

NAUSIVIOS CHORA

A Journal in Naval Sciences and Technology



Volume 4/2012

NAUSIVIOS CHORA

A Journal in Naval Sciences and Technology



Volume 4/2012

ΝΑΥΣΙΒΙΟΣ ΧΩΡΑ

Περιοδική Έκδοση Ναυτικών Επιστημών



Τεύχος 4/2012

«ΝΑΥΣΙΒΙΟΣ ΧΩΡΑ» 2012
Περιοδική Έκδοση Ναυτικών Επιστημών
Σχολή Ναυτικών Δοκίμων,
Τέρμα Χατζηκυριακού, Χατζηκυριάκειο,
Πειραιάς 18539, Ελλάδα
<http://nausivios.snd.edu.gr>
ΤΗΛ+302104581382/FAX+302104581604
nausivios@snd.edu.gr

“NAUSIVIOS CHORA” 2012
Journal in Naval Sciences and Technology
Hellenic Naval Academy
Hatzikiriakio, 18539 Piraeus, Greece
<http://nausivios.snd.edu.gr>
Tel +302104581382/fax +302104581604
nausivios@snd.edu.gr

Copyright © Σχολή Ναυτικών Δοκίμων 2012
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 © 2012: Σχολή Ναυτικών Δοκίμων

TABLE OF CONTENTS

ΧΑΙΡΕΤΙΣΜΟΣ ΔΙΟΙΚΗΤΗ ΣΧΟΛΗΣ ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ	1
WELCOME ADDRESS BY THE COMMANDANT OF THE HELLENIC NAVAL ACADEMY.....	1
INTERNATIONAL ADVISORY COMMITTEE	2
EDITORIAL BOARD	2
EDITOR'S NOTE	3
ACKNOWLEDGMENTS	4
PART A: MECHANICAL AND MARINE ENGINEERING	5
A COMPARATIVE STUDY ON THE SEAKEEPING OPERABILITY PERFORMANCE OF NAVAL COMBATANTS <i>G. Grigoropoulos and G. Petropoulos</i>	6
COMPARATIVE EVALUATION OF THE EFFECTS OF INTAKE AIR NITROGEN-ENRICHMENT AND EGR ON THE OPERATIONAL AND ENVIRONMENTAL BEHAVIOR OF A SI HEAVY DUTY NATURAL GAS ENGINE <i>R. Papagiannakis and Th. Zannis</i>	18
FEASIBILITY ANALYSIS ON A STEAM RANKINE CYCLE TO RECOVER HEAT FROM A GAS TURBINE USED ON A NAVAL VESSEL <i>E. Pariotis, I. Katsanis and I. Roumeliotis</i>	35
THE DESIGN AND DEVELOPMENT OF A MECHANICAL FAULTS SIMULATION TEST RIG FOR EDUCATIONAL PURPOSES <i>G. Doumouras, N. Aretakis, I. Roumeliotis, K. Mathioudakis</i>	57
FORENSIC ENGINEERING METHODOLOGY TO ASSESS THE MAINTENANCE, REPAIR AND OVERHAUL (MRO) PROCEDURES FOR GAS GENERATOR TURBINE COOLING PLATES <i>D. Karalis and N. Melanitis</i>	67
PART B: ELECTRICAL ENGINEERING AND COMPUTER SCIENCE	79
AVAILABILITY INVESTIGATION OF FREE SPACE OPTICAL LINKS WITH TIME DIVERSITY FOR TURBULENCE CHANNELS MODELED WITH THE K-DISTRIBUTION <i>A. Stassinakis, G. Chronopoulos and H. Nistazakis</i>	80
MAXIMUM EFFECTIVE BIT RATE ESTIMATION FOR WIRELESS OPTICAL COMMUNICATION LINKS WITH TIME- DIVERSITY OVER STRONG TURBULENCE CHANNELS <i>A. Tsigopoulos</i>	88
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΗΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΣΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΕΝΙΣΧΥΤΗ ΧΑΜΗΛΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΥΡΕΙΑΣ ΖΩΝΗΣ 3.1-10.6 GHz <i>N. Χατζηθαθανασίου και E. Καραγιάννη</i>	86
IMPLEMENTATION LIMITATIONS OF STANAG 1008 DESIGN CONSTRAINTS FOR PULSED LOADS <i>G. Tsekouras, F. Kanellos, J. Prousalidis and I. Hatzilau</i>	110
PART C: NATURAL SCIENCES AND MATHEMATICS	136
ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΕΛΛΕΙΨΟΕΙΔΟΥΣ ΕΚ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ ΣΕ ΣΦΑΙΡΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ <i>A. Παλληκάρης</i>	137
FOUNDATIONS OF NEWTONIAN DYNAMICS: AN AXIOMATIC APPROACH FOR THE THINKING STUDENT <i>C. Papachristou</i>	153
A STUDY ON RADIOACTIVE SOURCE IMAGING BY USING A PIXELATED CdTe RADIATION DETECTOR <i>K. Zachariadou, K. Karafasoulis, S. Seferlis, I. Papadakis, D. Loukas, C. Lambropoulos, C. Potiriadis,</i>	161

A GAMMA SPECTROSCOPIC RADIATION DETECTOR FOR SECURITY PURPOSES <i>K. Karafasoulis, K. Zachariadou, S. Seferlis, I. Kaissas, I. Papadakis, D. Loukas, C. Lambropoulos, C. Potiriadis</i>	171
CARBON NANOTUBES: FABRICATION, PROPERTIES AND APPLICATIONS <i>A. Markopoulos, V. Stavrou, G. Veropoulos and G. Boumpoukiotis</i>	180
DEVIATIONS FROM EXPONENTIAL DECAY LAW IN THE TIME EVOLUTION OF QUANTUM RESONANT STATES DESCRIBED BY LORENTZIAN LINE SHAPE SPECTRAL DISTRIBUTIONS <i>Th. Dounvopoulos</i>	192
PART D: HUMANITIES & POLITICAL SCIENCES	213
Η ΝΑΥΤΙΚΗ ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΟΥ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ ΚΑΙ ΣΤΟΛΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΚΑΙ ΤΗ ΣΥΝΕΧΕΙΑ ΤΟΥ ΕΛΛΗΝΙΣΜΟΥ, 1000 Π.Χ.–2011 Μ.Χ <i>Ζ. Φωτιάκης</i>	214
Η ΝΑΥΤΙΚΗ ΙΣΧΥΣ ΣΤΗ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΤΟΥ ΒΕΝΙΖΕΛΟΥ, 1910-1932 <i>Ζ. Φωτιάκης</i>	233
ΔΙΟΡΓΑΝΩΣΗ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΩΝ ΣΥΝΕΔΡΙΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ: ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΓΕΡΜΑΝΙΚΗ ΛΑΟΚΡΑΤΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ <i>Αι. Ροφούζου</i>	238
ΑΝΑΚΗΡΥΞΗ ΚΥΠΡΙΑΚΗΣ ΑΠΟΚΛΕΙΣΤΙΚΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΖΩΝΗΣ (ΑΟΖ) ΚΑΙ ΤΟ ΔΙΚΑΙΟ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΑΣ <i>Γ. Χρυσόχου και Δ. Δαλακλής</i>	245
REDUCING DEFENCE EXPENDITURE DURING THE GREEK CRISIS: A BALANCE BETWEEN AUSTERITY AND SECURITY <i>P. Migiakis and G Zombanakis</i>	264
ΣΗΜΕΙΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΤΗ ΓΕΛΟΙΟΓΡΑΦΙΑ <i>Ι. Ασαργιωτάκη</i>	276
Η ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΠΟΛΙΤΙΣΜΙΚΗΣ ΜΑΘΗΣΗΣ ΜΕ ΤΗ ΣΥΝΕΡΓΕΙΑ ΤΗΣ ΒΙΩΜΑΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΣΤΟ ΜΑΘΗΜΑ ΤΗΣ ΓΕΡΜΑΝΙΚΗΣ ΩΣ ΞΕΝΗΣ ΓΛΩΣΣΑΣ <i>Ε. Τσιαβού</i>	281
ΣΧΟΛΕΙΑ ΤΟΥ ΦΡΑΧΤΗ: ΑΠΟΤΥΠΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΥΝΑΦΕΙΕΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ, ΣΤΟ ΘΕΑΤΡΙΚΟ ΕΡΓΟ - <i>TRANSLATIONS</i> ΤΟΥ ΙΡΛΑΝΔΟΥ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ BRIAN FRIEL <i>Α. Καραντζή</i>	289
PART E: NAVAL OPERATIONS	300
SMALL ARMS AND LIGHT WEAPONS (SALWs) ILLEGAL TRAFFICKING: ANOTHER CHALLENGE FOR GLOBAL SECURITY <i>D. Dalaklis, G. Chrysochou</i>	301

Χαιρετισμός Διοικητή Σχολής Ναυτικών Δοκίμων

Καλωσορίζουμε το 4^ο τεύχος της «Ναυσιβίου Χώρας» που αναδεικνύει το έργο που επιτελείται στη ΣΝΔ όσον αφορά τις Ναυτικές Επιστήμες.

Σήμερα, σε μια εποχή οικονομικών και κοινωνικών προβλημάτων η έκδοση της «Ναυσιβίου Χώρας» σηματοδοτεί την προσπάθεια των καθηγητών της ΣΝΔ και άλλων εκπαιδευτικών ιδρυμάτων να δημιουργήσουν με το έργο τους θετικές προσδοκίες και εμπλουτισμό γνώσεων τόσο στους φοιτούντες στα Ανώτατα Στρατιωτικά Εκπαιδευτικά Ιδρύματα όσο και σε όλες τις Πανεπιστημιακές Σχολές που ασχολούνται με τον κλάδο των Ναυτικών Επιστημών. Στόχος τους είναι να ενημερώσουν και να προβάλλουν νέες μεθόδους και εξελιγμένες τεχνικές βασισμένες σε προσωπικές έρευνες και αναλύσεις, με αποτέλεσμα την καλύτερη εκπαίδευση και επιμόρφωση των νέων επιστημόνων.

