vs Predicted AIT values for the Training Set.

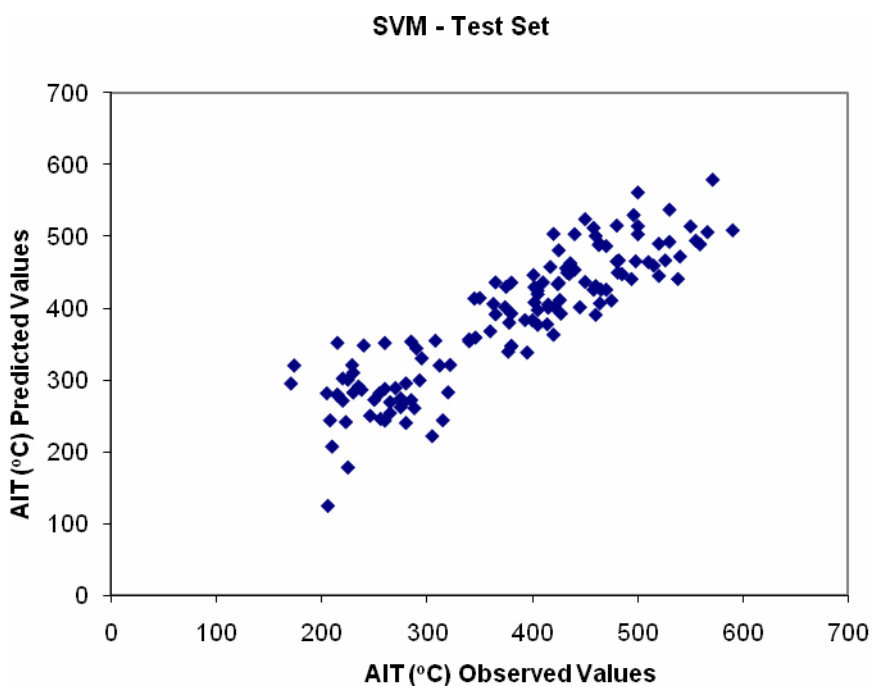


FIGURE 3. SVM model: Experimental vs Predicted AIT values for the Test Set.

CONCLUSIONS

In this paper we have successfully built and compared several models for the prediction of AIT based on a large dataset of 446 diverse organic compounds. All models were fully validated following OECD model validation guidance. The most accurate and reliable model was proven to be the kNN model. The molecular descriptors used in QSAR encode information about the structure, branching,

electronic effects, chains and rings of the modules and thus implicitly account for cooperative effects between functional groups. Applicability domain was defined to identify the reliable predictions. The developed models can predict AIT values for compounds that fall within the domain of applicability and guide the design of novel molecules by prioritizing compounds with desired characteristics.

ACKNOWLEDGMENTS

G.M. would like to acknowledge support from ChemAxon that provided scientific software license at no cost.

REFERENCES

1. ASTM International, ASTM Standard Test Method E659-78, The American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA. 2000.
2. X. Yu, X. Wang, H. Wang, X. Li, J. Gao, *QSAR Comb. Sci.* **2**, 151–61 (2005).
3. A. Afantitis, G. Melagraki, H. Sarimveis, P.A. Koutentis, J. Markopoulos, O. Igglessi – Markopoulou *QSAR Comb. Sci.* **27**, 432 – 436 (2008).
4. G. Melagraki, A. Afantitis, H. Sarimveis, P.A. Koutentis, J. Markopoulos, O. Igglessi – Markopoulou *J Mol Model* **13**, 55-64 (2007).
5. T.A. Albahri, *Chem. Eng. Sci.* **58**, 3629-3641 (2003).
6. J. Tetteh, E. Metcalfe, S. Howells, *Chemometric. Intell. Lab. Syst.* **32**, 177-191 (1996).
7. B.E. Mitchell, P.C. Jurs *J. Chem. Inf. Comput. Sci.* **37**, 538-547 (1997)
8. Y. Pan, J. Jiang, R. Wang, H. Cao, Y. Cui, *J Hazardous Materials*, **164**, 1242-1249 (2009).
9. ChemAxon Suite of programs, www.chemaxon.com
10. H. Hong, Q. Xie, W. Ge, F. Qian, F. Fang, L. Shi, Z. Su, R. Perkins, and W. Tong, Mold2, molecular descriptors from 2D structures for chemoinformatics and toxicoinformatics. *J Chem Inf Model* **48**,1337–1344 (2008).
11. M. Hall, E. Frank, G. Holmes, B. Pfahringer, P. Reutemann and I.H. Witten, The WEKA Data Mining Software: An Update. *SIGKDD Explorations* **11**, 10-18 (2009).
12. J.J.P. Stewart *J Mol Model* **14**, 499–535 (2008).
13. M. R. Berthold, N. Cebron, F. Dill, T. R. Gabriel, T. Kotter, T. Meinl, P. Ohl, C. Sieb, K. Thiel, B. Wiswedel, KNIME: The Konstanz Information Miner, Studies in Classification, Data Analysis, and Knowledge Organization, edited by C. Preisach, H. Burkhardt, L. Schmidt-Thieme, R. Decker, GfKI: Springer, 2007, pp. 319-326.
14. J.L. Melville, E.K. Burke, J.D. Hirst, Machine Learning in Virtual Screening. *Comb Chem High T Scr* **12**, 332-343 (2009).
15. G. Melagraki, A. Afantitis, H. Sarimveis, P.A. Koutentis, O. Igglessi – Markopoulou and G. Kollias *Molecular Diversity* **13**, 301-311 (2009).
16. G. Melagraki, A. Afantitis, H. Sarimveis, P.A. Koutentis, J. Markopoulos and O. Igglessi –Markopoulou *Bioorganic & Medicinal Chemistry* **15**, 7237-7147 (2007).
17. Franco-Lopez H, Ek AR, Bauer ME. "Estimation and mapping of forest stand density, volume, and cover type using the k-nearest neighbors method". *Remote Sensing of Environment* **77**, 251-274 (2001).
18. C. Cortes, V. Vapnik, *Mach Learning* **20**, 273-297 (1995).
19. C. J. C. Burges. *Data Mining and Knowledge Discovery* **2**,121–167 (1998).
20. S.K. Shevade, S.S. Keerthi, C. Bhattacharyya, K.R.K. Murthy, Improvements to the SMO Algorithm for SVM Regression. *IEEE T Neural Networ* **11**, 1188 – 1193 (2000).
21. OECD Principles for the validation, for regulatory purposes of (Quantitative) Structure Activity Relationship Models (www.oecd.org)
22. S. Zhang, A. Golbraikh, S. Oloff, H. Kohn, A. Tropsha A Novel Automated Lazy Learning QSAR (ALL-QSAR) Approach: Method Development, Applications, and Virtual Screening of Chemical Databases Using Validated ALL-QSAR Models. *J Chem Inf Model* **46**, 1984-1995 (2006).
23. R. Todeschini, V. Consonni, R. Mannhold R. In: Kubinyi H, Timmerman H (Series Ed.) Handbook of molecular descriptors. Wiley-VCH, Weinheim, 2000.
24. J. Devillers, A.T. Balaban, Topological Indices and Related Descriptors in QSAR and QSPR. The Netherlands: Gordon and Breach Science Publishers, 1999.

Section E: HUMANITIES AND POLITICAL SCIENCES

Η Σημασία του Εμφύχου Δυναμικού στην Ελληνοτουρκική Διένεξη

Ανδρέας Σ. Ανδρέου^α & Γεώργιος Α. Ζομπανάκης^β

^αΠανεπιστήμιο Κύπρου, Τμήμα Πληροφορικής, Καλλιπόλεως 75, CY1678 Λευκωσία, Κύπρος
aandreou@cs.ucy.ac.cy

^βΣχολή Ναυτικών Δοκίμων, Τομεύς Ανθρωπιστικών και Πολιτικών Επιστημών, Τέρμα
Λεωφόρου Χατζηκυριακού, Χατζηκυριάκειο, 18539 Πειραιεύς,
gzombanakis@bankofgreece.gr.

Σύνοψη. Η εργασία αυτή αποσκοπεί στην αναλυτική εξέταση του ανταγωνισμού των εξοπλιστικών προγραμμάτων Ελλάδος και Τουρκίας. Ο ανταγωνισμός αυτός ασκεί σημαντικές πιέσεις στις οικονομίες αμφοτέρων των εμπλεκομένων μερών σε εποχή, μάλιστα, κατά την οποία η οικονομία της πατρίδος μας ευρίσκεται στα πρόθυρα της χρεωκοπίας. Από τα συμπεράσματα της εργασίας αυτής προκύπτει η κεφαλαιώδης σημασία του ανθρωπίνου παράγοντος στο ανταγωνιστικό αυτό περιβάλλον, όπου η πρωτοβουλία ανήκει στην Τουρκική πλευρά με την Ελληνική απλώς να είναι υποχρεωμένη να ακολουθή. Από την παρατιθεμένη εφαρμογή η οποία αναφέρεται στον θεσμό της στρατιωτικής θητείας των Ελλήνων προκύπτει ότι η πολιτική ηγεσία δεν φαίνεται να συνειδητοποιή τον προεξάρχοντα ρόλο του ανθρωπίνου δυναμικού στο περιβάλλον της Ελληνοτουρκικής διενέξεως με αποτέλεσμα τον κίνδυνο απαξίωσης του συγκεκριμένου θεσμού.

Λήμματα: Ελλάς, Τουρκία, Ανταγωνισμός Εξοπλισμών, Νευρωνικά Δίκτυα.

JEL: C45, H56

Abstract. The Importance of Human Resources in the Greek – Turkish Conflict. This paper aims at focusing on the arms race between Greece and Turkey during a period in which such a race exerts considerable pressure upon the economies of both countries with Greece being at the verge of bankruptcy. The main conclusion of the paper is the vital importance of human resources in this arms race environment in which the initiative lies with the Turkish side leaving Greece no alternative but to follow. The application which forms the concluding section of the paper in terms of a case study concentrates on the issue of the military service. The paper concludes

that the populist policy followed by the Greek state authorities that insist on continuously reducing the compulsory military service term indicates that the policy - makers have hardly realized the importance of human resources in the Greek – Turkish arms race.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι Τουρκικές απαιτήσεις και διεκδικήσεις οι οποίες εγείρονται κατά τρόπο συστηματικό και επίμονο από το 1974 και εξής και θίγουν κυριαρχικά δικαιώματα της Ελλάδος και της Κύπρου έχουν δημιουργήσει αέναο και πανάκριβο κύκλο αμυντικών δαπανών οι συνέπειες του οποίου επιβαρύνουν τις οικονομίες αμφοτέρων των εμπλεκόμενων πλευρών. Η μελέτη αυτή αποσκοπεί στην ανάδειξη της σημασίας των πόρων, υλικών και ανθρωπίνων, οι οποίοι χρησιμοποιούνται στον ανταγωνισμό των εξοπλισμών μεταξύ Ελλάδος και Τουρκίας για την οικονομία της πατρίδος μας, η οποία έχει ήδη ευρεθεί στα πρόθυρα της χρεωκοπίας. Η εκτίμηση της σημασίας των πόρων αυτών καθώς και η σύγκριση μεταξύ των δύο κατηγοριών τους – ανθρωπίνων και υλικών – θα βασισθή στη χρήση Νευρωνικών Δικτύων, τα οποία εκτιμώνται ως καταλληλότερα από της συμβατικές μεθόδους υπολογισμού για λόγους οι οποίοι θα αναλυθούν κατωτέρω.

Το κόστος του ανταγωνισμού των εξοπλιστικών προγραμμάτων μεταξύ δύο χωρών υπολογίζεται ως ο βαθμός κατά τον οποίον διαταράσσεται ο μακροχρόνιος ρυθμός αναπτύξεως των εμπλεκόμενων οικονομιών λόγω των υπερρόγκων αμυντικών δαπανών, διαταραχή η οποία εμφανίζεται ως αντίστοιχη αύξηση των ελλειμμάτων του προϋπολογισμού. Ειδικώς ο εξωτερικός τομέας αυτών των οικονομιών υφίσταται υπερβολική επιβάρυνση, στον βαθμό κατά τον οποίο οι ανάγκες των Ενιαίων Μεσοπροθέσμων Προγραμμάτων Αναπτύξεως και Εκσυγχρονισμού (ΕΜΠΑΕ) δεν καλύπτονται από την εγχώριο παραγωγή, καθώς απαιτούνται υψηλότερες εισαγωγικές δαπάνες οι οποίες, επί πλέον, απορροφούν κονδύλια τα οποία προορίζοντο για εναλλακτικές, μη αμυντικές επενδύσεις υπό την έννοια του λεγομένου «μερίσματος της ειρήνης». Επιβάλλεται, βεβαίως, να τονισθή ότι ο εξωτερικός δανεισμός στον οποίον προσφεύγουν οι οικονομίες αυτές για την αποπληρωμή των κονδυλίων των απαιτητικών αμυντικών τους προγραμμάτων επιδρά αρνητικά τόσο στον εσωτερικό, όσο και στον εξωτερικό τομέα της οικονομίας: Στον πρώτο λόγω της επιβραδύνσεως της οικονομικής αναπτύξεως, όπως ήδη ανεφέρθη, και στον δεύτερο λόγω της επιβάρυνσεως του ισοζυγίου πληρωμών. Η επιβάρυνση αυτή δημιουργεί την ανάγκη περαιτέρω δανεισμού και συνεπώς συντηρεί έναν ατέρμονα κύκλο ολοένα αυξανόμενου εξωτερικού χρέους, έως και την πιθανή χρεωκοπία ενός εκ των εμπλεκόμενων, όπως εδίδαξε και η εμπειρία του λεγομένου «Πολέμου των Άστρων».

Οι συνέπειες του ανταγωνισμού των εξοπλιστικών προγραμμάτων Ελλάδος και Τουρκίας έχουν αποβή ιδιαίτερες επώδυνες για την χώρα μας δεδομένου ότι σημαντικό ποσοστό επί του ΑΕΠ διατίθεται για αμυντικές δαπάνες. Το ποσοστό αυτό έχει φθάσει να ανέρχεται σε συγκεκριμένα έτη της δεκαετίας του 70 και του 80 ακόμη και σε 6% ή και 7% του ετήσιου ΑΕΠ της οικονομίας. Εάν το ποσοστό αυτό εφαρμοσθή επί του σημερινού ΑΕΠ της χώρας τότε θα πρόκειται για μία ετησία επιβάρυνση της τάξεως των 15 δισεκατομμυρίων ευρώ, σε μία εποχή κατά την οποία το έλλειμμα του ισοζυγίου τρεχουσών συναλλαγών ανέρχεται σε περίπου 30 δισεκατομμύρια ευρώ, ποσό το οποίο αντιπροσωπεύει 12% του ΑΕΠ.

Στο σημείο αυτό όμως επιβάλλεται να γίνη μία διευκρίνιση: Πολλάκις τα παρατιθέμενα ποσοστά επί του ΑΕΠ τα οποία αντιπροσωπεύουν τις αμυντικές δαπάνες της Ελλάδος εμφανίζονται διογκωμένα για λόγους οι οποίοι εξυπηρετούν πολιτικές ή άλλες σκοπιμότητες. Απλός υπολογισμός αρκεί για να καταδείξη ότι η ετησία αμυντική δαπάνη της χώρας για έκαστο από τα επόμενα έτη αναμένεται να

ανέλθη στο έν πέμπτον του πενταετούς ΕΜΠΑΕ ύψους περίπου 15 δισεκατομμυρίων ευρώ, ήτοι σχεδόν σε 1,25% του ετησίου ΑΕΠ, ποσοστό το οποίο είναι σημαντικώς μικρότερο σε σύγκριση με αυτά τα οποία κατά καιρούς βλέπομε στον ημερήσιο, κυρίως, τύπο. Προς αποκατάστασιν της αλήθειας, επίσης, είναι απαραίτητο να διευκρινισθή ότι σε σύνολο δημοσίου χρέους 115,1% του ΑΕΠ για το 2009, το χρέος των Ενόπλων Δυνάμεων ανέρχεται μόλις σε 0,8% του ΑΕΠ.

Αξίζει, όμως, εν πάση περιπτώσει να επικεντρώσωμε την προσπάθειά μας στη μελέτη του ανταγωνισμού των εξοπλιστικών προγραμμάτων Ελλάδος και Τουρκίας και ειδικώτερον, στη πίεση την οποίαν ασκεί ο ανταγωνισμός αυτός επί των δεδομένων της υπερχρεωμένης Ελληνικής οικονομίας. Από τα δεδομένα αυτά θα επιλέξωμε με την βοήθεια καταλλήλων τεχνικών εφαρμογών, τις μεταβλητές εκείνες οι οποίες διαδραματίζουν τον πλέον σημαντικό ρόλο στον καθορισμό των αμυντικών δαπανών της Ελλάδος σε περιβάλλον διαρκών απαιτήσεων κα αμφισβητήσεων από πλευράς Τουρκίας.

ΤΕΧΝΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Αν και υπάρχει εκτενής διεθνής βιβλιογραφία επί του θέματος τόσο του ανταγωνισμού των εξοπλιστικών προγραμμάτων, όσο και αυτού της συναρτήσεως ζητήσεως αμυντικών δαπανών (π. χ. Refenes, Kollias and Zarpanis, 1995, Hartley and Sandler, 1995, Öcal, 2002, Brauer, 2003, Andreou and Zombanakis, 2000, 2006 και 2010), δεν υφίσταται γενικώς παραδεκτό επιστημονικό θεωρητικό υπόβαθρο το οποίο να καθορίζει την συμπεριφορά είτε των αμυντικών δαπανών είτε, έστω, του λεγομένου «χρέους των Ενόπλων Δυνάμεων» και επομένως και του εξωτερικού χρέους όταν τα μεγέθη αυτά επηρεάζονται από μία ποικιλία ανεξαρτήτων μεταβλητών. Η απουσία αυτή επαρκούς επιστημονικού υποβάθρου επιβάλλει για την συγκεκριμένη περίπτωση την προτίμηση της μεθόδου των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (TNN) έναντι των συνήθως χρησιμοποιουμένων μεθόδων αναλύσεως, όπως π. χ. της πολλαπλής παλινδρομήσεως. Αυτό συμβαίνει διότι η τεχνική των νευρωνικών δικτύων ως εκ της φύσεώς της δεν προϋποθέτει την ύπαρξη μιάς εκ των προτέρων καθορισμένης σχέσεως μεταξύ των χρησιμοποιουμένων μεταβλητών και επομένως η απουσία θεωρητικού υποβάθρου στην συγκεκριμένη περίπτωση δεν αποτελεί πρόβλημα. Επίσης, σε περιπτώσεις όπως η παρούσα, κατά τις οποίες ορισμένες μεταβλητές συσχετίζονται μεταξύ τους και η συμπεριφορά τους είναι ενδεχομένως μη - γραμμική, τα νευρωνικά δίκτυα έχουν αποδειχθή καταλληλότερα. Κατά συνέπειαν, λόγω της ευελιξίας τους από πλευράς χειρισμού, τα TNN χρησιμοποιούνται σε πληθώρα επιστημονικών εφαρμογών επί θεμάτων προβλέψεων συναλλαγματικών ισοτιμιών, χρηματιστηριακών τιμών, θεμάτων οικονομικής της αμύνης, αλλά και εφαρμογές άλλων επιστημών όπως η ιατρική (Kuo and Reitsch, 1995).

Τά TNN είναι υπολογιστικά υποδείγματα τα οποία μιμούνται την βιολογική συμπεριφορά του ανθρωπίνου νευρικού συστήματος. Τα υποδείγματα αυτά στις περισσότερες περιπτώσεις θεωρούνται ως προσαρμοσίμα συστήματα δεδομένου ότι έχουν την δυνατότητα προσαρμογής σε εξωτερικούς ή και εσωτερικούς ερεθισμούς (McCulloch and Pitts, 1943). Οι ερεθισμοί αυτοί δημιουργούνται επί τούτω και γίνονται αισθητοί μέσω του εκάστοτε χρησιμοποιουμένου δικτύου κατά την διάρκεια της φάσεως της εκπαιδεύσεώς του. Επομένως το TNN εκπαιδεύεται μέσω παραδειγμάτων και, όπως ήδη ανεφέρθη, θεωρείται ως τεχνική κατάλληλη για την αντιμετώπιση περιπλόκων, μή γραμμικών συναρτήσεων δεδομένου ότι χρησιμοποιεί εκπαιδευτικούς αλγορίθμους για την εκμάθηση της διαχρονικής εξελίξεως και της δομής χρονολογικών σειρών χωρίς να βασίζεται στην λογική της κατασκευής συγκεκριμένου οικονομετρικού υποδείγματος. Κατά συνέπειαν, τα TNN δεν δεσμεύονται από τους περιορισμούς τους οποίους επιβάλλει η δομή των υποδειγμάτων και επειδή είναι μή γραμμικά, έχουν την δυνατότητα να ερμηνεύουν περίπλοκες σχέσεις μεταξύ διαφόρων μεταβλητών. Ακριβώς επειδή τα TNN είναι

προσαρμόσιμα, έχουν την δυνατότητα να εκπαιδεύονται έτσι ώστε να ακολουθούν συγκεκριμένη διαχρονική συμπεριφορά, με την εκπαίδευση αυτή να βασίζεται σε τμήμα της υπό μελέτην χρονολογικής σειράς το οποίο ονομάζεται υποσύνολο παρατηρήσεων εκπαιδεύσεως του δικτύου (Haykin, 1999). Άπαξ και το δίκτυο έχει εκπαιδευθεί να αναγνωρίζει την συγκεκριμένη διαχρονική συμπεριφορά, τα TNN έχουν την δυνατότητα να γενικεύσουν οπότε ο ερευνητής ελέγχει σε ποιό βαθμό είναι πλέον εις θέσιν να ακολουθηθούν επιτυχώς την συμπεριφορά αυτή. Ο έλεγχος αυτός διενεργείται σε ανεξάρτητο τμήμα της χρονολογικής σειράς το οποίο δεν έχει περιληφθεί στην διαδικασία της εκπαιδεύσεως και το οποίο χαρακτηρίζεται ως υποσύνολο παρατηρήσεων ελέγχου ή αξιολογήσεως. Με την προϋπόθεση ότι η διαδικασία εκμαθήσεως κρίνεται ως επιτυχής βάσει των τιμών τις οποίες λαμβάνουν ορισμένοι συντελεστές μετρήσεως σφάλματος, το συγκεκριμένο σύστημα είναι εις θέσιν να επεκτείνει την συμπεριφορά στην οποία εκπαιδεύθηκε κατά το στάδιο της εκμαθήσεως με σκοπό την διενέργεια προβλέψεως της συμπεριφοράς της υπό μελέτην σειράς στο μέλλον. Επιπροσθέτως, χάρις στην διαδικασία της λεγομένης «εκτιμήσεως της σημαντικότητας εισροών» η οποία διενεργείται αυτομάτως, οι περισσότεροι σημαντικές ανεξάρτητοι μεταβλητές αποκτούν αντιστοίχως και υψηλότερους συντελεστές σταθμίσεως, ενώ, αντιστρόφως, χαμηλές τιμές συντελεστών σταθμίσεως δίδονται σε ανεξάρτητες μεταβλητές χαμηλής σημαντικότητας (Azoff, 1994).

ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ

Οι μεταβλητές οι οποίες έχουν χρησιμοποιηθεί είναι αυτές οι οποίες περιλαμβάνονται στον Πίνακα 1, όπου αναφέρονται και οι πηγές από τις οποίες έχουν αναζητηθεί τα δεδομένα. Η κάθε σειρά καλύπτει την χρονική περίοδο 1961 – 2008, ήτοι αποτελείται από 48 παρατηρήσεις. Το υποσύνολο παρατηρήσεων εκπαιδεύσεως αποτελείται από 40 ετήσιες παρατηρήσεις, οι οποίες καλύπτουν την περίοδο 1961 – 2000, ενώ το υποσύνολο παρατηρήσεων αξιολογήσεως περιλαμβάνει τις υπόλοιπες 8 ετήσιες παρατηρήσεις.

Πίνακας 1 : Μεταβλητές, Δεδομένα και Πηγές

| Κωδικός | Χρονολογική Σειρά | Πηγή |
|----------|---|--|
| A | Ρυθμός Μεταβολής ΑΕΠ Ελλάδος | Εθνικοί Λογαριασμοί |
| C | Ελλάς: Αμυντικές Δαπάνες ως Ποσοστό του ΑΕΠ | NATO, SIPRI (Swedish International Peace Research Institute) |
| D | Τουρκία: Αμυντικές Δαπάνες ως Ποσοστό του ΑΕΠ | NATO, SIPRI |
| G | Ελλάς: Αμυντικές Δαπάνες ανά κάτοικο | IISS (International Institute for Strategic Studies- London) |
| H | Τουρκία: Αμυντικές Δαπάνες ανά κάτοικο | IISS |

| | | |
|---------|--|--|
| I | Ελλάς: Ένοπλοι Δυνάμεις ανά 1000 κατοίκους | IISS |
| J | Τουρκία: Ένοπλοι Δυνάμεις ανά 1000 κατοίκους | IISS |
| K | Ελλάς: Ρυθμός Αυξήσεως του Πληθυσμού | Πληθυσμιακή Στατιστική Ηνωμένων Εθνών |
| L | Τουρκία: Ρυθμός Αυξήσεως του Πληθυσμού | Πληθυσμιακή Στατιστική Ηνωμένων Εθνών |
| P | Ρυθμός Μεταβολής ΑΕΠ Τουρκίας | IFS (International Financial Statistics – IMF) |
| Q (S) | Ελλάς: Εξωτερικό Χρέος Γενικής Κυβερνήσεως (Ποσοστό Μεταβολής) | Τράπεζα της Ελλάδος |

Οι μεταβλητές C και D οι οποίες αντιπροσωπεύουν τις Ελληνικές και Τουρκικές αμυντικές δαπάνες ως ποσοστό του ΑΕΠ αντιστοίχως θα χρησιμοποιηθούν ως εξηρημένες μεταβλητές. Οι υπόλοιπες μεταβλητές οι οποίες περιλαμβάνονται στον Πίνακα 1 προορίζονται για να χρησιμοποιηθούν ως ανεξάρτητοι μεταβλητές των συναρτήσεων οι οποίες προσδιορίζουν τις C και D. Από αυτές, ως εκ της φύσεώς των, οι A, P και Q (με εναλλακτικώς χρησιμοποιούμενη την S) χαρακτηρίζονται ως αντιπροσωπεύουσες την επίδραση υλικών πόρων, ενώ οι μεταβλητές I, J, K, και L την επίδραση του ανθρωπίνου δυναμικού. Επίσης ως μικτής φύσεως (υλικού και ανθρωπίνου δυναμικού) χαρακτηρίζονται οι μεταβλητές G και H. Σημειώνεται τέλος ότι η απουσία μεταβλητής η οποία αντιπροσωπεύει το Τουρκικό εξωτερικό χρέος οφείλεται στην αναξιοπιστία των σχετικών δεδομένων.

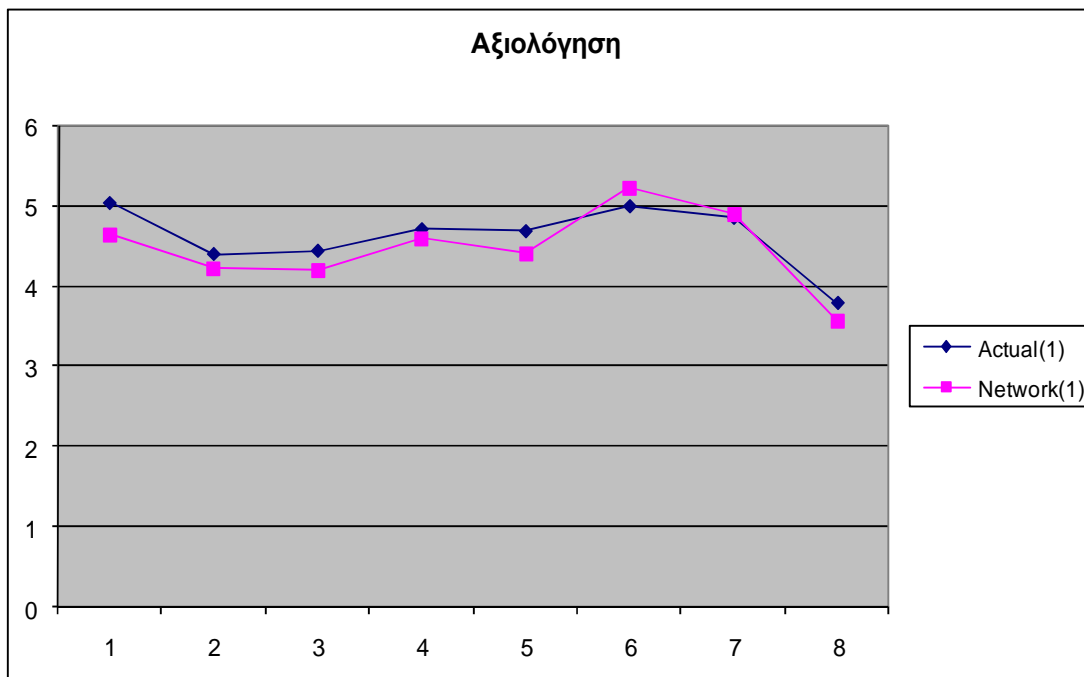
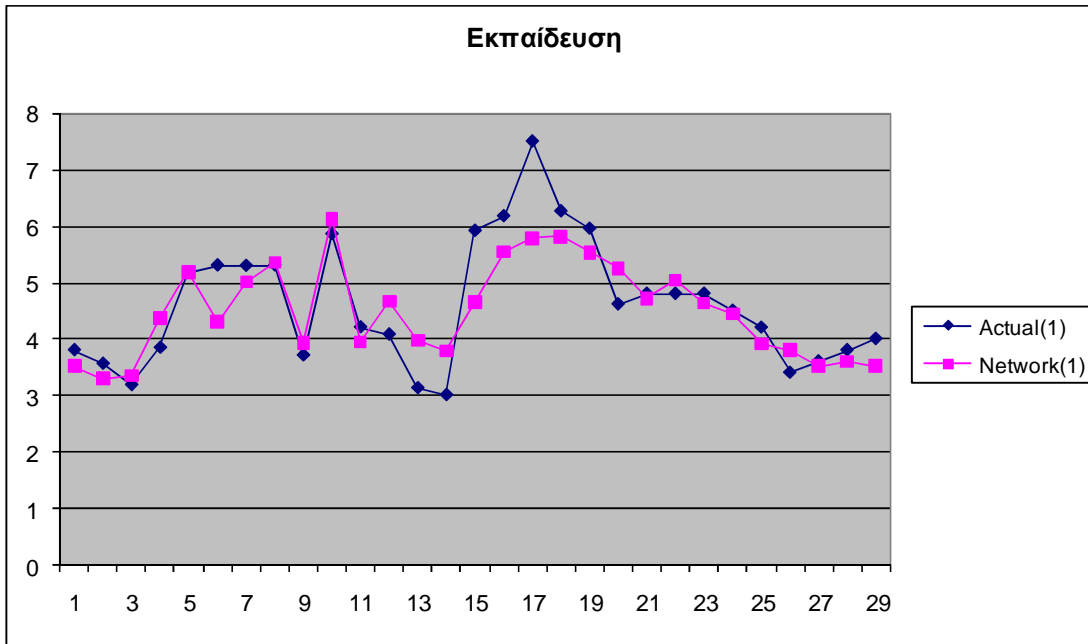
Μετά τον καθορισμό των εξηρημένων και των ανεξαρτήτων μεταβλητών, το επόμενο βήμα θα είναι ο καθορισμός της ερμηνευτικής ικανότητας των ανεξαρτήτων μεταβλητών βάσει του συγκεκριμένου νευρωνικού δικτύου και ακολούθως η επιλογή των μεταβλητών αυτών οι οποίες εμφανίζουν την ισχυρότερη ερμηνευτική ικανότητα σε περιβάλλον ανταγωνισμού των εξοπλιστικών προγραμμάτων Ελλάδος και Τουρκίας βάσει της διαδικασίας εκτιμήσεως της σημαντικότητας, όπως έχει ήδη αναφερθεί.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Ο Πίνακας 2 περιλαμβάνει επιλογή των πιά αξιόλογων αποτελεσμάτων με την απόδοση των δικτύων να αξιολογείται βάσει δύο διαφορετικών τύπων σφαλμάτων, του Κανονικοποιημένου Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος (Normalised Root Mean Square Error – NRMSE) και του Σχετικού Σφάλματος Μέσου Μεγέθους (Mean Magnitude Relative Error – MMRE), καθώς και του συντελεστού συσχέτισης (Correlation Coefficient CC). Τα CC, NRMSE και MMRE περιγράφονται ως εξής στις (1), (2) και (3) κατωτέρω:

Πίνακας 2 : Επιλογή Αποτελεσμάτων

| | Χρον. Σειρά | NRMSE | CC | MMRE |
|--|-------------------------------|--------------|-----------|-------------|
| <u>Περίπτωση 1^η :</u> Ελληνικές Αμυντικές Δαπάνες /ΑΕΠ Ανεξάρτητοι Μεταβλητές: D, G, H, I, J, K, L, A, Q | Εκπαίδευση (1961 - 2000) | 0.5213 | 0.8603 | 0.0947 |
| | Αξιολόγηση (2001 - 2008) | 0.5785 | 0.9264 | 0.0466 |
| <u>Περίπτωση 2α :</u> Τουρκικές Αμυντικές Δαπάνες /ΑΕΠ Ανεξάρτητοι Μεταβλητές: C, G, H, I, J, K, L, P | Εκπαίδευση (1961 - 2000) | 0.2450 | 0.9729 | 0.0384 |
| | Αξιολόγηση (20010 - 2008) | 0.7228 | 0.7232 | 0.1361 |



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ 1 και 2: Ελληνικές Αμυντικές Δαπάνες /ΑΕΠ. Ανεξάρτητοι Μεταβλητές: D, G, H, I, J, K, L, A, Q

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_{act}(i) - \bar{x}_{act,n})(x_{pred}(i) - \bar{x}_{pred,n})]}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^n (x_{act}(i) - \bar{x}_{act,n})^2 \right] \left[\sum_{i=1}^n (x_{pred}(i) - \bar{x}_{pred,n})^2 \right]}} \quad (1)$$

$$\text{NRMSE}(n) = \frac{\text{RMSE}(n)}{\sigma_{\Delta}} = \frac{\text{RMSE}(n)}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [x_{\text{act}}(i) - \bar{x}_{\text{act},n}]^2}}$$

όπου,
$$\text{RMSE}(n) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [x_{\text{pred}}(i) - x_{\text{act}}(i)]^2} \quad (2)$$

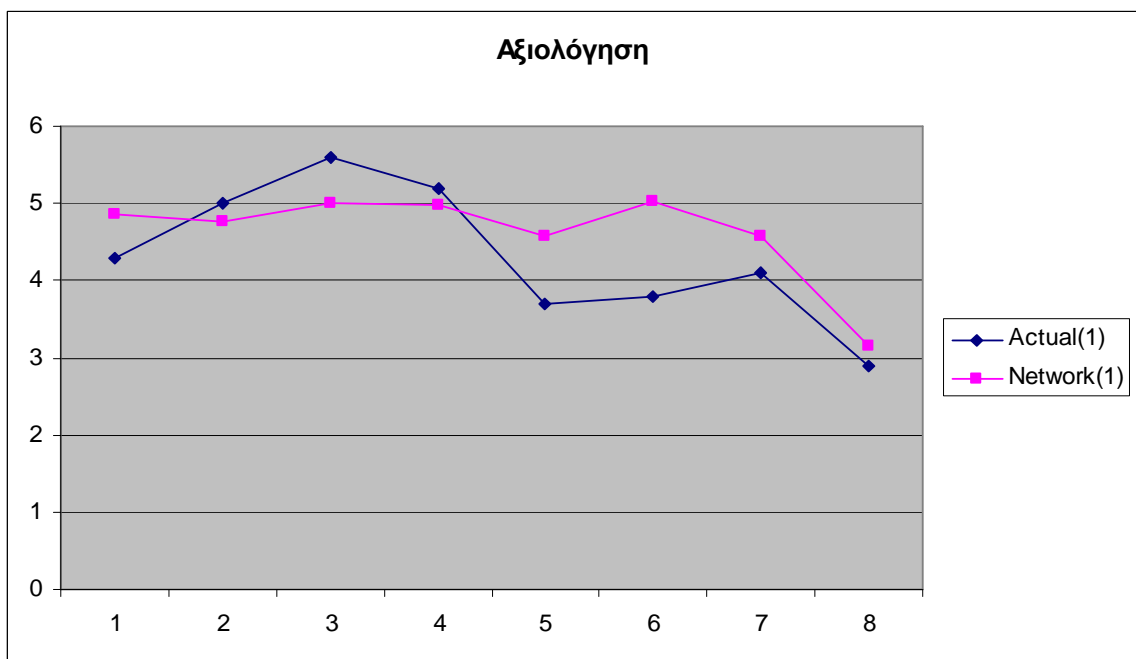
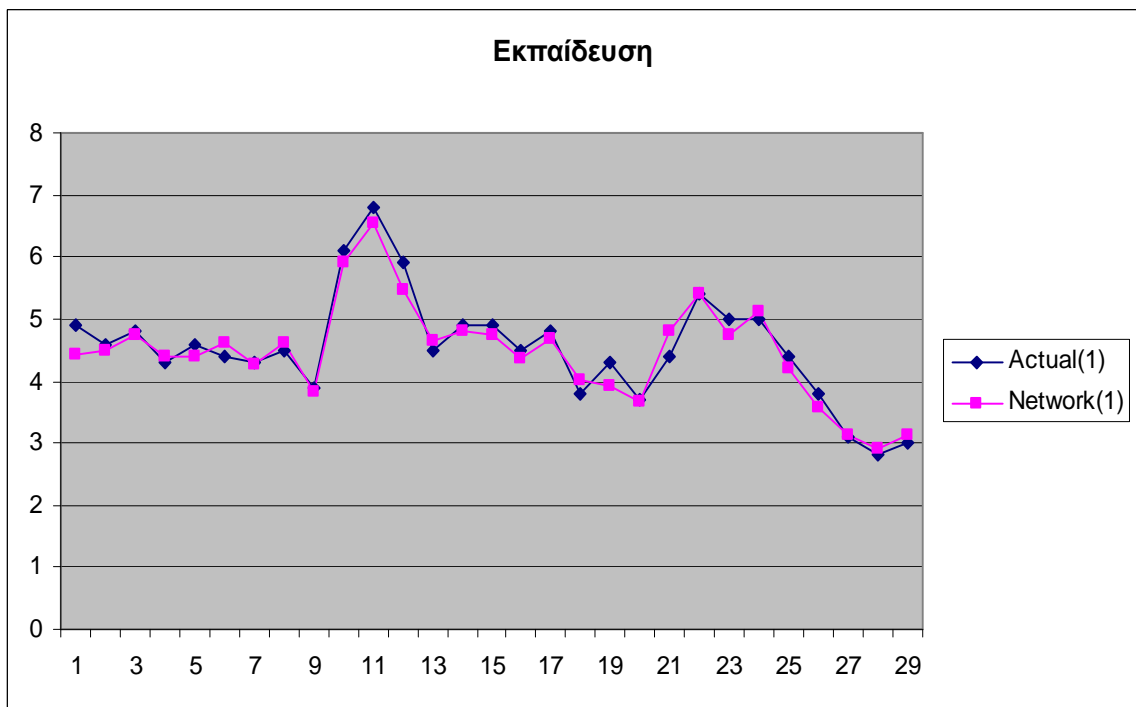
και
$$\text{MMRE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_{\text{pred}}(i) - x_{\text{act}}(i)}{x_{\text{act}}(i)} \right| \quad (3)$$

Όπου $x_{\text{act}}(i)$ και $x_{\text{pred}}(i)$ συμβολίζουν αντιστοίχως την πραγματική και την προβλεπόμενη τιμή της υπό μελέτην μεταβλητής όπως αυτή παρέχεται από το δίκτυο, $\bar{x}_{\text{act},n}$, $\bar{x}_{\text{pred},n}$ οι μέσες τιμές αντιστοίχως του πραγματικού και προβλεπόμενου δείγματος πλήθους n με το n να συμβολίζει τον συνολικό αριθμό των διανυσμάτων.

Όπως προκύπτει και από την μαθηματική έκφραση των ανωτέρω σφαλμάτων, ο συντελεστής συσχέτισης CC μετρά την έκταση κατά την οποία η σειρά η οποία προκύπτει από την πρόβλεψη του δικτύου ακολουθεί τις διακυμάνσεις της αρχικής σειράς. Συνεπώς μία τιμή του CC κοντά στην απόλυτο μονάδα ερμηνεύεται ως ταύτιση της συμπεριφοράς της προβλεπόμενης σειράς προς αυτή της αρχικής. Εάν το πρόσημο της CC είναι αρνητικό, τότε αυτό σημαίνει ότι η προβλεπόμενη σειρά ακολουθεί μεν τις διακυμάνσεις της αρχικής, αλλά με περιστροφή 180ο περί τον άξονα του χρόνου. Συνεπώς, όταν η αρχική σειρά έχει αύξουσα τάση, η αντίστοιχη προβλεπόμενη σειρά ακολουθεί συμμετρικώς προς τον άξονα του χρόνου φθίνουσα τάση και αντιστρόφως. Το κανονικοποιημένο μέσο τετραγωνικό σφάλμα NRMSE θεωρείται ότι ελέγχει την ποιότητα των προβλέψεων συγκρίνοντάς τις με τις αντίστοιχες προβλέψεις οι οποίες προκύπτουν βάσει του απλού μέσου όρου των n τελευταίων τιμών, ενώ το σχετικό σφάλμα μέσου μεγέθους MMRE , δεδομένου ότι είναι ανεξάρτητο των μονάδων μετρήσεως περιγράφει τον βαθμό ακριβείας των προβλέψεων σε όρους ποσοστού και επικεντρώνόμενο αποκλειστικώς στο προβλεπόμενο δείγμα. Αυτό παρέχει την δυνατότητα υπολογισμού του σφάλματος της προβλέψεως ως κλάσματος της αντιστοίχου πραγματικής τιμής, πράγμα το οποίο καθιστά το συγκεκριμένο τύπο σφάλματος περισσότερο αντικειμενικό από τους άλλους.

Ο Πίνακας 2 και τα Διαγράμματα 1 έως 4 συνοψίζουν τα αποτελέσματα των πειραμάτων τόσο για την φάση της εκπαίδευσεως του δικτύου, όσο και για αυτή του ελέγχου. Οι μεταβλητές οι οποίες χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη του ποσοστού του Ελληνικού ΑΕΠ που χρησιμοποιείται σε αμυντικές δαπάνες είναι οι μεταβλητές D, G, H, I, J, K, L, A και Q. Γιά την αντίστοιχη Τουρκική περίπτωση οι μεταβλητές οι οποίες χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη του ποσοστού των αμυντικών δαπανών επί του ΑΕΠ είναι οι μεταβλητές C, G, H, I, J, K, L, και P. Όλα τα δίκτυα είχαν πολύ ικανοποιητική απόδοση, με την καλύτερη τοπολογία γιά την Ελληνική περίπτωση να είναι αυτή, η πρόβλεψη της οποίας γίνεται με σχετικό σφάλμα μέσου μεγέθους (MMRE) της τάξεως του 4,5%, ενώ για αυτή της Τουρκίας η πρόβλεψη γίνεται με αρκετά υψηλότερο σχετικό σφάλμα μέσου μεγέθους, η τιμή του οποίου είναι περίπου 13,5%.

Βάσει των ανωτέρω διενεργήθηκε ακολούθως η διαδικασία εκτιμήσεως της σημαντικότητας των εισροών, επελέγησαν, δηλαδή οι κυριώτερες ερμηνευτικές μεταβλητές οι οποίες προβλέπουν την εξέλιξη των Ελληνικών και των Τουρκικών αμυντικών δαπανών. Τα αποτελέσματα της διαδικασίας αυτής συνοψίζονται στον Πίνακα 3.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ 3 και 4: Τουρκικές Αμυντικές Δαπάνες /ΑΕΠ. Ανεξάρτητοι Μεταβλητές: C, G, H, I, J, K, L, P

Τα αποτελέσματα της ερεύνης αυτής επιβεβαιώνουν τα συμπεράσματα στα οποία είχαμε καταλήξει σε προηγούμενη έρευνα επί του συγκεκριμένου θέματος (Andreatou and Zombanakis 2000). Επιβεβαιώνεται, δηλαδή ότι περίπου μία δεκαετία μετά την πρώτη αυτή έρευνα, ότι η κυριώτερα ερμηνευτική μεταβλητή η οποία επηρεάζει την εξέλιξη των Ελληνικών αμυντικών δαπανών είναι η αντίστοιχη Τουρκική, με δεύτερη σε σπουδαιότητα αυτή που αντιπροσωπεύει την δαπάνη ανά άτομο των Τουρκικών ενόπλων δυνάμεων και μόλις τρίτη αυτή η οποία εκφράζει την αντίστοιχη Ελληνική δαπάνη. Δηλαδή οι δύο από τις τρεις κυριώτερες ερμηνευτικές μεταβλητές των Ελληνικών αμυντικών δαπανών αντιπροσωπεύουν την Τουρκική πλευρά! Είναι, επομένως, σαφές ότι μεταβλητές οι οποίες χαρακτηρίζουν και

περιγράφουν το «έτερον κράτος» είναι αυτές οι οποίες ερμηνεύουν τις Ελληνικές αμυντικές δαπάνες. Το επόμενο ερώτημα είναι εάν ισχύει το αντίστοιχο στην περίπτωση της Τουρκίας. Στον ίδιο πίνακα διαπιστώνεται ότι η εξέλιξη των Τουρκικών δαπανών καθορίζεται αποκλειστικώς από μεταβλητές οι οποίες αντιπροσωπεύουν την Τουρκική και μόνον πλευρά, ήτοι, κατά σειράν σημαντικότητας, τις δυνάμεις ανά χιλίους κατοίκους, την αμυντική δαπάνη ανά κάτοικο και τον ρυθμό μεταβολής του ΑΕΠ. Επιβεβαιώνεται, επομένως, το συμπέρασμα ότι στο περιβάλλον του ανταγωνισμού των εξοπλιστικών προγραμμάτων Ελλάδος και Τουρκίας οι κινήσεις της Τουρκικής πλευράς καθορίζουν τις Ελληνικές αμυντικές δαπάνες, χωρίς όμως να ισχύει το αντίστροφο. Αυτό σημαίνει ότι υπό τις συνθήκες αυτές η Ελλάς είναι υποχρεωμένη να ακολουθή τις Τουρκικές εξοπλιστικές δαπάνες οι οποίες όμως καθορίζονται βάσει αμιγώς Τουρκικών κριτηρίων και μεταβλητών. Η Τουρκία, επομένως, διατηρεί την απόλυτο πρωτοβουλία κινήσεων στον εξοπλιστικό ανταγωνισμό μεταξύ των δύο χωρών με την Ελλάδα απλώς να είναι υποχρεωμένη να ακολουθή, ανεξαρτήτως του τιμήματος το οποίο καταβάλλει. Είναι χαρακτηριστικό ότι ο ρυθμός μεταβολής του Τουρκικού ΑΕΠ είναι μία από τις κυριώτερες ερμηνευτικές μεταβλητές των αμυντικών της δαπανών, πράγμα το οποίο, όμως, δεν ισχύει στην περίπτωση της Ελλάδος. Η χώρα μας, επομένως, αποφασίζει για το ύψος των αμυντικών της δαπανών ανεξαρτήτως της οικονομικής της καταστάσεως είτε αυτή περιγράφεται από τον ρυθμό μεταβολής του Ελληνικού ΑΕΠ, είτε από το ύψος του εξωτερικού της χρέους. Υπενθυμίζεται ότι έχει ήδη αναφερθή πως η απουσία μεταβλητής η οποία αντιπροσωπεύει το Τουρκικό εξωτερικό χρέος οφείλεται στην αναξιπιστία των σχετικών δεδομένων και επομένως αφήνει ανοικτό το ενδεχόμενο η μεταβλητή αυτή να διαδραματίζη κάποιο ρόλο στον καθορισμό των Τουρκικών αμυντικών δαπανών.

Πίνακας 3: Ιεράρχηση της Σημαντικότητας των Ανεξαρτήτων Μεταβλητών

| Αμυντικές Δαπάνες | Κυριώτερες Ανεξάρτητοι Μεταβλητές |
|--------------------------|---|
| Ελλάδος | 1. Τουρκικές Αμυντικές Δαπάνες / ΑΕΠ 2. Τουρκικές Αμυντικές Δαπάνες / Άτομο 3. Ελληνικές Αμυντικές Δαπάνες / Άτομο |
| Τουρκίας | 1. Τουρκικές Ένοπλοι Δυνάμεις / 1000 Κατοίκους 2. Τουρκικές Αμυντικές Δαπάνες / Άτομο 3. Ρυθμός Μεταβολής του Τουρκικού ΑΕΠ |

Το δεύτερο σημαντικό συμπέρασμα το οποίο προκύπτει από την αποτελέσματα της ερεύνης είναι ότι η ερμηνευτική παρουσία των μεταβλητών οι οποίες εκπροσωπούν αμέσως ή εμμέσως τον ανθρώπινο παράγοντα είναι ιδιαίτερως έντονη, με τις μεταβλητές οι οποίες αντιπροσωπεύουν αμιγώς υλικούς πόρους να

κάνουν αισθητή την παρουσία τους μόνο μέσω των Τουρκικών αμυντικών δαπανών για την περίπτωση της Ελλάδος, και τού ρυθμού ανόδου του Τουρκικού ΑΕΠ για την περίπτωση της Τουρκίας. Η διαπίστωση αυτή πρέπει να μας απασχολήσει κατωτέρω, δεδομένης της υπογεννητικότητας του Ελληνικού πληθυσμού, πράγμα το οποίο δεν συμβαίνει στην Τουρκία, καθώς και του φλέγοντος ζητήματος της διάρκειας της στρατιωτικής θητείας στην Ελλάδα, το οποίο ανακύπτει κατά διαστήματα.

Πίνακας 4 : Ελαστικότητες Αμυντικών Δαπανών σε Μεταβολές Ανεξαρτήτων Μεταβλητών

| Ανεξάρτητος Μεταβλητή | Ελληνικές Αμυντικές Δαπάνες / ΑΕΠ | Τουρκικές Αμυντικές Δαπάνες / ΑΕΠ |
|--|--|--|
| Τουρκικές Αμυντικές Δαπάνες / ΑΕΠ | 0,22 | |
| Τουρκικές Αμυντικές Δαπάνες / Άτομο | - | 0,64 |
| Ελληνικές Αμυντικές Δαπάνες / Άτομο | 0,86 | |
| Τουρκικές Ένοπλοι Δυνάμεις / 1000 Κατοίκους | | 0,43 |
| Ρυθμός Μεταβολής του Τουρκικού ΑΕΠ | | - 0,04 |

Τελειώνοντας αυτή την ανάλυση, πιστεύουμε ότι θα ήταν ενδιαφέρον να διαπιστώσουμε το βαθμό στον οποίο οι αμυντικές δαπάνες των δύο χωρών είναι ευαίσθητες σε μεταβολές των κυριωτέρων ανεξαρτήτων μεταβλητών, οι οποίες παρατίθενται στον Πίνακα 3. Ο βαθμός αυτός ευαισθησίας αντιπροσωπεύεται από τούς συντελεστές ελαστικότητας οι οποίοι προκύπτουν από τον υπολογισμό συμβατικών εξισώσεων βάσει της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων και οι οποίοι παρουσιάζονται στον Πίνακα 4:

Τα αποτελέσματα αυτά σημαίνουν ότι οι αμυντικές δαπάνες των δύο χωρών είναι ανελαστικές ως προς τις μεταβολές των διαφόρων ανεξαρτήτων μεταβλητών οι οποίες εν πολλοίς καθορίζουν τις δαπάνες αυτές. Είναι όμως αξιοσημείωτο το συμπέρασμα ότι , εάν το Τουρκικό ΑΕΠ μειωθεί κατά 10% οι αμυντικές δαπάνες της χώρας όχι μόνον δεν θα ακολουθήσουν, αλλά θα σημειώσουν και μικρή αύξηση της τάξεως του 0,4%.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ: Η ΘΗΤΕΙΑ ΣΤΙΣ ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΕΝΟΠΛΟΥΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ

Συμπεραίνουμε, επομένως, ότι ο ανθρώπινος παράγων σε περιβάλλον Ελληνοτουρκικού εξοπλιστικού ανταγωνισμού διαδραματίζει πολύ σημαντικότερο ρόλο από αυτόν τον οποίον η Ελληνική πλευρά αναγνωρίζει, κρίνοντας, τουλάχιστον,

από την έως τώρα ακολουθούμενη πολιτική επί του θέματος αυτού. Οι δημογραφικές εξελίξεις στις δύο χώρες αναδεικνύουν σοβαρό μειονέκτημα για την Ελληνική πλευρά, καθώς ο πληθυσμός της, εν αντιθέσει με αυτόν της Τουρκίας, γηράσκει, μεταβαλλόμενος με ιδιαιτέρως χαμηλούς ρυθμούς οι οποίοι σε ορισμένες περιπτώσεις είναι ακόμη και αρνητικοί. Η εξέλιξη αυτή, σε συνδιασμό με την σημαντική διαφορά του βιοτικού επιπέδου των δύο χωρών, έχει καταστήσει την ανάγκη για εξάπλωση αυτού που ορίζεται ως «ζωτικός χώρος», κάτι περισσότερο από απαιτητική για την Τουρκική πλευρά. Η Ελληνική πλευρά, με τη σειρά της, αποσκοπώντας στην αντιμετώπιση αυτού του δυναμισμού της γείτονος, και λαμβάνοντας υπ' όψιν την δυσμενή για την χώρα μας εξέλιξη από πλευράς δημογραφικής, στράφηκε στη βελτίωση της αποδοτικότητας των ενόπλων δυνάμεών της, δίνοντας έμφαση στην ευέλιξη και την ταχύτητα αντιδράσεώς τους, όπως επίσης στην ποιότητα του εξοπλισμού τους και στην τεχνολογία που χρησιμοποιείται. Αυτό όμως βεβαίως προάγει την αποτελεσματικότητα των ενόπλων μας δυνάμεων, το ίδιο όμως επιτυγχάνει παραλλήλως και η Τουρκική πλευρά, δεδομένου ότι σχεδόν όλα τα οφέλη της αναπτύξεως της τεχνολογίας είναι επί των ημερών μας διαθέσιμα σέ όποιον έχει την δυνατότητα να καταβάλει το αναλογούν τίμημα, στον βαθμό κατά τον οποίο δεν έχει την δυνατότητα εγχωρίου παραγωγής των καταλλήλων οπλικών συστημάτων.

Παραμένει, επομένως, το ερώτημα τι πράττει η χώρα μας για το ζήτημα της βελτιώσεως του συσχετισμού των ανθρωπίνων πόρων της προς αυτούς της Τουρκίας αλλά και για την καλύτερη αξιοποίηση των ήδη υπαρχόντων. Για το ζήτημα της βελτιώσεως του συσχετισμού το θέμα ανάγεται κατά κύριον λόγον σε θέματα δημογραφικής πολιτικής επί των οποίων – πρέπει να ομολογήσωμε – ότι ελάχιστα μέτρα έχουν ληφθή από πλευράς κυβερνητικής πολιτικής και αυτά, όπως η περίπτωση των οικογενειών με τρίτο παιδί, με ιδιαιτέρως χρονοβόρες διαδικασίες. Αλλά και για την καλύτερη αξιοποίηση του υπάρχοντος ανθρωπίνου δυναμικού, υπάρχουν τεράστια περιθώρια βελτιώσεως σε τομείς κεφαλαιώδους σημασίας, όπως π. χ. αυτός της Παιδείας, η συζήτηση για τον οποίο, όμως δεν είναι αρμοδιότης της Οικονομικής της Αμύνης. Αντιθέτως πολλά είναι δυνατόν να επιτευχθούν μετά από εμπειριστατωμένη μελέτη της αξιοποιήσεως του ήδη υπάρχοντος δυναμικού μέσω του θεσμού της στρατιωτικής θητείας, ζήτημα το οποίο δυστυχώς και πρὸς ανυπολόγιστη ζημία των εθνικών μας θεμάτων, έχει γίνει το προσφιλέθ θέμα προεκλογικών δημαγωγικών εξαγγελιών. Θεωρώ, επομένως, ότι από πλευράς Οικονομικής της Αμύνης θα ήταν σκόπιμο να εξετασθή το πρόβλημα αυτό εν ψυχρώ και απαλλαγμένο από τις όποιες πολιτικές σκοπιμότητες, ως εξής:

1. Δεδομένα

α. Η διεθνής εμπειρία έχει καταδείξει ότι η συμμετοχή μίας χώρας σε οργανισμούς όπως το NATO και η ΕΕ δεν επαρκεί για να εγγυηθή την ασφάλεια των συνόρων της. Αλλά ακόμη και σε περιπτώσεις στις τις οποίες δεν υπάρχει διαφανομένη απειλή κατά της εδαφικής ακεραιότητός τους, πολλές ευρωπαϊκές χώρες θεωρούν απαραίτητη την συμμετοχή του λαού στην άμυνα της χώρας, θεωρούν τις ενόπλους δυνάμεις ως αναπόσπαστο τμήμα της κοινωνίας τους και επομένως έχουν θεσπίσει και διατηρούν τον θεσμό της υποχρεωτικής θητείας, όπως φαίνεται και στον κατωτέρω πίνακα 5:

β. Η περίπτωση της Ελλάδος: Οι ένοπλοι δυνάμεις και ιδίως ο Στρατός Ξηράς αντιμετώπιζει πρόβλημα επανδρώσεως των μονάδων ως εξής:

Η οροφή για το Στρατό Ξηράς είναι οι 93.500. Ο κορμός των μονίμων στελεχών αποτελεί το 1/3 περίπου αυτού του αριθμού, δεδομένου ότι οι αξιωματικοί είναι 17.000 και οι μόνιμοι υπαξιωματικοί 16.000. Επομένως, παρά τις ευρέως παρεχόμενες αναβολές και τις ανυποταξίες, οι στρατεύσιμοι εξακολουθούν να αποτελούν τον κύριο όγκο του Στρατού Ξηράς, αριθμούντες περί τους 42.000. Έχομε

λοιπόν ένα σύνολο μονίμων και στρατευσίμων 75.000, πράγμα το οποίο έχει καταστήσει αναγκαία την πρόβλεψη προσλήψεως περίπου 30.000 ΕΠ.ΟΠ. Παρά την υπάρχουσα δυσχέρεια ευρέσεως επαγγελματικής απασχολήσεως λόγω της κρίσεως, αλλά και πρό αυτής, η δύναμη των ΕΠ.ΟΠ δεν υπερβαίνει τις 16.000. Άλλοι θεσμοί όπως οι έφεδροι υψηλής ετοιμότητας (ΕΦ.Υ.Ε.Σ.) δεν απέδωσαν τα αναμενόμενα αφού ο συνολικός τους αριθμός είναι μόλις 176 σε όλη την χώρα.

Πίνακας 5: Διάρκεια της Στρατιωτικής Θητείας σε Επιλεγμένες Ευρωπαϊκές Χώρες, Τουρκία και Ισραήλ.

| Χώρα | Διάρκεια Θητείας σε Μήνες |
|-------------------------|---------------------------------------|
| <u>Φινλανδία</u> | 6 έως 12 |
| <u>Σουηδία</u> | 7,5 έως 17,5 |
| Ελλάς | 12 |
| Κύπρος | 24 |
| Εσθονία | 11 |
| Λιθουανία | 12 |
| Πολωνία | 9 |
| <u>Νορβηγία</u> | 6 έως 12 |
| <u>Ελβετία</u> | 6 |
| <u>Τουρκία</u> | 15 |
| <u>Ισραήλ</u> | 36 για άνδρες, 24 για γυναίκες |
| Ρωσία | 12 |

Με αυτό το προσωπικό καλείται η διοίκηση των Ενόπλων Δυνάμεων να στελεχώση έξι μείζονες σχηματισμούς, ήτοι τέσσερα Σώματα Στρατού, την ΑΣΔΕΝ και την ΑΣΔΥΣ. Όπως φαίνεται και από τα ανωτέρω δεδομένα, η στελέχωση αυτή εβασίζεται ανέκαθεν και εξακολουθεί να βασίζεται στους στρατευσίμους. Όμως, η διάρκεια της θητείας στις Ελληνικές ενόπλους δυνάμεις, από 32, 30 και 28 μήνες οι οποίοι είχαν θεσπισθή για το Ναυτικό, την Αεροπορία και τον Στρατό Ξηράς αντιστοίχως έχει μειωθή σήμερα σταδιακά στους 12 μήνες και ακόμη ολιγότερον για ορισμένες κατηγορίες στρατευσίμων όπως παιδιά πολύτεκνων, μετανάστες, γονείς δυο παιδιών κλπ. Και ενώ επισήμως ισχύει η εξάμηνος υποχρεωτική παραμονή σε μάχιμες μονάδες, οι στρατεύσιμοι οπλίτες μένουν σε αυτές μόνο περί τους τέσσερις μήνες και στο διάστημα αυτό είναι αμφίβολο το κατά πόσον υφίστανται ουσιαστική εκπαίδευση.

Όμως η τακτική αυτή της συνεχούς μείωσης της διάρκειας της στρατιωτικής θητείας με τα δεδομένα τα οποία παρετέθησαν ανωτέρω οδηγεί με μαθηματική βεβαιότητα σε αδυναμία των Ελληνικών ενόπλων δυνάμεων να ανταποκριθούν πλήρως στην απαιτητική αποστολή τους. Είναι χαρακτηριστικό ότι όπως έχει διαμορφωθή η κατάσταση σήμερα, ενδεχομένη μείωση της θητείας κατά τρεις μήνες επί πλέον θα σημάνη μείωση του αριθμού των στρατευσίμων κατά 25%, δηλαδή κατά 10.500.

Αντιθέτως, η στράτευση στην ηλικία των 18 ετών έχει υπολογισθή ότι θα προσθέση περίπου 20.000 άτομα στον συνολικό αριθμό των στρατευσίμων επί ετησίας βάσεως¹⁸. Είναι, επίσης, χαρακτηριστικό να τονισθή, ως πρώτη προσέγγιση βάσει της λογικής συγκρίσεως κόστους – οφέλους, ότι μόνον η δαπάνη μισθοδοσίας των ΕΠΟΠ είναι εκατονταπλάσια αυτής ίδιου αριθμού στρατευσίμων, δεδομένου ότι ο μέσος στρατεύσιμος αμείβεται με ολιγότερον των 10 Ευρώ μηνιαίως. Δυστυχώς όμως το κόστος το οποίο συνεπάγεται για τον προϋπολογισμό του Ελληνικού κράτους η επιλογή ισάριθμων ΕΠΟΠ αντί στρατευσίμων είναι κατά πολύ μεγαλύτερο

¹⁸ Μελέτες ΓΕΕΘΑ 1997, 2002 και 2005.

για τους εξής λόγους: Κατ' αρχάς διότι η εκπαίδευση η οποία απαιτείται για την ορθή επαγγελματική κατάρτιση του μέσου ΕΠΟΠ είναι εκ των πραγμάτων και για πολλούς λόγους χρονοβόρος, περισσότερο απαιτητική και ως εκ τούτου και δαπανηρότερη σε σύγκριση με αυτή η οποία απευθύνεται στον μέσο στρατεύσιμο. Στο κόστος αυτό πρέπει να προστεθεί και αυτό το οποίο προκαλείται λόγω του μεγάλου αριθμού παραιτήσεων από πλευράς ΕΠΟΠ οι οποίοι αρνούνται να επωμισθούν το βάρος των υποχρεώσεων του συγκεκριμένου επαγγέλματος, όπως π. χ. η θαλασσία υπηρεσία ή η υπηρεσία σε μονάδες των συνόρων. Τέλος, προς χάριν πληρότητας της αναλύσεως αυτής απαιτείται ο συνυπολογισμός του οφέλους το οποίο συνεπάγεται η καθιέρωση της στρατεύσεως στην ηλικία των 18 ετών και η οποία θα συμβάλει στην απαλλαγή από το πρόβλημα των λεγομένων «ανυποτάκτων», αλλά και στην απρόσκοπτη προπτυχιακή και μεταπτυχιακή εκπαίδευση των αποφοίτων Λυκείου οι οποίοι θα έχουν εκπληρώσει έτσι τις στρατιωτικές τους υποχρεώσεις.

Ακόμη όμως και η πρόταση περί στελεχώσεως των άλλων δύο κλάδων των Ελληνικών Ενόπλων Δυνάμεων αμιγώς από επαγγελματίες και η μεταφορά των στρατευσίμων αποκλειστικώς στον Στρατό Ξηράς ενδεχομένως να δημιουργούσε δυσαναπλήρωτα κενά στο Πολεμικό Ναυτικό και την Πολεμική Αεροπορία. Ειδικώς στο Πολεμικό Ναυτικό οι κληρωτοί αριθμούν τους 4.110, ενώ οι αξιωματικοί είναι 5.600, οι υπαξιωματικοί 7.014 και οι ΕΠΟΠ 2.433. Μεταξύ των κληρωτών, όμως, υπάρχουν 165 ΣΕΑ/Μ οι οποίοι είναι απόφοιτοι σχολών του εμπορικού ναυτικού και οι οποίοι εκτελούν σημαντικά καθήκοντα. Υπάρχουν επίσης 172 γιατροί (δύο αξιωματικοί και 170 υπαξιωματικοί και ναυτοδίοποι), όλοι κληρωτοί, το έργο των οποίων, θεωρείται αυτονόητο ότι δεν είναι δυνατόν να εκτελεσθεί από ΕΠ.ΟΠ¹⁹.

γ. Διευτυώθη η άποψη ότι η έλλειψη ανθρωπίνου δυναμικού είναι δυνατόν να αναπληρωθεί από εξελεγμένα οπλικά συστήματα. Όμως, τόσο η θεωρία, όσο και η διεθνής εμπειρία έχει καταδείξει ότι η τεχνολογία δεν αναπληρώνει το ανθρώπινο δυναμικό. Αντιθέτως η τεχνολογική πρόοδος όπως αυτή ενσωματώνεται στα νέα οπλικά συστήματα τα καθιστά αποτελεσματικά μόνον εφ' όσον αυτά υπηρετούνται από ικανό σε αριθμό προσωπικό το οποίο, επιπλέον να είναι επαρκώς μορφωμένο ώστε να επιδέχεται απαιτητική εκπαίδευση υψηλής στάθμης.

2. Πρόταση

Τα ανωτέρω δεδομένα καταδεικνύουν την απόλυτο αναγκαιότητα του θεσμού της στρατιωτικής θητείας για την εύρυθμη λειτουργία των ενόπλων μας δυνάμεων, με παράλληλη αξιοποίηση ορισμένων από τους στρατευσίμους ακόμη και μετά την απόλυσή τους μέσω του θεσμού της εφεδρείας. Εάν, επί πλέον, γίνη αποδεκτή η πρόταση της στρατεύσεως σε ηλικία 18 ετών, η τροποποίηση αυτή θα συνεπάγεται σημαντικό αριθμό πλεονεκτημάτων ως εξής:

α. Η περίοδος της θητείας δεν θα αποτελή εμπόδιο στην εξέλιξη των σπουδών, εφ' όσον αυτές, πλέον, δεν θα παρεμβάλλονται μεταξύ προπτυχιακού και μεταπτυχιακού κύκλου, όπως γίνεται σε αρκετές περιπτώσεις σήμερα.

β. Θα υπάρξη σημαντική άνοδος του αριθμού των στρατευσίμων, εφ' όσον δεν θα υπάρχη πλέον λόγος χορηγήσεως αναβολής στρατεύσεως λόγω σπουδών.

γ. Η οικονομική επιβάρυνση για τον κρατικό προϋπολογισμό θα είναι κατά πολύ μικρότερη, σε σύγκριση με την περίπτωση καλύψεως των αναγκών από ισάριθμους επαγγελματίες, στο μέτρο κατά το οποίο κάτι τέτοιο θα καθίστατο εφικτό.

¹⁹ Η επισήμανση αυτή αποτελεί σχόλιο για τις πρόσφατες εξαγγελίες της πολιτικής ηγεσίας περί στελεχώσεως του ΠΝ και της ΠΑ μόνον από επαγγελματίες και δεν συνδέεται κατ' ανάγκην με την πρόταση της στρατεύσεως από την ηλικία των 18 ετών. Τα ανωτέρω δεδομένα κυμαίνονται κατά τι συν τω χρόνω, προσαρμοζόμενα στις ανάγκες των υπηρεσιών.

δ. Θα εκμηδενισθή η δυσμενής επιρροή των πολιτικών νεολαιών επί του χαρακτήρος των νέων οι οποίοι τώρα, αμέσως μόλις εισέλθουν στα ανώτατα εκπαιδευτικά ιδρύματα, εξωθούνται στην κομματική λογική.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

1. Ο ρόλος και η σημασία του ανθρωπίνου παράγοντος στο περιβάλλον του ανταγωνισμού των εξοπλιστικών προγραμμάτων Ελλάδος και Τουρκίας είναι κεφαλαιώδεις.