Ως εκ τούτου, χαιρετίζω την τέταρτη έκδοση της «Ναυσιβίου Χώρας» με την ευχή να αποτελέσει ένα νέο κίνητρο για την εξέλιξη και την πρόοδο της Ναυτικής Επιστήμης τόσο στην Ελλάδα όσο και στο εξωτερικό.

Υποναύαρχος Ι. Μαΐστρος ΠΝ, Διοικητής ΣΝΔ

Welcome Address by the Commandant of the Hellenic Naval Academy

We welcome the 4th edition of the “Nausivios Chora” which illustrates the work of the Hellenic Naval Academy concerning the Naval Sciences.

Nowadays, at a time of economic and social problems, the edition of the “Nausivios Chora” underlines the effort of the staff of the Hellenic Navy Academy and other Institutes to create with their work positive expectations and knowledge enrichment both to the students of the Higher Military Educational Institutions and to other Universities that are engaged with Naval Sciences. They are targeting to inform and display new methods and sophisticated techniques based on personal research and analysis, in order to educate and train the new scientists.

Therefore, I wellcome the fourth edition of the “Nausivios Chora” with the wish for it to be a motive for the development and progress of the Naval Science not only in Greece but also abroad.

Rear-Admiral I. Maistros HN, Commandant of the Hellenic Naval Academy

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
George Galanis, Asstn. Professor
Christos Kandylas, Asstn. Professor
Elias Tempelis, Asstn. Professor
Evangelia Karagianni, Asstn. Professor
Emilia Rofousou, Lecturer
Antonis Tsapalis, Lecturer
Theodore Zannis, Lecturer

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 various scientific disciplines and is divided in five parts, namely *Mechanical and Marine Engineering, Electrical Engineering and Computer Science, Natural Sciences and Mathematics, Humanities and Political Sciences* and *Naval Operations*. The present 2012 Edition Issue contains 24 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 Ar Yfantis
Editor in chief

Acknowledgments

I wish to express my special thanks to Dr Antonis Tsapalis for his excellent work as the administrator of the “Nausivios Chora” website.

Special thanks to Dr Evangelia Karagianni for her creative work on the “Nausivios Chora” 2012 Edition.

E.Ar.Yfantis

PART A:

MECHANICAL AND MARINE ENGINEERING

A Comparative Study on the Seakeeping Operability Performance of Naval Combatants

Gregory J.Grigoropoulos^a and George P.Petropoulos^b

^a*National Technical University of Athens, School of Naval Architecture and Marine Engineering,
9 Heroon Polytechniou str., 15773 Zografou, Greece*

^b*Lieutenant Cdr., Hellenic Navy, Salamis Naval Base, gpetrop71@gmail.com*

Abstract. In this paper the seakeeping operability of three naval combatants, including a well documented design available in the literature, are compared. In order to accomplish this task, a new realistic operability index is proposed. The actual vessels under investigation are of different design philosophy. The designs were compared scaled down at the same length taking into account their original design condition. Their operability is examined at selected areas of the Eastern Mediterranean Sea for four missions, two speeds and three heading angles, taking into account given seakeeping criteria. Wind and Wave Atlas provides the necessary sea statistics. Plots were produced to quantify the operability of each hull form in a specified area at constant heading and speed. On the basis of the most probable ship's course in each area a component of the operability index is calculated. These indices are summed up to derive the overall seakeeping operability of each candidate. The derived results are discussed and conclusions are drawn.

Keywords: Seakeeping, operability, naval vessel, mission, criteria.

PACS: 47.35.Lf, 47.85.Gh, 02.30.Nw, 02.50.Fz, 02.70.Hm

INTRODUCTION

During the last century a lot of computational methods to evaluate the seakeeping performance of ships in confused seas have been developed. Furthermore, criteria were established for the affordable dynamic responses that affect the ship integrity, the cargo (merchant ships), the crew and the passengers. As a reasonable consequence the capability of a ship to operate and accomplish her mission in a given sea environment could be quantified. Operability or operational effectiveness associates this capability with the percentage of time in which a ship does not violate any of imposed criteria (NATO, STANAG 4154, 2000).

To restrict ourselves in naval vessels, this capability is assessed by considering the various dynamic responses that affect the ship, the crew and its mission. The responses encompass both the basic ones (mainly heave, pitch and roll) and the derived ones, i.e. vertical and lateral velocities and accelerations along the vessel, as well as random events (slamming, deck wetness, propeller racing etc) at specific positions.

The seakeeping performance of a vessel is mainly affected by its size and its hull form geometrical parameters (main dimensions, block coefficient, prismatic coefficient, waterplane area coefficient, longitudinal and vertical location of the centre of buoyancy, longitudinal position

of the center of waterplane area). It is essential to consider the same size when we compare alternative designs, that are expected to operate in the same areas. In this work the length of the vessel was considered as a size indicator. On the other hand, it is clear that the seakeeping operability should be examined in the preliminary ship design stage (Grigoropoulos, 2004), in order the designer to be able to take any necessary measures to improve it, in case some targets or specifications are not fulfilled. In general, the smaller the vessel is, the more sensitive it is in a specific sea environment. Nowadays, the trend is to build versatile, sophisticated and difficult to detect platforms, keeping their size small to reduce the building and maintenance cost, while innovations are also incorporated to improve specific capabilities, such as STEALTH property (VISBY Corvette, LAFAYETTE Frigate, DDG-1000 ZUMWALT Destroyer). In this paper we compare the seakeeping operability of the three candidate hull forms at the frigate size.

OPERABILITY PERFORMANCE ASSESSMENT

Following NATO STANAG 4154 (2000) the seakeeping operability performance of naval ships is assessed in two ways:

- by comparison of the seakeeping performance of a specific design to another reference design with known (good) performance (Figure 1) or to a database of similar ships (Bales, 1980). This method is known as comparative and it is used extensively for hull form optimization for seakeeping (Grigoropoulos and Loukakis, 1990). This method uses quantitative as well as qualitative criteria.

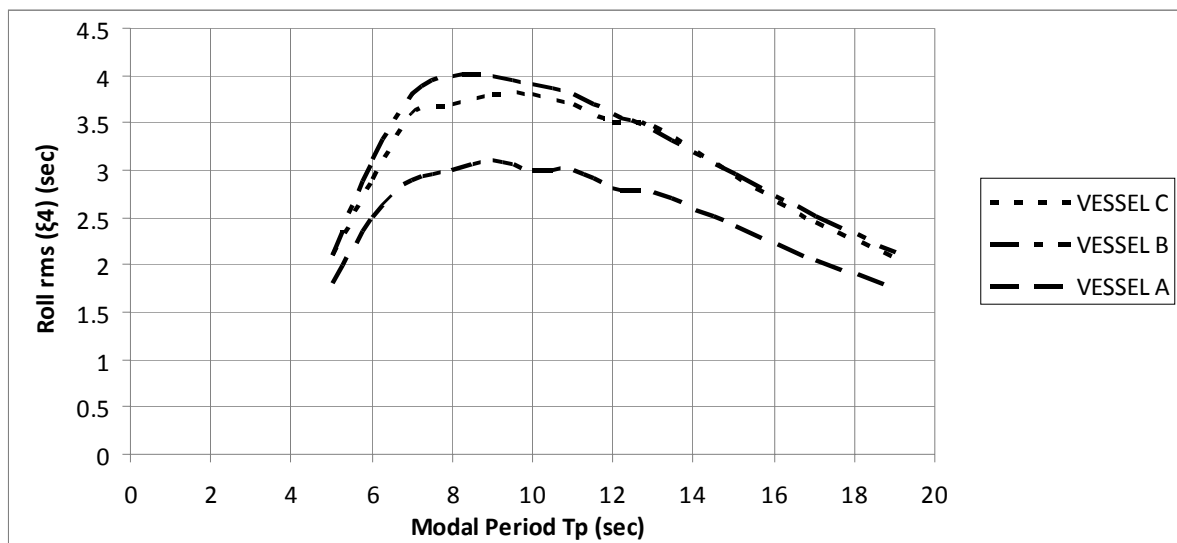


FIGURE 1. Comparative Method of Roll Evaluation. Three vessels sailing at a speed of 15 Kn, encounter beam seas with significant wave height $H_s = 3$ m. Vessel A has the best performance.

- by direct calculation of the seakeeping performance and implementation of specific criteria. The latter are acceptable limits that are set to ship's responses based on crew and systems degradation. The vessel is evaluated according to these criteria (Figure 2) to derive the sea conditions where the ships is operable. Then, on the basis of the statistical percentage of time these conditions prevail, an operability index is derived (absolute method). This method uses only qualitative criteria.

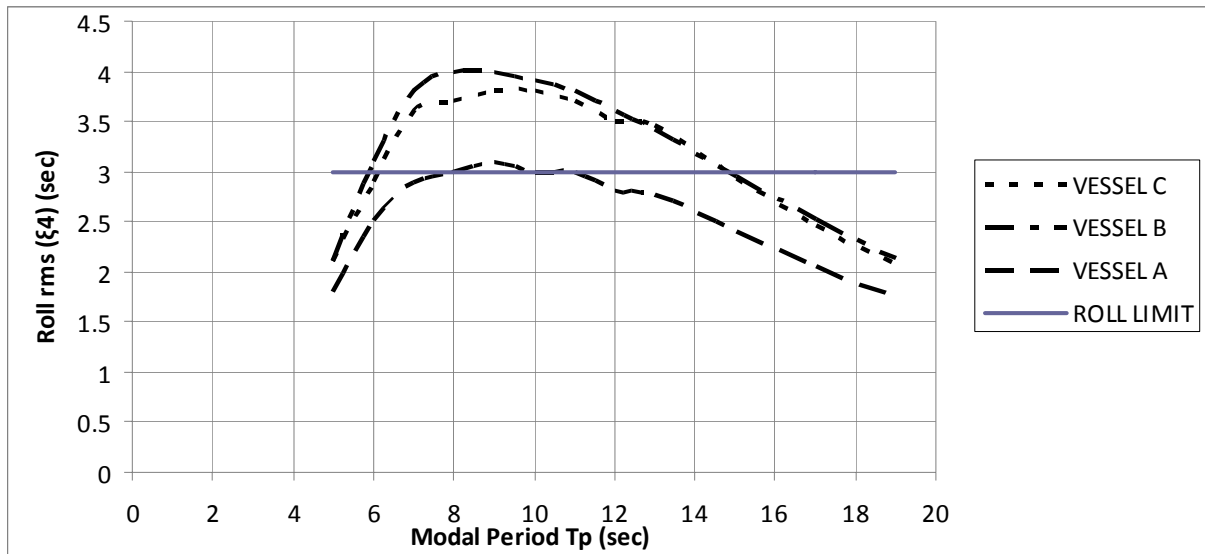


FIGURE 2. Absolute Method of Roll Evaluation. Three vessels sailing at a speed of 15 Kn, encounter beam seas with significant wave height $H_S = 3$ m. Vessels B and C violate the roll limiting criterion for RMS roll (3 deg) for waves with Modal Period in the 6 to 15 sec range. Vessel A has the best performance, since its roll response exceeds the criterion for Modal Periods in the 8 to 10 sec range.