2. Στον ανταγωνισμό αυτό τον τόνο δίδει η Τουρκική πλευρά με την Ελληνική απλώς να είναι υποχρεωμένη να ακολουθή. Επομένως είναι καθοριστικός ο ρόλος της Τουρκίας στην πίεση η οποία ασκείται επί της Ελληνικής οικονομίας, λόγω του εξοπλιστικού ανταγωνισμού σε εποχή, μάλιστα, μεγίστης οικονομικής δυσπραγίας για την πατρίδα μας.

3. Η δυσπραγία αυτή φαίνεται να γίνεται αντικείμενο επιλεκτικής εκμεταλλεύσεως από την πλευρά των αρμοδίων οι οποίοι αφ' ενός μεν επιχειρούν μείωση των αμυντικών δαπανών σε εποχές εξάρσεως των Τουρκικών προκλήσεων, αφ' ετέρου όμως επιμένουν στην δημαγωγική τακτική της συνεχούς μειώσεως της διάρκειας της θητείας επιβαρύνοντας έτσι τον κρατικό προϋπολογισμό.

4. Προκύπτει, επομένως, ότι η πολιτική ηγεσία – κρίνοντας τουλάχιστον από τους έως σήμερα χειρισμούς - δεν φαίνεται να συνειδητοποιή τον προεξάρχοντα ρόλο του ανθρωπίνου δυναμικού στο περιβάλλον της Ελληνοτουρκικής διενέξεως. Είναι όμως σημαντικό να θυμάται κανείς ότι η διαχείριση του ανθρωπίνου δυναμικού επαφίεται κατά κύριον λόγον στην πολιτική ηγεσία, η οποία χαράσσει τις κατευθυντήριες γραμμές και παραλλήλως έχει και την δυνατότητα να ασκή, αμέσως ή εμμέσως, διοίκηση κατά τα πρότυπα του επιχειρησιακού management. Εάν, επομένως, το στρατεύσιμο ανθρώπινο δυναμικό δεν αποδίδει, κάτι το οποίο χρησιμοποιείται συχνά εκ του πονηρού ως επιχείρημα υπέρ της καταργήσεως της θητείας στις Ελληνικές Ενόπλους Δυνάμεις, αποκλειστικώς υπεύθυνος είναι ο manager, εν προκειμένω η πολιτική ηγεσία, η οποία καλό θα ήτο να αντιμετωπίσει αυτό το μείζον θέμα με την σοβαρότητα και την προσοχή η οποία απαιτείται και μακριά από πολιτικές σκοπιμότητες, πρίν είναι πολύ αργά για τα συμφέροντα της πατρίδος μας.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Προηγούμενη μορφή του παρόντος έχει παρουσιασθή σε επιμορφωτικό πρόγραμμα το οποίο οργάνωσε η Σχολή Ναυτικών Δοκίμων σε συνεργασία με το City University of Seattle υπό τον τίτλο «Διαχείριση Ανθρωπίνων και Οικονομικών Πόρων» τον Ιούνιο του έτους 2009. Πολλές ευχαριστίες οφείλονται στον δημοσιογράφο κ. Ε. Πέτρου για την πολύτιμη συμβολή του στην αξιοποίηση των στατιστικών στοιχείων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Andreou, A. S. and Zombanakis. G. A. (2010, Forthcoming) Financial Versus Human Resources in the Greek-Turkish Arms Race Ten Years On: A Forecasting Investigation Using Artificial Neural Networks, *Defence and Peace Economics*.

2. Andreou, A. S. and Zombanakis. G. A. (2006) The Arms Race between Greece and Turkey: Commenting on a Major Unresolved Issue. *Peace Economics, Peace Science and Public Policy* 12(1), Article 2, (online).
3. Andreou. A. S. and Zombanakis, G. A. (2000) Financial versus Human Resources in the Greek - Turkish Arms Race. A Forecasting Investigation Using Artificial Neural Networks. *Defence and Peace Economics*. 11(4), 403-426.
4. Azoff, E. M. (1994) *Neural Network Time Series Forecasting of Financial Markets*. John Wiley & Sons, N.Y.
5. Brauer, J. (2003) Greece and Turkey: A Comprehensive, Critical Review of the Defense Economics Literature. In the *Greece and Turkey in the 21st Century: Conflict or Cooperation – The Political Economy Perspective*, edited by Kollias C. and Góniok - Senesen G., 193-242.
6. Hartley, K. and Sandler, T. (1995) *Handbook of Defence Economics*. North Holland, Amsterdam.
7. Haykin, S. (1999). *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
8. Kuo, C. and Reitsch, A. (1995) Neural Networks vs. Conventional Methods of Forecasting. *The Journal of Business Forecasting*, Winter 1995-1996, 17-22.
9. McCulloch, W.S. and Pitts, W. (1943) A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity, *Bulletin of Mathematical Biology* 5(4), 115-133.
10. Öcal, N. (2002). Asymmetric Effects of Military Expenditure between Turkey and Greece. *Defence and Peace Economics* 13(5), 405-416.
11. Refenes, A.N., Kollias, C. and Zarpanis A. (1995) External Security Determinants of Greek Military Expenditure: An Empirical Investigation Using Neural Networks. *Defence and Peace Economics* 6, 27-41.

Αξιωματικοί και Συγγραφείς: Δύο Ασύμβατες Ιδιότητες;

Ευαγγελία Τσιαβού

*αΛέκτορας (Π.Δ.407/80) Γερμανικής Γλώσσας στη Σχολή Ναυτικών Δοκίμων
βΣ.Ε.Π. στο Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Εξειδίκευσης Καθηγητών Γερμανικής Γλώσσας
(Ενότητα: ΓΕΡ 51: Κατανόηση Γραπτού Λόγου)*

Περίληψη. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η αποτύπωση της καλλιτεχνικής πλευράς των αξιωματικών-συγγραφέων και η ανάγκη έκφρασης των πολλαπλών ιδιοτήτων τους ως αξιωματικοί, ως λογοτέχνες και ως άνθρωποι. Δεν είναι λίγες οι φορές που η πρώτη ιδιότητά τους επηρεάζει έμμεσα ή άμεσα και το λογοτέχνημα, και που τελικά καθίσταται συντεταγμένη αποφασιστικής σημασίας. Ωστόσο, δεν πρέπει να παραγνωριστεί και η δημιουργική διάσταση της προσωπικότητάς τους, όπως αποτυπώνεται στο συγγραφικό τους έργο. Εστιάζοντας κυρίως στα έργα του Έλληνα Νίκου Α. Σταθάκη, η επικείμενη μελέτη θα επιχειρήσει να συνοψίσει τα γενικά χαρακτηριστικά τους και να προσεγγίσει ερμηνευτικά μόνο όσα είναι αποκυήματα φαντασίας, καθότι η συντριπτική πλειονότητα είναι απομνημονεύματα. Ο συσχετισμός των λογοτεχνικών αυτών κειμένων με τη θεωρία της λογοτεχνίας θα καταστήσει ορατή την αποτίμησή τους.

Λέξεις-κλειδιά: Ν. Σταθάκης, λογοτεχνία, αξιωματικός, συγγραφέας, λογοτέχνης, θάλασσα, αυτοβιογραφία, απομνημονεύματα

Abstract. Officers and authors: two incompatible properties?

The expression of naval officers' creativity appears to be of a great interest, particularly their attempts to combine multiple tasks such as those associated with being naval officers and authors at the same time. It is more common than not, that their first identity influences their writings directly or indirectly and turns out to play a decisive role in shaping their artistic profile. Focusing on the literary work of N. Stathakis the present paper will attempt to summarize its general characteristics, taking into consideration the fact that most of it has been written in the form of memoirs. Then, it will interpret the parts that are fictional and imaginative constructions. Finally, it will include evaluation based on the criteria of literary theory.

Sea and a disposition of intense experiential nature seem to be the central axes, along which the writer moves. We will focus on both of them while attempting a general assessment of his work. The issue to be discussed is whether the professional status of Stathakis is expressed through his literary status. Emphasis will be laid then on those texts of a literary character and an effort will be made towards appreciating and interpreting them. The literary activity of L. Stathakis is extensive, which makes us guess his multi-faceted personality. He has published nineteen books and numerous studies in various magazines and newspapers. Both in the selection of his material and his writing style the influence of his profession is clearly distinctive. The neuralgic role he had played while serving in various posts of the Greek Navy is present and affects his writing style.

The language he uses is lyrical full of rich colours, variety and range, and enriched by idiomatic expressions. Psychological comments are also present together with short but concise outline of the main characters. In addition, the construction of his personal psychological profile is of great interest along with the formulation of his literature identity. Openness, culture and ethos are reflected throughout his work, and he often surprises the reader referring to the "emotional connection" between people. Besides, he outlines pertinent events and people giving historical and sociological data. He also tries to be objective and his criticism not to be full of bigotry and chauvinism. Instead he projects the greek element at every opportunity.

Stathakis is aware of his statuses both as an officer and as a writer. Through his writings he constructs an identity, which is intertwined with these two properties, and also incorporates social values of his time: he is a defender of his country, proud of the immortal greek spirit, without being a nationalist, he appreciates the importance of understanding people, he recognizes the important role of religious faith and takes his role as the representative of Greece in earnest.

This article analyses Stathakis' works of a fictional character and literary dimension. These include the following: "The Wreck" (1980:19-35), "Endless contemplation" (1980:301-323), "A boat returns to port" (1980:324-348) and "Ships in the Mist" (1980: 349-363). By placing these texts in the literary pantheon, we may claim that his creative expression contains elements of literary value indeed. Although the themes are not original, they involve the author's personal touch that makes these works stand out. They appeal to the reader with their immediacy, and manage to enrich him emotionally and broaden his horizons. The texts enable the reader to experience life in the Navy even as a fiction of

imagination. Linguistically, without using boastful word patterns, descriptions become so strong that they excite readers with their representational power.

The profile of an officer-poet is difficult to be outlined from the study of Stathakis texts alone; such an attempt would require the presence of other sources as well. However, the question of whether the status of the officer affects the writer, can be answered positively in the first instance, either referring to the textual sort, and themes, or to the incentives of writing and thus the creation of a writer's identity.

Keywords: literature, officer, writer, memoirs, sea

ΘΑΛΑΣΣΑ ΚΑΙ ΒΙΩΜΑ

Αν η καλλιτεχνική δημιουργικότητα συνίσταται πρωτίστως στην ανάγκη έκφρασης, στην κωδικοποίηση των βιωμάτων, στην επεξεργασία (α-) συνειδητων τάσεων και προϊόντων αντιμεταβίβασης, στην αναγωγή ψηγμάτων καθημερινότητας σε τέχνη και στην αποστασιοποίηση του υποκειμένου από την πραγματικότητα,²⁰ τότε υπάρχει σοβαρός λόγος να επιστήσουμε την προσοχή μας στα λογοτεχνικά είδη αλλά και στους συγγραφείς, που στα κείμενά τους αποτυπώνονται ειδικές συνθήκες και είναι για αυτό το λόγο χαρακτηριστικά.

Μια τέτοια περίπτωση αποτελούν λογοτέχνες, των οποίων η επαγγελματική ιδιότητα εμπνέει και διαπνέει τη θεματική του έργου τους, όπως είναι η περίπτωση των ναυτικών και πιο συγκεκριμένα των αξιωματικών του Πολεμικού Ναυτικού (Π.Ν.). Από το *Ροβινσώνα Κρουσό* (1971) του Ντάνιελ Ντεφόε και τις "Robinsonades"²¹ δεν είναι και τόσο μακρινή η απόσταση ως τα δημιουργήματα των αξιωματικών του πολεμικού ναυτικού. Πέρα από εκείνα με στρατιωτικό περιεχόμενο και τα διδακτικά εγχειρίδια, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν όσα ανήκουν στην ευρύτερη κατηγορία της λογοτεχνίας, δηλ. όχι μόνο τα μυθιστορήματα, διηγήματα, αφηγήματα, χρονογραφήματα, ποιήματα και τα θεατρικά έργα²², αλλά και τα ιστορικά, ταξιδιωτικά, οι βιογραφίες και τα απομνημονεύματα.

Στην τελευταία κατηγορία ανήκει το έργο του Νίκου Α. Σταθάκη. Ο έντονος βιοματικός χαρακτήρας και η θάλασσα είναι οι δύο κεντρικοί άξονες, πάνω στους οποίους κινείται ο συγγραφέας. Αυτούς θα πάρει ως γνώμονα η επικείμενη μελέτη και σε αυτούς θα επικεντρωθεί επιχειρώντας μια γενική εκτίμηση του έργου του. Το ερώτημα που προκύπτει είναι κατά πόσο η επαγγελματική ιδιότητα του Σταθάκη εκφράζεται μέσα από τη συγγραφική. Στη συνέχεια, θα δοθεί έμφαση σε εκείνα τα κείμενα, που έχουν λογοτεχνικό χαρακτήρα και θα επιχειρηθεί η εκτίμηση και η ερμηνευτική προσέγγισή τους.

²⁰ Πρβ. Schönau (1991: 31-45)

²¹ Το έργο αυτό του Ντεφόε έδωσε το έναυσμα για τη συγγραφή μιας σειράς λογοτεχνημάτων με το ίδιο μοτίβο, που αποτέλεσαν ξεχωριστή λογοτεχνική κατηγορία με την επωνομασία "Robinsonade" [Σε ελεύθερη μετάφραση: Ροβινσωνάδες]. Πρβ. http://www.ruebenberge.de/robinsonaden/4_robinson_motiv.html 13.06.2010.

²² Χαρακτηριστική περίπτωση είναι η πλούσια συγγραφική δραστηριότητα του Παντελή Χορν (1881-1941), αξιωματικού του Π.Ν. και θεατρικού συγγραφέα. Πρβ. <http://www.ekebi.gr/frontoffice/portal.asp?cpage=NODE&cnode=461&t=413> 13.06.2010

Ο ΣΥΓΓΡΑΦΕΑΣ ΔΕΝ ΕΙΝΑΙ ΝΕΚΡΟΣ!²³ ΤΟ ΕΡΓΟ ΤΟΥ ΝΙΚΟΥ Α. ΣΤΑΘΑΚΗ: ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Η συγγραφική δραστηριότητα του Ν. Σταθάκη είναι μεγάλη σε εύρος, γεγονός που μας κάνει να μαντεύουμε και την πολυσχιδή προσωπικότητά του. Εξέδωσε δεκαεννιά βιβλία²⁴ ενώ πλήθος μελετών του δημοσιεύτηκαν σε διάφορα περιοδικά²⁵ και εφημερίδες. Το χειμώνα του 1941-'42 κάνει την πρώτη του λογοτεχνική απόπειρα με τα διηγήματα "Θυσία", Το μέταλλο του ζητιάνου", "Γιατί;" και "Μέσα από το σκλαβωμένο Παρθενώνα", που όμως δε δημοσιεύονται.²⁶ Ξεκινάει την πορεία του στα γράμματα το 1942 αρθρογραφώντας με το ψευδώνυμο Πέτρος Θαλασσινός στις ελληνικές εφημερίδες του Καΐρου *Φως* και *Χρόνος*, ενώ κατά από το 1945 ως το 1990 συνεργάζεται και με το *Βατικιώτη*.²⁷ Αποσπά πλήθος βραβείων, διακρίσεων και επαίνων,²⁸ ενώ τα έργα του δεν περνάν απαρατήρητα, όπως φαίνεται από τα άρθρα που παραθέτει στους προλόγους ή στα εξώφυλλα των βιβλίων του.²⁹

Όπως, πολύ εύστοχα, σημειώνει ο Γ. Κουρνούτος στον πρόλογο του *Αμόνι και Αρμύρα*, τα κείμενά του Σταθάκη είναι κυρίως αυτοβιογραφικά.³⁰ Ο ίδιος ο συγγραφέας δεν παραλείπει να το αναφέρει στις εισαγωγές των βιβλίων του,³¹ και μάλιστα, πιο συγκεκριμένα δεν κρύβει ότι χρησιμοποιεί ως πρωτογενές υλικό τα ημερολόγιά του.³² Στο επίκεντρο του ενδιαφέροντός του βρίσκεται η ιστορία και εκεί στοχεύει έμμεσα: όλα του τα έργα και ειδικά το *Πολύπτυχο* (που αποτελείται από τα *Αμόνι κι αρμύρα* (1983), *Φλόγα και μνήμες* (1984), *Δόξα και Σαράκι* (1985), *Επιστροφή* (1986), *Το τέλος του ταξιδιού* (1988)) έχουν σα γνώμονα τον εμπλουτισμό της ιστοριογραφίας μέσα από την προσωπική πορεία. Για αυτό το σκοπό δε διστάζει να ξεδιπλώσει την προσωπική, οικογενειακή και επαγγελματική του ιστορία, προκειμένου να δώσει μια εικόνα της εποχής με τις πολυτάραχες ιστορικές συνθήκες. Εντάσσει το βίωμα σε ένα πλαίσιο ιστορικότητας, με την πεποίθηση ότι "Η προσωπική ιστορία έχει αξία μόνο όταν από αυτήν προβάλλει μια περίοδος και περιγράφονται καταστάσεις, που αγγίζουν το σύνολο."³³ Φυσικά, ούτε αυτή του η στάση δεν είναι τυχαία: οι ραγδαίες ιστορικοπολιτικές εξελίξεις στο παγκόσμιο αλλά και στο εθνικό σκηνικό σε συνδυασμό με την ιδιότητά του ως αξιωματικού του Π.Ν. συντελούν στην εγγύτητα που αποκτά με τα γεγονότα.

Τόσο στην επιλογή του υλικού όσο και στον τρόπο γραφής διακρίνεται η επιρροή της επαγγελματικής ιδιότητας. Ο νευραλγικός επαγγελματικός ρόλος σε διάφορες

²³ Αναφορά στον Ρ. Μπάρτ, που τόνισε ότι το λογοτέχνημα έχει προτεραιότητα στην ερμηνεία της λογοτεχνίας και διακήρυξε συμβολικά το θάνατο του συγγραφέα. Πρβ. <http://iasl.uni-muenchen.de/discuss/lisforen/koeppeforum.html> 31.05.2010

²⁴ Παρατίθεται λίστα με όλα τα έργα του στο τέλος του άρθρου.

²⁵ Όπως τα "Ναυτική Ελλάς", "Νέα Σκέψη", "Ναυτική Επιθεώρηση", "Ισραηλινά Νέα", "Φιλολογική Πρωτοχρονιά" κατά το χρονικό διάστημα 1945-1990.

²⁶ Βλ. Σταθάκης (1985: 68-72)

²⁷ Βλ. Σταθάκης (1980α: [εξώφυλλο]) και (1985: 137 α)

²⁸ Αναφέρονται διεξοδικά μ.α. στο Σταθάκης (2000:10)

²⁹ Υπάρχουν επιστολές και άρθρα του Ι.Μ.Παναγιωτόπουλου, του Γ. Κουρνούτου, του Ι.Μ.Χατζηφώτη, του Δ.Σιατόπουλου [Βραδυνή, 5.3.1985], του Γ.Σαββίδη [Απογευματινή, 17.9.1985], του Δ.Τσάκωνα [Γενεύη, 10.8.1987], του Δ. Σταμέλλου [Ελευθεροτυπία, 17.8.1988] και του Α. Τάγαρη [Στρατηγικά Μελέται, 88: 1990].

³⁰ Πρβ. Κουρνούτος στο: Σταθάκης (1983: 7-14)

³¹ Βλ. ενδεικτικά Σταθάκης (1986:11),

³² Παραπομπές και αναφορές στα ημερολόγιά του υπάρχουν σε πάρα πολλά σημεία του συνολικού του έργου. Ενδεικτικά αναφέρονται: (1983: 15)

³³ Σταθάκης (1983:16). Πρέπει να αναφερθεί ότι η ορθογραφία και η στίξη του πρωτοτύπου έχουν διατηρηθεί, αλλά όχι και ο τονισμός.

θέσεις του Π.Ν.³⁴ υποβάλλει και επηρεάζει το συγγραφικό στυλ.³⁵ Φροντίζει να μην αφήνει ανοιχτούς διαύλους παρεξήγησης, επισημαίνοντας: "[...] δεν κάνω κριτική, ούτε αξιολόγηση ατόμων και προσφοράς τους. Λέω μόνο προσωπικές σκέψεις και αισθήματα που με ενέπνευσαν".³⁶ Ενίοτε είναι αποτέλεσμα διακριτικής υπόδειξης: "Ακόμα, κι αυτό μου υποδείχτηκε νωρίς -από ανθρώπους που σεβόμουν την κρίση τους- ότι μπορούσα να καταγράψω με συγκίνηση, όχι μόνο στην επιφάνεια αλλά στο βάθος, με περιεκτική περιγραφή κι ανάλυση ψυχογραφική, χωρίς το κείμενο να χάνει λυρισμό. Εκεί βρίσκονται οι δυνατότητές μου."³⁷

Ο Σταθάκης επιλέγει συνειδητά να αυτοαναφερθεί και τολμά να μιλήσει σε πρώτο πρόσωπο για όλα όσα τον άγγιξαν, τον συνεπήραν, τον εντυπωσίασαν, τον προβληματίσαν. Σε πολλά σημεία του έργου του³⁸ παραθέτει σκέψεις, γνώσεις, συναισθήματα και διαπιστώσεις, που αναφέρονται στα κίνητρα συγγραφής. Επισημαίνει ότι: "Όταν έχεις μέσα σου την παρόρμηση της πνευματικής δημιουργίας, θα παρουσιάσεις ό,τι το πνεύμα και η ψυχή σου υπαγορεύουν."³⁹ Μέσα από πολλές τέτοιου είδους παρατηρήσεις αλλά και με διεξοδική αναφορά στα εφαλτήρια έμπνευσής του εμπλουτίζει με πλούσιο υλικό τη μελέτη της δημιουργικότητας.

Ο λόγος του λυρικός (βλ. χαρακτηριστικά: "Κύματα ορμήστε, με τα άσπρα σας λουλουδία, τους βράχους στεφανώστε και τραγουδέστε τις ρίμες της θάλασσας, φέρτε την ηχώ της... και άμποτε μέσα από το νερό να ξεπροβάλλουνε τα μυστικά της, να μιλήσει, να πει, λόγια που μόνο οι ψυχές γροικάνε"⁴⁰), διακρίνεται από πλούσιες αποχρώσεις εφάμιλλες του Τερζάκη, βρίθει από ποικιλία και εύρος, καθώς κινείται δεξιοτεχνικά μεταξύ της καθομιλουμένης (π.χ. "βάσταξε"⁴¹) και της καθαρεύουσας (όπου επιβάλλεται), ενώ εμπλουτίζεται τόσο από λόγιες (π.χ. "λίκνισμα"⁴²) όσο κι από ιδιωματικές λέξεις (π.χ. "λεφτερισμένος"⁴³). Αν και το έργο του είναι κυρίως αφηγηματικό, όπου υπάρχουν διάλογοι, είναι εμφανής η τεχνητή αναπαραγωγή τους, δηλ. ο λογοτεχνίζων λόγος είναι παρών και στους εξωραϊσμένους διαλόγους, έτσι ώστε οι τελευταίοι να ακούγονται αποκομμένοι από την πραγματικότητα.⁴⁴ Δε λείπουν επίσης και οι ψυχολογισμοί με πολλές αναφορές στο υποσυνειδητό⁴⁵ και η σύντομη αλλά μεστή σκιαγράφηση των κύριων χαρακτήρων. Επιπλέον, ενδιαφέρον παρουσιάζει η κατασκευή του ατομικού του ψυχογράμματος και με αυτόν τον τρόπο η δημιουργία -λογοτεχνικής και όχι μόνο- ταυτότητας.⁴⁶

Έχει το θάρρος να υποστηρίξει τα γραπτά του χωρίς να χρησιμοποιεί το λογοτεχνικό πέπλο, που δημιουργεί εντυπώσεις και προσθέτει ασάφεια. "Τα ανδρείκελα της φαντασίας του συγγραφέα παρουσιάζονται με πειστικότητα ή όχι, κατακτούν ή απωθούν, ανάλογα με το ταλέντο του δημιουργού τους. Αυτά τα πλάσματα της φαντασίας, σπάνια τα ένιωσα κοντά μου."⁴⁷ Η παραδοχή του για τα "πλάσματα της φαντασίας", που δεν ένιωσε παρά σπάνια την εγγύτητά τους, ενδεχομένως οφείλεται στο γεγονός ότι η διαύγεια, η αποτελεσματικότητα και η

³⁴ Εκτός από πολλές αναφορές στα έργα του, βλ. το Βιογραφικό του στα εξώφυλλα, ειδικά στα Βότσαλα III (1996), Βότσαλα IV (2000), Βότσαλα V (2005).

³⁵ Βλ. Σταθάκης (1984:11)

³⁶ Σταθάκης (1983:16)

³⁷ Βλ. Σταθάκης (1984:7)

³⁸ Βλ. ενδεικτικά Σταθάκης (1996:9)

³⁹ Σταθάκης (1983:17)

⁴⁰ Σταθάκης (1980:301)

⁴¹ Σταθάκης (1980:310)

⁴² Σταθάκης (1980:306)

⁴³ Σταθάκης (1980:306)

⁴⁴ Βλ. ενδεικτικά Σταθάκης (1980:47-51)

⁴⁵ Βλ. ενδεικτικά Σταθάκης (1985:43) και (1980:74-6)

⁴⁶ Η σπουδή της αυτοβιογραφικής γραφής του Σταθάκη είναι όμως αντικείμενο κάποιας άλλης μελέτης και δε θα επεκταθούμε εδώ.

⁴⁷ Βλ. Σταθάκης (1984:7)

ενσυναίσθηση της ευθύνης σε συνδυασμό με τον ρεαλισμό και την αίσθηση του καθήκοντος τον ωθούν να εκφράζεται με σαφήνεια. Η ευθύτητα του χαρακτήρα του τον ωθεί να αποφεύγει τεχνικές συγκάλυψης ή απόκρυψης: "Σκέφτηκα να δημιουργήσω ένα φανταστικό πρόσωπο, κι έχοντας αυτό για ήρωα, να δώσω τα προσωπικά βιώματα. Όμως δε θα ήταν σαν κρύψιμο πίσω από ένα προπέτασμα καπνού; Μια αλήθεια, που δεν τόλμησα να παρουσιάσω; Ένωσα ότι η μεταμφίεση αυτή ήταν προσπάθεια απόκρυψης -κάτω από διάφανο πέπλο- ταυτότητας, που εύκολα ο καθένας θα αναγνώριζε! Αλλά τότε, θα ήταν δίκαια η κατηγορία για έλλειψη θάρρους κι όχι σοβαρότητας."⁴⁸ Συνοψίζει λέγοντας: "[...] νιώθω πως έτσι μπορώ να αποδώσω πιο έντονα γεγονότα που γι' αυτά έχω προσωπικές εμπειρίες και δεν μεταφέρω ξένες εντυπώσεις με διεργασίες της φαντασίας."⁴⁹

Η ευρύτητα πνεύματος, η καλλιέργεια και το ήθος του αποτυπώνονται στο σύνολο του έργου του, ενώ εκπλήσσει αναφερόμενος συχνά στο "συναισθηματικό σύνδεσμο"⁵⁰ μεταξύ των ανθρώπων και σκιαγραφεί εύστοχα γεγονότα και πρόσωπα παραθέτοντας ιστορικά και κοινωνιολογικά στοιχεία. Καταβάλλει προσπάθεια να είναι αντικειμενικός⁵¹ και οι κρίσεις του να μη στομώνουν από μισαλλοδοξία και σωβινισμό, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι δεν υπεραμύνεται του ελληνικού στοιχείου με κάθε ευκαιρία.⁵² Πάντως, χωρίς φανατισμό και εθνικοφροσύνη στο *Τέλος του ταξιδιού* με το "Όραμα"⁵³ ανοίγει προοπτική συμπόρευσης όλων των λαών: καθώς εκτιμά πολύ τον ανθρώπινο παράγοντα και πιστεύει στην επικοινωνία, την ψυχική επαφή και την ειρήνη, θεωρεί ότι μέσα στα πλαίσια της ενωμένης Ευρώπης οι ευρωπαϊκοί λαοί μπορούν να χτίσουν το μέλλον πάνω στα θεμέλια της επικοινωνίας, διατηρώντας την ιδιαιτερότητά τους.

Όμως, παρόλο που αναλαμβάνει την ευθύνη για τα γραφόμενά του⁵⁴ και δίνει την εντύπωση ότι επιλέγει να εκτεθεί, τελικά διατηρεί τον έλεγχο, επειδή εκφράζεται προσεκτικά και ειδικά για τους συναδέλφους διπλωματικά και εγκωμιαστικά. Με άλλα λόγια, έχει συναίσθηση της θέσης του τόσο ως αξιωματικός όσο και ως συγγραφέας. Μέσα από τα γραπτά του κατασκευάζει μια ταυτότητα στενά συνυφασμένη με αυτές τις δύο ιδιότητες και επιπλέον, υιοθετεί κοινωνικές αξίες της εποχής του: είναι υπερασπιστής της πατρίδας, περήφανος για το ελληνικό αθάνατο πνεύμα, χωρίς να γίνεται εθνικιστής, εκτιμά τη σημασία της συνεννόησης των λαών, αναγνωρίζει το σημαντικό ρόλο της πίστης και παίρνει το ρόλο του ως εκπρόσωπος της Ελλάδας στα σοβαρά, είτε λειτουργώντας σα διπλωμάτης, είτε σα σύμβολο. Ήθος, ειλικρίνεια, σαφήνεια, καλλιέργεια και ευρύτητα πνεύματος, συγκρατημένος συναισθηματισμός, θάρρος γνώμης και πρωτοβουλία είναι χαρακτηριστικά που μπορεί να απορρέουν από το επάγγελμά του, μπορεί να είναι αφομοίωση των κοινωνικών προτύπων, αλλά μπορεί και να αποτελούν τον προσωπικό του μύθο, καθώς με αυτά αυτοπαρουσιάζεται στα κείμενά του.

Κύμα και Ψυχή

Όλα αυτά τα στοιχεία είναι πρόδηλα από το πρώτο κιόλας βιβλίο του Σταθάκη. Το *Κύμα και Ψυχή* (Αθήνα, 1980) παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, ακριβώς επειδή είναι μια συλλογή πονημάτων που συνοψίζει τις συγγραφικές τάσεις του. Παρόλο

⁴⁸ Σταθάκης (1983:17)

⁴⁹ Σταθάκης (1984:7)

⁵⁰ Διάσπαρτες αναφορές υπάρχουν σε όλο το έργο του. Το *Πορτραίτα* (2001) είναι εξ ολοκλήρου αφιερωμένο σε αυτήν τη θεματολογία, την οποία εκθέτει και διεξοδικά στον Πρόλογο του συγκεκριμένου βιβλίου (2001:15).

⁵¹ Βλ. Σταθάκης (2001:16)

⁵² Περιττεύουν οι αναφορές στην αγάπη του για την πατρίδα, καθότι από αυτό το στοιχείο είναι εμποτισμένο όλο ο έργο του.

⁵³ Σταθάκης (1988:390-2)

⁵⁴ Πρβ. ενδεικτικά εισαγωγή (1982: 13)

που δεν είναι αντιπροσωπευτικό δείγμα του έργου του, επεκτείνεται πέρα από τα απομνημονεύματα και συμπεριλαμβάνει και λογοτεχνήματα. Τα κριτήρια επιλογής των κειμένων περιορίζονται στο γεγονός ότι πρόκειται για αναδημοσίευση εργασιών του από την περίοδο 1959-64.⁵⁵ Σε αυτή τη συλλογή αφηγημάτων είναι προφανές ότι δεν έχει ακόμη αποκρυσταλλωθεί η συγγραφική ταυτότητα του Σταθάκη. Επιπλέον, είναι αξιοπρόσεκτο το λογοτεχνίζον στοιχείο και μαζί με αυτό μια μυθοπλαστική ροπή, που διαπιστώνεται σε επτά κείμενα, όπως θα δούμε στη συνέχεια. Αυτά δε θα συμπεριληφθούν στη συνοπτική αναφορά του περιεχομένου του βιβλίου, αλλά θα αναλυθούν ξεχωριστά. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι στα αφηγήματα με αυτοβιογραφικό χαρακτήρα, προσωποποιείται ο δημιουργός δηλ. αναφέρεται, ενώ στα προϊόντα μυθοπλασίας σβήνει από το προσκήνιο.

Διαφορετικά εναύσματα εμπνέουν τα περισσότερα κείμενα. Το "Υποβρύχιο 'Λ. Κατσώνης'" (1980:46-56) προέρχεται από τη συγγραφική δραστηριότητα του Σταθάκη το 1943 και αναφέρεται στο ομότιπλο πολεμικό πλοίο. Αφού παραθέτει ένα διάλογο μεταξύ του φίλου του γράφοντος Στέφανο Τρουπάκη και τον ίδιο, επισυνάπτεται το πολεμικό ανακοινωθέν της καταστροφής του υποβρυχίου και κλείνει με έναν επικήδειο στο χαμένο φίλο. Το "Αντικρίζοντας τα περασμένα" (1980:73-91) περιγράφει μια επίσκεψη της Σχολής πολέμου στη Βόρειο Ελλάδα το 1959, ενώ το "Ανδρών επιφανών πάσα γη τάφος" (1980:92-96) αναφέρεται στο ελληνικό νεκροταφείο της ταξιαρχίας του Ρίμινι στη Νότια Ιταλία. Αυτό το αφήγημα στάθηκε αφορμή για ένα φαροφύλακα να θυμηθεί τη δική του εμπειρία ως αιχμάλωτος πολέμου στα Μουδανιά κατά την κατασκευή της γέφυρας Μπεχλιβάν Κιουπρού, γεγονός που αναφέρεται στο "Ένα γράμμα" (1980:97-102) και στο "Μια ασπροντυμένη φάλαγγα" (1980:103-111). Ακολουθούν δύο επετειακοί λόγοι για την 25^η Μαρτίου (1980:112-119) και την 28^η Οκτωβρίου (1980:120-3), και η ενότητα 'Άγκυρα και Σημαία' κλείνει με το "Ακούς, Ελλάδα;" (1980:124-130), όπου τον συγγραφέα τον διακατέχει το πνεύμα εθνικής περηφάνιας και νιώθει ανάταση με τη δύναμη της ελληνικής ψυχής, καθώς περιγράφει πως τα ελληνικά αντιτορπιλικά συνόδευσαν τα δύο παραδοθέντα ιταλικά πλοία κατά τον πόλεμο προς το Πορτ Σαΐδ.