In the case of direct calculation belong also the polar plots proposed by Comstock and Keane (1980) which are used to derive the operability index of a naval vessel in a specific sea condition. Such a plot extracted from the PNA (1989) is shown in Figure 3. On this plot, which is based on the seakeeping criteria of Table 1, the operating (non-shaded) and non-operating (shaded) areas are depicted. The shaded area is defined by one or more responses that exceed the limiting values (criteria). The operability index in a specified Sea State, assuming that all headings are equally probable and the higher speeds are more probable than the lower ones, is the ratio of the non-shaded area to the whole circular area. In other words, the bigger the non-shaded area the better the seakeeping performance of the vessel. Thus, these plots don't take into account the effect of speed and heading profiles of the vessel in a rational way. Furthermore, they should be derived for all possible sea conditions encountered by a vessel throughout its mission or life to come up with a mission or a through-life operability index.

To be more specific, warships operate in various sea areas performing multiple tasks. Following STANAG (2000) there is long list of mission scenarios, such as Anti-Aircraft Warfare (AAW), Anti-Submarine Warfare (ASW) etc. Thus, in order to derive a realistic overall operability index the following components should be considered:

1. Definition of missions (AAW, ASW etc).
2. Sea environment description (Wind and Wave Atlas).
3. Responses calculation (computer or/ and model simulation).
4. Criteria application (STANAG 4154, NORDIC Project).
5. Data collection and evaluation in order to calculate the operability indices.

These components can only be combined within an absolute method of seakeeping performance evaluation, as the one proposed in this paper, which is also quite robust. Among the data to be collected under (5) in the above list of components is the operational profile of the vessel in accomplishing each of the assigned missions and the probability of encountering a restrictive sea condition with given heading, significant wave height and modal period. This information is not provided in either of Figures 1 or 2.

TABLE 1. Mission criteria sets.

		Roll [deg]	Pitch [deg]	Yaw [deg]	LOCATION-DEPENDENT CRITERIA			
					No.	Vacc [g]	Lacc [g]	Vvel [m/sec]
TAP	Deck Wetness				30			
	Slamming				20			
	Personnel, Bridge	4	1.5			0.2	0.1	
	Propeller Emergence				90			
ASW	TAP Criteria AND ...							
	Sonar Emergence				24			
	Active SONAR	7.5	2.5					
AAW	TAP Criteria AND...							
	Fwd Gun	3.8	3.8					0.5
	Missile Launch from VLS	8.8	1.5	0.8		0,3	0.35	
NAO	TAP Criteria AND...							
	Helicopter Landing	2.5	1					1

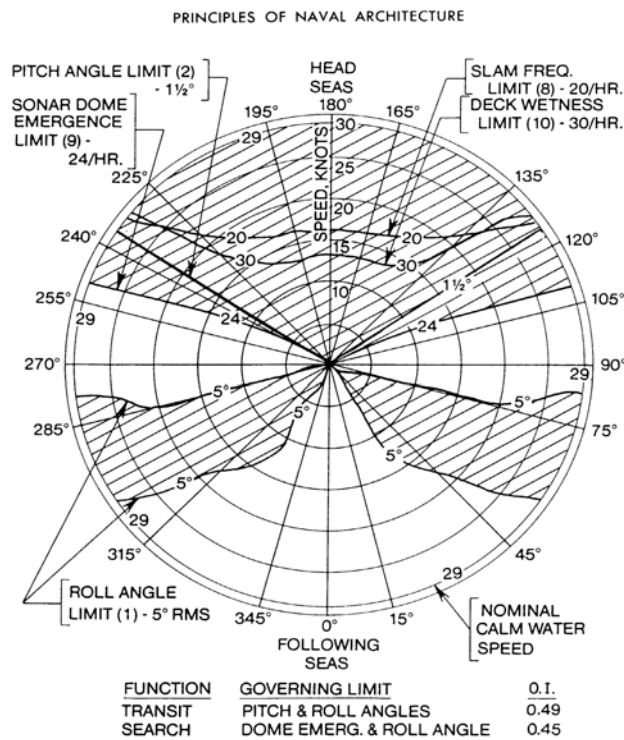


FIGURE 3. Polar Diagram for calculating the operability for TRANSIT and ASW operations at sea state 6 for all speeds and headings. The bigger the non-shaded area the better the seakeeping performance.

MISSION AND SEAKEEPING BEHAVIOUR OF THE HULL FORMS

Derivation of the Hull Forms

The prime scope of this paper is to present a rational comparison of three hull forms to be used as frigates serving Hellenic Navy and operating in the East Mediterranean sea region. Two

of the selected hull forms, the ONR 5415M and the ONR 5613 hull forms were scaled down from the destroyer to the frigate size (Figure 4). The former one is a well documented design available in the literature. The third hull form (HULL C) was manipulated in its real dimensions and was considered as a guide for scaling the other two.

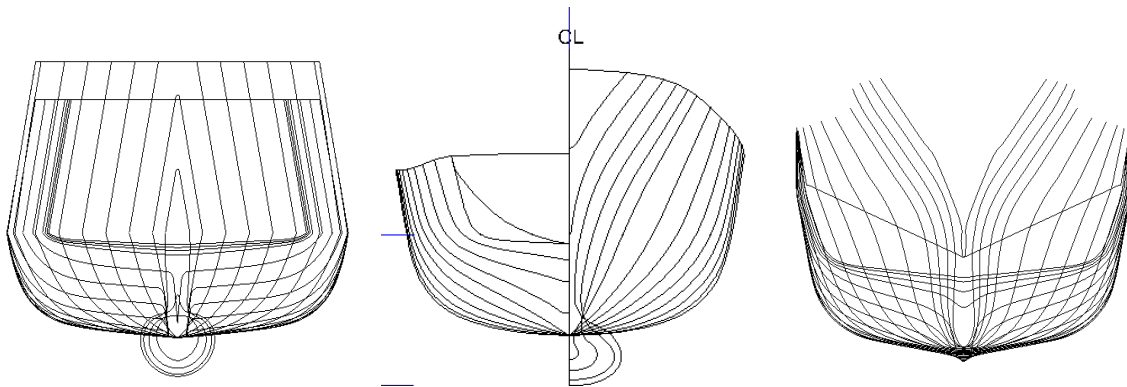


FIGURE 4. The investigated hull forms (HULL A, HULL B and HULL C)

TABLE 2. Main Particulars.

MAIN PARTICULARS	HULL A (ONR 5613)	HULL B (5415 M)	HULL C
Length Between Perpendiculars, L_{PP} [m]	109	109	109
Beam Amidships, B [m]	13.29	14.62	13.96
Draft Amidships, T [m]	3.89	4.72	4.32
Displacement in S.W. Δ [mt]	3087.6	3898.4	3441.1
Design Speed, V [kn]	30	30	30
Length/Beam Ratio L/B	8.199	7.456	7.806
Beam/Draft Ratio B/T	3.418	3.099	3.233
Draft/Beam Ratio T/B	0.293	0.323	0.309
Volume of Displ. / $(0.1L_{PP})^3$	2.325	2.934	2.59
Froude Number (F_n)	0.472	0.472	0.472
Vert. Centre of Gravity (KG) [m]	5.44	5.76	5.99
Metacentric Height (GM) [m]	1.41	1.46	1.41
Wetted Surface, WS	1590.2	1737.4	1619
Block Coefficient C_B	0.534	0.506	0.51
Prismatic Coefficient C_P	0.638	0.618	0.625

As reference for the scaling the length between perpendicular L_{PP} was used, while the ratios of the main dimensions were kept constant. Thus, the resulting hulls possess the same length L_{PP} but different displacement. Furthermore, the rest of the main dimensions are not the same (TABLE 2). The decision to compare the hull forms at their respective design conditions is based on the fact that the design condition is the most representative of each hull form, while the down-scaling of two of them was too mild to lead to un-realistic loading condition. In order to achieve greater accuracy, especially with roll response, the three hulls are examined with their appendages (Petropoulos, 2012).

Mission Definition

Naval vessels are generally built as multi-tasking platforms. Their sensors and arsenal is oriented to one mission, but the platform has the ability to perform successfully a variety of different missions by fitting and / or replacing devices, sensors or systems while the platform remains the same (modular concept). In this work four missions are depicted: Transit And Patrol (TAP), Anti-Air Warfare (AAW), Anti-Submarine Warfare (ASW) and Naval-Air Operations (NAO).

The seakeeping operability of the three competitors is examined in four areas of the Eastern Mediterranean Sea assuming four missions specified in NATO STANAG 4154 (2000) along with their respective platform criteria. Two ship speeds and three wave heading angles are accounted for in the presented test case out of the five headings that could cover all instances. The Western European Armament Organization (WEAO) Wind and Wave Atlas (2004) provides the necessary sea statistics. Plots have been produced to quantify the operability of each hull form in a specified area at constant heading and speed.