Στην ενότητα 'Ψυχή' ο Σταθάκης παίρνει ως αφορμές σκηνές της καθημερινότητας που τον άγγιξαν και μετατρέπει τον προκληθέντα προβληματισμό και τα αναδυόμενα συναισθήματα σε αφηγήματα. Συγκεκριμένα, στο "Σκοτάδι" (1980:133-138) ζει ένας τυφλός συμμαθητής του γιου του και από αυτό γλιτώνει κάποια κοπέλα με τη μεταθανάτια δωρεά των ματιών του Giuseppe Faranda, του οδηγού ράλι που σκοτώθηκε στην πίστα στο "Μάτια που δε σβήσανε" (1980:139-144). Οι "Άγγελοι πάνω στη γη" (1980:145-153) είναι τα παιδιά: από τρία περιστατικά διαφαίνεται πόσο τον συγκινούν. "Ο πατέρας με το παιδί του" (1980:154-160), και ειδικά η αγάπη που νιώθει ο πρώτος γι' αυτό, σκιαγραφείται πολύ παραστατικά και δίνεται με μελανά χρώματα ο χαμός του παιδιού από πνιγμό. Αφιερώνοντας το επόμενο αφήγημα "Γι' αυτούς που φεύγουνε" (1980:161-168) γράφει με στοχαστική διάθεση κάποιες σκέψεις πάνω στο λόγο, τη σιωπή και το θάνατο. Ακολουθεί ο "Ναύαρχος Φοίφας" (1980:169-174), όπου μέσα από τρεις εικόνες, ο Σταθάκης αποτίει το δικό του φόρο τιμής στον άρτι απωλεσθέντα συνάδελφο. Η "Επιστροφή" (1980:175-179) αναφέρεται σε εκείνη του μετανάστη γεννήτορα το 1969, ενώ ο "Χαιρετισμός στον πατέρα" (1980:180-183) είναι ο επικήδειος λόγος για κείνον.

Ο υπότιπλος 'Αναδρομές' της τρίτης ενότητας θα έπρεπε να αντικατασταθεί με τη λέξη 'Διαδρομές', μιας και ο Σταθάκης εδώ κινείται μάλλον στα πλαίσια του οδοιπορικού, καθώς το "Επίσκεψη στην Πόλη" (1980:187-193), το "Ταξιδεύοντας στην Ελλάδα" (1980:194-241) και το "Εικόνα μεταμόρφωσης" (1980:241-246) θεματοποιούν ταξιδιωτικές εντυπώσεις και εμπειρίες. Το "Καμπάνες" (1980:247-252) είναι η συγκινησιακή καταγραφή διάφορων εικόνων από τα Χριστούγεννα και στο "Ελλάδα και θάλασσα" (1980:253-259) αναφέρεται στη σχέση των Ελλήνων με το

⁵⁵ Η πλειονότητα δημοσιεύτηκε στην περίοδο 1959-64, υπάρχουν δύο αφηγήματα από τα 1942-3 και άλλα δύο από το 1976-77. Πρβ. Σταθάκης (1980: 10-11).

υγρό στοιχείο από την αρχαιότητα ως το 1940, που αποτυπώνεται στην ελληνική σημαία.

Στην τελευταία ενότητα ['Κύμα'] το πρώτο αφήγημα περιγράφει πολλές διαφορετικές καταστάσεις που λαμβάνουν χώρα "Πάνω στη γέφυρα"(1980:263-277), όπως λέει και ο εύστοχος τίτλος του. Στην "Αναγνώριση ακτής" (1980:278-283) έχουμε ένα περιστατικό προσγειώσεως και το επόμενο αφήγημα, "Το μπουρίνι"(1980:284-290), αναφέρεται σε μια δύσκολη περίπτωση που αντιμετώπισε το αρματαγωγό 'Λήμνος'. Η "Επίσκεψη στην πατρίδα" (1980:291-295) είναι η επιστροφή του συγγραφέα στα πάτρια εδάφη της Νεάπολης Λακωνίας και ο "Αποχαιρετισμός" (1980:296-300) αφορά στο 'Λήμνος' και σε όλα όσα τον άγγιξαν κατά τη διάρκεια της παραμονής του εκεί, σε συμβάντα, ανθρώπους, εντυπώσεις και συναισθήματα.

Λογοτεχνική έκφραση

Εξαίρεση από τα αμιγή αποκυήματα της φανταστικής ικανότητας του Σταθάκη αποτελούν το "Κυβερνήτες που πεθαίνουνε στη γέφυρα" (1980:36-45) και "Το δαχτυλίδι"(1980:57-72). Και τα δύο εμπεριέχουν ψήγματα αυτοβιογραφισμού και φαντασίας, καθώς ο συγγραφέας παρουσιάζει στην αρχή την αφορμή έμπνευσής του, που προέρχεται από κάποιο προσωπικό βίωμα για να το εμπλουτίσει έπειτα με φανταστικά στοιχεία. Στο πρώτο, συγκινείται από το ήθος του ηττημένου ιάπωνα αντίπαλου Fuchida, όπως το καταγράφει ο τελευταίος στο βιβλίο του με την ιστορία της ναυμαχίας του Midway το 1942. Εκεί διαβλέπει "έξαρση και μια ρομαντική ιδέα για τα καράβια και το καθήκον του Κυβερνήτη, να δίνουνε παραδείγματα που ξεφεύγουνε από τα όρια των συνόρων και του χρόνου και ανήκουνε στην Ιστορία του Ναυτικού όλου του κόσμου και της ανθρωπότητας."⁵⁶ Και στη συνέχεια, ο Σταθάκης σκηνοθετεί με πολλή κινηματογραφική έφεση δύο φανταστικές αναπαραστάσεις γεγονότων και τις εμπλουτίζει με σχόλια για την ηγετική φύση του αρχηγού, ενώ δεν παραλείπει να αποδώσει τιμές στους απωλεσθέντες "Κυβερνήτες που πεθαίνουνε στη γέφυρα" (τον πλοίαρχο Yanagimoto, τον υποναύαρχο Yamaguchi και τον πλοίαρχο Kaku). Τα διανθισμένα γραφόμενα με προβληματισμούς και σκέψεις πάνω στην ανθρώπινη φύση και η ίδια η θεματική του κομματιού δεν αγγίζουν μόνο τους επίδοξους κυβερνήτες αλλά και όσους επέλεξαν να θυσιάσουν για κάποια ιδέα: "Η ζωή τους στον κόσμο έχει κλείσει· σβύστηκε με την πνοή τους. Όμως αυτό που δε χάθηκε και που αιώνια θα φωτίζει είναι το παράδειγμά τους. Ό,τι κάνανε γίνηκε σύμβολο που δικαιώνει τη σκέψη ότι, όσο η ανθρωπότητα μπορεί να παρουσιάζει τέτοιες ψυχές, στο δρόμο του πεπρωμένου της, θα προχωράει μπροστά και αργά ή γρήγορα, το σκαλοπάτι θα διαβεί και ξάφνου θα αντικρίσει την παγκόσμια επιταγή της ειρήνης, που τέτοιους ήρωες θέλει για να οδηγήσει τον κόσμο στο φως."

"Το δαχτυλίδι" (1980:57-72) κινείται στο ίδιο στοχαστικό πνεύμα. Έπειτα από μια εισαγωγή για το συμφέρον σε αντιδιαστολή με την αγάπη της μάνας, παρέχει πολύτιμες πληροφορίες με τις παρατηρήσεις του συγγραφέα στη θεωρία της δημιουργικότητας. Ο Σταθάκης γράφει χαρακτηριστικά: "Διαβάζοντάς τα ['ψιλά' μιας εφημερίδας του τόπου του, όπου είχε δημοσιευτεί το θέμα: Ε.Τ.] ένοιωσα σαν να βρίσκομαι σε θέατρο: Η περιστροφική σκηνή σε φέρνει γοργά κάθε φορά, σε καινούριους κόσμους, σβύνοντας έτσι την απόσταση και το χρόνο. Γράφοντας τώρα, ένοιωσα πως έτσι πρέπει να το ιστορήσω. Να ζωγραφίσω τις διάφορες σκηνές ξεχωριστά και τότε αυτές, πινελιές της ίδιας εικόνας, θα συνθέσουνε αυτό που θέλω να πω, το θέμα μου. Η εισαγωγή ήτανε το πρώτο σκηνικό, ο πρόλογος τρουμπέτες που αναγγέλλουνε και η αυλαία ανοίγει."⁵⁷ Στη συνέχεια, περιγράφει την ιστορία του γερμανού στρατιώτη Ρούπερτ, που έπεσε στη μάχη του Ελ Αλαμίν το 1942. Με μελανά χρώματα περιγράφεται το πεδίο των μαχών μετά τον πόλεμο. Και με σεβασμό προς τους νεκρούς αναπαρίσταται η διαδικασία ταφής και ο τάφος τους. Το

⁵⁶ Σταθάκης (1980:37)

⁵⁷ Σταθάκης (1980:59)

φυλαχτό του Ρούπερτ, το δαχτυλίδι του πατέρα του, εναποτίθεται στο μνήμα του λόγω άλλων ελλιπών στοιχείων ταυτοποίησης. Από αυτό το δαχτυλίδι η χαροκαμένη μάνα αναγνωρίζει τον τάφο του παιδιού της το 1959 μετά από χρόνια αναζήτησης και προσμονής.

Οι διάλογοι είναι πολύ παραστατικοί, αποδίδεται με μεγάλη ζωντάνια η επικοινωνία μεταξύ των στρατιωτών στη γραμμή του μετώπου. Όταν ο ευθύς λόγος επεκτείνεται στο μοιρολόι της μάνας, ο μονόλογος αποκτά έντονα λυρικά στοιχεία:

"«Παιδί μου, εσύ'σαι; Ρούπερτ ήλθα... είμαι κοντά σου... μ' ακούς; με νοιώθεις;

»Α! δεν είσαι συ... κάποιος ψίθυρος θα μ' έφθανε, την καρδιά μου θ' άγγιζε, με την ψυχή μου θα μιλούσε...

»Ανόητη πούμαι, τον ύπνο του νεκρού, δικαίωμα δεν έχω να ταράξω... Τι κι αν είμαι μάνα που γυρεύω το παιδί μου...

»Συγχώρα με ευγενικέ νεκρέ, τη σιωπή σου σέβομαι, συμπάθα με, ο πόνος με έφερε κοντά σου...

»Ίσως νάσαι το παιδί μου, ίσως φίλος του, συνάδελφός του... ίσως μαζί να πολεμήσατε, και αντάμα το ίδιο φθονερό ασάλι να σας πήρε τη ζωή.

"Παιδί μου... όποιο και νάσαι, μάνα σε γέννησε, μάνα σε λαχταράει... μάνα σαν και μένα... τον γυρισμό σου περιμένει, πάει καιρός πολύς και ελπίζει στο Θεό κοντά σου να βρεθεί...

»Αγόρι μου, δέξου την προσευχή μου... Χώμα που σε σκεπάζει, πάρε το δάκρυ μου, σταυρέ χωρίς όνομα πάρε το δικό μου."⁵⁸

Το μοιρολόι είναι να σα ξεπήδησε από αρχαία τραγωδία, γίνεται πανανθρώπινο, υπεράνω κάθε ιστορικότητας και τόσο συγκινητικό, που αγγίζει ακόμα και αναγνώστες χωρίς ανάλογα βιώματα.

Ας εστιάσουμε τώρα τα πονήματα με φανταστικό χαρακτήρα και στη λογοτεχνική διάσταση που τα χαρακτηρίζει κι ας 'αγνοήσουμε' το συγγραφέα. Σε αυτά συγκαταλέγονται τα ακόλουθα: "Το Ναυάγιο"(1980:19-35), "Ατελείωτο αγνάντεμα"(1980:301-323), "Μια βάρκα γυρνάει στο λιμάνι"(1980:324-348) και "Καράβια στην ομίχλη"(1980: 349-363).

Στο πρώτο κομμάτι, με αφορμή το ναυάγιο της 'Αριάδνης', που είναι σφηνωμένο ανάμεσα σε δύο βράχους έξω από ένα νησί, ξετυλίγεται η τελευταία φάση της ιστορίας του πλοίου. Γλαφυρά αναπαρίσταται το αντάμωμα του Μαθιού με τη Λεμονιά μια μέρα πριν μπάρκαρει αυτός στο 'Αριάδνη', όταν η κοπέλα του υπόσχεται ότι θα τον περιμένει να γυρίσει. Ο καπετάνιος και ο Γραμματικός τον καλωσορίζουν και τον ενημερώνουν για το πλήρωμα την προσωπική ιστορία του, κυρίως όμως του Κάι και του Κουρτ χωρίς να παραλείψουν να αναφερθούν και στο σκύλο τους το Ντικ, τον πιστό φρουρό του πλοίου. Σε μια σκηνή από τη ρουτίνα της πλεύσης σκιαγραφούνται οι συνάδελφοι του Μαθιού και κυρίως ο Κάι με τις αναμνήσεις του από το ρωσικό μέτωπο. Ξαφνικά, χωρίς καμία εισαγωγή, το σκηνικό αλλάζει και βρισκόμαστε σε ένα μπαρ, όπου παρακολουθούμε τον Κουρτ να αναμοχλεύει τις τραυματικές εμπειρίες του από τη θητεία στα υποβρύχια. Στην επόμενη ενότητα περιγράφονται οι καιρικές συνθήκες που οδήγησαν στο ναυάγιο της 'Αριάδνης'. Ήταν ευτύχημα, που ο καπετάνιος κατάφερε να ρίξει το πλοίο στους βράχους. Έτσι, όλο το πλήρωμα διασώθηκε και εγκατέλειψε το καράβι εκτός από το Ντικ, το σκύλο, που έμεινε στο ναυάγιο πιστός φύλακας.

Με το κάλεσμα από τα στοιχεία της φύσης ξεκινά το "Ατελείωτο αγνάντεμα". Επηρεασμένη από αυτά η Κάρεν εκφράζει την ανησυχία της για τον Όλε που θα ξενιτευτεί και πάλι, ενώ του περιγράφει το φόβο, την αγωνία και τη μοναξιά που νιώθει περιμένοντάς τον. Ο άντρας την καθησυχάζει υποσχόμενος ότι σύντομα θα γυρίσει κοντά της μετά το μπάρκο του στο 'Ατρόμητος' που ταξιδεύει στη Βόρεια Θάλασσα. Με στοχαστικό και νοσταλγικό ύφος συνάμα αποτυπώνονται με μοναδικά λυρικό τρόπο σκέψεις και αισθήματα για την "επίδραση της θάλασσας στο πνεύμα

⁵⁸ Σταθάκης (1980:70-1)

και την ψυχή του ναυτικού"⁵⁹. Ξαφνικά, θύελλα ξεσπάει και το καράβι κλυδωνίζεται. Από μια ατυχή συγκυρία ο καπετάνιος πληγώνεται βαριά και τελικά υποκύπτει στα τραύματά του. Το πλήρωμα τον κηδεύει με τις πρέπουσες τιμές ρίχνοντας τη σωρό του στη θάλασσα. Ο Όλε κρατάει την υπόσχεσή του και επιστρέφει να παντρευτεί την Κάρεν. Μένει κοντά της για ένα χρόνο, όταν έρχεται η είδηση ότι ο 'Ατρόμητος' θα σαλπάρει και πάλι. Η Κάρεν και πάλι εκφράζει τη βαθιά ανησυχία της, μιλάει στα στοιχεία της φύσης, ξορκίζει τη θάλασσα να τον φέρει πίσω, προσεύχεται γι' αυτόν και ως άλλη πιστή Πηνελόπη τον περιμένει να γυρίσει. Πάνω στον 'Ατρόμητο' ο Όλε ως κυβερνήτης καλείται κάποια στιγμή να αντιμετωπίσει έναν τυφώνα. Το καράβι παλεύει σκληρά, αλλά τελικά χάνεται. Σε κάποια δανέζικη στεριά η Κάρεν καρτερεί αγναντεύοντας τη θάλασσα. Όταν έρχεται η είδηση του χαμού, αρνείται να το δεχτεί και συνεχίζει να περιμένει τον Όλε για πολλά χρόνια ακόμη.

"Μια βάρκα γυρνάει στο λιμάνι" και είναι εκείνη του δάσκαλου του νησιού, που αγαπούσε τη θάλασσα και τα κύματά της, όσο και τη Ρόδω, τη γυναίκα του. Μαζί φροντίζουν τη μόρφωση των παιδιών του νησιού κι όταν κάθονται μπροστά στο τζάκι μελετώντας, εκείνος της εξηγεί τον πυρετό της δημιουργίας που τον συνεπαίρνει όταν γράφει.⁶⁰ Εκτός από αυτή του την αγαπημένη ασχολία, στο δάσκαλο αρέσει να ξανοίγεται με τη βάρκα παρέα με τα παιδιά του, Τάσο, Κατίνα και Ειρήνη. Μια μέρα πήγαν σε ένα βραχονήσι και μόλις είδαν τον καιρό να μαζεύει, ξεκίνησαν να γυρίσουν. Όμως, τους έπιασε μπουρίνι και άρχισαν να παλεύουν σκληρά με τη θάλασσα. Σε αυτόν τον αγώνα η καρδιά του δάσκαλου τον εγκαταλείπει τη στιγμή που διακρίνει τα φώτα της ακτής. Ο Τάσος καταφέρνει να οδηγήσει τις αδερφές του στο ασφαλές λιμάνι. Η Ρόδω μοιρολογεί τον άντρα της και μετά όλο το χωριό τον συνοδεύει στην τελευταία κατοικία του ακούγοντας συγκινημένο τον εγκωμιαστικό επικήδειο του προέδρου.

Στο "Καράβια στην ομίχλη", τοποθετείται η δράση στο τέλος του πολέμου στην Αγγλία. Από το γάμο του Στανίσλα με την Ειρένα έρχεται στον κόσμο η Άννα, ένα αξιαγάπητο κοριτσάκι. Όταν η μητέρα αρρωσταίνει, βλέπει ένα εφιάλτη και ξορκίζει το Στανίσλα να μην πάρει ποτέ την κόρη τους στο καράβι. Εκείνος της το υπόσχεται και η Ειρένα κλείνει τα μάτια της ήρεμη. Μετά από καιρό, η Άννα ζητάει από τον πατέρα της να την πάρει μαζί του και επιμένει τόσο πολύ, που ο άντρας αναγκάζεται να σπάσει τον όρκο και να συγκατατεθεί. Τη συνέχεια της ιστορίας τη μαθαίνουμε από ένα λοστρόμο σε ένα πανδοχείο, που περιγράφει πως χάθηκε η μικρή Άννα κι απέμεινε μονάχος ο πατέρας να θρηνεί.

Ομόκεντρα είναι τα αφηγήματα ως προς τη θεματολογία τους: όλα έχουν στο επίκεντρο ιστορίες, που βρίσκονται σε άμεση συνάφεια με τα βιώματα που αποκτά κανείς όταν έχει άμεση σχέση με τη θάλασσα: είτε ως μέλος πληρώματος ("Το ναυάγιο" και "Καράβια στην ομίχλη"), είτε ως η γυναίκα που περιμένει τον άντρα της να γυρίσει ("Ατελείωτο αγνάντεμα"), είτε ως ανθρώπου ερωτευμένου με τη θάλασσα ("Μια βάρκα γυρνάει στο λιμάνι"). Γεγονός είναι ότι ο Σταθάκης έχει έφεση στο συγκεκριμένο θέμα· ο λόγος του δε ρέει μόνο όταν περιγράφει τη φύση, όπως π.χ. στο "Ναυάγιο": "Στην αγριεμένη θάλασσα, τα κύματα είναι βουνά και χαράδρες σε τρελό χορό και στο σκοτάδι της νύχτας μόνο ο αφρός δίνει κάποια ανταύγεια. Ο αγέρας λυσομανάει και αντηχάει στα αυτιά σου σαν ουρλιαχτό."⁶¹ Παραστατικός είναι ο λόγος του κι όταν εξιστορεί διάφορα συμβάντα: "Η ΑΡΙΑΔΝΗ πάλεψε άγρια με το θάνατο... Προχωρούσε αγκομαχώντας, μέτρο με μέτρο, πλησιάζοντας το λιμάνι του σωσμού, ώσπου η προπέλα της σταμάτησε..."⁶². Ειδικά όταν ο συγγραφέας αναφέρεται σε εμπειρίες που βρίσκονται σε συνάρτηση με το υγρό στοιχείο, εκφράζεται με ευφράδεια: "Είναι ωραία η ζωή της θάλασσας, όσες πίκρες και νάχει. Είναι βίωμα· για να γίνεις δικός της, για να τη νοιώσεις βαθιά, πρέπει να της δοθείς με

⁵⁹ Σταθάκης (1980:307)

⁶⁰ Σταθάκης (1980:329)

⁶¹ Σταθάκης (1980:32)

⁶² Σταθάκης (1980:33)

την ψυχή σου, με όλο σου το είναι. Με τη θάλασσα δεν υπάρχουνε συμβιβασμοί. Σε θέλει ολοκληρωτικά μαζί της, αλλιώς θα μείνεις για πάντα ξένος."⁶³

Εντυπωσιακό είναι ότι ο Σταθάκης δεν έχει αναστολές στο να εκφράσει ευαισθησίες και να ξεδιπλώσει συναισθηματικές πτυχές που προέρχονται από εμπειρίες της θαλασσοπορίας. Αυτά τα βιώματα είναι ίσως άγνωστα σε πολλούς όμως η περιγραφή τους είναι τόσο περιεκτική, που καταφέρνουν να αγγίξουν ευρύ αναγνωστικό κοινό. Ειδικά για όσους έχουν εργαστεί σε πλοίο, έχουν ξανοιχτεί στο πέλαγος ή έχουν μείνει πίσω περιμένοντας, αγγίζει ευαίσθητες χορδές. Τα συναισθήματα, οι αισθήσεις, οι εντυπώσεις και οι σχετικοί προβληματισμοί που προκαλούν αποτελούν τη δίοδο προς το μεταφυσικό. Χαρακτηριστικό παράδειγμα: "Αυτή η επίδραση της θάλασσας στο πνεύμα και την ψυχή του ναυτικού, έχει κάτι το ακατάλυτο, το υπερφυσικό... Ίσως, η απεραντοσύνη της, η αέναη εναλλαγή της, ο βαθύς κόσμος του μυστηρίου που σκεπάζουνε τα κύματα, το βάθος του ορίζοντα που ενώνεται με τον ουρανό κι αρμενίζεις πια στους δύο κόσμους, να σε φέρνουνε πιο κοντά στη δύναμη που κυβερνάει το σύμπαν, στο νόμο του ρυθμού του απείρου."⁶⁴

Πάντως, είναι εμφανές ότι όταν αναφέρεται σε θέματα σχετικά με τις εμπειρίες του (υπηρεσία ή πολεμική εμπειρία ή ανθρωπογνωσία), ο λόγος γίνεται πιο άμεσος. Έτσι συμβαίνει στο "Ναυάγιο" (1980:25-31) κατά την περιγραφή του πληρώματος και τους ακόλουθους διαλόγους και μονολόγους αλλά και κατά την αναπαράσταση του δυστυχήματος που τελικά σκότωσε την Άννα (1980: 360-1). Σε περιπτώσεις που δεν έχει ο ίδιος εμπειρία (όπως π.χ. στο "Ατελείωτο αγνάντεμα"), επιστρατεύει την ενσυναίσθησή του για να φανταστεί τους φόβους, τον καημό, την προσμονή, την απελπισία, την καρτερικότητα. Τέλος, δίνει την εντύπωση ότι γράφει για να ξορκίσει τα κακά, που μπορεί να βρουν έναν ναυτικό: "Το Ναυάγιο", το "Ατελείωτο αγνάντεμα", το "Μια βάρκα γυρνάει [μόνη: Ε.Τ.] στο λιμάνι" και το "Καράβια στην ομίχλη" έχουν στο επίκεντρο τον (υπο-) συνειδητο τρόπο μπροστά στο χαμό, μπροστά στο θάνατο.

Αξιοπρόσεκτη είναι η μετάβαση από την αφήγηση στο διάλογο και ιδιαίτερα η ευκολία με την οποία ο συγγραφέας σχοινοβατεί ανάμεσα σε αυτά τα δύο. Οι διάλογοι σε άλλα σημεία είναι ζωντανοί, σαν να είναι παρμένοι από πραγματικό ηχητικό περιβάλλον, όπως στη συνομιλία με τον καπετάνιο (1980:24) και αλλού είναι εμφανές ότι είναι τεχνητοί και επιτηδευμένοι (1980:305). Ως προς το κειμενικό είδος, παρόλο που τα όρια ανάμεσα στο αφήγημα και το διήγημα είναι πολύ ρευστά, αυτά τα συγκεκριμένα τέσσερα κείμενα ξεφεύγουν από το αφηγηματικό είδος. Δομικά, πληρούν τα περισσότερα κριτήρια του διηγήματος: αρχίζουν συνήθως εισάγοντας το θέμα είτε με περιγραφή γεγονότων, είτε με παρατηρήσεις γενικής φύσης. Στη συνέχεια, επικεντρώνονται στο κρίσιμο θέμα, έπειτα φτάνει η στιγμή της δράσης που κλιμακώνεται για να επιλυθεί στο τέλος και ενίοτε να καταλήξουν στο ηθικό δίδαγμα.⁶⁵ Όμως κι από τη σκοπιά της θεματολογίας, της δράσης και των πρωταγωνιστών ενσωματώνει πολλά κριτήρια του διηγήματος: εξιστορούνται συγκρουσιακές καταστάσεις, που χαρακτηρίζονται από το συναισθηματικό παράγοντα. Υπάρχει μικρός αριθμός ηρώων και δράσης, που περιορίζεται τοπικά και ποσοτικά. Μόνο μερικές πλευρές των χαρακτήρων αποτυπώνονται και γίνεται αναφορά μόνο σε ένα μικρό απόσπασμα της ζωής της φιγούρας, που είναι αποφασιστικής σημασίας για την εξέλιξη του διηγήματος.⁶⁶

Ωστόσο, αυτά τα λογοτεχνήματα είναι σχετικά απλά, δεν επιδέχονται πολυεπίπεδη ανάγνωση, γιατί δεν αφήνουν ανοιχτά ερωτήματα σχετικά με τη δράση ή την ιδιοσυγκρασία των πρωταγωνιστών. Στο "Ναυάγιο" ο Μαθιός μπαρκάρει, ταξιδεύει λίγο και μετά μάλλον γυρίζει για να παντρευτεί τη Λεμονιά. Τους

⁶³ Σταθάκης (1980:307)

⁶⁴ Σταθάκης (1980:307)

⁶⁵ Πρβ. Graf v. Nayhauss (2004: 13)

⁶⁶ Στο ίδιο

συντρόφους του με την πολυτάραχη προσωπική ιστορία, που είναι αναπόσπαστο κομμάτι της παγκόσμιας, μπορεί να τους κυνηγάν φαντάσματα, όμως κανένας δεν απογειώνεται από λογοτεχνική άποψη σε φιγούρα-κλειδί. Μόνο η στάση του Ντικ του σκύλου, που δεν αποχωρίζεται το πλοίο ούτε κι όταν ναυαγεί και ξεμένει στην ξέρα, παραμένει αινιγματική. Όμως, το ζώο έχει διαδραματίσει δευτερεύοντα ρόλο στο όλο κείμενο και δε μπορεί να λειτουργήσει ως σύμβολο για το ηθικό δίδαγμα του διηγήματος.

Στο "Ατελείωτο αγνάντεμα" ο φόβος της Κάρεν περιγράφεται με μεγάλη αμεσότητα και η νοσταλγία της για τον άντρα της είναι τόσο ισχυρή που κοντεύει να ξεπεράσει τα όρια της αντοχής της: "Η ρόδα πως γυρίζει... ο άνεμος πως φυσάει... τα στράλια μου μιλάνε... αγαπημένε μου, ακούω τη φωνή σου... Οι ώρες πως περνάνε; με συλλογιέσαι άραγε; ή σε λιμάνι μακρινό με ξένη συντροφιά ξεχνιέσαι; - Συγχώρα με ακριβέ μου, ο πόνος με τυφλώνει, δεν ξέρω πια τι λέω, το λογικό μου χάνω... Κι αν άγρια κύματα σε δέρνουνε; κι αν το καράβι σου αγωνίζεται; μαύρη είναι η σκέψη μου, καρδιοχτυπάω."⁶⁷ Φτάνει σε σημείο να παραλογίζεται καθώς η μοναξιά και η επιθυμία της να τον έχει κοντά της υπερνικούν τη λογική της. Στο τέλος, δεν αντέχει να χειριστεί τη δυσάρεστη είδηση του χαμού και ενεργοποιείται ο μηχανισμός άμυνας αποφασίζοντας να συμπεριφερθεί σαν να μην έχει συμβεί τίποτα. Όμως, ακόμα και τότε, είναι τόσο προφανή τα αίτια αυτής της στάσης, που δεν επιδέχονται άλλη ερμηνεία. Το ίδιο ισχύει και για τις καταστάσεις πάνω στο καράβι: Ναι μεν είναι πολύ δυνατές οι εικόνες (η περιγραφή της θύελλας, οι τελευταίες στιγμές του καπετάνιου, η ταφή του), όμως η λειτουργία τους είναι φωτογραφική, δηλ. περιορίζεται στην επιφάνεια, σε αυτό που διακρίνεται, χωρίς να αφήνει ερωτηματικά. Ηθικό δίδαγμα δεν υπάρχει ούτε εδώ, εκτός κι αν συνοψίζεται στην ισχυρή ανάγκη του ναυτικού να μην αφήσει το καράβι του και ξεμείνει στη στεριά.

Ο δάσκαλος στο "Μια βάρκα γυρνάει στο λιμάνι" ψυχογραφείται πολύ εύστοχα: εκτιμάται το λόγιο πνεύμα του, η μόρφωσή του και εξαιρείται το λειτούργημα και η προσφορά του στην πρόοδο του χωριού. Η αγάπη που ανακαλύπτει μέσα του για τα παιδιά του και ο κεντρικός ρόλος του στη διαπαιδαγώγηση πάντα σε συνεννόηση με τη γυναίκα του, είναι υποδειγματικά. Στη δύσκολη στιγμή του μπουρινιού βάζει τη σωτηρία των παιδιών του πάνω από όλα. Μέσα στην απελπισμένη προσπάθειά του είχε παραισθήσεις ότι βλέπει "τη Ρόδω [τη γυναίκα του: Ε.Τ.] στο μουράγιο να τους αγναντεύει."⁶⁸ Τότε τη φώναζε μέσα στην παραζάλη του. Να ήταν οι ενοχές και οι τύψεις, που τον ωθούσαν; Να ήταν η επιθυμία διάσωσης προσωποποιημένη; Να ήταν ο συναισθηματικός δεσμός μεταξύ τους ή το αίσθημα ευθύνης για την παρακαταθήκη που της άφηνε; Πάντως, "στο μουράγιο τους περίμενε [όντως: Ε.Τ.] η Ρόδω."⁶⁹

Με σκεπτική διάθεση και ερωτήματα ψυχαναλυτικής και φιλοσοφικής φύσης ξεκινά το "Καράβια στην ομίχλη": "Ποια είναι τα σύνορα της ψυχής; που σταματάει η λογική και αρχίζει το υποσυνείδητο; ποια είναι αυτή η μυστηριακή δύναμη που ξυπνάει τις ξέχωρες αυτές καταστάσεις της "ενόρασης"; Τι είναι αυτό που κάνει το ένστικτο να βλέπει μακριά, στην ομίχλη του μέλλοντος και να μαντεύει έτσι αυτό που πρόκειται να γίνει;"⁷⁰ Σε αυτά τα ζητήματα ανάγεται έμμεσα και το όνειρο της Ειρένας, αποκτώντας μεταφυσική χροιά. Όταν αυτό τελικά πραγματοποιείται, δεν υπάρχουν λόγια να εκφράσουν τη βαθύτατη οδύνη του πατέρα, που εντείνεται ακόμη περισσότερο από το γεγονός ότι έσπασε τον όρκο που είχε δώσει στη γυναίκα του. Το μοιρολόι του στο τέλος εκφράζει τον πόνο του γονιού, που ψάχνει να βρει εξήγηση ή προσπαθεί να χειριστεί το μη αναστρέψιμο: "Τώρα η καταστροφή μας βρήκε. Συ, που είσουνα η Μάνα της, δε μπορούσες από κει ψηλά ν' αλλάξεις τίποτε;

⁶⁷ Σταθάκης (1980:318)

⁶⁸ Σταθάκης (1980:345)

⁶⁹ Σταθάκης (1980:347)

⁷⁰ Σταθάκης (1980:349)

Μόνο στη γη να μας πεις αυτά που στον ουρανό θάπρεπε να θωρεί η ψυχή σου;"⁷¹ Σε αυτό το κείμενο η δομή ανατρέπεται, καθώς η εισαγωγή ενέχει ρόλο ηθικού διδάγματος: "Όμως συμβαίνουν τόσα πολλά στην καθημερινή ζωή, που όχι μόνο δεν μπορεί κανείς να τα αρνηθεί, δε μπορεί να τα δεχτεί σα φαντασία, αλλά που σε αναγκάζουν να σταθείς σιωπηλός, να τα σκεφτείς βαθιά και να νοιώσεις την ανατριχίλα της αποκάλυψης ενός ολόκληρου κόσμου, άυλου, που παράλληλα μας ακολουθεί στα χωματένια βήματά μας πάνω στη γη, και που κάθε του αποκάλυψη σου ξεσκεπάζει σα διάπτοντας την παρουσία του και δίνει την παράξενη αυτήν αίσθηση, που έχεις μόνο κοντά στο θάνατο."⁷² Έτσι, είναι σα να υπαγορεύεται η όποια ερμηνευτική απόπειρα και να δρομολογείται προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Ταυτόχρονα, υποβάλλεται η εντύπωση ότι πρέπει να αφουγκραζόμαστε τα μηνύματα των ονείρων ως πρεσβευτές κάποιας άλλης διάστασης. Τέλος, οφείλουμε να σεβόμαστε τον όρκο, ειδάλλως επισείεται η θεία μήνις.