Sea Environment Description

In order to acquire reliable data for the sea environment, we use an Atlas. It is an edition where statistical data concerning wind speed, significant wave height, wave modal period, wind and wave directionality in various areas are gathered. The objective is to provide long term wind and wave statistics at specified points of a sea area (e.g. North Atlantic Ocean, Mediterranean Sea). For the purposes of this paper, the area of interest is focused on four points of the Eastern Mediterranean Sea (Figure 5). Statistical data related to the sea environment (wave direction, probability of occurrence, significant wave height and modal wave period) are derived from the WEAO Wind and Wave Atlas (2004).

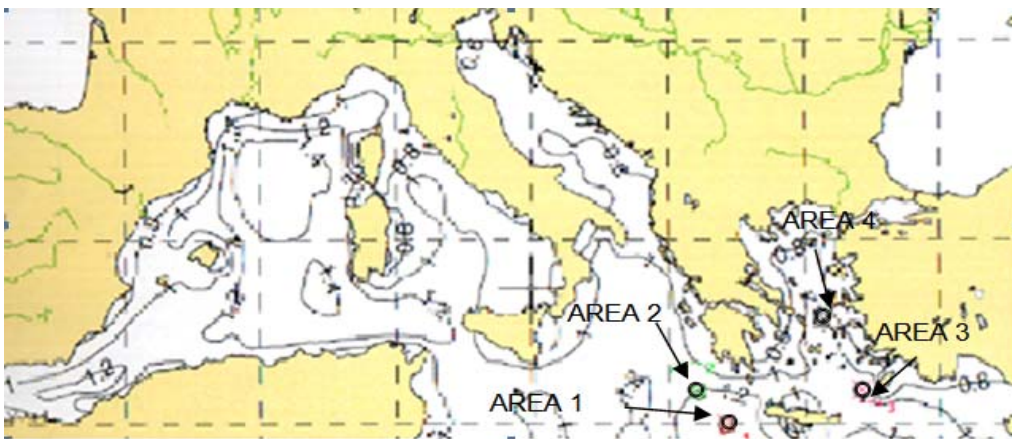


FIGURE 5. Areas of interest in the East Mediterranean sea region.

Calculation of the Dynamic Responses

In order to estimate the ship responses, the Standard Ship Motion Program of US Navy SMP 93-PC (Smith and Meyers, 1994) is used. This code is a frequency domain, strip theory based program, able to calculate responses in all six degrees of freedom (surge, sway, heave, roll, pitch, yaw) as well as random events in irregular seas (long-crested and short-crested). Frank close-fit method is used to estimate the two-dimensional hydrodynamic characteristics (Frank, 1967). Up to ten sources are distributed on each half-section. A two-parameter Bretschneider

spectrum is used. Roll response calculations make use of Tanaka’s roll damping coefficients. Rigid body motions as well as derived responses and random events were calculated in various locations onboard the three vessels.

TABLE 3. Locations onboard ship. Station number starts at Forward Perpendicular. Y is the transverse distance from the vertical symmetry axis. Z is the vertical distance from the keel.

NUMBER	NAME	STATION NR	Y [m]	Z [m]
HULL A				
1	Helicopter Deck	17.4711	0	10.325
2	Bridge (Helmsman)	6.6249	0	19.18
3	FWD GMVLS Outer Corner	6	4.399	11.738
4	FWD Gun Barrel Tip	5	0	11.738
5	Slamming @ 3/20 L _{PP}	3	0	1.489
6	Deck Wetness @ 1/10 L _{PP}	2	0.748	11.739
7	Propeller Emergence	18.44	2.898	3.38
8	Sonar Dome Emergence	-0.0149	0	2.9
HULL B				
1	Helicopter Deck	18.227	0	10.736
2	Bridge (Helmsman)	6.2	0	21.3014
3	5/54 Gun Barrel Tip	1.8822	0	14.9687
4	FWD GMVLS Outer Corner	5	5.682	12.0457
5	Slamming @ 3/20 L _{PP}	3	0	2.3186
6	Deck Wetness @ 1/10 L _{PP}	2	5.7444	13.5076
7	Propeller Emergence	19	3.5668	4
8	Sonar Dome Emergence	0.5	0	3.7913
HULL C				
1	Helicopter Deck	18.4954	0	10
2	Bridge (Helmsman)	5.5046	0	15.6
3	5/54 GUN Barrel Tip	1.3211	0	10.3
4	GMVLS Outer Corner	12.6606	2.2	15.8
5	Slamming @ 3/20 L _{PP}	3	0	0.6666
6	Deck Wetness @ 1/10 L _{PP}	2	5.047	10.736
7	Propeller Emergence	18.935	3.25	2.8
8	Sonar Dome Emergence	3.5963	0	0.675

For the analysis described herein, the operating speeds are assumed to be 15 kn and 25 kn. Short-crested seas are considered. Calculations are made for eight locations onboard each ship (TABLE 3). The angles of wave encounter are 0° (head seas), 45° (bow seas) and 90° (beam seas). These three headings have been selected as the worst cases out of the five headings to keep the number of plots to a minimum. The two additional headings refer to 135° (stern waves) and 180° (purely following waves). The body plans are derived as described by Petropoulos (2012) and fed to the code. For the purposes of the study, the appendages that affect roll

response (skeg, non-retractable fins, rudders and bilge keels) are fed to the code. HULL A and HULL C are described by 25 stations, while HULL B is defined by 23 stations.

Application of Seakeeping Criteria

The criteria are taken from NATO STANAG 4154 (2000) and concern the four aforementioned operations. Human Performance Degradation Criteria such as Motion Induced Interruptions as well as wind speed (for NAO operations) are omitted. Roll criterion used for NAO mission is the generic one, described in STANAG 4154. The decision to study simultaneously criteria referring to four missions arises from the fact that a naval ship is a multitasking platform. Thus, it is more realistic to use “multi-mission criteria sets” instead of single-mission criteria (Smith and Thomas, 1989), as depicted in TABLE 1 for the four missions under consideration. In case a response is used as criterion in more than one missions, only the stricter is taken under consideration. For instance, both TAP and NAO missions include roll RMS value as a criterion. But the RMS value for a NAO operation has a lower value than that of a TAP mission. Thus, the limiting criterion is considered to be the stricter one (Roll RMS value for NAO operations).

A NEW METHOD TO ASSESS SEAKEEPING OPERABILITY

Following the discussion in the proceeding sections, the seakeeping operability of a naval vessel is directly related to a mission profile that actually constitutes its overall mission or at least the major part of it. The currently available methods either evaluate this property for a given sea condition (polar diagrams) or evaluate the upper limiting values of one or more responses for which the vessel is operable, disregarding the probability of encountering sea conditions for which the criteria are violated. Even the overall operability index derived by repetitive implementation of the polar diagrams for the long list of the sea conditions that the vessel may encounter during a year or through life is based on the statistics of the waves in one or more sea areas, without taking into account the mission profile and the associated speed and heading profiles for the specific naval ship.

In the present study, a different approach is used, based on the method recommended by Andrew, Loader and Penn (1984) in its simplified version as described by Lloyd (1989). The Operability Index for each ship sailing at a chosen area location, speed and angle of encounter over a year is graphically presented. The Modal Period T_P , and the Significant Wave Height H_S are the abscissa and the ordinate of the plot, respectively. The wave probability of occurrence, taken from the WEAO Atlas is inserted and criteria of the four missions are plotted. The shaded area under the stricter criterion curve specifies the operable area for the ship at the specific pair of speed and heading angle. The operability index is the ratio of the shaded area to the area where there is a wave probability of occurrence. The probability of occurrence of each combination of H_S and T_P can be directly taken into account in whole or partly (if the respective parallelogram is crossed) as weighting in the evaluation of the operability index. Both the overall operability for all set criteria as well as the respective one for any single criterion or combination of criteria can be evaluated using the same plot.

In order to calculate the final operability of the vessel in the specific area, the course of the vessel to its mission in Cartesian Coordinates is combined with the directional wave statistics in the area to derive the probability of encountering specific headings. Then at each heading for which a plot like the one in Figure 6 is built, a weighting factor corresponding to the probability of encountering that heading is derived. The weighting factors are derived on the basis of TABLES 4 and 5. The former table presents the course of the vessel in the selected sea areas, while the

latter one provides the probability of encountering waves with heading 0°, 45° and 90° in these areas.

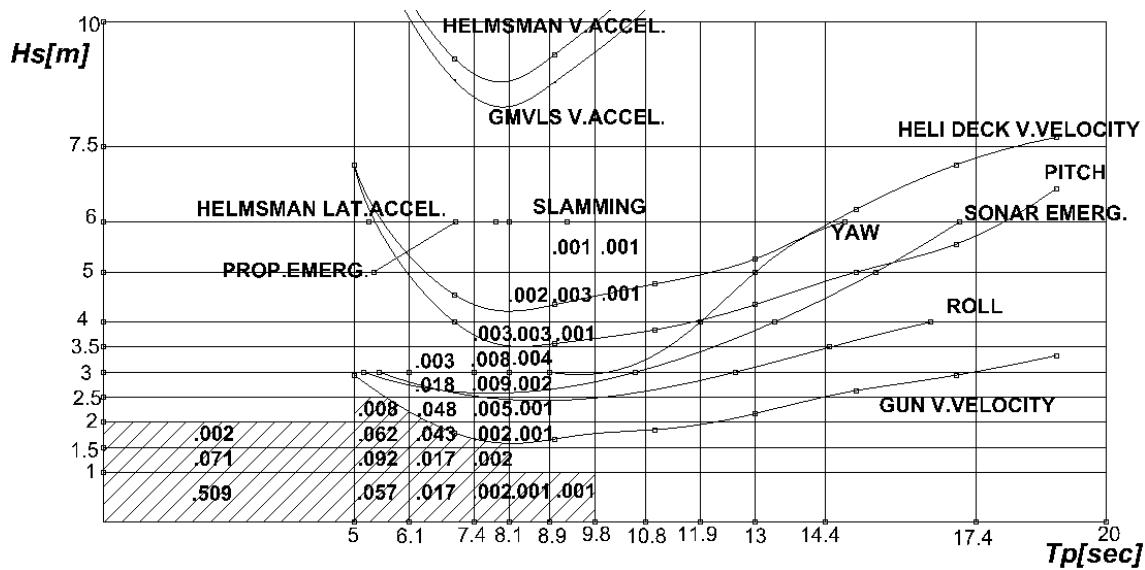


FIGURE 6. Operability calculation at a specific ship speed and wave heading and is based on the wave statistics of a specific area.. All criteria are plotted on a Cartesian coordinate system. Ship responses are calculated for a specific heading to derive the limiting (T_p , H_s) pairs. The shaded area represents the operability index for the specific area, ship, speed and heading.