Παρόλο που σε αυτά τα συμπεράσματα μπορούμε να καταλήξουμε με την πρώτη ανάγνωση, δε σημαίνει ότι η αξία τους δεν είναι υπολογίσιμη. Εντάσσοντας τα συγκεκριμένα κείμενά του Σταθάκη στο λογοτεχνικό πάνθεον μπορούμε να ισχυριστούμε ότι οι λογοτεχνικές εκφάνσεις της δημιουργικότητάς του, βρίσκονται στο κατώφλι της λογοτεχνίας. Παρόλο που η θεματολογία του δεν είναι καινοτόμα, εμπριέχει το προσωπικό στίγμα του συγγραφέα, που κάνει τα έργα του αυτά να ξεχωρίζουν. Αγγίζει τον αναγνώστη με την αμεσότητά της, καθώς καταφέρνει να του αποφέρει συναισθηματικό κέρδος και να διευρύνει τους ορίζοντές του. Του δίνει τη δυνατότητα να δοκιμάσει με τη φαντασία του εμπειρίες του ναυτικού και να αναμετρηθεί με ξένα μεγέθη σε άλλες κλίμακες. Από γλωσσική άποψη, χωρίς να καταφεύγει σε στομφώδη λεκτικά σχήματα, οι περιγραφές του είναι τόσο δυνατές που συνεπαίρνουν με την αναπαραστατική τους δύναμη. Ο πλούσιος λόγος του ρέει με περισσή παρρησία.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μια διεξοδική ερμηνευτική προσέγγιση όλων των έργων του Σταθάκη είναι αδύνατο να επιχειρηθεί σε ένα πόνημα τόσο περιορισμένης έκτασης. Ωστόσο, διακρίνεται έντονα ως κυρίαρχο στοιχείο ο αυτοβιογραφικός παράγοντας, που αποτυπώνεται σε όλα τα κείμενά του και με διαφορετικούς τρόπους. Εστιάζοντας στις απόπειρες λογοτεχνικής δημιουργίας διαπιστώνουμε ότι αναφορικά με αυτές ο τίτλος του βιβλίου (*Κύμα και Ψυχή*) είναι πολύ εύστοχος: το στοιχείο της θάλασσας αποτελεί τον πυρήνα της θεματολογίας του και εκτός αυτού σημαντικός είναι ο άνθρωπος με τις πνευματικές και συναισθηματικές ανησυχίες του. Όσον αφορά στην αποτίμηση και αξιολόγηση των γραπτών του, είναι προφανές το ταλέντο του δημιουργού. Η ενάργεια και οι συναισθηματικές αποχρώσεις του λόγου του μετράν στα ισχυρά πλεονεκτήματα των αναλυθέντων διηγημάτων. Έτσι, εξισορροπείται η μέτρια εμβάθυνση στις κεντρικές φιγούρες και η απουσία ηθικού διδάγματος από δομική άποψη.

Το προφίλ του αξιωματικού-λογοτέχνη είναι δύσκολο να διαμορφωθεί από τη μελέτη των κειμένων μόνο του Σταθάκη, καθώς χρήζει εμπλουτισμού και από άλλες πηγές. Ωστόσο, το ερώτημα κατά πόσο η ιδιότητα του αξιωματικού επηρεάζει εκείνη του συγγραφέα και συγκεκριμένα του λογοτέχνη μπορεί να απαντηθεί σε πρώτη φάση θετικά, είτε αναφερθούμε στο κειμενικό είδος (απομνημονεύματα, αφηγήματα/διηγήματα), είτε στη θεματολογία, είτε στα κίνητρα και στη δημιουργία συγγραφικής ταυτότητας (λόγω της αυτοβιογραφικής τάσης του).

⁷¹ Σταθάκης (1980:362)

⁷² Σταθάκης (1980:149-50)

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. H.-C. Graf v. Nayhauss (εκδ.), *Theorie der Kurzgeschichte*. Στουτγάρδη: Reclam, 2004.
2. H. L. Arnold & H. Detering (εκδ.), *Grundzüge der Literaturwissenschaft*. Μόναχο: Deutscher Taschenbuch Verlag, 2002.
3. R. Zymner, *Probleme und Positionen der Literaturwissenschaft*. Πάντερμπορν: mentis, 2003.
4. W. Schönau, *Einführung in die psychoanalytische Literaturwissenschaft*. Στουτγάρδη: Metzler, 1991.
5. Ν. Σταθάκης, *Κύμα και Ψυχή*, Αθήνα, 1980^α.⁷³
6. Ν. Σταθάκης, *Σταυρός και Μένορα*, Αθήνα, 1980^β.
7. Ν. Σταθάκης, *Από τη στάχτη στη ζωή*, Αθήνα, 1982.
8. Ν. Σταθάκης, *Αμόνι κι αρμύρα*, Αθήνα, 1983. [Έπαινος Ακαδημίας Αθηνών]
9. Ν. Σταθάκης, *Φλόγα και μνήμες*, Αθήνα: 1984. [Έπαινος Ακαδημίας Αθηνών]
10. Ν. Σταθάκης, *Δόξα και Σαράκι 1941-1944*, Αθήνα, Τάσος Πιτσιλός, 1985.
11. Ν. Σταθάκης, *Επιστροφή*, Αθήνα, 1986.
12. Ν. Σταθάκης, *Ναυτικό*, Αθήνα, 1986.
13. Ν. Σταθάκης, *Αβέρωφ. Το θωρηκτό της νίκης*, Αθήνα, 1987. [Βραβείο Ακαδημίας Αθηνών]
14. Ν. Σταθάκης, *Τέλος του ταξιδιού*, Αθήνα: Σιδέρης, 1988.
15. Ν. Σταθάκης, *Βότσαλα*, Αθήνα, 1990.
16. Ν. Σταθάκης, *Βότσαλα II*, Αθήνα, 1992.
17. Ν. Σταθάκης, *Μακεδονία*, Αθήνα, 1993.
18. Ν. Σταθάκης, *Πολιτιστική Οδύσσεια στην Κίνα το 1994*, Αθήνα: Εστία, 1994.
19. Ν. Σταθάκης, *Βότσαλα III*, Αθήνα, 1996.
20. Ν. Σταθάκης, *Βότσαλα IV*, Αθήνα, 2000.
21. Ν. Σταθάκης, *Πορτραίτα*, Αθήνα, 2001.
22. Ν. Σταθάκης, *Βότσαλα V*, Αθήνα, 2005.
23. Ν. Σταθάκης, *Ρίμες. (Η λύρα του ναύτη)*, Αθήνα, 2006

Internet sites

http://www.ruebenberge.de/robinsonaden/4_robinson_motiv.html

13.06.2010

<http://www.ekebi.gr/frontoffice/portal.asp?cpage=NODE&cnode=461&t=413>

13.06.2010

<http://iasl.uni-muenchen.de/discuss/lisforen/koeppeforum.html>

31.05.2010

⁷³ Τα στοιχεία των εκδόσεων είναι ελλιπή, λόγω του γεγονότος ότι η πλειονότητα των βιβλίων του έχει εκδοθεί από τον ίδιο.

Πρεσβευτές Στα Μπλε: Γερμανικός Στολίσκος Στο Λιμάνι Του Πειραιά

Αιμιλία Ροφούζου

*Λέκτορας, Σχολή Ναυτικών Δοκίμων
emiliarofousou@daad-alumni.de*

Περίληψη. Το Νοέμβριο του 1978 πραγματοποιήθηκε μια σημαντική επίσκεψη εκπροσώπων του Γερμανικού Ναυτικού στην Ελλάδα. Επτά γερμανικά πλοία αγκυροβόλησαν στο λιμάνι του Πειραιά, το πολυμελές πλήρωμα των οποίων ακολούθησε ένα αυστηρώς οργανωμένο πρόγραμμα που περιελάμβανε συναντήσεις με εκπροσώπους της πολιτικής και στρατιωτικής ηγεσίας της χώρας, επιθεωρήσεις πλοίων, φιλανθρωπικές και εορταστικές εκδηλώσεις, ακόμη και αθλητικές διοργανώσεις, όπως τη διεξαγωγή φιλικών αγώνων ποδοσφαίρου και βόλεϊ στις εγκαταστάσεις της Σχολής Ναυτικών Δοκίμων.

Η εν λόγω επίσκεψη διαφοροποιείται από παρόμοιες επισκέψεις του παρελθόντος, καθώς πρόκειται για την πρώτη τέτοιου μεγέθους επίσκεψη γερμανικού στολίσκου στην Ελλάδα από την εποχή της ίδρυσης του Ομοσπονδιακού Στρατού.

Abstract. Ambassadors In Blue: German Flotilla In Piraeus Port.

In the context of broader educational programme, the German Navy ships at regular intervals embark on trips abroad, sometimes in quite remote areas. These trips are part of international relations and aim to promote the German State in general and to improve its image to other countries. The vessels themselves are often the sites of important meetings, meanwhile officers, petty officers, and even sailors support the work of diplomats in a country, justifying their reputation as "Ambassadors in Blue".

One of the most striking examples of this effort of Germany raised abroad through the Navy is the "tour" of the second fleet destroyers in the Mediterranean in 1978 for the first time since the Second World War. The plans of the German Navy consisted of consecutive visits to the central Italian, North African and Spanish ports, and the port of Piraeus. In this "tour" ships "Rommel", "Schleswig-Holstein", "Hessen", "Z5",

"Braunschweig", "Coburg" and "Rhön" sailed on November 7, 1978 under the command of captain Kähler, to Piraeus, making the first visit of such magnitude German fleet in Greece since the founding of the Federal Army. The fleet remained at the port of Piraeus until November 10. The visit's purpose was to achieve in the few days the plans set by the German leadership, both political and military, following a strictly organized project preparation and conduct, which is indicative of the mechanism and operation of the German State in general. The programme was based on close cooperation with the Embassy of the Federal Republic of Germany in Athens, which, as was required, took all the steps to make the necessary proper preparation, contributed to the smooth conduct of the visit and prepared the prepetition report to the Federal Ministry of Defence after the visit of the German fleet in Greece.

Preparations began months earlier. Already in February 1978 the Defence Attaché and his staff in Athens had been informed of the visit and they were able to take the necessary steps and to inform promptly the Greek Navy. In May of that year that staff had already prepared a detailed report on the Hellenic Naval Academy despite the fact that the programme of this visit didn't include any specific contact between the German fleet and the Hellenic Naval Academy. While the German fleet was in the port of Piraeus, the German leadership had planned a broad program of meetings. This program initially provided courtesy visits to the Fleet Commander and events aboard ship, with "Hessen" and "Rommel" as the main reception areas of both the German diplomatic corps in Athens and the Greek official guests. The overloaded, however, programme of the Greek side in conjunction with the desire not to allow the visit of the fleet to be marked as an official event, limited the scope of the Germans. Onboard the ship "Hessen" was planned a short interview to a Greek journalist and to a German correspondent, a wreath at the German military cemetery in Dionysos, a lunch by the Ambassador of the Federal Republic of Germany at the home of the Military Attaché and a dinner for the crew of the fleet and the German community in Athens at the Ambassador Residency. Through these meetings, the Germans intended to promote their plans, having the best opportunity to come in contact with the leadership of the Hellenic Navy.

In summary it is worth stressing that the Greek side was critical towards the plans of the German naval leadership. The intentions of the Germans were clear and the preparations, the detailed report and the comments of the Military Attaché at the Embassy in Athens is indicative of the visit's aims of the German fleet in Piraeus. The stance of the Hellenic Navy, however, was not only unexpected and undesired, but

was often inhibitory factor in the effort of German Navy to promote the image of a great naval power.

Keywords: Γερμανικό Ναυτικό, Πολεμικό Ναυτικό, Στολίσκος

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στα πλαίσια ευρύτερων εκπαιδευτικών προγραμμάτων πλοία του Γερμανικού Ναυτικού πραγματοποιούν ανά τακτά χρονικά διαστήματα ταξίδια στο εξωτερικό, μερικές φορές μάλιστα και σε αρκετά απομακρυσμένες περιοχές (1). Τα ταξίδια αυτά εντάσσονται, ωστόσο, και στο πλαίσιο των διακρατικών σχέσεων και αποσκοπούν επιπροσθέτως στην προβολή του γερμανικού κράτους γενικότερα και στη βελτίωση της εικόνας του στις άλλες χώρες. Τα ίδια τα πλοία αποτελούν συχνά χώρους σημαντικών συναντήσεων, ενώ αξιωματικοί, υπαξιωματικοί, ακόμη και ναύτες δρουν υποστηρικτικά στο έργο του διπλωματικού σώματος σε μια χώρα, δικαιολογώντας τη φήμη τους ως 'Πρεσβευτές στα μπλε' (2). Ένα από τα χαρακτηριστικότερα παραδείγματα της προσπάθειας αυτής της Γερμανίας να προβληθεί στο εξωτερικό μέσω του Ναυτικού της αποτελεί η «περιοδεία» του 2^{ου} στολίσκου αντιτορπιλικών στη Μεσόγειο το 1978. Για πρώτη φορά μετά το Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο πολεμικά σκάφη της Δυτικής Γερμανίας εισήλθαν στα ύδατα της Μεσογείου ως οργανική ναυτική δύναμη θέλοντας να υπογραμμίσουν τη ναυτική της παρουσία. Τα σχέδιά τους περιελάμβαναν διαδοχικές επισκέψεις σε κεντρικά ιταλικά λιμάνια, σε λιμάνια της Β. Αφρικής και της Ισπανίας, καθώς και στο λιμάνι του Πειραιά (3).

Στα πλαίσια αυτής της «περιοδείας» τα αντιτορπιλικά κατευθυνόμενων βλημάτων «Ρόμμελ», «Σλέσβιγκ-Χόλσταϊν» και «Εσσην» το αντιτορπιλικό συνοδείας «Ζ5», η φρεγάτα «Μπράουνσβαϊγκ» και τα βοηθητικά στόλου «Κόμπουργκ» και «Ραιν» κατέπλευσαν στις 7 Νοεμβρίου 1978 υπό τη διοίκηση του πλοιάρχου Kähler στον Πειραιά πραγματοποιώντας την πρώτη τέτοιου μεγέθους επίσκεψη γερμανικού στολίσκου στην Ελλάδα από την εποχή της ίδρυσης του Ομοσπονδιακού Στρατού (4). Ο εν λόγω γερμανικός στολίσκος, ο οποίος συστάθηκε το 1965 (5), παρέμεινε στο λιμάνι του Πειραιά μέχρι τις 10 Νοεμβρίου. Για να επιτευχθούν, ωστόσο, κατά την ολιγόμηρη αυτή επίσκεψη οι στόχοι της γερμανικής ηγεσίας -πολιτικής και στρατιωτικής- ακολουθήθηκε ένα αυστηρά οργανωμένο πρόγραμμα προετοιμασίας και διεξαγωγής, το οποίο είναι ενδεικτικό του μηχανισμού δραστηριοποίησης και λειτουργίας του γερμανικού κράτους εν γένει. Το πρόγραμμα αυτό στηρίχθηκε στη στενή συνεργασία με την Πρεσβεία της ΟΔΓ στην Αθήνα, η οποία ως όφειλε, προέβη σε όλες τις απαιτούμενες ενέργειες ώστε να γίνει η απαραίτητη και ενδεδειγμένη προετοιμασία, συνείσφερε στην ομαλή διεξαγωγή της επίσκεψης και συνέταξε την προκαθορισμένη αναφορά προς το Υπουργείο Άμυνας της ΟΔΓ μετά το πέρας της παραμονής του γερμανικού στολίσκου στην Ελλάδα.

ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΕΠΙΣΚΕΨΗΣ

Οι σχετικές προετοιμασίες άρχισαν μήνες νωρίτερα. Ήδη από το Φεβρουάριο του 1978 είχε ειδοποιηθεί ο Ακόλουθος Άμυνας και το επιτελείο του στην Αθήνα, ώστε να μπορέσει να προβεί στις απαιτούμενες ενέργειες και να ενημερώσει εγκαίρως το Ελληνικό Πολεμικό Ναυτικό (6). Το Μάιο του ίδιου έτους το εν λόγω επιτελείο είχε ήδη συντάξει λεπτομερή αναφορά με αντικείμενο μελέτης αποκλειστικά τη Σχολή Ναυτικών Δοκίμων. Εκεί γινόταν μια παρουσίαση της Σχολής σε όλους τους τομείς. Παρέχονταν πληροφορίες για το επίπεδο της Σχολής, τη Διοίκηση, το Εκπαιδευτικό Συμβούλιο, την Ακαδημαϊκή Εκπαίδευση, ενώ η αναφορά έκλεινε με δύο επισημάνσεις: η μια αφορούσε στην αύξηση του δυναμικού της Σχολής από το 1975 και έπειτα, η οποία κατά τους Γερμανούς συνδεόταν με το Κυπριακό και η άλλη στο

ποσοστό των αλλοδαπών σπουδαστών, το οποίο χαρακτηριζόταν ως εξαιρετικά ενδιαφέρον. Από τα στοιχεία του γερμανικού εγγράφου φαίνεται ότι περισσότερο ενδιέφερε η Ακαδημαϊκή Εκπαίδευση. Η αναφορά συνοδευόταν από παράρτημα με αναλυτικές πληροφορίες για τον αριθμό του διδακτικού προσωπικού κατά αντικείμενο και από παράρτημα με τις προϋποθέσεις που έρεπε να πληροί ένας υποψήφιος σπουδαστής για να μπορέσει να εισαχθεί στη Σχολή Ναυτικών Δοκίμων (7).

Ενδιαφέρον, αλλά και ενδεικτικό των σκοπιμοτήτων των Γερμανών είναι το γεγονός ότι κρίθηκε αναγκαία η σύνταξη μιας τέτοιας αναφοράς παρά το ότι κατά τη διάρκεια της εν λόγω επίσκεψης δεν προβλέπονταν ιδιαίτερες επαφές των Γερμανών με τη Σχολή Ναυτικών Δοκίμων. Αυτό μαρτυρούν τουλάχιστον τόσο το πρόγραμμα που ετοίμασε η Γερμανική Πρεσβεία πριν τον κατάπλου του στολίσκου στο λιμάνι του Πειραιά όσο και η προαναφερθείσα αναφορά. Ως το κορυφαίο, ωστόσο, εκπαιδευτικό ίδρυμα του Ελληνικού Πολεμικού Ναυτικού ενδιέφερε ιδιαίτερως την ηγεσία του Γερμανικού Ναυτικού. Τα στελέχη του όφειλαν να είναι σωστά προετοιμασμένα, ώστε να μπορούν να ανταποκριθούν σε ενδεχόμενες συζητήσεις. Όφειλαν να γνωρίζουν λεπτομέρειες για το εκπαιδευτικό σύστημα του Πολεμικού μας Ναυτικού, ομοιότητες και διαφορές από το αντίστοιχο γερμανικό.

Ας σημειωθεί εδώ εν παρενθέσει ότι ακριβώς σε αυτό το σημείο στήριζαν οι Γερμανοί τις προσπάθειές τους, στην ανάπτυξη δηλαδή διαλόγου με σκοπό την προβολή της χώρας τους και σε αυτόν τον τομέα.

Στο διάστημα που ακολούθησε η Πρεσβεία της ΟΔΓ προέβη σε όλες τις απαραίτητες ενέργειες για να προετοιμάσει το έδαφος για την εν λόγω επίσκεψη των γερμανικών πολεμικών σκαφών στην Ελλάδα. Παρά, ωστόσο, τις ενέργειες των Γερμανών, η δραστηριοποίηση της ελληνικής πλευράς δεν ήταν η αναμενόμενη. Το πρόγραμμα της ελληνικής ναυτικής ηγεσίας ήταν ήδη επιβεβαρωμένο από τις επίσημες επισκέψεις δύο σοβιετικών πλοίων (23.-28.10.), του βρετανικού 'Ark Royal' (27.10.-2.11.) και δύο αμερικανικών πλοίων (από 4.11.). Το γεγονός αυτό προκάλεσε τη δυσαρέσκεια των Γερμανών, οι οποίοι ήθελαν να έχουν το περιθώριο για ενδεχόμενες αλλαγές στον προγραμματισμό της επίσκεψης. Ωστόσο, μόλις στις αρχές Νοέμβρη και ενώ ο στολίσκος ήταν ήδη εν πλω και όλες οι απαραίτητες προετοιμασίες είχαν ήδη πραγματοποιηθεί ο Ακόλουθος Άμυνας έλαβε γραπτή ενημέρωση από τις ελληνικές αρχές σχετικά με τη διαθεσιμότητα και τις προθέσεις τους. Παρόλα αυτά τα πλοία μπόρεσαν να ενημερωθούν στην πορεία και οι διαδικασίες να ακολουθήσουν την προγραμματισμένη τους ροή (8).

ΠΑΡΑΜΟΝΗ ΤΩΝ ΓΕΡΜΑΝΙΚΩΝ ΠΛΟΙΩΝ ΣΤΟΝ ΠΕΙΡΑΙΑ

Κατά την παραμονή του γερμανικού στολίσκου στο λιμάνι του Πειραιά είχε προβλεφθεί ένα ευρύ πρόγραμμα συναντήσεων, το οποίο εξυπηρετούσε τα σχέδια της ηγεσίας του Γερμανικού Ναυτικού. Η ελληνική πλευρά, ωστόσο, και συγκεκριμένα το Γενικό Επιτελείο Ναυτικού επιθυμούσε να αποδώσει στην επίσκεψη αυτή το χαρακτήρα ενός συνηθισμένου γεγονότος και όχι μιας επίσημης επίσκεψης, κάτι το οποίο δεν άρεσε στο επιτελείο του Γερμανού Ακόλουθου Άμυνας. Οι προσπάθειές του για εθιμοτυπικές επισκέψεις του Διοικητή του στολίσκου και για την υποδοχή των αντιτορπιλικών κατά την άφιξή τους από εξέχοντα στελέχη του Πολεμικού Ναυτικού της Ελλάδας υποστηρίχθηκαν μεν, αλλά περιορίστηκαν στο ελάχιστο δυνατό. Το μόνο σημείο που φαίνεται να ικανοποίησε πλήρως τη γερμανική πλευρά ήταν η παραχώρηση έξι θέσεων στην προβλήτα του λιμανιού για να παραμείνουν τα πλοία αγκυροβολημένα καθ' όλο το διάστημα της παραμονής τους.

Για το γεγονός ενημερώθηκε μάλιστα και ο αθηναϊκός Τύπος, από το αρμόδιο τμήμα της Γερμανικής Πρεσβείας, με αποτέλεσμα σημαντικές ελληνικές εφημερίδες

να προβούν σε σχετικές αναφορές. Μια σύντομη ανακοίνωση του Ακόλουθου Άμυνας δημοσιεύτηκε σε διάφορα έντυπα πριν την επίσκεψη των αντιπορπλικών - μερικές φορές με τις απαραίτητες περικοπές-, ενώ κατά τη διάρκειά της υπήρξαν και άλλα σχετικά δημοσιεύματα και φωτογραφικό υλικό των αγκυροβολημένων στο λιμάνι του Πειραιά πλοίων (9). Στην πλειοψηφία τους τα δημοσιεύματα περιορίζονταν στην απλή ενημέρωση του ελληνικού κοινού -συχνά, ωστόσο, με βαρύγδουπους τίτλους. Χαρακτηριστικό το σύντομο δημοσίευμα της εφημερίδας 'Το Βήμα' την Τετάρτη 8 Νοεμβρίου 1978 με τον τίτλο «Γερμανικά πολεμικά στον Πειραιά» (10) και το εκτενέστερο δημοσίευμα της εφημερίδας 'Ακρόπολις' την Τρίτη 7 Νοεμβρίου 1978 με τον τίτλο «Μοίρα του γερμανικού ναυτικού καταπλέει σήμερα στον Πειραιά», από το οποίο μπορούσε κανείς να ενημερωθεί τόσο για τα ίδια τα πλοία, όσο και για το προβλεπόμενο πρόγραμμα παραμονής τους στον Πειραιά (11). Μόνο ο 'Ριζοσπάστης' προέβη με το δημοσίευμα «Δυτικογερμανικά πλοία στον Πειραιά» σε πολιτικό σχολιασμό για τη σκοπιμότητα της εν λόγω περιοδείας του στολίσκου στη Μεσόγειο, γεγονός που η γερμανική πλευρά συνέδεσε και με δημοσιεύματα του ιταλικού Τύπου (12).

Για να επανέλθουμε στο πρόγραμμα που είχαν σχεδιάσει οι Γερμανοί, αρκεί να αναφέρουμε ότι αρχικά προέβλεπε εθιμοτυπικές επισκέψεις του Διοικητή του στολίσκου στον Κεντρικό Λιμενάρχη Πειραιώς, στο Διοικητή Ναυτικής Διοικήσεως Αιγαίου, στο Νομάρχη και στο Δήμαρχο του Πειραιά, επισκέψεις που πραγματοποιήθηκαν με μοναδική εξαίρεση τη συνάντηση του Καίλερ με το Δήμαρχο Πειραιά, ο οποίος δεν μπόρεσε να παρευρεθεί στη συνάντηση στο Δημαρχείο λόγω ξαφνικής ασθένειας.

Στη συνέχεια προβλέπονταν εκδηλώσεις πάνω στα πλοία, με το «Εσσην» και το «Ρόμμελ» ως τους κύριους χώρους υποδοχής, τόσο του γερμανικού διπλωματικού σώματος στην Αθήνα, όσο και επίσημων Ελλήνων προσκεκλημένων, όπως του Αρχηγού Στόλου, αλλά και του Διοικητή της Σχολής Ναυτικών Δοκίμων. Στις εκδηλώσεις αυτές αναμενόταν σύσσωμη η ηγεσία του Πολεμικού μας Ναυτικού.

Το υπερφορτωμένο, ωστόσο, πρόγραμμα της ελληνικής πλευράς σε συνδυασμό με την επιθυμία να μη δοθεί στην επίσκεψη του στολίσκου χαρακτήρας επίσημου γεγονότος όπως προαναφέρθηκε, αλλά κατά την άποψη των Γερμανών ιθυνόντων και το γεγονός ότι ο Διοικητής του στολίσκου είχε «μόνο» το βαθμό του πλοιάρχου, περιόρισαν το πεδίο δράσης των Γερμανών. Έτσι, η εκδήλωση επί παραδείγματι στο πλοίο «Εσσην» το βράδυ της 7^{ης} Νοεμβρίου δεν είχε την αναμενόμενη ανταπόκριση από τη ναυτική και γενικότερη στρατιωτική ηγεσία της Ελλάδας.

Περιορισμένη ήταν όμως και η παρουσία των διπλωματών των άλλων χωρών στην Αθήνα. Από τους 15 Πρέσβεις που είχαν προσκληθεί το εν λόγω βράδυ, εμφανίστηκαν προσωπικά μόνο οι επτά, ενώ άλλοι τρεις έστειλαν εκπροσώπους τους, ενώ από τους εννέα Ναυτικούς Ακολουθούς προσήλθαν οι έξι. Και μολονότι η απουσία των Ναυτικών Ακολουθών χαρακτηρίστηκε φυσιολογική και αναμενόμενη, δε συνέβη το ίδιο και για την απουσία των Πρέσβειων.

Περαιτέρω, το πρόγραμμα προέβλεπε την παραχώρηση στο πλοίο «Εσσην» σύντομης συνέντευξης σε έναν Έλληνα δημοσιογράφο και σε ορισμένους Γερμανούς απεσταλμένους εφημερίδων και ειδησεογραφικών πρακτορείων (13) -δεδομένου ότι το ΓΕΝ δεν επέτρεψε την επιθυμητή από τη γερμανική πλευρά συνέντευξη Τύπου- και στις 8 Νοεμβρίου τη φιλοξενία στη φρεγάτα «Μπράουνσβαίγκ» παιδιών από το Τζάνειο Ορφανοτροφείο.

Την επόμενη μέρα οι εκδηλώσεις μεταφέρθηκαν στο γερμανικό στρατιωτικό νεκροταφείο Διονύσου, αφού ο Διοικητής του στολίσκου προέβη στην κατάθεση στεφάνου με τη συνοδεία αγήματος που διέθεσε η ελληνική πλευρά.

Στη συνέχεια τα ηνία ανέλαβε η Γερμανική Πρεσβεία στην Αθήνα. Ο Πρέσβης της ΟΔΓ παρέθεσε γεύμα στην οικία του στρατιωτικού ακολουθού και δείπνο στην οικία του για 150 μέλη του πληρώματος του στολίσκου, καθώς και για περίπου 200 εκπροσώπους της γερμανικής κοινότητας της Αθήνας. Με τις συναντήσεις αυτές σκόπευαν οι Γερμανοί να προωθήσουν σε σημαντικό βαθμό τα σχέδιά τους, αφού

τους δινόταν μια καλή ευκαιρία ανάπτυξης διαλόγου με υψηλά στελέχη του Πολεμικού Ναυτικού της Ελλάδας. Εδώ, ήταν εξίσου σημαντικός και ο ρόλος της γερμανικής κοινότητας της Αθήνας, η παρουσία της οποίας θα ενίσχυε την εικόνα της Γερμανίας και θα υποστήριζε τις προσπάθειες του πληρώματος των πλοίων και του διπλωματικού σώματος. Για το λόγο αυτό είχαν ενημερωθεί εγκαίρως τόσο η Γερμανική Σχολή Αθηνών και το Ελληνογερμανικό Εμπορικό και Βιομηχανικό Επιμελητήριο, όσο και ο Ελληνογερμανικός Σύλλογος 'Φιλαδέλφεια' και το Ινστιτούτο Γκαίτε, όλοι δηλαδή οι φορείς, οι οποίοι συγκέντρωναν στους κόλπους τους την ελίτ του γερμανικού κόσμου στην Ελλάδα (14).

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Συνοψίζοντας αξίζει να υπογραμμιστεί ότι η ελληνική πλευρά τήρησε κριτική στάση απέναντι στα σχέδια της γερμανικής ναυτικής ηγεσίας περιορίζοντας σημαντικά το πεδίο δράσης της. Οι προθέσεις των Γερμανών ήταν σαφείς και τόσο οι σχετικές προετοιμασίες όσο και η εκτενής αναφορά και τα σχόλια του στρατιωτικού ακολούθου στην Πρεσβεία της Αθήνας είναι ενδεικτικά των σκοπιμοτήτων της εν λόγω επίσκεψης του γερμανικού στολίσκου στον Πειραιά. Η στάση, ωστόσο, του Ελληνικού Πολεμικού Ναυτικού όχι μόνο δεν ήταν η αναμενόμενη και επιθυμητή, αλλά πολλές φορές ήταν ανασταλτικός παράγοντας στην προσπάθεια του Γερμανικού Ναυτικού να προωθήσει την εικόνα μιας μεγάλης ναυτικής δύναμης.

Για το λόγο αυτό τονίζεται, τέλος, και στην προαναφερθείσα αναφορά της Γερμανικής Πρεσβείας ότι οι εκδηλώσεις της ελληνικής πλευράς περιορίστηκαν σε δύο μόνο γεγονότα: στην παράθεση ενός γεύματος από το Διοικητή Ναυτικής Διοίκησης Αιγαίου το μεσημέρι της 8^{ης} Νοεμβρίου και στη διεξαγωγή αγώνων ποδοσφαίρου και βόλεϊ μεταξύ ομάδων του Πολεμικού Ναυτικού της Ελλάδας και της Δυτικής Γερμανίας, οι οποίοι έλαβαν χώρα στις 8 και 9 Νοεμβρίου αντίστοιχα στις εγκαταστάσεις της Σχολής Ναυτικών Δοκίμων (15).

REFERENCES

1. Βλ. ενδεικτικά „Segelschulschiff ‚Gorch Fock‘, www.marine.de, 8.8.2010 και Astrid Brügggen, „Segelschulschiff ‚Gorch Fock‘ muss abspecken“, *Welt Online*, www.welt.de, 21.1.2008.
2. Βλ. ενδεικτικά, Pörtner, „Botschafter in Blau“, *Der Spiegel*, Τχ. 33, 1997, „Botschafter in Blau laden zum Empfang“, www.marine.de, 8.8.2010 και „Botschafter in Blau. Flottenbesuch der Deutschen Marine auf Teneriffa“, *Wochenblatt.online, Die Zeitung der Kanarischen Inseln*, www.wochenblatt.es, Nr.115, 21.7-10.8.2010. Επίσης, PA AA, R 72613, Τηλεγράφημα, 14.2.1927.
35. Βλ. εφημερίδα 'Ριζοσπάστης', 9.11.1978.
4. PA AA Zwischenarchiv 115870, Επιστολή της Γερμανικής Πρεσβείας στη Αθήνα, 13.10.1978. Υπό τις διαταγές του πλοιάρχου Kähler βρίσκονταν εκείνη την περίοδο περίπου 100 αξιωματικοί, 520 υπαξιωματικοί, 770 ναύτες και 30 ιδιώτες.
5. Βλ. "Zerstörerflottille", <http://de.wikipedia.org>, 8.8.2010.
6. PA AA Zwischenarchiv 115870, Αναφορά για την προετοιμασία και πορεία της επίσκεψης του 2^{ου} στολίσκου αντιτορπιλικών στον Πειραιά, 16.11.1978.
7. PA AA Zwischenarchiv 115870, Αναφορά της Πρεσβείας της ΟΔΓ στην Αθήνα για τη Σχολή Ναυτικών Δοκίμων, 17.5.1978.
8. PA AA Zwischenarchiv 115870, Αναφορά για την προετοιμασία και πορεία της επίσκεψης του 2^{ου} στολίσκου αντιτορπιλικών στον Πειραιά, 16.11.1978.

9. Ό.π. Επίσης, στο ίδιο, Πρόγραμμα για την επίσκεψη του στολίσκου αντιτορπιλικών στον Πειραιά, 6.11.1978.
10. Βλ. εφημερίδα 'Το Βήμα', 8.11.1978.
11. Βλ. εφημερίδα 'Ακρόπολις', 7.11.1978.
12. Βλ. εφημερίδα 'Ριζοσπάστης', 9.11.1978 και PA AA Zwischenarchiv 115870, Αναφορά για την προετοιμασία και πορεία της επίσκεψης του 2^{ου} στολίσκου αντιτορπιλικών στον Πειραιά, 16.11.1978.
13. Γερμανοί απεσταλμένοι έκαναν επίσης λήψεις για ρεπορτάζ στην τηλεόραση με τον τίτλο «Botschafter in Blau» (Πρεσβευτές στα μπλε). PA AA Zwischenarchiv 115870, Αναφορά για την προετοιμασία και πορεία της επίσκεψης του 2^{ου} στολίσκου αντιτορπιλικών στον Πειραιά, 16.11.1978.
14. PA AA Zwischenarchiv 115870, Πρόγραμμα για την επίσκεψη του στολίσκου αντιτορπιλικών στον Πειραιά, 6.11.1978 και στο ίδιο, Αναφορά για την προετοιμασία και πορεία της επίσκεψης του 2^{ου} στολίσκου αντιτορπιλικών στον Πειραιά, 16.11.1978.
15. PA AA Zwischenarchiv 115870, Αναφορά για την προετοιμασία και πορεία της επίσκεψης του 2^{ου} στολίσκου αντιτορπιλικών στον Πειραιά, 16.11.1978.

Greek Naval Policy and Strategy, 1923-1932

Dr Zisis Fotakis,

Lecturer in Naval History, Hellenic Naval Academy

Abstract: Despite the relative stability of Mediterranean naval politics during the 1920s, Greece faced a number of challenges whose answer influenced decisively the force structure and training of the Greek Navy. The expected utility of Greek naval co-operation with a Great Naval Power, the state of Greek-Turkish relations and the increasing financial difficulties of Greece conditioned Greek naval development in the aftermath of the First World War. Having secured the naval co-operation of Britain and the good services of Latin shipbuilding and finance, Greece also succeeded in coming to a naval understanding with Turkey in 1930. The latter underwrote the flotilla navy concept which was adopted for budgetary as well as naval considerations. While British shipbuilders did not secure any big Greek naval tenders at the time, Britain maintained a substantial influence over Greek naval affairs through the good work of successive British naval missions to Greece.