TABLE 4. Ship's Course definition.

Area	Ship Course (°) Relative to North
1 (35N,22E)	45
2 (36N,21E)	90
3 (36N,27E)	135
4 (38N,25.5E)	0

TABLE 5. Wave Probability of Occurrence/ Directionality.

Area	Course (°)	Wave Probability of Occurrence/ Directionality (°)		
		0	45	90
1	45	0.1519/30°÷60°	0.0835/345°÷15°	0.3854/300°÷330°
2	90	0.1013/75°÷105°	0.0355/30°÷60°	0.0578/345°÷15°
3	135	0.0284/120°÷150°	0.0396/165°÷195°	0.0588/210°÷240°
4	0	0.541/345°÷15°	0.1074/300°÷330°	0.0294/255°÷285°

Finally, the operability indices for every speed, area and course are as follows (TABLE 6).

The overall operability performance assessment is calculated as the sum of the operability indices in all speeds, areas and courses. For simplicity reasons we may consider all ship speeds and areas as equally probable, otherwise we would have to make an assumption about their probabilities, thus we should insert weighting factors for each probability.

DISCUSSION AND CONCLUSIONS

In this paper a different approach for assessing the operability of three naval ships is briefly described. The method makes use of Cartesian Coordinates, in which a mission criteria set for four missions is graphically represented. The curves are drawn for each vessel, traveling in four areas, at two speeds and three angles of wave encounter (five angles are needed to take into

account the following seas as well). These plots have the advantage of giving information about the seakeeping operability performance in all probable waves encountered in that area. The use of mission criteria sets gives the opportunity to choose which area and which ship is more suitable for each mission or combination of missions. In that way mission performance can be optimized. In addition, if consequential locations are selected, plotted and the results combined, it is possible to optimize ship's route, thus saving time and budget. Moreover, ship owners or Navy can compare different designs and arrive at safe conclusions about what vessel suits best their needs.

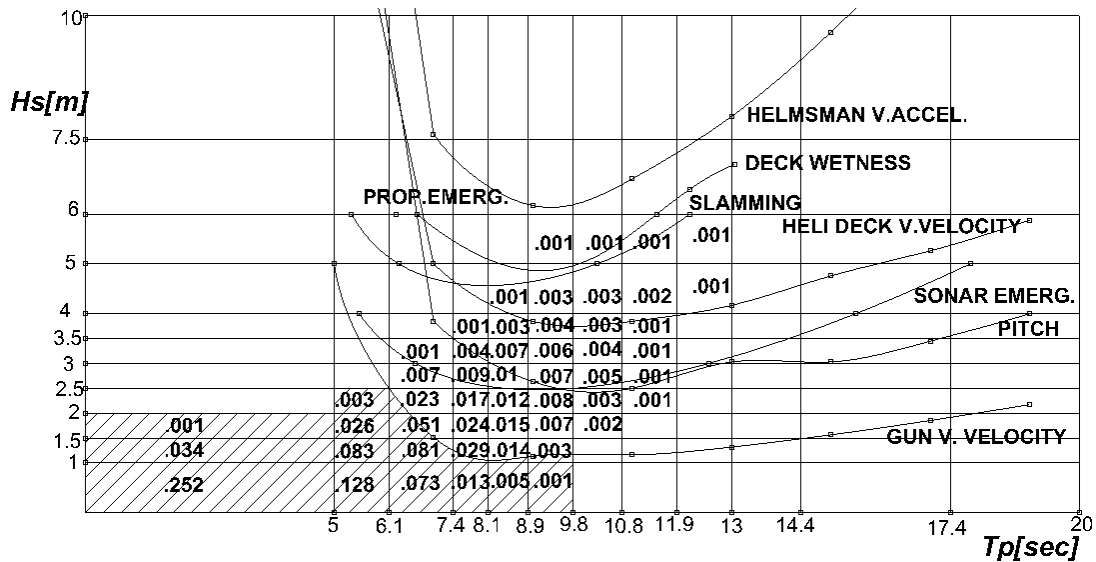


FIGURE 7. Altered 5415M plot for Area 1, at 15 kn in Head Seas. Criterion for gun barrel tip vertical velocity is the stricter of all.

TABLE 6. Final Operability Indices.

Final Operability Indices				
Area 1 35 N, 22 E				
Speed	Course (°)	VESSEL A	VESSEL B	VESSEL C
15	45	80.72%	75.42%	70.04%
25	45	78.91%	76.45%	70.94%
Area 2 36 N, 21 E				
Speed	Course (°)	VESSEL A	VESSEL B	VESSEL C
15	90	82.30%	77.78%	73.67%
25	90	81.30%	79.18%	74.17%
Area 3 36 N, 27 E				
Speed	Course (°)	VESSEL A	VESSEL B	VESSEL C
15	135	86.34%	81.79%	77.86%
25	135	85.43%	83.11%	78.25%
Area 4 38 N, 25.5 E				
Speed	Course (°)	VESSEL A	VESSEL B	VESSEL C
15	0	88.53%	86.11%	83.99%
25	0	89.54%	89.05%	84.97%

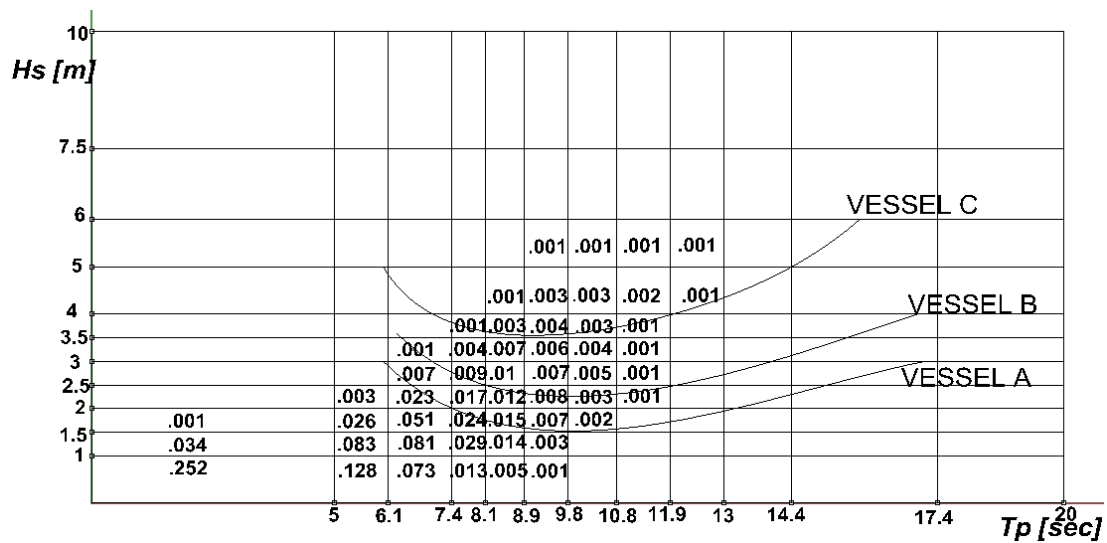


FIGURE 8. Sonar Emergence Criterion comparison for Area 1, at 25 kn in Head Seas. VESSEL C has a keel mounted sonar. The other two vessels have hull mounted sonars.

Following the results provided in graphical form, it is revealed that the gun barrel tip vertical velocity is the most limiting criterion (Figure 7). That was anticipated because the gun’s location is close to the bow and thus exposed to large responses. On the other hand, keel mounted sonars suffer much less from sonar emergence than the hull mounted ones (Figure 8). Thus the designing trend to place keel mounted sonars in ships of that size is proved to be correct.

HULL A has the highest operability indices in every case. This may be due to:

1. The fact that the exact location of gun barrel tip wasn’t known, thus an assumption had to be made. This is very important because the related criterion (gun barrel tip vertical velocity) is the stricter in every case examined.
2. The fact that this hull has an unconventional, wave piercing bow that moves through and not above waves.

It must be emphasized that all operability performance assessment methods use a large amount of data and require a high degree of automation, especially in the plotting process. The method described is more convenient in case we are interested in a few missions in a specific area. If we intend to investigate the performance for a long list of missions, at many speeds, sea areas and courses the results may give a more precise insight, but in that case the amount of data would be of considerable amount. Thus, the development of a code able to use all information in an automated way and plot the diagrams is of crucial importance to take full advance of the method.

REFERENCES

1. Bales, N.K., "Optimizing the Seakeeping Performance of Destroyer-Type Hulls", Office of Naval Research, *13th Symposium on Naval Hydrodynamics*, Tokyo, Oct. 1980.
2. Frank, W., 'Oscillation of Cylinders in or Below the Free Surface of Deep Fluids', NSRDC, Rep. No. 2375, Washington, D.C., 1967.
3. Grigoropoulos, G.J and Loukakis, T.A., "On the Optimization of Hull Forms with Respect to Seakeeping", *5th IMAEM Congress*, Athens, May 1990.
4. Grigoropoulos, G.J., "Hull Form Optimization for Hydrodynamic Performance", *Marine Technology*, Vol. 41, No. 4, October 2004

5. Grigoropoulos, G.J. and Petropoulos, G.P., "A New Methodology for the Operability Performance Assessment of Naval Ships", 2012, to appear.
6. Comstock, E.N. and Keane, R.G., "Seakeeping by Design", Naval Engineers Journal, April 1980.
7. Lewis, E.V., "Principles of Naval Architecture 2nd Revision Vol 3, Motions in Waves and Controllability", SNAME, 1989.
8. Lloyd, A.R.J.M., "Seakeeping: Ship Behavior in Rough Weather", Ellis Horwood Ltd, 1989.
9. NATO, "STANAG 4154 Edition 3", 2000.
10. NORDIC Project Board, "Assessment of Ship Performance in a Seaway", NORDFORSK, NORDIC Co-operative Project : Seakeeping Performance of Ships, Copenhagen, Denmark, 1987.
11. Petropoulos, G.P., "Seakeeping Operability of Large Naval Vessels in the Aegean Sea Environment", MSc Thesis, NTUA, 2012.
12. Smith, T. C. and Meyers, W. G., "SMP 93-PC User Manual", Carderock Division, Naval Surface Warfare Center, 1994.
13. Smith, T. C. and Thomas, W. L., "A Survey and Comparison of Criteria for Naval Missions», DTRC / SHD -1312-01, 1989.
14. WEAO, "Wind and Wave Atlas of the Mediterranean Sea", Western European Armaments Organization Research Cell, ISBN 2-11-095674-7, 2004.

Comparative Evaluation of the Effects of Intake Air Nitrogen-Enrichment and EGR on the Operational and Environmental Behavior of a SI Heavy Duty Natural Gas Engine

Roussos G. Papagiannakis^a and Theodoros C. Zannis^b

^a*Thermodynamic & Propulsion Systems Section, Hellenic Air Force Academy, Dekelia Air Force Base, MP 1010 Dekelia, Attiki, Greece, r.papagiannakis@gmail.com*

^b*Laboratory of Marine Internal Combustion Engines, Naval Architecture & Marine Engineering Section, Hellenic Naval Academy, Hatzikiriakio, 185 39 Piraeus, Greece, thzannis@snd.edu.gr*

Abstract. In natural gas spark-ignited engines operating under lean conditions, low temperature combustion is identified as one of the pathways to meet the mandatory ultra low NO_x emissions levels set by the regulatory agencies. Exhaust gas recirculation (EGR) has proved to be an effective methodology to reduce in-cylinder combustion temperature and hence NO_x emissions. Nitrogen enrichment of the inducted air is an effective, alternative to EGR, methodology to reduce NO_x emissions, since the introduction of inert diluents, such as nitrogen, into a fuel-air mixture results in reduction of the in-cylinder combustion temperature. Since nitrogen-enrichment of intake-air and exhaust gas recirculation (EGR) are two important methods that mostly affect the combustion process occurring within the combustion chamber of natural gas spark-ignited engines, the present work studies their effect on the performance and exhaust emissions of a multi-cylinder, four-stroke, turbocharged, spark-ignited engine fuelled with natural gas. Hence, a theoretical investigation is conducted by using a comprehensive, two-zone, phenomenological model. The model has been properly modified and substantially improved to describe, in a detailed way, the combustion process of the gaseous fuel taking into account the aforementioned techniques. The results concerning engine performance characteristics, NO and CO emissions, with : (i) normal oxygen mass fraction of the inducted air (i.e. normal engine operation NEO), (ii) nitrogen-enriched inducted air (NEIA) and (iii) EGR operating modes, for various engine operating conditions, come from the application of the model. The main objectives are to record and also to comparatively evaluate the relative impact that each one of the above mentioned methods has on the engine performance characteristics and emitted pollutants. Thus, comparing the theoretical results when engine operates with (i) NEIA or (ii) EGR mode, as against with NEO mode, a considerable effect on engine performance and emission characteristics are revealed. Another objective of this assessment is to quantify NO reduction benefit achieved with each of the two strategies examined. The conclusions of the specific investigation will be extremely valuable for the application of the examined technologies on an existing spark-ignited natural gas engine.

Keywords: natural gas, spark ignition, nitrogen enrichment, exhaust gas recirculation.

INTRODUCTION

For meeting stringent imposed emissions regulations, engineers working in the automotive industry or belonging to the research community have focused their interest either on the domain of engine- or fuel-related techniques, such as alternative gaseous fuels or oxygenated fuels that can mitigate emissions, used either in diesel or spark ignition engines that are well established as dominating power-train solution in the world market [1-9]. For the majority of heavy-duty spark-ignited engines, natural gas is most usually introduced with the air during the induction stroke. The majority of this type of engines features a homogeneous natural gas-air mixture compressed rapidly below its auto-ignition condition and ignited around top dead center (TDC) position by the existence of a spark plug. Under constant engine speed, the power output of the specific type of engine is controlled by changing the total amount of the inducted mixture (i.e. air and gaseous fuel). Substantial improvements of these engines in terms of brake specific fuel consumption and reduction of pollutant emissions has been achieved, over the last years, by adopting various engine-related techniques, such as the homogeneous charge compression ignition (HCCI), the micro pilot combustion, the exhaust gas recirculation (EGR), the nitrogen enrichment of the inducted air with the use of air separation membrane (ASM) [10-13] etc. While, each concept has its advantages and disadvantages, exhaust gas recirculation (EGR) has proved to be a very effective tool to reduce the nitrogen oxide emissions. However, exhaust gas recirculation has some significant demerits, such as increased CO emissions, decreased brake thermal efficiency, combustion contamination, greater control system complexity, application variability, material durability, lubricant contamination and increased PM emissions. On the other hand nitrogen enrichment of the inducted air (NEIA) could be an effective strategy, alternative to EGR, without the undesired consequences [10-13]. This strategy could be achieved using a mature technology which involves selective permeation of gases using an air separation membrane [10-13]. Introduction of inert diluents such as nitrogen, into a fuel-air mixture, slow down the reaction rates of participating chemical species, which eventually leads to lower combustion temperatures and hence lower nitrogen oxides. This process gives an added control parameter to reduce combustion temperature in advanced engines.

It is true that experimental work concerning fuel economy and low pollutant emissions from internal combustion engines includes successive changes of each of the many parameters involved, which is very demanding in terms of money and time. Today, the development of powerful digital computers leads to the obvious alternative of simulating the engine performance by mathematical modeling, where the effect of various design and operation changes can be estimated in a fast and inexpensive way. The need for accurate predictions of emitted pollutants has forced researchers to develop two-zone combustion models, accompanied with studies of the significant process of heat transfer in engines, many aspects of which are still unexplored. Eventually, some multi-zone combustion models have appeared where the detailed analysis of fuel-air distribution permits the calculation of exhaust gas composition with reasonable accuracy, but under the rising of computing time cost when compared to lower zones combustion models. At this point it is mentioned that multi-dimensional models have proved useful in examining problems characterized by the need for detailed spatial information and complex interactions of many phenomena simultaneously, but they are limited by the relative inadequacy of sub-models for turbulence, combustion chemistry and by computer size and cost of operation, to crude approximations to the real flow and combustion processes. Thus, it is felt that a good choice for the present study is a two-zone model, which includes the effect of changes in engine design and operation on the details of the combustion process, via a phenomenological model where the geometric details are fairly well approximated by detailed modeling of the various mechanisms involved. This is to have the advantage of relative simplicity and reasonable computer time cost. Numerous experimental and theoretical

investigations concerning the effect of (i) nitrogen-enrichment of intake-air [10-16] and (ii) exhaust gas recirculation (EGR) [17-23] on performance and exhaust emissions of an engine have been reported in the international literature.

The primary objective of the present work is to examine, using a theoretical model, the effect of nitrogen-enrichment of intake-air (NEIA) and exhaust gas recirculation (EGR) on the performance and exhaust emissions of an existing stationary, spark-ignited, engine fuelled with natural gas. The theoretical results are generated using a two-zone phenomenological combustion model, which predicts in-cylinder pressure and heat release rate histories, as well as NO and CO concentration profiles. Several of the model predictions on performance and emissions characteristics of the examined engine, have been presented already in the past [14-16]. For the current investigation, the simulation model has been properly modified and improved substantially to describe more accurately the complicated natural gas combustion process in a spark ignition engine environment, taking into account the details of the processes concerning the nitrogen-enrichment of intake-air (NEIA) and exhaust gas recirculation (EGR) and hence, their effects on the combustion process.

The theoretical results corresponding to engine operation without EGR and nitrogen-enriched inlet air (i.e. normal engine operation – NEO operating mode), are validated against respective experimental values obtained from a multi-cylinder, turbocharged, water-cooled, spark-ignited engine operating under NEO mode at various engine operating points (i.e., load and engine speed) with natural gas. From the comparison of computed and experimental findings, it is revealed that the simulation model developed predicts adequately the engine performance and pollutant emissions trends with engine load under natural gas operation. Furthermore, taking into account data from the international literature, it is shown that the developed model could be used to examine the effect each one of the examined engine parameters on engine performance and pollutant emissions. In any case, it can be used safely in the present work, which performs a comparative assessment by using the simulation results concerning the relative impacts of the examined parameters on engine performance characteristics and emitted pollutants. The results reported herein concern the calculated maximum combustion pressure, ignition delay, duration of combustion, total brake specific fuel consumption, and the calculated brake specific NO and CO emissions, for intermediate and high engine loading conditions at 1500 rpm engine speed. The comparative assessment is accomplished through the comparison of results corresponding to engine operation with EGR or air inlet nitrogen-enrichment, with the corresponding ones corresponding to normal engine operation. From the theoretical findings, important information is derived revealing both the applicability each one of the examined techniques on an existing spark-ignition engine operating with natural gas and also the effect of each technique on engine performance and pollutant emissions.

Consequently, the information derived from the present work is extremely valuable regarding the implementation one of the two strategies examined in the present work for improving the environmental behavior of an existing heavy-duty spark-ignited engine fuelled with natural gas, without deteriorating seriously its performance.