Keywords: Greek Navy, British naval mission, Mediterranean naval situation, naval program, force structure, flotilla navy, capital ship, naval education, naval organization

OVERVIEW OF THE MEDITERRANEAN NAVAL SITUATION IN THE 1920S

The first century of modern Greek statehood was largely shaped by the irredentist aspirations of the Greek people. The Asia Minor Catastrophe (1922) and the Treaty of Lausanne (1923) shifted their attention to the domestic consolidation of the Greek state and the defense of its territory against foreign threats. It is the aim of this paper to explore the naval dimension of the security policy of Greece at a point of fundamental readjustment of her priorities and capabilities in an internationally fluid environment.

In the aftermath of the First World War, the Mediterranean naval situation was conditioned by the pacifist and economic drive towards naval disarmament which was shared by the leading powers of the victorious coalition, the Entente. This took the shape of the Washington Naval Treaty of February 1922 which provided for a ratio of

5:5:3:1.75:1.75 in capital ships and aircraft carriers for Britain, the United States, Japan, France and Italy respectively.ⁱ The naval situation of the Mediterranean was also conditioned by the territorial expansion of the British and the French Empires in its Eastern basin and the Italian predominance in the Adriatic.

The ramifications of these developments were quick to crystallize. Being centrally positioned in relation to the Atlantic and the Pacific Oceans, the seats of the potential naval contestants of Britain, the Mediterranean naval bases of Malta and Gibraltar hosted the majority of the Royal Navy, which had been freed from the prewar threat of the German Navy in the North Sea.ⁱⁱ The agreeable Mediterranean environment, the potential, though remote, threat of Italy or France and, the long and, occasionally, troubled littoral that Britain controlled in that part of the world made the Middle Sea the favorite training ground of the British fleet between the wars.ⁱⁱⁱ Concurrently, France attempted to nullify her relative loss of naval power vis-à-vis Italy, a loss that stemmed from the provisions of the Washington Naval Treaty, by reinforcing her navy with a substantial number of submarines and other light units. This, it was hoped, would secure the French control of, at least, the Western Mediterranean against Italian encroachments.^{iv} France was helped in this by the political and economic restraints that precluded Italy from capitalizing before 1926 on the favorable provisions of the aforementioned Treaty.^v

Notwithstanding the difficulties that the Italian state faced during the first half of the 1920s, neither France nor Britain went to war against it on the occasion of the Fiume Question and the Corfu incident. This was, partly, due to the fact that the Italian naval might was not seen as particularly threatening by the two Western Democracies. It was only when Mussolini, the Italian dictator, tried to substitute French influence in the Balkans and the Eastern Mediterranean in the latter half of the decade that France dropped her policy of appeasing Italy in favor of a more energetic one.^{vi} Even then, Britain was not worried by the gradual Italian ascendancy in the Mediterranean, since as a source of trade, markets, investment and raw materials the British Empire West of Suez was of vastly greater significance than, say, the undeveloped and apparently unpromising Mediterranean. English business, to be sure, had substantial investments, in, for instance, Spanish mining, the Greek public debt, Egyptian cotton and the Suez Canal Company but none of these had the actual or potential importance of the capital invested in India, Burma, Malaya, the East Indies and.... China.^{vii}

Considering that the priority for the British was the Far East and Western Europe in the 1920s, British tolerance of contemporary Italian ambitions in the Mediterranean was understandable.^{viii}

EARLY PLANS FOR THE INTERWAR NAVAL RE-ARMAMENT AND DEVELOPMENT OF GREECE, JULY 1923- NOVEMBER 1924

This concatenation of naval political parameters obviously worked for a fairly stable relationship between the major Mediterranean powers, and one would expect that peace and stability would characterize the contemporary naval policies of all coastal powers of that sea. However, the case of Greece was quite different. In the aftermath of the First World War the Hellenic Kingdom emerged from the victorious coalition free from the Turkish naval threat and with a mission to supplement British naval presence in the Eastern Mediterranean. To this end, two British naval missions were successively invited to the country with the aim to advise, instruct and organize a Hellenic fleet along the flotilla navy lines, which advocated the advisability of building up a naval force structure of, primarily, light naval units in the narrow waters of the Aegean.^{ix} The good work of these missions was partly undone by the Asia

Minor Catastrophe in 1922, the concomitant Republican Revolution in autumn 1922, and a couple of short-lived naval mutinies in summer 1924, the latter being largely caused by the political favoritism of naval promotions for June of that year.^x Concurrently, Greek naval policy backtracked, in principle, to the primacy of the capital ship which appeared to offer the most effective way of securing command of the Aegean against Turkey, in the absence, that is, of a naval disarmament accord between the two countries.^{xi} Greek trust in the reliability of the capital ship was logical in the sense that it reflected the majority view of contemporary, international, naval opinion, which held that the big guns that the capital ships carried still held supreme in any type of naval fighting across the word.^{xii} Be that as it may, the advocacy of the then Greek Minister of Marine, Voulgaris, of procuring a Greek battle-fleet of no less than 100,000 tons of displacement, a figure not much lower than the Washington quotas for the French and the Italian battle-fleets, was obviously misplaced;^{xiii} all the more so, considering the difficulties of the Greek economy after the end of the Greco-Turkish War of 1919-1922.^{xiv}

The capital ship proclivities of Voulgaris were fully shared by parliamentarian, retired admiral, Pericles Rediadis^{xv} and, to a lesser extent, by the contemporary head of the Greek Naval Staff, Captain Agesilaos Gerontas, and the responsible naval committee headed by Captain Leonidas Kanaris. Another naval committee headed by Captain Dimoulis, who had recently served as vice-director of the torpedo service of the Greek navy,^{xvi} favored the procurement of submarines and destroyers on account of their increased reliability and, in particular, their affordable cost at a difficult time for the Greek economy. These considerations were also acknowledged by the Kanaris committee and Gerontas himself, whose fear of the future refit of the Turkish battle-cruiser *Yavouz*, (the *ex-Goeben*) and the potential reinforcement of the Turkish navy by Soviet naval units, resulted in putting forward a Greek naval program, which placed emphasis on refitting the war-torn Greek naval units and procuring three/four submarines, a submarine depot-ship, fifteen/twenty coastal motor boats, four destroyers, and a minelayer before the end of 1924. Gerontas also urged for the replenishment of naval stores, which were scarce, the reinforcement of the naval air service in personnel and materiel, the modernization of the naval wireless communications, and the development of the Salamis arsenal and its defenses.^{xvii} Following the conclusion of the Treaty of Lausanne (23 July 1923),^{xviii} the lifting of the embargo of sale of arms to Greece (August 1923),^{xix} and the short-lived Italian occupation of Corfu in August-September 1923^{xx} steps were taken for the implementation of the aforementioned proposals. British sea power had played an instrumental role in thwarting Italian plans for commanding the Straits of Otranto by occupying Corfu,^{xxi} therefore it was natural that Messrs Samuel White & Vickers was given the contract for the extensive refit and re-armament of the four Greek destroyers of the *Leon* Class, involving the expenditure of some £360,000 in November of the same year.^{xxii} The four ships were refitted in England and were ready for service in summer 1925.^{xxiii} The Government also announced its intention of getting rid of the two pre-dreadnoughts *Kilkis* and *Lemnos*, and a number of old torpedo and auxiliary craft.^{xxiv} In the event, two German built destroyers, *Keravnos* and *Nea Yenea* and two French built submarines, *Delphin* and *Xifias* were disposed of.^{xxv} Finally the Greek Ministry of Marine filed a suit against the *Vulkan Werke* in which it was argued that the corresponding provisions of the Treaty of Lausanne and the development of naval technology since 1914 obliged the Greek Government to cancel its pre-war order for the still half-built battle-cruiser *Salamis*. It was also demanded that the German shipbuilders should return to Greece all advance payments which had been made to Vulkan for that purpose. The Mixed Tribunal that examined the case rejected the first of the Greek arguments and appointed a Dutch admiral to examine the technical side of the Greek suit.^{xxvi}

Further steps would have been taken towards the completion of the Gerontas naval program before the end of 1924 had it not been, amongst other things, for the

reorientation of Greek naval attention to the 1924 Rome Naval Conference and the contemporary Greek-Turkish negotiations over the institution of a ten-year “naval holiday” between the two countries. On the occasion of the aforementioned conference, whose aim was to expand the 1922 Washington Treaty limits to the minor Powers, “the Italian diplomacy succeeded in denying Spain and Greece any rival maritime role in the Mediterranean, although no minor Power could ever be a real match for Rome: Spain had sought to build 3 modern battleships along the 36,000-tons limit established with the 1922 Washington Treaty, while Greece too held similar ambitions. Both found themselves unable to fulfill their plans as the conference closed inconclusively thanks to the host’s diplomacy.”^{xxvii} Illustrative of the ill-feeling that existed vis-à-vis Greece in Italian naval circles was, amongst other things, the naval war plans against a supposedly hostile Balkan Bloc (Greece, Yugoslavia, Albania) which were published in the 1924 book “For Italy’s Efficiency” by the influential Commander Alfredo Baistrocchi.^{xxviii}

Greek readiness to settle with Turkey along the 36,000 tons battle-fleet limit, did not meet with success because Turkey would not accede to the Greek intention of building three modern battleships of the aforementioned cumulative tonnage.^{xxix} This was logical given that the *Javouz* was the only capital ship with which the Turkish navy could be reinforced then. Notwithstanding the arguments of the Turkish Navy in favour of procuring more large surface units, the Turkish General Staff and army officer corps placed greater emphasis on the procurement of lighter and, therefore cheaper units. This was understandable considering the contemporary lack of Turkish funds and the Turkish involvement in overwhelmingly defensive land battles from the War of Tripoli of 1911 to the end of the Asia Minor Campaign in 1922. “In all these conflicts, friendly naval forces performed peripheral roles. As a result, the early Republican military mind saw, at best, a coastal defence function for the navy. In practical terms, the navy was treated as a natural extension of the army.”^{xxx}

In the aftermath of this failure Roussos, the Greek Minister of Marine, was obliged to explore ways in which the Greek navy could be strengthened. To this end, he enquired *Vulkan Werke* regarding the modernization of the half built Greek battle-cruiser *Salamis*, which earlier Greek administrations had declined taking delivery of. The *Vulkan* reply was less than satisfactory but the Greek move probably facilitated the pronouncement of the Dutch Admiral in favor of the *Vulkan Werke*, which demanded the completion of the ship and the conclusion of this transaction.^{xxxi} The year 1924 ended with the placement of a Greek order for two submarines from France.^{xxxii}

THE WEBB NAVAL MISSION TO GREECE DECEMBER 1924- MARCH 1925

The precariousness of Greek naval position, which was due to her unfavorable regional environment, was attenuated by considerable deficiencies in the Greek navy itself. The standard of Greek naval officers in naval navigation, wireless communication, signaling, torpedo and gunnery notably deteriorated because of the contemporary steep decline in fleet training.^{xxxiii} This deterioration made necessary the invitation of a British flag officer to Greece, to study the naval situation of the country, and pronounce on the optimal force structure for the Greek Navy, since the Greek naval opinion had grown divided on that particular issue.^{xxxiv} The prospect of a new British naval mission to Greece was agreeable to Milne Cheetham, the British Minister in Athens because it “would be of considerable utility to our trade in armaments.”^{xxxv} The corresponding view of the Admiralty was lyrical. It characteristically stated:

....There can be no question that the Greeks as a nation like and admire the British as they do no other people and that they honestly regard our Navy as incomparably the most efficient of all navies. If we fail to provide them with a Mission now they have asked for it, they will undoubtedly go to either France or America, which would be deplorable from the point of view of British prestige. Although such a contingency is probably very unlikely, Greece, in view of its geographical position, its long coast-line, good harbours and considerable mercantile marine, would prove a most valuable ally in the case of our being at war with a Mediterranean power. Even if Greece is a neutral in wartime it is much better that her benevolence should gravitate towards us rather than towards any other nation. In times of peace, a British naval Mission would obtain for the Mediterranean Squadron many facilities concerning the use of harbours, etc...^{xxxvi}

The first Labor Prime Minister of Britain, Ramsay MacDonald, whose commitment to world disarmament was common knowledge,^{xxxvii} saw additional advantages in lending a British Naval Mission to Greece:

It can scarcely be doubted that the successive British naval missions which have been present in Greece since 1911...have not only proved of great utility to the Hellenic navy, but have been of considerable advantage to British political and strategic interests. Since the establishment of the Republic in Greece, the French Government have endeavoured and are still endeavouring to bring that country within their own orbit, and it is to be apprehended that if His Majesty's Government were to refuse this present request the Greek Government would apply to the French government for the expert naval advice of which they now stand in need. Such a contingency would not only be generally undesirable but would also be particularly inconvenient at a moment when we are endeavouring to discourage these small states from all unnecessary armament programmes...if our influence in Greek naval matters is to be superseded by French influence, the Greek Government will be encouraged to place further orders in France and build up a navy in excess of their actual needs. The presence of a British naval mission in Greece would go far to counteract this dangerous tendency...^{xxxviii}

After consultation between the Greek and the British authorities it was agreed that Vice-Admiral Webb, should proceed "to draw up a complete scheme of organization of the Greek Navy, (Staff, materiel, personnel, and the duties and establishments of every branch of the Service, including the Naval Air Service".^{xxxix} It was also agreed that the whole period of the contract should not exceed five months. During his stay in Athens, Admiral Webb meticulously studied Greek naval needs before producing a detailed scheme of organization, education and development of the Greek Navy, which he submitted to the Greek Government in mid February 1925.

A large part of Webb's lengthy report was devoted to the naval education of the Greek Navy. While not pressing for the introduction of interchangeability, which was actually abandoned in Britain at the time,^{xl} Webb advocated the concentration of all naval schools in two major complexes, the Cadet College at Piraeus (Scholi Naftikon Dokimon) and the Central Training Establishment at Poros. He concurred with the decision of the Greek Naval Staff to train together Engineer, Paymaster and Executive Cadets at the College because he held that "all officers should be drawn as far as possible from the same source, entered under the same conditions, and trained together, so far as the different duties they will be called upon to perform will allow."^{xli} He also thought that the enlargement of the institution would soon become necessary, and that some room re-arrangement was unavoidable in order to keep separate the dormitories from the classrooms and both of them from the laboratories and the storehouses.^{xlii} Webb held a positive opinion of the overall organization and standard of studies at the Cadet College but warned against providing too theoretical instruction to its students. The need was also emphasized for more physical exercise

of cadets and was pointed out that the college library had been neglected for years, therefore money was overdue for its expansion.^{xliii}

The Central Training Establishment at Poros was on the whole well conducted, proceeding on satisfactory lines and Webb hoped that it would develop further following its relocation to Salamis after the intended transfer of the Greek Arsenal to Scaramanga. The Signal School favorably impressed Webb both in technical efficiency and cleanliness; it was well equipped and arranged, and the training in all branches of signaling appeared very satisfactorily conducted. The Gunnery School was well organized too, though its equipment was becoming "rather out of date". A tendency was also noticed to fall behind the latest advances in the important study of Fire Control. The Gabier School was in a less satisfactory position while the training in the Boys' School appeared to be satisfactory. The Engineers' school was in need of a proper place for the conduct of its courses, while the Torpedo School impressed Webb favorably. It was doing very well in spite of being handicapped by inadequate equipment, much of the instructional gear being out of date, and the space available being rather crammed.^{xliiv}

Staff education in the Greek Navy was another subject which attracted the attention of Admiral Webb. It was generally held that a staff officer should enjoy freedom from the routine work of administration and maintenance in order to occupy himself with drawing up war plans, updating them and making all arrangements that can be made beforehand for carrying out the operations that would become necessary in war. Webb noticed with relief that this freedom was assured by the contemporary organization of the Naval Staff and that of the Ministry of Marine. However, the successful discharge of the duties of staff officers required familiarity with the Principles of War based upon a study of history and the art of War. This familiarity could only be attained through instruction and training that could be provided by a War College, whose establishment was overdue and from which officers of all ranks should benefit through their attendance of corresponding courses (specifically designed courses for cadets, ensigns, lieutenant commanders and senior officers). Webb envisaged the establishment of this school at Poros, which would initially offer only a Senior Officers' War Course. It would later expand its courses and have a building of its own.^{xlv}

The state of training of Greek naval officers was another area that was explored by Admiral Webb. He was best impressed by the officers of the Executive branch although they appeared in need of more practical training and experience at sea. Their lack of experience could be remedied, to some extent, by sending a few junior officers to serve in the sea-going ships of friendly Powers, and by sending others of higher seniority to study in the technical schools of those Powers. Webb further noticed that the training of the Engineer officers fell far short of the standard required, therefore considerable assistance from outside the Hellenic Navy was necessary until a scheme of naval engineering education had been in operation sufficiently long to produce qualified officers of the seniority necessary for the Directing Staff. The Medical officers were equally lagging behind the medical and hygienic progress of the world and the enlistment of the Heads of the Medical Profession in Greece would provide the only way of upgrading the state of Greek Naval Medicine. On the contrary, the Accountant Officers were up to the required standard but insufficient responsibility was vested in the Accountant Branch in the performance of accountant duties on board ship, and in the internal economy of the Branch generally.^{xlvi}

Organizational issues were hardly ignored by the British Admiral. The full utilization of the Greek merchant marine in wartime attracted his attention, and he proposed the creation of a separate division of the Naval Staff which would be divided into two sections, one for matters of transport and requisitions and another for ships of the mercantile marine not under the requisition. He thought that it was important that the Greek Naval Staff would have a clear picture of the potential use of each one of the Greek merchant ships and their whereabouts. Webb also espoused

the idea of controlling mercantile movements for defensive and offensive purposes in wartime through the appointment of Shipping Control Officers at the principal commercial ports. Retired naval officers were thought ideal for the job which would demand, amongst other things, close co-operation with the Harbor Masters of lesser ports and the Intelligence Officers of their area. It was also important to persuade the Greek shipowners to fit their vessels in time of peace with the strengthening necessary to enable them to mount defensive armaments without delay on the outbreak of war. This armament would probably constitute the only safeguard of the Greek merchantmen against enemy action since the small number of Greek warships made impossible sparing ships to act as convoy for any merchant ships other than militarily important vessels such as troopships and naval auxiliaries. The attendance of special lectures, wireless drills between Greek men-of-war and merchantmen, and the drawing up of detailed orders and instructions by the Naval Staff for merchant vessels in the war zone, convoy and signaling would go a long way towards preparing merchant mariners for any possible war eventuality.^{xlvii}

Naval Intelligence was a similar and equally important organizational subject that attracted the attention of the British Admiral. Webb found that the Intelligence Department of the Naval Staff was organized on sound lines and that it required further development on those lines. Despite the fact that naval intelligence could come from a variety of sources, its best interpretation and utilization could be best trusted to selected retired executive naval officers, who resided near the posts they would occupy in wartime. It was thus suggested to organize a distinct intelligence system in the probable zone of naval operations, which would be divided up into intelligence areas, to the centers of which Intelligence officers would be appointed. The definition of areas and selection of centers would follow the position of the various telephone exchanges of the islands and coast towns on the mainland and that of any outlying wireless stations. The Intelligence officers should be exercised at their stations at least once a year, preferably at a time when the Greek fleet was carrying out manoeuvres. Given the importance that Webb placed to efficient intelligence gathering regarding the whereabouts of the *Yavouz* and the rest of the Turkish fleet, his corresponding detailed proposals were understandable.^{xlviii}

The contemporary serious shortage of supply of officers and its consequences on the organization of the Greek Navy troubled the British Admiral. He attributed it, in large measure, to "war weariness" and suggested that some voluntary, non-political body on the lines of the English "Navy League" should be initiated with the help of the Government, in order to educate the Greek people on the merits and necessity of sea power.^{xlix} Stability of appointments, which would ensure a career to those who enter the Navy, was another way of attracting people to it. Bearing probably in mind the constant changes of duty in the Greek Navy, owing to naval political considerations, and the damage made by this, Webb suggested two years as a reasonable period for officer's appointment in general. The British Admiral was also disappointed by much of what he saw in the Greek naval penal system. He called for the compilation of a book of "Naval Regulations" on the lines of the British "KING'S REGULATIONS AND ADMIRALTY INSTRUCTIONS", which would embody the laws of the country by which the conditions of service in the navy was governed, and the regulations under which the navy was administered. He recommended that men awaiting trial should not be sent to prison. He also thought best that those convicted of offences against discipline should be committed to a naval prison on the lines of the British "Detention Barracks"; those convicted against the ordinary criminal laws should be sent to civil prisons.¹

With regard to the naval program of Greece Webb argued that this should attend to her war needs and geographic eccentricities. The physical fragmentation of the country and the inadequacy of her railway communications meant that the mobilization of the Greek army and its concentration at the desired points was essentially a question of sea communications. Moreover, the dependence of Greece

on sea-trade for feeding her population, importing indispensable ammunition to wage war, and maintaining her credit necessitated the thorough protection of her sea communications.

Webb was in agreement with contemporary international orthodoxy which regarded the complete destruction of the enemy fleet in battle as the only certain method of securing freedom of sea communications. The Greek Navy could not realistically hope to destroy the superior Italian fleet, if it came to war between the two countries. However, facing down the Turkish Navy was another matter, not least because of the configuration of the probable theatre of operations, the Aegean.^{li} The latter, "being an archipelago allows for the organization of a very effective system of intelligence, whereby the enemy can be quickly located and dealt with. At the same time it affords numerous points of shelter for shipping, thus enabling vessels to be directed into ports at very short notice, and moved over unprotected parts of their voyage when it has been ascertained for certain that there is no enemy within striking distance."^{lii} It was necessary therefore to make provision for very complete reconnaissance of the whole theatre of operations by naval aircraft working in conjunction with the Greek fleet. Given suitable landing grounds (invisible from seaward so that it may not be open to direct bombardment) on certain Aegean islands equipped with a store of fuel, a small repair outfit and basic local defenses, the whole field of operations could be covered by aircraft working from the main base. Thus, there was no immediate necessity for the provision of aircraft carriers. Reconnaissance ought also to be supplemented by a system of local defense which should include, in the absence of costly, fixed defenses, carefully disposed minefields in shallow water, patrolling submarines further out, aircraft and submarine hunting vessels.^{liii}

In addition to the reconnaissance system and local defenses, a striking force was indispensable, in Webb's view, if the Turkish Navy was to be countered, and the Turkish sea-trade stopped. The strongest Turkish naval unit, the battle-cruiser *Yavouz*, could threaten Greek command of the Aegean if she was reconstructed, updated, and obtained foreign naval personnel to man her, as it was likely. Webb admitted that the most certain reply to the Turkish warship would be another battle cruiser of at least equal gun power and speed. Considering, however, the vast expense such a battle cruiser would be to Greece an increased number of destroyers, submarines and aircraft in the Greek Navy would do the job cheaper. Local defenses would protect vital points on the Greek coast from being bombarded by *Yavouz*, while aircraft reconnaissance and land intelligence would make continuously known her position to the Greek naval command. Consequently, Greek sea communication could be stopped and deflected as necessary, while the attacking forces, submarines by day and destroyers by night could be so disposed as to attack to the best advantage. Torpedo and bombing aircraft would also attack *Javouz* all the time.^{liv}

An additional Turkish naval threat to Greek naval communications was that of the light cruiser *Hamidieh*, which Webb thought that it could be best dealt with by a Greek cruiser of sufficient speed and protection against aerial and underwater attack. The possession of a cruiser by the Greek Navy would also facilitate its sea training by serving as target for dummy attacks by Greek naval aircraft and light units. It could also provide enough space for those directing and co-ordinating Greek naval exercises and provide accommodation for junior officers and men and boys under training. Turkish torpedo craft and submarines could also play an important role in a Greek-Turkish War. Given that Greek destroyer personnel were "second to none"^{lv} Greek destroyers could be relied upon to account for those of the Turkish Navy, provided that there existed some approximation to material equality of strength between opponents. On the other hand, the craft required to counter the Turkish submarine threat were destroyers and coastal motor boats with depth charges, hunting craft with hydrophones and aircraft with bombs.^{lvi}

Having generally surveyed the context within which Greek naval power was to evolve, Webb turned to specific recommendations regarding the best possible composition of the Hellenic Navy. The *Kilkis* and the *Lemnos*, the two American built pre-dreadnoughts should be disposed of owing to their slow speed, obsolete armament, lack of protection against underwater and aerial attack, and vulnerability to plunging fire.^{lvii} On the other hand the *Averoff* should be retained for at least five more years provided that she received a thorough refit and was fitted with new boilers, extra armour protection over magazines, anti-flash protection, and improved under-water protection. Webb also recommended that the *Averoff* be fitted with director fire control for her guns and to burn fuel oil only. The expense for all this was estimated at, approximately, £260,000, which was a far cry from the £1,250,000 that the procurement of a new cruiser would require.^{lviii} The cruiser *Helle* appeared, in Webb's view, admirably adapted for conversion into a minelayer. This required that her armament was removed except for some guns to repel destroyers and aerial attack. Her engines should be thoroughly overhauled, her boilers would be renewed and designed for fuel oil only. The whole upper deck could then be transformed to carry mines both sides.^{lix}

With regard to the existing destroyers of the Greek Navy, four of them, *Ierax*, *Panther*, *Leon* and *Aetos* could take their place in the striking force, while the *Smyrna*, *Thyella*, *Sphendoni*, *Lonchi*, *Aspis*, *Niki*, and *Velos* were quite equal to the task of hunting the smaller type of submarines, and also of assisting to search (and if necessary blockade), the enemy coasts. To this end, their torpedo tubes should be removed, and the vessels equipped with depth charges and anti-aircraft guns. The destroyers *Aigli*, *Alkyone*, *Arethousa*, *Daphne*, *Doris*, and *Thetis* were too small for any offensive operations but could prove, according to Webb, suitable for work as hydrophone vessels, at least the four, most efficient of them. They should retain only a light armament and an anti-aircraft gun and their torpedo tubes should be removed. The six torpedo boats of the *Pergamos* and *Broussa* Class were of very recent design and construction and appeared extremely well built, therefore they could be usefully employed for anti-submarine duties. Finally, the existing couple of mine-sweeping vessels and the fleet repair-ship were well adapted for their work.^{lx}

The final part of the Webb proposals on the force structure of the Greek Navy concerned the naval procurements that should take place before the end of the 1920s. Webb insisted that "in all future construction, and in any re-armament of existing vessels it is essential that the number of different caliber of guns on board any ship should be kept as low as possible. Similarly the number of caliber of guns in the Hellenic Navy should be reduced to the lowest limits, compatible with efficiency. This would achieve considerable economy and would also make for increased efficiency, in that officers and gunnery ratings would have an intimate knowledge of any guns with which they might suddenly be called upon to deal."^{lxi} He also recommended that any new Greek naval vessel should be designed to burn oil fuel only.^{lxii} With regard to the naval units needed by the Greek Navy, Webb argued that a second Greek cruiser might be necessary in the future and the procurement a flotilla leader *V* or *W* class destroyer as well as a division of four *S* class destroyers was considered indispensable. Six submarines were also required to maintain an observation patrol off the Dardanelles with a striking force deployed in the Aegean. Since two of them had already been ordered in France, Webb proposed ordering four submarines of the British *L 50* class (two in 1925 and two more in 1927). Four coastal motor boats of 37 knots speed, 55 foot size and a displacement of 11 tons were also required for operations against submarines and also for surprise torpedo attacks on large ships.^{lxiii} Several small craft would be required to lay groups of mines at short notice and two more pairs of mine sweeping vessels would be necessary at some future point.^{lxiv}

The development of the Greek Naval Air Service constituted an integral part of the Webb naval program. For reasons of economy, efficiency, and checking French

influence in Greek naval affairs, Webb did not agree with the intention of the Greek Government to amalgamate the Greek Naval Air Arm with its sister service and attach both of them to the Ministry of War as a separate branch.^{lxv} He was adamant that the personnel of the Greek Naval Air Service should come from within the Navy and he emphasized the need for giving strong inducements to naval personnel to join it. He thought it important that the Naval Air Bases of Tatoi and Phalerum were kept up up-to-date.^{lxvi} The Greek Naval Air Service should also be reinforced with two squadrons of Medium Reconnaissance Machines (also available for torpedo attack and bombing) of twelve planes each, a squadron of two-seater fighters of the same strength, three long distance reconnaissance machines (also available for torpedo attack or heavy bombing) and three training and practice machines per squadron. A repair section with necessary equipment was necessary to be attached to each squadron and to the heavy machines. Up to 1926 half of the Medium Reconnaissance Machines should be constructed as seaplanes and half as land planes, while further experience of actual operations would determine their correct proportion. Of the Long Distance machines one was desired to be flying boat and the other two land planes.^{lxvii} Certain of these machines would be assembled at the Air Factory at Phalerum which had recently been taken over by the Blackburn Aeroplane Company following an open international competition.^{lxviii}

The naval program that Webb put forward also touched the issue of the Greek arsenal at Scaramanga. The British admiral agreed with his predecessor, Vice-Admiral Kelly, that the position of Salamis Dockyard was inadequate in elementary facilities required of a dockyard (wharves, quays, basins, docks, cranes, lifting appliances), and that its shops were insufficient for the work required of them. Furthermore, its lack of communications, and the entire absence of connection with the railway network of the country caused a good number of labor difficulties and pushed up the cost of its running. Bearing in mind these deficiencies and the urgent necessity for replacement or repair of the existing establishments at Salamis, the creation of a new dockyard at Scaramanga commended itself.^{lxix} However, Webb warned against developing it beyond the absolute needs of the Hellenic Navy, since no Great Power was interested in an advanced base there, as was erroneously thought in official Greek circles.^{lxx}

The work for the new arsenal, Webb argued, should be put out to contract, stipulating that Greek labor should be employed throughout with a minimum of British supervision. As the dockyard had been designed on the lines of British naval dockyards and the plans had been drawn by British engineers, the work of construction was better to be confided to a British firm, on grounds of efficiency and economy. A British civil engineer should scrutinize the tenders and supervise the work of construction and the organization and direction of the dockyard should be undertaken by a British officer with full experience in British dockyards. Webb also recommended certain reductions from the complete scheme as drawn up by Sir Edward Raban. He was not in favor of erecting a new cadet school or new barracks there, and he thought that the magazines should remain at Leros Island, some more underground magazines being provided. Pending completion of the new dockyard, no work of a permanent nature was advisable to be undertaken at Salamis except absolutely necessary repairs or renewals and provision of machinery, etc. capable of being transferred eventually to Scaramanga. Webb finally recommended that the "Costing System" introduced on the advice of Vice Admiral Kelly should be adhered to rigidly.^{lxxi}

Webb proposals regarding the naval program of the Greek navy followed closely Macdonald's wish not to encourage the Greek Government in any grandiose scheme of naval expenditure. Shortly before the submission of his proposals to the Greek Government, the British Admiral characteristically informed the Admiralty that his provision contained no capital ship or new cruiser and his recommendations for torpedo and submarine craft, aircraft and naval works were limited "to the absolute

minimum that I consider consistent with the bare existence of the Hellenic navy as an effective force.”^{lxxii} He further noted that “If His Majesty’s Government views this very moderate provision of naval force with disapproval that appears to me tantamount to disapproval even of the bare survival of the Hellenic navy.”^{lxxiii} In fact, his espousal of the procurement of submarines as a safeguard against the *Yavouz*, at a time when fleet manoeuvres of the American navy had demonstrated the inability of submarines to carry out successful attacks on heavy surface vessels except at night or under lucky circumstances, puts some doubt in the value of his scheme.^{lxxiv}

THE CAREFUL REGENERATION OF A WAR-TORN NAVY, APRIL 1925 – JUNE 1928

In adherence to the recommendations of Vice-Admiral Webb, excited by the Patriarchal trouble in Turkey,^{lxxv} thoroughly convinced about the superiority of British naval armaments,^{lxxvi} and in an attempt to combine an Anglo-Greek rapprochement with the procurement of a homogeneous and modern fleet in Britain the Greek Ministry of Marine made consistent efforts to secure British financial assistance. It was first tried to borrow from the British Government or get a loan approved by the British Government under the Exports Credit Scheme.^{lxxvii} Failing this, it was then attempted to get a loan from some financial group as was approved by the British Government.^{lxxviii} The British Treasury advised against this because the Geneva Protocol and the prospectus of the Greek Refugee Loan did not permit the Greek Government to create any charges on its revenues for military purposes. Moreover, under the War Debt Agreement Greece could not assign any such security without the assent of Great Britain, France and the United States (which would clearly not be forthcoming). Finally, if the Greek Budget had an available balance out of revenue, it was expected to make some payment on Greece’s large war debts to the Allies. The Treasury concluded that neither the British Government would make a loan to Greece, nor could the Trade Facilities Act or the Exports Credit Scheme be available for the purchase of war material.^{lxxix} The sensitivity of the Treasury regarding the fiscal health and credit-worthiness of the Greek economy was understandable considering that two thirds of Greek foreign debt and the majority of foreign direct investment in Greece were held by British investors during the interwar years.^{lxxx}

The Greeks were very much put out by their failure to obtain a loan in England and delayed the invitation of a new British naval mission to succeed the Webb one, in a further attempt to secure British financial assistance.^{lxxxi} Meanwhile, the forthcoming Greek naval tenders had attracted the interest of five British naval shipbuilders (Vickers Ltd., Sir W.G. Armstrong Whitworth Ltd., J & I. Thornycroft Ltd., Cammell Laird & Company, John Brown & Company). The first two were more interested in the construction of submarines for the Greek Government, and the last three were most interested in the construction of destroyers. Some of the British shipbuilders (i.e. Vicker’s and John Brown) did not insist on any definite security or charge on specific revenue from the Greek Government in consideration of accepting the orders on deferred payment terms. In the case of submarines, destroyers and aeroplanes, the material would itself be of a saleable value in the event of the Greek Government defaulting.^{lxxxii} However, their being taken over by the Royal Navy was not considered probable, since this would necessitate the deletion of a similar number of vessels from any new construction program for vessels not of the very latest type.^{lxxxiii} John Brown in particular contacted the British Government with a view to securing financial assistance from it for the whole Greek project.^{lxxxiv} This amounted to five million pounds for which, at 10% annual appropriations of approximately £600,000, would be needed to pay off interest and sinking fund in approximately 20 years.^{lxxxv}