BRIEF DESCRIPTION OF THE MODEL

In the present work only an outline of the model is given since its details have been presented in previous publications [14,16]. The simulation model used is a phenomenological two-zone one, examining the closed part of the engine cycle. At the start of the compression stroke, the cylinder charge is assumed to be a homogeneous mixture of air and gaseous fuel, which has been properly premixed during the induction stroke. During the compression stroke, the entire charge of the mixture is treated as a single zone up to the initiation of combustion. Here, at each instant of time, the perfect gas law describes the state of the mixture inside the

cylinder, while there is uniformity in space of pressure, temperature and composition. As is well known, the combustion process of a SI engine is divided into two processes, that is, the ignition process and the stable flame propagation process [24-28]. The former one is made of the flame kernel, which is formed by a spark electric discharge and the unstable flame propagation of the kernel. This is, however, treated as a SI delay period. In the proposed model, the initiation of combustion is assumed to take place when a finite volume of the burned mixture (i.e. the volume of the flame kernel formed by the spark discharge) exceeds 0.001 times the total cylinder volume, that is, displacement plus clearance volume (see Figure 1).

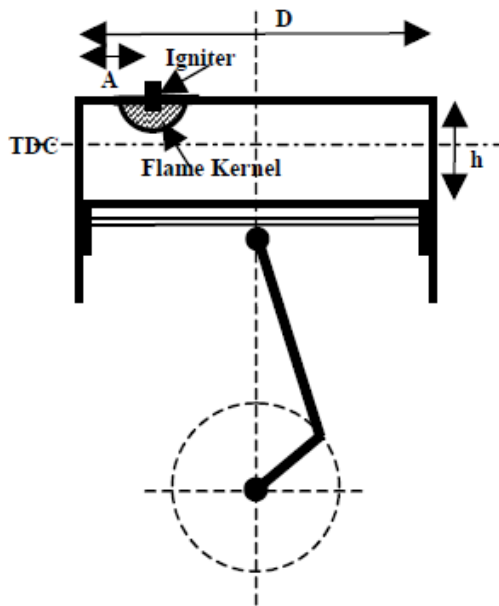


FIGURE 1. Schematic diagram of the flame kernel formation.

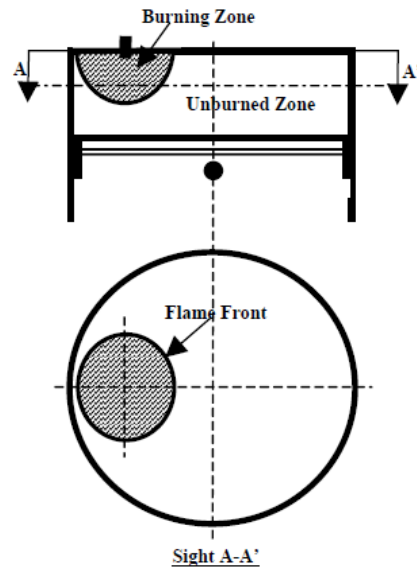


FIGURE 2. Two-zone thermodynamic model of combustion process.

When combustion is initiated, a two-zone phenomenological model is considered to exist for the rest of the closed part of the engine cycle. The first zone consists of air-gaseous fuel mixture (unburned zone), while the second one (burning zone) consists of combustion products and excess air depending on the AFR (air to fuel ratio) (see Figure 2). In each zone, there is uniformity in space of pressure, temperature and composition, at each instant of time, neglecting heat exchange between the zones. After the spark plug ignition, the two zones are separated by a thin flame front that has the shape of a sphere. During the combustion process, the instantaneous cylinder volume and its derivative with respect to crank angle, the flame front area, and the area of the combustion chamber in contact with the unburned and burning zones, are computed through the respective geometric sub-models. Assuming that the geometry of the flame front formed inside the chamber of a spark-ignited engine has a spherical form [2-3], the determination of the instantaneous flame geometry after spark discharge is achieved in the present work by applying a model developed by Annand [28]. The flame front spreads towards the unburned zone, having a flame speed that is calculated by taking into account both the turbulent flame propagation mechanism and the percentage of the nitrogen-enriched inducted-air [27]. After the initiation of combustion, the volume of the burning zone changes due to the existence of the flame front which spreads towards the unburned zone having a turbulent flame speed. The volume change of the burning zone leads to the computation of the quantity of the gaseous fuel and air entrained into the zone. Since the laminar flame thickness under engine conditions is infinitesimal [2-3], in the present model the flame is treated as negligibly thin. The present model assumes that a flame front of negligible thickness propagates into the unburned

zone, having a direction perpendicular to the outer spherical surface of the burning zone formed after the initiation of combustion. The gaseous fuel entrained inside the burning zone, due to the flame front spread, is transformed into products. Thus, the combustion rate depends actually on the turbulent flame speed. Heat exchange rate for each zone is calculated by employing the Annand formula [29]. After the initiation of combustion, each zone possesses its own temperature and composition, while the pressure is uniform inside the cylinder. Dissociation of combustion products is taken into account by using the Vickland et al. [30-31] method, incorporating 11 chemical species. For the formation of NO, the extended Zeldovich chain reaction mechanism is considered [30-31].

Model Modifications - Improvements

Below, is given an analysis of the most important modifications performed to the engine simulation model regarding the definition of the calculation of the laminar flame speed and the definition of the charge mixture composition at inlet valve closure (IVC) corresponding to air inlet nitrogen-enrichment and EGR operating modes.

Laminar Flame Velocity

The laminar flame velocity is defined as the relative velocity, with which the unburned gas moves inside the flame front and is transformed to products [2-4]. It is an important intrinsic property of a combustible mixture. The laminar flame velocity developed inside a combustion chamber depends mainly on the equivalence ratio, the temperature of the unburned gas and the pressure [2-4]. Since methane is the main constituent of natural gas, the laminar flame velocity in the present model is obtained by applying a correlation proposed by Karim [32], which simulates adequately the burning velocity of Methane – Air mixtures. The mathematical formula has as follows:

$$S_l = A + (F_1 \cdot F_2) \cdot (F_3 + F_4 (\varphi_u - 1.036) + F_5 (\varphi_u - 1.036)^2) \quad (1)$$

where A, F₁, F₂, F₃, F₄ and F₅ are correlations given in [32] that take into account the gaseous fuel equivalence ratio of unburned zone (φ_u), the cylinder pressure and the temperature of the unburned zone. The main advantage of the proposed correlation is that it can predict adequately the laminar burning velocity for non-stoichiometric region.

Definition of the Actual Mass Flow Rate of the Inducted Air at Inlet Valve Closure (IVC)

Under EGR operating mode, the percentage of the exhaust gas re-circulated (x_{EGR}) is defined via the formula:

$$x_{EGR} (\%) = \frac{\dot{m}_{EGR}}{\dot{m}_{mix,IVC}} \cdot 100\% \quad (2)$$

where (\dot{m}_{EGR}) represents the mass flow rate of exhaust gas re-circulated, and ($\dot{m}_{mix,IVC}$) represents the total mass flow rate of gaseous mixture inside the cylinder at inlet valve closure. The latter is calculated by taking into account the pressure, temperature and concentration of the mixture at inlet valve closure. The pressure is assumed to be the one after the air-compressor as this is a turbocharged spark ignited heavy duty engine. It is well known that re-circulated exhaust gas displaces some of the air entering the combustion chamber. Thus, the actual mass flow rate of the inducted air at inlet valve closure is calculated as:

$$\dot{m}_{air,IVC} = (1 - x_{EGR}) \cdot \dot{m}_{mix,IVC} \quad (3)$$

Then, for specific total air excess ratio, the actual mass flow rate of natural gas is calculated by taking into account the actual mass flow rate of the inducted air as follows:

$$\dot{m}_{NG} = \frac{\dot{m}_{air,IVC}}{AFR_{st} \cdot \lambda} \quad (4)$$

where AFR_{st} corresponds to the stoichiometric air to fuel ratio (by mass) for natural gas. It must be stated here that the mixture at inlet valve closure is assumed to be an ideal homogeneous mixture with uniform composition and thermodynamic properties. It consists of fresh air, gaseous fuel, and re-circulated exhaust gas. The re-circulated exhaust gas is assumed to consist of CO_2 and H_2O , the concentrations of which are obtained from the composition of the cylinder charge at exhaust valve opening event. Moreover, the temperature of the re-circulated exhaust gas is calculated at the exhaust valve opening condition by running the in-house made software for the baseline Normal Engine Operation (NEO). Under nitrogen-enriched air inlet (NEIA) operating mode, nitrogen enrichment alters the chemical composition of the inducted air because N_2 displaces a portion of the inducted air that would otherwise be utilized during combustion, resulting in lowering of the total air excess ratio. In the proposed model, for each load examined (i.e. air excess ratio value), the actual mass flow rate of the air at inlet valve closure ($\dot{m}_{air,IVC}$) is calculated taking into account the percentage of nitrogen enrichment in the inducted mixture combined with the air mass flow rate corresponding to NEO operating mode. The percentage of nitrogen enrichment in the inducted mixture (Δy_{N_2}) is defined as :

$$\Delta y_{N_2} (\%) = \frac{y_{N_2}^{NEIA} - y_{N_2}^{NEO}}{y_{N_2}^{NEO}} \cdot 100 \quad (5)$$

where ($y_{N_2}^{NEIA}$) represents nitrogen concentration (by volume) in the inducted mixture under NEIA operating mode while ($y_{N_2}^{NEO}$) represents nitrogen concentration (by volume) in the inducted mixture under NEO operating mode. Furthermore, the gaseous fuel consumption (\dot{m}_{NG}) is calculated by EQ(4).