A provisional order was placed by the Greek Government with Messrs Brown & Coy. Ltd, Cammel Laird & Coy. Ltd, and Messrs. Fairfield Shipbuilding & Engineering Coy. Ltd. for four destroyers, four submarines and four coastal motor boats in July 1925. This was made conditional upon the extension of British financial assistance and, momentarily, placed the British shipbuilding industry in a most favourable position for securing future orders on the ground of homogeneity.^{lxxxvi} The Greek order would make a favorable impression on those sections of British government and public opinion who were either interested in arresting the decline of British shipbuilding, which followed the Washington Naval Treaty, or valued the importance of good bilateral relations for the Mediterranean position of Britain.^{lxxxvii} Its realization was also momentarily facilitated by the suggestion of the Overseas Trade Department that it would be possible to include the hulls and engines of the Greek warships under the Export Credits Scheme.^{lxxxviii}

The suggestion fell eventually through owing to the general reluctance of the British authorities to compromise the spirit of the Trade Facilities Act. It was threatened instead that if Greece procured naval units from the Continent the British Government would expedite the repayment of the war debts that Greece had contracted in Britain.^{lxxxix} It was also stated that unless the Greek Government procured in Britain a much lower but budgetary affordable number of naval units which Vicker's had undertaken to finance (two submarines, two destroyers, some mines and anti-aircraft guns)^{xc} "there will be no hope of their [the Greeks] obtaining any further loan on the London market. Moreover, if Greek Government were so shortsighted as to disregard our advice in this matter, we should be bound to take serious account of their action in the settlement of other questions affecting Greek finances..."^{xc} alluding obviously to loans concerning the settlement of refugees and for development purposes like the Ulen one.^{xcii} These threats followed an implicit one ushered by Vice-Admiral Webb in January 1925 when he made the acceptance of Greek sub-lieutenants aboard British warships conditional upon the placement of Greek naval orders with British firms.^{xciii}

By far the most outspoken rejection of the repeated advances regarding the extension of British financial assistance to Greek naval procurements in Britain came from the Treasury. The latter characteristically argued that:

.....No-one in their senses supposes that anybody here is going to lend £2½ millions to John Brown, (which is what the proposition amounts to) on an unsecured lien of the Greek Government. There is no question of "official financial sanction"; it is simply a question of whether anybody in England is likely to be foolish enough to lend money for this purpose. I am quite convinced that there are no such fools in England and I should be considerably surprised if in fact there were any such in France. Whether an order, if placed, would be any help to British industry is a highly debatable economic proposition. Of course, if somebody gave John Brown £2½ millions, John Brown would be very happy to have £2 ½ millions, but if it came out of British pockets and was in fact not repaid by Greece, as is not unlikely, the benefit to British industry to the whole would be absolutely nil.^{xciv}

Wishing to avoid a serious breach with Britain the Greek Government delayed the placement of Greek naval orders for a while.^{xcv} However, the advertised reconstruction of the *Javouz* meant that four submarines had been ordered from France for the Greek navy by the end of the year.^{xcvi} Both the size and the quality of the French-built submarines were, apparently, inferior to their British equivalents. Be that as it may, the extension of sufficient credit by the French and the low price of the French submarines, which were half as cheap as the British ones, made their procurement a welcome alternative.^{xcvii} In fact, the Greek Minister of Marine confided to Rear Admiral Townsend, the successor to Vice-Admiral Webb that "what is good enough for France is good enough for Greece".^{xcviii}

The procurement of a submarine flotilla by the Greek navy in the mid-1920s was not the only Greek naval tender that was placed with French shipbuilders. Due to the

favorable terms offered by them they also secured contracts for a training ship, the *Ares*, and the repairs of the *Averoff* and *Helle* in 1925. During the same year more Greek naval procurements and repairs took place or commenced: a contract was given to an Austrian firm for the repair of old torpedo-boats,^{xcix} two coastal motor boats were procured in the Netherlands and Italy,^c a formerly German cargo-ship was turned into a repair-ship in Britain, and six tugboats and six patrol boats were also procured.^{ci} Furthermore, the repairs of the pre-dreadnoughts *Kilkis* and *Lemnos* commenced at the Salamis Arsenal,^{cii} as well as those of the six ex-Austrian torpedo-boats. Substantial work was also undertaken for the extension of the shops at the Arsenal and the dredging of its harbor. Finally, new machinery was ordered, torpedo and mine magazines and shops were erected at Scaramanga,^{ciii} and unsuccessful negotiations were held between the Greek Government and the Austrian shipbuilder *Gant* for the establishment of a shipyard there.^{civ} Some credit for this work goes to the Admiral cum politician Alexandros Chatzikiriakos^{cv} and part of its cost, which amounted to two and a half million pound sterling,^{cvi} was possibly covered by the 1925 discovery of certain, sizeable, forgotten bequests to the Greek Navy by late, expatriate tycoons.^{cvii}

Notwithstanding the speed with which the force structure of the Greek Navy was upgraded in 1925-1927, the placement of orders for destroyers developed into a drawn out and eventful process. Anticipating further Greek naval tenders, Cheetham discussed with Townsend the possibility of General Pagalos, the Greek dictator, taking over the Ministry of Marine himself. In Cheetham's view, Admiral Botassis, the then Minister of Marine, was more than half a Frenchman, therefore it was quite possible that some attempt might have been made to influence him against the British Mission which, in the mind of the French Representative in Athens, meant the exclusion of French industry from the larger naval contracts.^{cviii} This course of action, if actually pursued by the British representatives in Greece, did not lead anywhere. On the contrary, Townsend's mission was terminated suddenly and ungraciously a few months later.^{cix}

At the beginning of March 1926, the British Minister in Athens, Cheetham, unofficially learned that the Greek Government intended to invite tenders for two or four destroyers of about 1500 tons and 35 knots speed on the British pattern. Considering that British prices for these ships were substantially higher than the corresponding French or Italian ones it was thought advisable to make strong representations to the Greek authorities in favour of the British shipbuilding industry.^{cx} But before these were made Pagalos intimated to Townsend that Greece would purchase British destroyers in preference to other foreign-built craft, even though the cost would be greater, provided that the British Government lent its assistance in procuring a satisfactory settlement (from the Greek point of view) of the *Salamis* question.^{cxii} Apparently the Greeks were impressed by the utility of the corresponding support of Lord Jellicoe,^{cxiii} the former C-in-C of the Grand Fleet, at the Ambassador's Conference,^{cxiii} after the Greek Government sought to utilize its services.^{cxiv}

During its term in Greece the Townsend naval mission did not escape the turbulence of domestic politics; nor did the obsolete Greek naval materiel and the limited stocks of fuel and ammunition dedicated to fleet training facilitate its work.^{cxv} Be that as it may, it managed to implement a good number of the Webb recommendations. Under its supervision the limited knowledge of Greek officers in technical branches was significantly expanded and the training in naval tactics of the Greek light fleet was advanced. Moreover, a Naval War College was started at the request of the Greek Naval Authorities.^{cxvi} Many difficulties had to be overcome, but eventually they were surmounted and the College was opened and provided sorely needed staff education to Greek naval officers for a short time. In January 1926 Botassis signed an order for the closing of the Naval War College, despite his earlier assurances to the contrary. Townsend protested energetically against this and had interviews with the President of the Republic, ex-Admiral Coundouriotis and the

dictator, General Pagalos. Coundouriotis appeared greatly upset and begged Townsend to remain on, while Pagalos was, apparently, equally sympathetic and considered taking over the Ministry of Marine himself.^{cxvii} In the end, the good work of the Townsend mission was prematurely interrupted, ostensibly, on ground of economy in May 1926.^{cxviii}

In autumn 1926, shortly after the fall of the Pagalos Dictatorship, a request was received from the Greek Government for a mission of "instruction and organisation" to the Greek fleet to include aviation officers for the general training of aviation personnel and to be under the orders of the chief of the Greek staff. The Charge d' affaires at Athens was anxious that the request should be acceded to but the Foreign Office was decidedly averse from sending any more missions to Greece, as there was no guarantee of the stability of the Greek Government, nor proof of any improvement in the Greek financial position. The Director of Naval Intelligence considered that an undertaking given by the British minister on withdrawal of the previous mission, that another would be sent if desired, should be honoured, and moreover that it was most desirable to retain and if possible increase British influence in Greece in matters of defence. The British Government eventually granted the Greek request on the understanding that the new British Naval Mission to Greece should be under a senior British officer (captain) and not under the orders of the Chief of staff as proposed by the Greek Government. In view of the treatment accorded to the Townsend mission the agreement was also made on lines which prevented any repetition of such treatment.^{cxix} A new contract was signed in January 1927 and Captain Turle was appointed Head of the Mission, with a staff of not more than nine officers. The purpose of the mission was advisory, for reorganisation and direct training of naval personnel. All officers held equivalent rank in Hellenic Navy.^{cxx}

Following the signature of its contract, the Turle naval mission to Greece focused on educating and training the Greek Navy,^{cxxi} which was in a state of moral depression, due to political troubles and the absolute lack of sea training for almost a year, in consequence of the difficulties of the financial situation of Greece. The latter had led to a notable decrease in the budget of the Ministry of Marine between 1926 and 1930^{cxxii}. The War College was re-opened and Commader de Pass was appointed its Director of studies, being assisted in his duties by Greek officers who were fluent in English. A fleet summer cruise was also decided on and its program of tactical exercises was prepared by Turle. He and his staff, were also on board the flagship during the exercises, where he acted as umpire. The cruise proved satisfactory from a point of view of morale and was divided into three periods. The first commenced on 12th June 1927, the fleet proceeding from Phalerum to Chios. The second period commenced on 1st August and finished on 10th August, during which time Salonica and Volo were visited. More day and night exercises were carried out. The third and last period commenced on 2nd September and finished on 5th September. The fleet visited Syra, afterwards returning to Phalerum Bay. During the third period of the summer cruises, while carrying out a night exercise of abandoning and attacking an enemy convoy, a tug, representing a warship collided with one of the attacking destroyers, *Lonchi* and sank; the crew were rescued, but all efforts to keep the tug were unavailing.^{cxxiii} This was one of many accidents that plagued the Greek Navy during the decade after the Asia Minor Catastrophe, owing to insufficient sea training of the Greek fleet.^{cxxiv}

The education and training of the Greek Navy were not the only aspects of Greek naval affairs which were affected by the contemporary financial difficulties of Greece. Its force structure equally suffered between 1926 and 1929, since only £600,000 were invested upon it.^{cxxv} No naval order for new construction was given but the boilers of *Lemnos* were repaired in order to show to the Greek public that their Government "was not remaining inactive under the threatened establishment of Turkish naval supremacy in the Aegean".^{cxxvi} Steps were also taken in 1926 for the establishment of a cheaper means of naval defence, a national coastal defence

system, but this did not go much further than the publication of some of the required decrees and regulations.^{cxxvii} The Naval Air Service was also left far behind requirements, overshadowed by its sister Army service and burdened with an uneconomic airplane factory at Phalerum. In fact, the five squadrons of the Greek Naval Air Service had been reduced to negligible operations by 1928.^{cxxviii}

THE VENIZELOS ADMINISTRATION AND THE MATURITY OF GREEK NAVAL PLANNING, JULY 1928 - MAY 1932

The return of Venizelos to power in summer 1928, after four years of self-imposed exile from Greece, marked the beginning of a fruitful series of arguments and decisions that generally defined Greek naval policy up to the Second World War. His Administration placed particular emphasis on the education and training of the Greek Navy in an attempt to maximize its war efficiency. Sports and athletics were promoted and *Ares*, the recently procured training ship sailed to America three decades after the last American visit of a Greek warship.^{cxxix} In fact, her visit to Portsmouth in September 1930 made such an impression that the revival of sail was raised by Admiral R.R.C. Backhouse. This was extensively discussed in the Admiralty over the next couple of years.^{cxxx}

Fleet cruises and tactical exercises were also undertaken. On the 17th/18th June 1929 a combined operation was carried out at Port Mandri, with the object of investigating the practicability of the various types of landing craft employed, and the time taken for disembarking troops, animals and artillery. The naval forces employed were the *Averoff*, *Ierax*, *Aetos*, *Sphendoni*, *Thyella*, a transport and two tugs. The landing party consisted of fourteen officers, three hundred men, four guns and fifty seven animals. The whole forces left Keratsina Bay (Salamina) at night and arrived at Port Mandri before dawn.^{cxxxi} Lyon, the head of the new British Naval Mission to Greece since March 1929,^{cxxxii} and his staff were onboard the *Averoff*. Owing to various delays in the transport, the "first flight" did not leave for the shore until one hour after the intended time; it then being broad daylight. Submarines and aircraft also took part in the operation, attacks by the former being made before and after the landing. Many valuable lessons were learnt and many useful experiences gained from that exercise. During the remainder of June and July the training of the fleet proceeded on normal lines, a certain amount of gunnery firings and torpedo test runs being carried out.

On 12th August the Training Squadron, sailed from Phalerum Bay for a cruise round Morea and the Ionian Islands. The first few weeks were devoted to simple exercises and tactical drills; sea time, which was usually short owing to the need for fuel economy, being taken up with such exercises. It was clear from these earlier drills that destroyer officers were not being trained on the right lines. Several alterations were made in formations and method attack, and improvement was noticeable all round. No torpedoes were fired from surface vessels during the cruise, there being great fear of losing some; consequently the torpedo ratings at sea had little practical experience of keeping the torpedoes efficient onboard, and all the attacks carried out (in fifteen different exercises) were theoretical. Later on in the cruise schemes were carried out, but no attempt was made to try and go fast, and no complicated strategical schemes were attempted. Owing to need of fuel economy and shortage of engine room ratings the exercises were not carried out at more than three-fifth power. Several attacks and shadowing exercises were also carried out by the submarine *Papanikolis* during the cruise, the former being of a simple nature as she had recently been recommissioned. 18-inch torpedoes were used in all attacks, a special arrangement being fitted in one of the bow 21-inch tubes of the submarine.^{cxxxiii} Towards the end of the year a certain number of gunnery firings were

carried out, the *Averoff* carrying out her first full calibre night firing since 1923. All were under very easy conditions. Submarine training proceeded normally, diving exercises being carried out frequently and occasional attacks, but it was difficult to get a permanent vessel as a target ship.^{cxxxiv}

Aircraft took part in some of these exercises, but these were not of any great value, as there was great difficulty in communication between aircraft and ships. During June and July, while the fleet was in Phalerum Bay, training was carried out in wireless telegraphy, Aldis lamp, and dummy torpedo attack, and when the Fleet sailed for the summer cruise a dummy torpedo attack was carried out by three seaplanes on *Averoff*, who was screened. Two flights of seaplanes also left Phalerum for Corfu on 3rd September, refuelling in Dragamesti Bay. The Director of Naval Air Service and staff took passage in the seaplanes and the lighthouse tender *Pleias* acted as tender. At Corfu a camp was established in Govino Bay with moorings for the seaplanes. The arrangements for making the advanced base and refuelling base were well carried out. Air exercises were carried out with the Fleet, consisting of sector patrols a dummy torpedo attack, and a convoy escort. The advanced base was dismantled and the seaplanes returned to Phalerum on 19th September 1929. On the day the Fleet returned from the cruise an unsuccessful combined torpedo plane and destroyer attack on *Averoff* took place. Furthermore, the training of pilots, wireless telegraphy operators, gunners, fitters and riggers also proceeded satisfactorily. Some straight runs had been obtained from torpedo-plane practice dropping, but the torpedoes themselves needed overhaul. Wireless reception and transmission improved, but were still unsatisfactory.^{cxxxv}

The contribution of the British naval mission in the development of gunnery in general in the Hellenic fleet was equally important. It became apparent from some of the destroyer firings witnessed early in summer 1929 that the best results were not being obtained, chiefly because the material was not well looked after. The advantages of appointing a competent officer to the larger destroyers for gunnery duties were pointed out, and there was a qualified Gunnery officer in the Commander of Destroyers ship. Lectures were also delivered to Gunnery specialists, and the system of analyzing firings was revised; also a full report on the gunnery material and arrangements in *Averoff* was prepared.

The work of the Greek destroyers and that of the Greek Naval Air Service also benefitted from the advice of the Lyon naval mission. A destroyer manual was written, which became the standard book and included all orders and instructions necessary for destroyer work in the Hellenic fleet. Consequently, the sections relating to destroyers in the Commander-in-Chief's Battle Instructions were revised. Furthermore, the Royal Air Force manual, and handbooks for each type of aircraft in the Greek Naval Air Service and those on order were translated into Greek.^{cxxxvi}

By a decree published in February 1929, the status of the War Academy was revised, and called upon to carry out two separate functions, that of a Staff College for the training of Staff Officers and that of a War College whose attendance was necessary for all executive officers before promotion to Commander. The same decree also ordered that all existing captains should follow the course on instruction at the Academy in order to complete and perfect their knowledge in the conduct of naval warfare, the course being obligatory before promotion to flag rank. Lectures were also given and schemes were investigated under the direct supervision of the Head of the British Mission.^{cxxxvii} It was finally proposed that all specialty schools should be concentrated in Poros, except the Gunnery, the Torpedo and the Signal schools. The first two schools would be based in the Bay of Kyra close to Scaramanga and the latter in Votanikos, Athens.^{cxxxviii}

The issue of naval re-organization was hardly ignored by the Venizelos Administration. Legislative measures were taken that provided a sound basis for the system of assessment and promotion in the Navy. That system, alongside with the provision of an attractive scheme of voluntary exit and the consolidation of similar

specialties and services within the Navy, resulted in the resignation or early retirement of a good number of officers and petty officers. Thus normalcy was restored, efficiency was increased and considerable economies were effected.^{cxxxix} Indeed, the salaries of the overmanned Greek Navy consumed an astonishing 60% of the budget of the Ministry of Marine before these measures were taken.^{cxl} A new scheme of recruiting conscripts was also tried. The term of recruitment was shortened to sixteen months,^{cxli} recruits still joined in March and October but those joining in March did not serve in seagoing ships; they completed their time after leaving the schools in shore establishments. Recruits joining in October completed their time in seagoing ships only. That meant that the conscripts and crews changed only once a year instead of twice a year, which formerly had been the case. Thus a higher state of efficiency of ships and crews was attained and greater economy was effected.^{cxlii} The drive for increased efficiency of the lower deck rates was reinforced by the legislative widening of the pool from which the naval recruits were drawn and by the encouragement of long-term enlistment of volunteers who had a sea-faring background.^{cxliii} A new law was also brought into force which ordered that all commanders who had not been executive officers as commander or lieutenant commander had to serve one year as second in command of sea-going ships before they were promoted.^{cxliv} Furthermore, the pay was raised in the submarine service, thus attracting many volunteers.^{cxlv}

One of the most important largely organizational failings of the Greek naval system was the poor efficiency and maintenance of its mechanical departments, which were a quarter of a century astern of modern countries, both in ability of personnel and types of machinery.^{cxlvi} Commander Wardlaw, who was appointed technical adviser to the General Director of the Arsenal for the organization of the workshops and inspection of ship's repairs, improved the technical administration of the Arsenal by revising the technical regulations and by introducing British naval engineering methods and standards. Moreover, Commissioned Electrician W.A. Nimmy did ample electrical work at the Arsenal while the Submarine Officer of the mission, Commander de S. Brock, undertook a lot of gyro compass and torpedo work.^{cxlvii}

The formulation of the Greek naval program reflected the general policy of the Venizelos Administration and naval developments in neighbouring Turkey. The former neither entertained irredentist aspirations against neighboring countries, nor cultivated suspiciously close relations with any of the Great Powers.^{cxlviii} It respected the status quo and trusted in the power of the League of Nations to forestall renewed hostilities between Greece and Turkey.^{cxlix} Venizelos was also "more interested in the budget than in the navy and he does not seriously believe in possibility of war. He feels therefore that it is more important that such ships as public opinion demands should be the cheapest rather than the best".^{cl} A good example of this attitude was given on the occasion of the Greek procurement of inferior French batteries. Venizelos, when approached by Sir Percy Loraine, "stated with frankness.... that he was well aware that the British batteries were better than any other batteries and that in the case of the outbreak of war they would at once throw overboard the French batteries and install British batteries, but that in time of peace they were obliged to content themselves with a less good article at a lower price".^{cli}

Notwithstanding the pacifist and economic drive of the Venizelos Administration Turkish naval developments caused consternation in Greece. Turkey got two Dutch built submarines in 1928 and the *Yavuz* was successfully re-commissioned in 1930, after years of speculation regarding her state. The cruiser's performance in speed trials surpassed the most optimistic expectations. The *Yavouz* also passed gunnery and fire control trials with flying colours in August 1930. It was expected that she would be fully operational in 1932, when the delivery of all the destroyers needed to protect her would be completed.^{clii} Interestingly, a concerned Soviet Union, who was

the most trusted partner of Turkey at the time, reinforced her Black Sea Fleet with a battleship and a cruiser from her Baltic Sea fleet in January 1930.^{cliii}

Venizelos was well aware that if war erupted between the two countries the initial danger for Greece was similar to the French case with the passage of the Algerian army corps to France; it consisted in the transport of the Greek troops from Crete and the rest of Greece to Salonika.^{cliv} A further danger to be dealt with was the occupation of a major Greek island, i.e. Chios and Lesbos by the Turkish Navy. Both dangers did not impress Venizelos. He felt confident that even if Greece was denied the use of sea for her mobilization, the latter would still be completed earlier than the Turkish one, provided that the Greek navy also harassed the Aegean lines of communications of Turkey. He also argued that the temporary occupation of a major Greek island by the Turkish fleet would not decide the war. Moreover, such an occupation was not likely if the Turkish Navy denied the sea-transportation of the armed Greek islanders to the main theatre of operations in Thrace.^{clv}

Having reviewed the worst case scenario of a Greek mobilization at the outbreak of a future Greek-Turkish war the question arose of the optimal force structure and objectives of the Greek Navy. Ever since his 1928 return to Government, the Greek statesman had been a recipient of a wide range of counsels and initiatives that shaped his vision of the Greek Navy. A complicating factor for the formulation of the Greek naval program was that of the *Salamis*. In 1928 *Vulkan* attempted to reach a compromise with the Greek State by proposing that Greece should procure the modernised *Salamis* and a dry dock of 20,000 tons. Alternatively, *Vulkan* proposed, Greece could buy any other item she wanted from the German shipbuilder and Germany at large up to the cost of the battle-cruiser. Both options would be financed by the full amount of the German War Reparations to Greece for the years 1928, 1929, 1930 and, to some extent, 1931. Argyropoulos, the Greek Minister of Marine, argued in favour of procuring the modernised *Salamis* based on a corresponding study by the Greek Naval Staff.^{clvi} This study maintained that the speed superiority of the *Yavouz* vis-a-vis the *Salamis* would be marginal and that the superior naval ordnance and armour protection of the Greek battle-cruiser would decide the issue in a contest between the two ships at a distance of less than eighteen kilometers. Argyropoulos wrote in favour of reaching a compromise on the lines proposed by *Vulkan*, since he was convinced of the fighting value of the *Salamis* and the alliance and commercial value of possessing a large dry dock in Piraeus. Moreover, a compromise with *Vulkan* would, in his view, facilitate the establishment of a “naval holiday” between Greece and Turkey without having to sacrifice the *Averoff*.^{clvii}

The procurement of *Salamis* was also supported by a study which was prepared by the renowned British naval architect and engineer Sir Eustace d'Eyncourt. It was maintained that the Greek battle-cruiser would enjoy substantial superiority in gunnery range, armour-protection and anti-aircraft protection over the *Yavouz*, if she was successfully modernised. It was also argued that the *Salamis* would be slightly speedier than the *Yavouz* after both of them took their final form.^{clviii} A further support for the procurement of *Salamis* came from the Greek War College, where all relevant war games emphasised the need for procuring a heavy unit for the Greek Navy.^{clix} This, of course, begs the question whether the results of those games were influenced by the member of the British Naval mission who supervised the college. Considering the “Jutland obsession” of the majority of the interwar Royal Navy officers one cannot exclude this possibility.^{clx}

In mid-1929, Kolialexis, a highly political but able naval officer,^{clxi} sent Venizelos a detailed memorandum in which he argued that the *Salamis* would be no adequate reply to a reconditioned *Yavouz*. According to him, the latter would be much speedier than the *Salamis* whose completion required an uncertain, probably large, amount of time and money. Moreover, *Yavouz* could lodge surprise attacks against Greek islands, convoys and the Greek capital itself, whose repulse would endanger *Salamis*, owing to the risks that she would run against carefully laid Turkish minefields, the

Turkish superiority in light naval units and aircraft and the facile, good knowledge of her movements by the Turks. Based on First World War experience Kolialexis also argued that the alliance value of a Greek flotilla navy would be greater than that of a Greek navy whose main striking force was battleships. He therefore advocated building a fleet which would possess more torpedo-craft and fighter airplanes than its Turkish opponent and called for the possession of at least 10 submarines (one pair for each of the Dardanelles, Saronic and Thermaikos patrols and the rest for the protection of military convoys, the island of Lemnos, etc.)

The fate of *Kilkis* and *Lemnos* also exercised Venizelos and his staff. A study by the Greek Naval Staff concluded that the two pre-dreadnoughts enjoyed some chances of defeating the *Yavouz*, provided that the latter had already been torpedoed, bombed, or the exchange of fire between the Greek and the Turkish battle-fleets took place at a distance less than twelve kilometres. However, this was unlikely to happen considering the speed superiority of the *Yavouz* and its greater range of naval ordnance.^{clxii} A year later, another committee of the Greek Ministry of Marine favoured the upkeep and maintenance of the two pre-dreadnoughts, since their fire power was thought useful in wartime and they could house naval schools and a good number of sailors and officers in peacetime, thus making good the shortage of space of the shore establishments.^{clxiii}

Without fully subscribing to Kolialexis view, Venizelos preference for a flotilla navy and a strong naval arm owes much to it. The Greek Prime Minister admitted that it was likely that a modernised *Salamis* could prove slightly stronger than a refitted *Yavouz*. However, this was irrelevant considering the state of the naval air arm internationally, and its growing acceptance by such eminent naval thinkers as Admiral Castex. The *Salamis* could not hope to guard against a Turkish landing on a major Greek island, protect a military convoy, or fight it off against the *Yavouz*, if the Turks possessed superior naval air force.^{clxiv} The opposite would be the case if Greece enjoyed superiority over Turkey in light units and naval aircraft. Considering the financial equality of Greece and Turkey, Greece could not procure a relatively strong light fleet and naval air arm, if she spent a vast amount of money on completing the *Salamis*, while Turkey did not procure any new capital ship.^{clxv} For reason of economy, neither the call for procuring two battleships^{clxvi} nor that of possessing a Navy which would include the *Salamis*, fifteen destroyers, and forty submarines, were accepted.^{clxvii} Finally it was decided that the two American pre-dreadnoughts could be utilised for the defence of the Saronic and the Thermaikos Gulfs, provided they were stationed behind the island of Fleves and the promontory of Karabournou respectively, and their fire be directed by naval aircraft.^{clxviii} Apparently, the British naval mission agreed with this in the short run.^{clxix}

Having settled the main lines of the Greek naval program the Venizelos Administration took steps towards reinforcing the Greek naval air arm. A new large hangar at Tatoi aerodrome, with a floor space of 60 by 40 meters was completed and a ground gunnery range was also constructed. The Tatoi aerodrome also doubled in size, and the technical buildings (workshops, bombing teacher hut, camera obscura hut, offices and stores) of the Phalerum Air Base further increased. Two "ATLAS" army co-operation aeroplanes were delivered from England and another ten of the same model were constructed at the Phalerum factory. Six "Horsley" day bombers also arrived from England and were installed in the new hangar at Tatoi. A Vickers Bygraves Bombing Teacher and a Camera Obscura for bombing instruction was also installed at Phalerum. Finally, the appointment of twenty eight new pilots and eight observer officers nearly doubled the number of flying personnel.^{clxx}

Developing the naval infrastructure of the country was also high in the agenda of Venizelos. Significantly, it was decided not to move to Scaramanga the Salamis Arsenal but equip it with completely modern machinery of all types and a new generator of German manufacture. A new refrigerating plant also of German manufacture, with ice boxes and cold room, was also completed, and big

developments in harbour, basin and jetty arrangements were undertaken. These developments improved berthing for ships, and facilitated fuelling and refitting. Submarine jetties were also constructed for berthing the new submarines, and the equipment of the submarine depot was completed.^{clxxi}

Replenishing the naval stores was hardly ignored by the Greek government. Ammunition and anti-aircraft guns for naval units and naval shore establishments were procured, the cable and wireless communication system of the Navy was updated and the stocks of oil fuel, and other necessary material were replenished. However, the procurement of torpedoes was somewhat eventful. An order for fifty torpedoes was originally placed with Messrs Whitehead.^{clxxii} The latter sold complicated engines to the Greeks and neglected expert instructions in their use, with the result that most of the torpedoes supplied were quickly rendered unserviceable. The firm eventually set out an expert who declared that they were nearly all useless but that he was not competent to put them in running order. The Greek Government asked Messrs Whitehead to take them all back and test them, but the request was refused on the ground that their Weymouth range was booked up. The whole trouble gave rise to loud complaints in Parliament.^{clxxiii} When a new tender for the procurement of torpedoes was invited, a French firm came close to securing it. However, the British Minister in Athens and the Head of the British naval mission to Greece intervened against this and it was eventually decided to place a trial order for six torpedoes each with Whitehead's and its French competitor.^{clxxiv}

The reinforcement of the Greek light fleet with new units was also taken up by the Venizelos Administration. After three years of indecision, tenders were invited for the procurement of two destroyers in summer 1929. At a time when the warship tonnage under construction in Britain was a seventh of the 1913 level,^{clxxv} the British feared lest the Greek tenders were given to Italian shipbuilders. The latter could offer excellent terms of payment because they were fully supported by the government and the banking system of Italy.^{clxxvi} Indeed, "Italian firms had always been mere adjuncts of the government."^{clxxvii} In an attempt to help the British shipbuilder to win the Greek naval order the Admiralty allowed them to make use of Admiralty hull and machinery designs in preparing their tenders.^{clxxviii}

The question of the Greek naval tender for destroyers was raised during Venizelos' visit to the Foreign Office in early August 1929. The Greek statesman professed his intention to give the order to a British shipbuilder provided that his offer was competitive.^{clxxix} A few days later Sir E. Phipps, the British delegate at the Hague Conference on Reparations raised again the issue with Venizelos who re-iterated his position that a competitive British offer would not be turned down. The Greek Prime Minister also added that if Greece was not given what she asked for at the conference, she could not proceed with any naval procurement, in an attempt to secure British support for her claim to higher annuities from the German Reparations.^{clxxx} In the sidelines of the Hague Conference British pressure upon Venizelos stepped up in an awkward manner. It was characteristically reported that "Everybody here is rather on edge and I find that the D.O.T. not knowing that I had already been directed to do so, instructed one of the Treasury people to speak to Venizelos about the destroyers. This he did after my interview with Venizelos, and was somewhat coldly received."^{clxxxi} Eventually, the British delegation supported the Greek claim at the Hague Conference on Reparations in August 1929, thus facilitating one of the greatest ever diplomatic victories of Venizelos;^{clxxxii} he secured for Greece the trebling of her income from war reparations while most other victorious countries saw drastic reductions in their income from that source.^{clxxxiii}

Notwithstanding the many British efforts to win the Greek naval order, two Greek destroyers were eventually ordered from the Italian shipbuilding firm *Odero* in October 1929^{clxxxiv} and another two from the same company in 1930.^{clxxxv} This provoked the ire of the First Sea Lord of the Admiralty;^{clxxxvi} he probably foresaw the fact that the Greek order to Italy, at a time when there was British Naval Mission in Athens, would

be used as evidence of the superiority of the Italian boats as compared with the British.^{clxxxvii} The Greeks were, according to Wardlow, “honestly anxious to obtain the best value for their money and they are not slow in these matters, and, whatever may be said, there is no doubt that the tenders are most minutely examined.”^{clxxxviii} It was therefore understandable that their order was placed with the *Odero* given that the Italian shipbuilder offered the lowest price and excellent performance and speed on paper, at least. It also without any reservation accepted the conditions and penalties laid down in the specification of the Greek Ministry of Marine, “which almost all other firms proposed to modify or render less onerous.”^{clxxxix} This was also acknowledged by British officials who spoke of “the extraordinarily good terms which the Greeks extracted”^{cx} out of *Odero*. They also attributed the British failure to secure the Greek naval order to the marketing inferiority of the local agents of the British shipbuilders.^{cxci} Lower labor, material and overhead shipbuilding costs in Italy was a further explanation for the latest misfortune of the British shipbuilders.^{cxcii} In fact, there were nineteen warships and four coast boats building for foreign powers in Italy in August 1930, at which time there was just one such order in progress in the UK – a destroyer for Yugoslavia.^{cxci}

It did not take long though before the four destroyers of the *Dardo* class that Greece procured from *Odero* proved as deficient as the Italian built destroyers that the Turkish Navy bought at the time.^{cxci} It then became obvious that their procurement was also politically motivated and reflected the contemporary rapprochement between Greece and Italy. This was a process which was initiated by Prime Minister Kafandaris and his Minister of Foreign Affairs Michalakopoulos, who governed Greece between 1926 and 1928.^{cxci} It was subsequently carried to its logical conclusion, namely the signing of a Graeco-Italian Treaty of Friendship and Arbitration in September 1928, at the beginning of Venizelos’ Premiership. The aforementioned treaty, alongside with the one that had been concluded between Italy and Turkey earlier the same year, could have led to a tripartite Italian-Greek-Turkish bloc that would strengthen the Italian position in the Eastern Mediterranean.

“But both Greece and Turkey were wary of the Italian dictator. In fact, Greece used her new tie with Italy to press Yugoslavia into settling the long-standing dispute over the free zone in Saloniki. In March 1929, Greece and Yugoslavia reached an agreement concerning the administration and operation of the free zone. This settlement was not a source of pleasure for Mussolini, who was interested in isolating Yugoslavia from her neighbors.”^{cxci} He was also disappointed by the outcome of the Greco-Turkish Treaty of Friendship, Neutrality, and Arbitration and the Greek-Turkish Naval Protocol which were signed in October 1930.^{cxci} The treaty settled several issues that had arisen between the two countries since 1923. On the other hand, the Naval Protocol, by cleverly insisting on monitoring rather than banning outright naval armaments, put an end to the naval armaments race between Greece and Turkey.^{cxci} It also found its corollary in the 1931 Soviet-Turkish Naval Protocol, marking the beginning of the naval holiday in the Aegean and the Black Sea that was to last until 1934.^{cxci}

The Greco-Turkish tie, once achieved, proved to be one of the strongest bulwarks of the status quo in the Balkans. Neither the Greek nor the Turkish Government was willing to allow itself to become the pawn of Mussolini’s expansionist strategy.^{cc} Greece was given time to strengthen her army,^{cci} bring the *Salamis* question into an agreeable conclusion,^{ccii} and implement a “flotilla navy” policy against the advice of the Greek Naval Staff that advocated the procurement of at least one pocket battleship.^{ccii} In summer 1931 the Greek naval programme was voted in, and its implementation was to take place between 1931 and 1940. It provided for the building of two flotillas of eight destroyers each, two flotilla leaders, a submarine layer, an oil tanker, a floating dock, the extension of the infrastructure of the Arsenal at Salamis, the procurement of mines and mine barrages, etc. It was also intended to develop a relatively strong air arm which would be supervised by the newly established Greek

Ministry of Air.^{cciv} No provision was made for the procurement of submarines since the accession of six French-built submarines to the Greek fleet was about to be completed.^{ccv}

Alas, debt-ridden Greece could not withstand the double shock of the Great Crash (1929) and the abandonment of the Gold Standard by Britain (1931). The Greek economy defaulted in the spring of 1932, despite persistent attempts to the contrary by the Venizelos Administration.^{ccvi} Between then and the outbreak of the Second World War Greece's access to international capital markets was interrupted.^{ccvii} The small number of Greek naval procurements in the early 1930s constituted all that was permitted by the default of Greece, the contemporary international monetary instability, the current movement for general disarmament,^{ccviii} and the failure to effect considerable economies inside the Greek Navy.^{ccix} Such was the economic crisis that Greece experienced at the time that she dispensed with the services of all foreign missions in the country, despite the Admiralty's modest reaction against this.^{ccx}

Greek naval policy and strategy in the decade that followed the Treaty of Lausanne proved flexible enough to move comfortably from its original capital ship proclivities to the mature acknowledgment of the merits of the "flotilla navy" thesis. This acknowledgement was, admittedly, reinforced by financial considerations and the counsels of successive British Naval Missions to Greece. The naval affairs of Greece were of some interest to the Great Mediterranean Naval Powers as attested by the concurrent competition of Britain, France and Italy for securing a substantial political or economic influence over them. The satisfactory record of the reorganizational and educational activities of the British naval missions to Greece confirmed the value of foreign naval assistance.

REFERENCES

ⁱ E.B. Potter and C.W. Nimitz, *Sea Power A Naval History*, Englewoods Cliffs, New Jersey, Prentice Hall, 1960, pp. 480-481

ⁱⁱ St. Roskill, *Naval Policy between the Wars. The Period of Anglo-American Antagonism 1919-1929*, London, Collins, 1968, p. 354

ⁱⁱⁱ L. R. Pratt, *East of Malta West Of Suez: Britain's Mediterranean Crisis 1936-1939*, Cambridge, Cambridge University Press, 1975, p. 9. A. Clapton, "Growing Respect: The Royal Navy and the Marine Nationale, 1918-39" edited by M. S. Alexander and W. J. Philpott, *Anglo-French Defence Relations between the Wars*, Basingstoke, Palgrave Macmillan, 2002, pp. 30-31

^{iv} J. Blatt, "The Parity that Meant Superiority: French Naval Policy towards Italy at the Washington Conference, 1921-1922, and Interwar French Foreign Policy", *French Historical Studies*, vol. 12 n. 2, pp. 223-248

^v L. Sondhaus, *Navies of Europe 1815-2002*, London, Pearson Educated Limited, 2002, p. 209

^{vi} W.I. Shorrock, *From Ally to Enemy. The Enigma of Fascist Italy in French Diplomacy*, Kent, Ohio, The Kent State University Press, c1988, pp. 58-59. A. Cassels, *Musolini's Early Diplomacy*, Princeton, Princeton University Press, 1970, pp. ix-xi. R. M. Salerno, "The French Navy and the Appeasement of Italy, 1937-9", *The English Historical Review*, 112:445 (1997) p. 45

^{vii} Pratt, *East of Malta West Of Suez*, p. 13

^{viii} *Ibid.*, pp. 13-16. Salerno, "The French Navy and the Appeasement of Italy", p. 45

^{ix} Z., Fotakis, "The Kelly Naval Mission to Greece, May 1919–October 1921", *Byzantine and Modern Greek Studies*, 3, 2 (2006), pp. 185–188, 191-194. Information on the work of the Smith Naval Mission to Greece (November 1921-June 1923) can be found in T.N.A., ADM. 1/8648/228, Smith to Bentinck, Athens, 30 December 1922 & Bentinck to Curzon, Athens, 27 April 1923

^x T.N.A., ADM. 1/8648/228, Bentinck to Curzon, Athens 27 April 1923. T.N.A., ADM. 1/8756/157, p. 3. St., Charatsis, *1023 Axiomatikoi kai 22 Kinimata*, Athens, 1985, vol. 1, pp.

103-123. G. Dafnis, *I Hellas metaxi dio Polemon*, vol. 1, Athens, Ikaros, 1974, pp. 252-253, 258-260

^{xi} E.L.I.A. (Elliniko Logotechniko kai Istoriko Archeio) Oikonomou-Gouras MSS, Gerontas to Voulgaris, 24 July 1924

^{xii} Roskill, *Naval Policy between the Wars*, p. 322. E. J. Grove, "Richmond and Arms Control" in *MAHAN IS NOT ENOUGH. The Proceedings of a Conference on the Works of Sir Julian Corbett and Admiral Sir Herbert Richmond*, edited by J. Goldrick & J.B. Hattendorf, Newport, Rhode Island, Naval War College Press, 1993, p. 233

^{xiii} I.P.E.X., (Ipourgeio Exoterikon) 1923, File 8/5, Voulgaris to Greek Ministry of Foreign Affairs, Athens, 20 July 1923.

^{xiv} Hekdotike Athenon, *Historia tou Hellenikou Ethnous. Neoteris Hellenismos, apo 1913 os 1941*, Athens, 1978, pp. 300-301

^{xv} A.C.M., (Archives Centrales de la Marine) BB7/143, Bulletin d'Informations Militaires n. 20, Chapitre V, Athenes, 27 Août 1923

^{xvi} A.C.M., BB7/143, Bulletin d'Informations Militaires n. 7, Chapitre II, Athenes, 3 Avril 1922

^{xvii} E.L.I.A. Oikonomou Gouras MSS, Gerontas to Voulgaris, 24 July 1924. T.N.A., ADM 1/8648/228, Smith to Bentinck, Athens, 30 December 1922

^{xviii} The proceedings of the Greek delegation there is comprehensively treated in H. Psomiades *The Eastern question : the last phase : a study in Greek-Turkish diplomacy*, Thessaloniki, Institute for Balkan Studies, 1968

^{xix} This was imposed upon her after the resumption of the Greek Throne by the germanophile King Constantine in late 1920, Z. Fotakis, "He Bretaniki Naftiki Apostoli Kelly (1919-1921). To Istoriko Plaisio kai he Drasi tis sto Helleniko Naftiko" *Naftiki Epitheorisi*, 549 (2004), p. 240. IPEX, File 1923/88-5, London Legation to the Greek Ministry of Foreign Affairs, London, 27 August 1923

^{xx} J. Barros, *The Corfu Incident of 1923. Mussolini and the League of Nations*, Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1965

^{xxi} M. Rimanelli, *Italy between Europe and the Mediterranean: diplomacy and naval strategy from unification to NATO, 1800s-2000*, New York, Washington, etc., Peter Lang, 1997, pp. 516-517

^{xxii} T.N.A. (The National Archives), F.O. (Foreign Office) 286/887, Naval Attache to Bentinck, Rome, 31 December 1923, Enclosure, Annual Report on the Greek Navy December 1923.

^{xxiii} A. Despotopoulos, *I Polemiki Proparaskevi tis Elladas 1923-1940*, Athens, Akademia Athinon, 1998, p. 35

^{xxiv} T.N.A., F.O. 286/887, Naval Attache to Bentinck, Rome, 31 December 1923, Enclosure Annual Report on the Greek Navy December 1923.

^{xxv} G. Mezeviris, *Tessares Dekatirides eis tin Hipiresian tou Vasilikou Naftikou*, Athens, 1971, p. 82

^{xxvi} *Ibid.*, p. 94

^{xxvii} Rimanelli, *Italy between Europe and the Mediterranean*, p. 520

^{xxviii} *Ibid.*, p. 531

^{xxix} Guvenc, S. & Barlas, D., "Ataturk's Navy: Determinants of Turkish Naval Policy, 1923-38", *The Journal of Strategic Studies*, vol. 26, n. 1, p. 10

^{xxx} *Ibid.*, p.9

^{xxxi} N. Petropoulos, *Anamniseis kai Skepseis enos Paliou Naftikou. Meros A, he Periodos tou Mesopolemou, 1923-1940*, Athens, 1966, pp. 21-22. Mezeviris, *Tessares Dekatirides eis tin Hipiresian tou Vasilikou Naftikou*, p. 94

^{xxxii} E.L.I.A., Delagrammatikas MSS, File 1, Avenant au contrat du 28/11/1924, Gouvernement Hellenique, Societe Anonyme des Ateliers et Chantier de la Loire et Société Anonyme des Chantiers Naval Français

^{xxxiii} O. Papanikolaou, "To Naftiko mas meta ton Polemo", *Nautiki Epitheorisis*, (January-February 1923) p. 97

^{xxxiv} T.N.A., ADM. (Admiralty) 116/2264, Cheetham to Macdonald, Athens, 22 September 1924

^{xxxv} *Ibid.*

^{xxxvi} T.N.A., ADM. 116/2264, M. 01696/24, Greek Naval Mission, London, 4 October 1924. In peacetime, the Greek seas were hardly of lesser importance. The large scale exercise in the southern Aegean, which was carried out by the British Mediterranean Fleet under Admiral Sir Roger Keyes during the summer cruise of 1925, in order to find out the risks to which the British Main Fleet would be exposed when passing through the southern part of the Malacca Strait on its way to relieve Singapore

from possible Japanese invaders, is a case in point. Roskill, *Naval Policy between the Wars*, pp. 537-538

^{xxxvii} Macdonald's decision in March 1924 to end construction work at the Singapore naval base constitutes a telling example of this. J. Neidpath, *The Singapore Naval Base and the Defence of Britain's Eastern Empire, 1919-1941*, Oxford, Clarendon Press, 1981, pp. 66-69. See also D.A. Baugh, "Confusions and Constraints: The Navy and British Defense Planning, 1919-1939" in *Naval Power in the Twentieth Century*, edited by N.A.M. Rodger, Annapolis, Md., Naval Institute Press, 1996, p. 110

^{xxxviii} T.N.A., ADM. 116/2264, Memorandum circulated to the Cabinet by Ramsay MacDonald, London, 30 September 1924

^{xxxix} T.N.A., ADM. 116/2264, Greek Naval Mission. Changes Proposed in contract of 1922 to adapt it to circumstances of present mission

^{xl} B. D. Hunt, "Richmond and the Education of the Royal Navy", in *MAHAN IS NOT ENOUGH. The Proceedings of a Conference on the Works of Sir Julian Corbett and Admiral Sir Herbert Richmond*, edited by J. Goldrick and J.B. Hattendorf, Newport, Rhode Island, Naval War College Press, 1993, p. 71

^{xli} T.N.A., ADM. 116/2264, Enclosure V to British Naval Mission Letter no. 1A of 14th February 1925, pp. 8-9

^{xlii} T.N.A., ADM. 116/2264, Enclosure III to British Naval Mission Letter no. 1A of 14th February 1925, pp. 8-10

^{xliii} T.N.A., ADM. 116/2264, Enclosure V to British Naval Mission Letter no. 1A of 14th February 1925, pp. 3-4

^{xliv} T.N.A., ADM. 116/2264, Enclosure VI to British Naval Mission Letter no. 1A of 14th February 1925, pp. 1, 4-8

^{xlv} T.N.A., ADM. 116/2264, Enclosure IV to British Naval Mission Letter no. 1A of 14th February 1925

^{xlvi} T.N.A., ADM. 116/2264, Enclosure V to British Naval Mission Letter no. 1A of 14th February 1925, pp. 6, 10-13

^{xlvii} T.N.A., ADM. 116/2264, Enclosure VII to British Naval Mission Letter no. 1A of 14th February 1925

^{xlviii} T.N.A., ADM. 116/2264, Enclosure IX to British Naval Mission Letter no. 1A of 14th February 1925

^{xlix} T.N.A., ADM. 116/2264, Enclosure V to British Naval Mission Letter no. 1A of 14th February 1925, pp. 1-2

^l T.N.A., ADM. 116/2264, Enclosure X to British Naval Mission Letter no. 1A of 14th February 1925, pp. 2-5

^{li} T.N.A., ADM. 116/2264, Enclosure I to British Naval Mission Letter no. 1A of 14th February 1925, pp. 2-6

^{lii} *Ibid.*, p. 6

^{liii} *Ibid.*, p. 7 & Enclosure III to British Naval Mission Letter no. 1A of 14th February 1925, p. 7

^{liv} T.N.A., ADM. 116/2264, Enclosure I to British Naval Mission Letter no. 1A of 14th February 1925, pp. 8, 10-13

^{lv} *Ibid.*, p. 14

^{lvi} *Ibid.*, pp. 13-17

^{lvii} *Ibid.*, pp. 17-18

^{lviii} *Ibid.*, pp. 18-20

^{lix} *Ibid.*, p. 20

^{lx} *Ibid.*, pp. 21-24

^{lxi} T.N.A., ADM., 116/2264, Enclosure X to British Naval Mission Letter no. 1A of 14th February 1925, pp. 7-8

^{lxii} *Ibid.*, p. 8

^{lxiii} T.N.A., ADM. 116/2264, Enclosure I to British Naval Mission Letter no. 1A of 14th February 1925, pp. 24-27

^{lxiv} *Ibid.*, pp. 29-30

^{lxv} T.N.A., ADM 116/2264, Enclosure to Letter n. 30 c from Webb dated 24th December 1924 – Memorandum on the Greek Naval Air Service

^{lxvi} T.N.A., ADM. 116/2264, Enclosure II to British Naval Mission Letter n. 1A of 14th February 1925, pp. 1-8

- lxvii T.N.A., ADM. 116/2264, Enclosure I to British Naval Mission Letter no. 1A of 14th February 1925, pp. 28-29
- lxviii T.N.A., ADM 116/2264, Enclosure to Letter n. 30 c from Webb dated 24th December 1924 – Memorandum on the Greek Naval Air Service
- lxix T.N.A., ADM 116/2264, Enclosure to Letter n. 13 D from British Naval Mission dated 29th December 1924, Memorandum on Dockyards
- lxx T.N.A., ADM 116/2264, Webb to the Secretary of the Admiralty, Athens, 24 December 1924
- lxxi T.N.A., ADM 116/2264, Enclosure to Letter n. 13 D from British Naval Mission dated 29th December 1924, Memorandum on Dockyards, p. 6 & Enclosure III to British Naval Mission Letter no. 1A of 14th February 1925, pp. 1-3. The Costing System was an elaborate way of accounting specifically designed to serve the financial operation of the Salamis Arsenal.
- lxxii T.N.A., ADM 116/2264, Webb to the Admiralty, Athens, 8 February 1925
- lxxiii Ibid.
- lxxiv E. Andrade, “Submarine Policy in the United States Navy, 1919-1941”, *Military Affairs*, vol. 35, n.2, p. 53
- lxxv T.N.A., ADM. 116/2298, Webb to the Secretary of the Admiralty, Athens, 13 March 1925. A concise account of the ensuing crisis in Greek-Turkish relations because of the deportation of the Ecumenical Patriarch Constantinos VI by the Turkish authorities in January 1925 can be found in Dafnis, *I Hellas metaxi dio Polemon*, vol. 1, pp. 271
- lxxvi T.N.A., ADM. 116/2298, Townsend to the Secretary of the Admiralty, 22 May 1925
- lxxvii T.N.A., ADM., 116/2264, Webb to the Secretary of the Admiralty, Athens, 8 January 1925
- lxxviii T.N.A., ADM., 116/2264, Webb to the Secretary of the Admiralty, Athens, 8 February 1925
- lxxix T.N.A., ADM., 116/2264, Niemeyer to Undersecretary of State, 4 February 1925
- lxxx C., Svolopoulos, *He Helleniki Exoteriki Politiki 1900-1945*, Athens, Estia, 1993, p. 196
- lxxxi T.N.A., ADM. 116/2298, Minute 0368 by Hotham D.N.I., 25 March 1925 & Cheetham to Foreign Office, Athens, 27 March 1925
- lxxxii T.N.A., ADM. 116/2298, Cheetham to Chamberlain, Athens, 1 April 1925
- lxxxiii T.N.A., ADM. 116/2298, Draft, Admiralty to Foreign Office, 4 November 1925
- lxxxiv T.N.A., ADM. 116/2298, Ellis to Chamberlain, 8 April 1925
- lxxxv T.N.A., ADM. 116/2298, Townsend to the Secretary of the Admiralty, 22 May 1925
- lxxxvi T.N.A., ADM. 116/2298, Townsend to the Secretary of the Admiralty, Athens 9 July 1925 & Charles Ellis to Baldwin, London, 27 July 1925 & Rentis to Cheetham, Athens, 9 July 1925
- lxxxvii T.N.A., ADM. 116/2298, Minute by Hotham DNI on M. 1877/25, London 11 May 1925. Ibid., Lampson to the Secretary of the Admiralty 28 July 1925 & Note by First Lord of the Admiralty, 20 July 1925
- lxxxviii T.N.A., ADM. 116/2298, Memorandum by the Department of Overseas Trade, August 1925
- lxxxix T.N.A., ADM. 116/2298, Ross to the Undersecretary of State, 4 September 1925
- xc T.N.A., ADM. 116/2298, Lampson to the Secretary of the Admiralty, 12 August 1925
- xci T.N.A., ADM. 116/2298, Foreign Office to Keeling, 22 September 1922
- xcii T.N.A., ADM. 116/2298, Ross to the Under Secretary of State, 4 September 1925
- xciii T.N.A., ADM. 116/2298, Webb to the Minister of Marine, Athens, 22 January 1925
- xciv T.N.A., ADM. 116/2298, Niemeyer to Baddeley, London 26 October 1925
- xcv T.N.A., ADM 116/2298, British Naval Mission to Admiralty, Athens, 24 October 1925
- xcvi C. Sourvinos, ‘To Programma Exoplismou tou Polemikou Nautikou, 1824–1989’, *Nautike Epitheoresis*, 459 (1989), p. 214
- xcvii T.N.A., ADM. 116/2298, Cheetham to Foreign Office, London, 12 October 1925. The steady and fairly rapid devaluation of the franc between the end of First World War and 1926 accounts, to some extent, for the commercial attractiveness of French naval units. Mezeviris, *Tessarisi Dekatirides eis tin ipiresian tou Vasilikou Naftikou*, p. 71 & P. Kennedy, *The Rise and Fall of the Great Powers. Economic Change and Military Conflict from 1500 to 2000*, New York, Random House, 1987, p. 310
- xcviii T.N.A., ADM. 116/2298, Cheetham to Foreign Office, London, 12 October 1925
- xcix T.N.A., ADM. 116/2298, Enclosure in Athens dispatch no. 75 of February 18th 1926, Townsend, Athens, 12 February 1926
- c Sourvinos, ‘To Programma Exoplismou tou Polemikou Nautikou, 1824–1989’, p. 214
- ci E. Kavadias, *O Naftikos Polemos tou 40*, Athens, Pysos, 1950, p. 33
- cii Petropoulos, *Anamniseis kai Skepseis enos Paliou Naftikou*, p. 38
- ciii Ibid., pp. 39

-
- ^{civ} G.A.K., (Genika Archeia tou Kratous) Metaxas MSS, File 121, Sinoptikon Ipomnima epi tou Naftikou Programatos, 1935
- ^{cv} Kavadias, *O Naftikos Polemos tou 40*, pp. 33-34
- ^{cvi} E.S.B., (Efimeris Sizitiseon tis Voulis) Second Period, Second Synod, Session 37, 14 February 1930, Address of Rediadis, p. 645
- ^{cvi} E.S.B., Fourth Constitutional Assembly, Session 139, 4 February 1925, Address of S. Zervos, vol. 4, pp. 166-168
- ^{cvi} T.N.A., F.O. 286/951, Cheetham to Chamberlain, Athens, 19 February 1926
- ^{cix} T.N.A., F.O. 286/951, Cheetham to Chamberlain, Athens, 16 May 1926
- ^{cx} T.N.A., ADM. 116/2298, Cheetham, Athens, 3 March 1926
- ^{cx} T.N.A., F.O. 286/972, Townsend to the Secretary of the Admiralty, Athens, 17 March 1926
- ^{cxii} T.N.A., F.O. 286/972, Smith, 8 March 1926
- ^{cxiii} T.N.A., F.O. 286/951, Report by Lord Jellicoe, Isle of Wight, 14 January 1926
- ^{cxiv} Mezeviris, *Tessares Dekatirides eis tin Hipiresian tou Vasilikou Naftikou*, p. 95
- ^{cxv} T.N.A., F.O. 286/1050, Half-Yearly Report from British Naval Mission to the Director of Naval Intelligence, Admiralty, Athens, 5 December 1929. Although this source dates from the end of our period it demonstrates weaknesses that were valid throughout the 1920s .
- ^{cxvi} T.N.A., F.O. 286/951, Caclamanos to Chamberlain, London, 9 June 1926. Mezeviris, *Tessares Dekatirides eis tin Hipiresian tou Vasilikou Naftikou*, p. 108.
- ^{cxvii} T.N.A., F.O. 286/951, Townsend to the Secretary of the Admiralty, Athens, 18 February 1926
- ^{cxviii} T.N.A., ADM. 1/8756/157, p. 4
- ^{cxix} T.N.A., ADM. 116/2504, Foreign Office to Cheetham, 23 October 1926
- ^{cx} T.N.A., ADM. 1/8756/157, p. 4
- ^{cx} On the occasion of its departure from Greece, Lorraine, the British Minister in Athens, characteristically wrote that "the late mission won golden opinions in all quarters". T.N.A., F.O. 371/13648, C4876, Lorraine to Foreign Office, Athens, 14 June 1929
- ^{cxii} E.S.B., Second Period, Second Synod, Session 58, 24 March 1930, Address of Vasiliadis, p. 368
- ^{cxiii} T.N.A., F.O. 286/988, Turle to the Secretary of the Admiralty, Athens, 9 October 1927.
- ^{cxiv} Kavadias, *O Naftikos Polemos tou 40*, pp. 42-43. Benakion, Venizelos MSS, File 88, Panas to Minister of Marine, Athens, 12 February 1929
- ^{cxv} E.S.B., Second Period, Second Synod, Session 37, 14 February 1930, Address of Rediadis, p. 645
- ^{cxvi} T.N.A., F.O. 286/999, Loraine to Chamberlain, Athens, 30 November 1927.
- ^{cxvii} D. Phocas, *Ekthesis epi tis Draseos tou B. Nautikou kata ton Polemon 1940-1944*, Athens, Ekdoseis, Istorikis Ipiresias Basilikou Naftikou, 1953, vol. 1, pp. 12-13. Loundras MSS, Loundras to the Chief of the Greek Naval Staff, Athens, 11 August 1927
- ^{cxviii} Loundras MSS, Loundras to the Chief of the Greek Naval Staff, Athens, 11 August 1927. T.N.A., F.O. 286/988, Turle to the Secretary of the Admiralty, Athens, 9 October 1927
- ^{cxix} E.S.B., Second Period, Second Synod, Session 37, 14 February 1930, Address of Botsaris, p. 642
- ^{cx} St. Roskill, *Naval Policy between the Wars. The Period of Reluctant Rearmament 1930-1939*, London, Collins, 1976, pp. 189-190
- ^{cx} T. N. A., F.O. 286/1050, Half-Yearly Report from British Naval Mission, Lyon to the Director of Naval Intelligence, Admiralty, Athens, 5 December 1929, p. 1
- ^{cxii} Captain Lyon had a staff of seven officers at his disposal, including two Royal Air Force officers. T.N.A., ADM 1/8756/157, p.4. The contract of his mission followed closely the lines of the Turle one. T.N.A., F.O. 371/13648, C1719 Loraine to Foreign Office, Athens, 8 March 1929
- ^{cxiii} T. N. A., F.O. 286/1050, Half-Yearly Report from British Naval Mission, Lyon to the Director of Naval Intelligence, Admiralty, Athens, 5 December 1929, pp. 1-2
- ^{cxiv} Ibid, p. 3
- ^{cxv} Ibid, p. 6
- ^{cxvi} Ibid, pp. 13-14
- ^{cxvii} Ibid, p. 4
- ^{cxviii} E.S.B., Second Period, Second Synod, Session 37, 14 February 1930, Address of Botsaris, p. 641
- ^{cxix} Ibid., p. 642

-
- cxl Benakion, Venizelos MSS, File 88, Panas to Minister of Marine, Athens, 12 February 1929
- cxli Ibid.
- cxlii T. N. A., F.O. 286/1050, Half-Yearly Report from British Naval Mission, Lyon to the Director of Naval Intelligence, Admiralty, Athens, 5 December 1929, p. 5
- cxliii E.S.B., Second Period, Second Synod, Session 37, 14 February 1930, Address of Botsaris, p. 642. E.S.B. Second Extraordinary Period, Session 6, 11 July 1929, Address of Botsaris, p. 142
- cxliv T. N. A., F.O. 286/1050, Half-Yearly Report from British Naval Mission, Lyon to the Director of Naval Intelligence, Admiralty, Athens, 5 December 1929, p. 8
- cxlv Ibid., p. 9
- cxlvi Ibid, p. 12
- cxlvii Ibid, p. 13
- cxlviii Svolopoulos, *He Helleniki Exoteriki Politiki 1900-1945*, p. 212
- cxlix Petropoulos, *Anamniseis enos Paliou Nautikou*, pp. 22-28. T.N.A., F.O. 371/13648, C4880, Lorrain to Foreign Office, Athens 24 June 1929 & C3354, Harvey to Henderson, Athens, 13 November 1929 & C8693, Harvey to Foreign Office, Athens, 14 November 1929
- cl T. N. A., F.O. 371/13648, C8693, Harvey to Foreign Office, Athens, 14 November 1929. Harvey also spoke highly of the "really great efforts which M. Venizelos has made himself to improve the financial position of his country" T. N. A., F.O. 371/13648, Harvey to Henderson, Athens, 13 November 1929
- cli T. N. A., F.O. 371/13648, , C 5295, Foreign Office to Arthur Henderson, 5 July 1929
- clii Guvenc, & Barlas, "Ataturk's Navy", p. 19
- cliii Ibid., pp. 16-17
- cliv T. N. A., F.O. 371/13648, C7391, Commander-in-Chief, Mediterranean Station to Secretary of the Admiralty, Malta, 22 August 1929. Eleftherai, a port near Cavalla, was abandoned as the point of concentration of the Greek mobilization on account of its vulnerability to Turkish naval harassment, owing to its proximity to the Dardanelles. E.S.B., Second Period, Second Synod, Session 34, 10 February 1930, Address of Venizelos, p. 554
- clv E.S.B., Second Period, Second Synod, Session 34, 10 February 1930, Address of Venizelos, p. 555-559
- clvi Benakion, Venizelos MSS, File 87, Argyropoulos to Venizelos, Athens, 18 October 1928
- clvii Benakion, Venizelos MSS, Sigrisis machitikis isxios: A) Thorikton Kilkis kai Lemnos kai evdromou machis Javouz; b) Thoriktu Salamis kai Evdromou Machis Javouz, Athens, 17 October 1928
- clviii E.S.B., Second Period, Second Synod, Session 41, 14 February 1930, Address of Stratos, p. 722
- clix Ibid., p. 729
- clx Roskill, *Naval Policy between the Wars. The Period of Anglo-American Antagonism 1919-1929*, p. 533
- clxi Kavadias, *O Naftikos Polemos tou 40*, p. 574
- clxii Benakion, Venizelos MSS, File 87, Sigrisis machitikis isxios: A) Thorikton Kilkis kai Lemnos kai evdromou machis Javouz; b) Thoriktu Salamis kai Evdromou Machis Javouz, Athens, 17 October 1928
- clxiii Benakion, Venizelos MSS, File 90, Praktikon, Athens, 20 December 1929. E.S.B., Second Period, Second Synod, Session 37, 14 February 1930, Address of Botsaris, p. 641
- clxiv E.S.B., Second Period, Second Synod, Session 34, 10 February 1930, Address of Venizelos, pp. 555-559
- clxv Benakion, Venizelos MSS, File 89, Kolialexis to Venizelos, Athens, 7 June 1929. T.N.A., F.O. 286/999, Lorraine to Chamberlain, Athens, 30 November 1927.
- clxvi E.S.B., Second Period, Second Synod, Session 37, 14 February 1930, Address of Rediadis, p. 642
- clxvii E.S.B., Second Period, Second Synod, Session 34, 10 February 1930, Address of Venizelos, p. 559. This naval program was advocated by the Greek Naval Staff who it was forced to withdraw it, owing to the implicit threat of Venizelos that he would re-install Kolialexis in the Active List and appoint him as Chief of the Naval Staff. Petropoulos, *Anamniseis kai Skepseis enos Paliou Naftikou*, pp. 26-27
- clxviii E.S.B., Second Period, Second Synod, Session 34, 10 February 1930, Address of Venizelos, p. 557-558

- clxix Efimeris ton Sizitiseon tis Gerousias, Third Synod, Session 111, 6 July 1931, address of Venizelos, p. 1446
- clxx T.N.A., F.O. 286/1050, Half-Yearly Report from British Naval Mission to the Director of Naval Intelligence, Admiralty, Athens, 5 December 1929, pp. 6-7
- clxxi Ibid., p. 10
- clxxii E.S.B., Second Period, Second Synod, Session 37, 14 February 1930, Address of Botsaris, pp. 640-641
- clxxiii T.N.A., F.O. 371/14379, C1133, Ramsay to Henderson, Athens, 3 January 1930
- clxxiv T.N.A., F.O. 371/14379, C4703, Ramsay to Foreign Office, Athens, 14 June 1930.
- clxxv G.A.H. Gordon, *British Seapower and procurement between the Wars: a reappraisal of rearmament*, Annapolis, Naval Institute Press, 1988, p. 77
- clxxvi T. N. A., F.O. 371/13648, C4969, Loraine to Foreign Office, Athens, 5 July 1929
- clxxvii Th. Ropp, "The Modern Italian Navy. II Since 1900", *Military Affairs*, vol. 5, n. 2, p. 108
- clxxviii T. N. A., F.O. 371/13648, C5030, Naval Staff, Intelligence Division Admiralty, 5 July 1929
- clxxix T. N. A., F.O. 371/13648, C5877/14/19, Sargent to Harvey, 7 August 1929
- clxxx T. N. A., F.O. 371/13648, C6210/14/19, Sargent to the Managing Director of Vickers-Armstrong, August 1929
- clxxxi T. N. A., F.O. 371/13648, C6471/5000/19, Phipps to Sargent, The Hague, 16 August 1929
- clxxxii T. N. A., F.O. 371/13648, C7857, Dawson to Sargent, London 10 October 1929
- clxxxiii Dafnis, *I Hellas metaxi dio Polemon*, vol. 2, pp. 71-75
- clxxxiv T. N. A., F.O. 371/13648, C7549, Harvey to Foreign Office, Athens, 3 October 1929
- clxxxv T. N. A., F.O. 371/14379, C5862, Ramsay to Henderson, Athens, 16 July 1930
- clxxxvi T. N. A., F.O. 371/13648, C7701, Department of Overseas Trade to Foreign Office, 4 October 1929
- clxxxvii T. N. A., F.O. 371/13648, Yarrow Co Ltd to Foreign Office, Glasgow, 18 December 1929
- clxxxviii T.N.A., F.O. 371/15230, Memorandum by Commander Mark Wardlow, Athens, 7 January 1931
- clxxxix T. N. A., F.O. 371/13648, C7714, Note by the Greek Government, Athens, 9 October 1929
- cx c T. N. A., F.O. 371/13648, C7857, Dawson to Sargent, 10 October 1929
- cxci Ibid.
- cxcii T. N. A., F.O. 371/13648, C3354, Thornycroft to D.O.T, 19 November 1929 & T.N.A., F.O. 371/14379, C185, Naval Attache Rome to Sir Ronald Graham HM Ambassador Rome, January 1930
- cxciij Gordon, *British Seapower and procurement between the Wars*, p. 91
- cxciiv T.N.A., F.O. 371/15230, C6296, Naval Staff Intelligence Division Admiralty, to Foreign Office London, 12 August 1931; Kavadias, *O Naftikos Polemos tou 40*, p. 183; Guvenc, & Barlas, "Ataturk's Navy", pp. 19-20
- cxci v Svolopoulos, *He Helleniki Exoteriki Politiki 1900-1945*, pp. 208-210
- cxci vi L. S. Stavrianos, *The Balkans since 1453*, London, Hurst and Company, 2001, p.736
- cxci vii Ibid.
- cxci viii Xatzivassileiou, E., *O Eleftherios Venizelos, he hellenotourkike prosegise kai to provlima tis asfalias sta Valkania, 1928-1931*, Thessaloniki, Institute for Balkan Studies, 1999, pp. 86-98
- cxci x Guvenc, & Barlas, "Ataturk's Navy", pp. 16-17
- cc Stavrianos, *The Balkans since 1453*, p. 736. Dafnis, *I Hellas metaxi dio Polemon*, pp. 61-62
- cci Svolopoulos, *He Helleniki Exoteriki Politiki 1900-1945*, p. 225
- ccii Mezeviris, *Tessares Dekatirides eis tin Ipresian tou Vasilikou Naftikou*, pp. 98-99
- cciii T.N.A., F.O. 371/14379, C9206 Ramsay to Sargent, Athens, 6 December 1930. Influential senator and former naval person Ginis subsequently advocated the procurement of three pocket battleships by Greece. Efimeris ton Sizitiseon tis Gerousias, Third Synod, Session 111, 6 July 1931, address of Ginis, p. 1442
- cciv G.A.K., Metaxas MSS, File 121, Sinoptikon Ipomnima epi tou Naftikou Programatos, 1935; T.N.A., F.O. 371/13648, C7391, C-in-C Mediterranean Station to Secretary of the Admiralty, Malta, 22 August 1929
- ccv Sourvinos, 'To Programma Exoplismou tou Polemikou Nautikou, 1824-1989', p. 214
- ccvi Ekdotiki Athinon, *Historia tou Hellenikoy Ethnous: Neoterou Hellenismos apo to 1913 os to 1941*, Athens, 1978, pp. 328-331

-
- ^{ccvii} N. Pantelakis, *Dimosia Dania*, Athens, Morfotiko Idrima Ethnikis Trapezis, 1995, pp. 77-78
- ^{ccviii} C. Karamanlis, *O Eleftherios Venizelos kai oi Exoterikes mas Scheseis, 1928-1932*, Athens, Helliniki Euroekdotiki, 1986, p. 215
- ^{ccix} G.A.K., Metaxas MSS, File 121, Isigitiki Ekthesis Sxediou Nomou peri ekteleseos Naftikou Programatos, 1935
- ^{ccx} T.N.A. F.O. 371/15969, C3751, Comment of Balfour 10 May 1932 & C3905 Ramsay to Foreign Office, Athens, 15 May 1932