TEST CASES EXAMINED

In the present work, the simulation model is used to investigate the relative impact of air inlet nitrogen enrichment and exhaust gas recirculation on the performance characteristics and exhaust emissions of a heavy duty, spark-ignited natural gas engine fuelled with natural gas. Thus, at partial (i.e. 65% of full load) and high (i.e. 100% of full load) load conditions, the percentage of nitrogen concentration in the inducted air was increased by 2, 4 and 6 per cent ($\Delta y_{N_2} = 2\%$, 4% and 6%) relative to the convectional operating case (i.e. 79% by volume in air). Thus, for each loading point examined, besides the oxygen mass fraction of the inducted mixture corresponding to the conventional operating case ($x_{O_2} = 23,2\%$), three different oxygen mass fractions were estimated. Specifically, oxygen mass fraction of the inducted mixture was decreased from $x_{O_2} = 23,2\%$ to $x_{O_2} = 18\%$, at both engine loading conditions examined. Moreover, for each loading point examined, three different EGR percentages were examined herein. Specifically, for each engine load condition, the appropriate EGR percentage was estimated in order that the inducted mixture oxygen mass fraction resulting from the EGR application becomes equal to the respective oxygen mass fraction derived from the application of nitrogen-enrichment operating mode. Thus, under EGR operating mode, EGR percentage was increased from $x_{EGR} = 0\%$ to $x_{EGR} = 15\%$ at partial load conditions, while at high load

conditions it was increased up to $x_{EGR} = 10\%$. It must be stated here that the test case corresponding to $x_{O_2} = 23,2\%$ (by mass) nitrogen concentration in the inducted air and $x_{EGR} = 0\%$ is referred as 'normal engine operating point' (NEO point). Moreover, for each test case examined, the injection advance was kept constant. In Table 1 more details are given about the test cases examined in the present work.

Table 1. Test Cases Examine

x_{O_2} (%)	65% Load & $\lambda_a = 1,66$ & 1500 rpm			100% Load & $\lambda_a = 1,85$ & 1500 rpm		
	λ_{O_2}	Δy_{N_2} (%)	x_{EGR} (%)	λ_{O_2}	Δy_{N_2} (%)	x_{EGR} (%)
23,2	1,73	0	0	1,92	0	0
21,5	1,60	2	5	1,78	2	6
19,8	1,47	4	10	1,63	4	12
18	1,34	6	18	1,49	6	20

MODEL VALIDATION

Results obtained from an extended experimental investigation conducted in the past on a 'GE Jenbacher 320', multi-cylinder, spark-ignited engine [15] are used to experimentally validate the predictions of the simulation model. The basic data related to the simulated engine are presented in Table 2 [15].

Table 2. Basic data of the Test Engine.

Engine Type	V-70 ⁰ , 20 Cyl., 4-Stroke, SI, T/C
Bore	135 mm
Stroke	170 mm
Connecting Rod	320 mm
Compression Ratio	11:1
Engine Displacement Volume	48,7 lt
Normal SOI (at 100% load)	23 °CA before TDC

This is a four-stroke, turbocharged, water-cooled, spark-ignited engine fuelled with natural gas. Since the specific engine is used as an electric power generator (actually in a co-generation mode), the normal speed of the engine is fixed at 1500 rpm and it is kept constant for the entire range of loads examined. A comparison between experimental and calculated pressure traces under NEO operating mode is given in Figure 3. Also, in figure 4 are compared experimental and calculated values of (i) engine power, (ii) engine efficiency and (iii) NO emissions. All experimental data were taken at four different engine loads corresponding to 40, 65, 85 and 100% of full engine load and at 1500 rpm engine speed. Examining these figures, it is observed that there is a good coincidence between calculated and experimental values at all test cases examined. This proves the ability of the specific model to predict adequately performance characteristics and the exhaust emissions of a spark ignition engine operating under natural gas fuel mode with normal chemical composition of the inducted air.

Furthermore, taking into account experimental data it is shown that the simulation model manages to predict with adequate accuracy the trend of the engine performance characteristics with the change each one of the examined techniques. Thus, the specific model can be used to look into the effect each one of the examined parameters on performance and pollutant emissions of the specific engine. It is emphasized here that the values of the present model's constants are held constant for all strategies examined in the present work (i.e. NEIA and EGR).

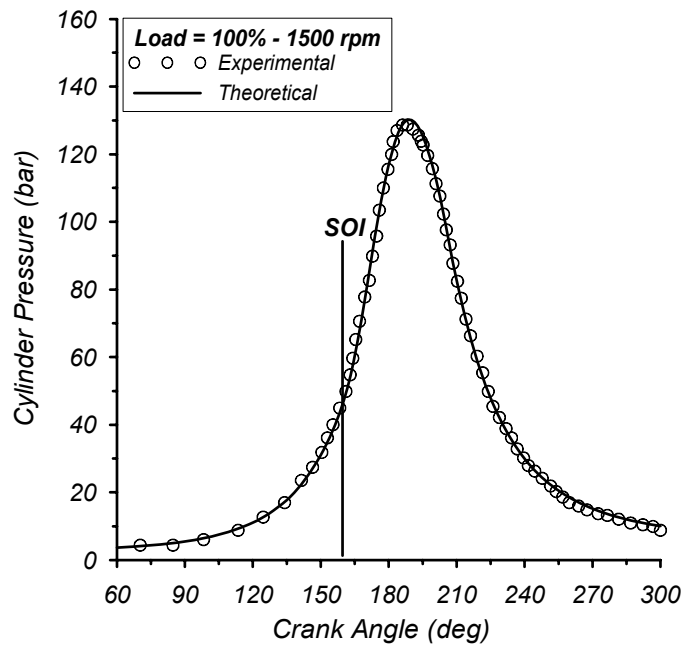


FIGURE 3. Comparison of experimental and computed pressure traces at the engine speed of 1500 rpm and 100% load.

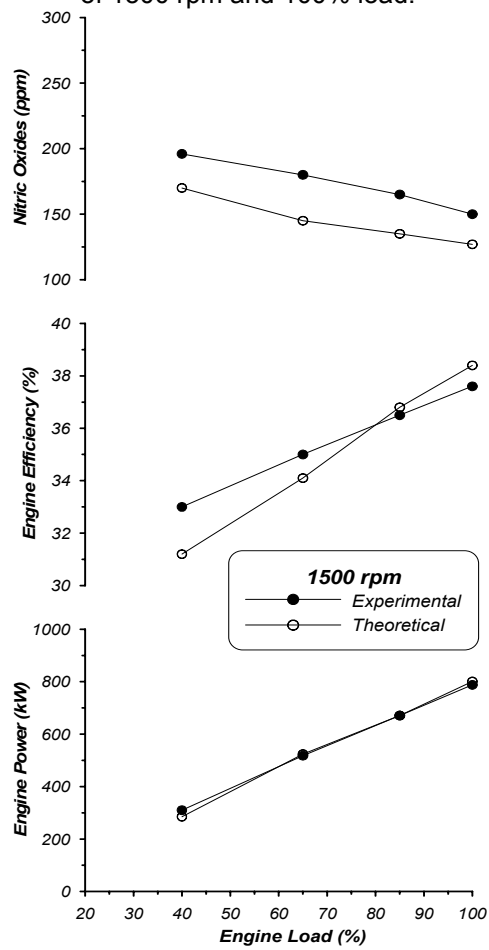


FIGURE 4. Computed and experimental values of (i) Power, (ii) Efficiency and (iii) NO emissions, versus engine load, at 1500 rpm engine speed.

RESULTS AND DISCUSSION

Comparative Evaluation of the Effects of Intake-Air Nitrogen-Enrichment and EGR on SI Natural Gas Engine Performance Characteristics

In this section, the predictive capabilities of the phenomenological model are explored. The predicted effects of the two strategies examined herein on some basic performance characteristics and pollutant emissions of a heavy-duty spark-ignited natural gas engine are examined, for two engine operating points corresponding to 65% and 100% of full engine load at 1500 rpm engine speed.

Figures 5-6 provide the predicted cylinder pressure and total heat release traces for $x_{O_2} = 19,75$ (%) oxygen mass fraction of the cylinder charge at inlet valve closure event, at 100% of full engine load at 1500 rpm engine speed, using the two methodologies examined herein i.e. nitrogen enrichment of the inducted air (NEIA) and exhaust gas recirculation (EGR), respectively. In these figures the predicted cylinder pressure and total heat release traces are also given corresponding to normal engine operating (NEO) mode. Observing figure 5 it can be seen that the air inlet nitrogen-enrichment affects the cylinder pressure history. Thus, by raising the nitrogen mass fraction of the inducted mixture, the rate of cylinder pressure rise during the initial stage of the combustion process becomes lower, while the peak cylinder pressure occurs slightly later compared to the respective values observed under NEO condition. This is the result of both the later initiation of combustion and the lower combustion rate of the gaseous fuel, especially during the initial stages of combustion process, which occurred due to the lower cylinder charge temperatures. As far as the heat release rate curves are concerned (Figure 6), it is observed that the nitrogen enrichment affects also the burning rate. It is shown that the initiation of combustion observed with increased nitrogen mass fraction at IVC starts later compared to the respective one under NEO mode. This is attributed to the increase of ignition delay and also due 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, etc.) do not favor the propagation of the flame front.

Observing figures 5-6, it is obvious that the presence of the exhaust gas re-circulated in the cylinder charge, affects both cylinder pressure and total burning rate. Thus, for high engine loading point, the increase of EGR affects the values of the cylinder pressure compared to the respective one observed under normal engine operating mode. The difference observed during the last stages of the compression stroke is the result of the higher specific heat capacity of the cylinder charge mixture (i.e. air-natural gas-EGR), compared to that of the air-natural gas in the case of NEO mode. Moreover, for all engine operating points examined, as EGR increases the rate of cylinder pressure rise during the first stage of the combustion process becomes lower, while the peak cylinder pressure occurs slightly later compared to the respective values observed without EGR. As far as the heat release rate curve is concerned (Figure 6), it is revealed that for the same oxygen mass fraction at IVC the initiation of combustion observed with EGR operating mode starts later compared to the respective one observed with air inlet nitrogen enrichment (NEIA mode). This is due to the fact that the cylinder charge with EGR (i.e. gaseous fuel – air – EGR mixture) has higher overall specific heat capacity compared to the respective one without EGR. Furthermore, as EGR increases the burning rate observed during the first stage of combustion decreases. This is due to the lower cylinder charge temperature that affects negatively the combustion process of the gaseous fuel, which has not yet progressed enough since the cylinder charge conditions during the specific phase do not favor the existence of the flame front.

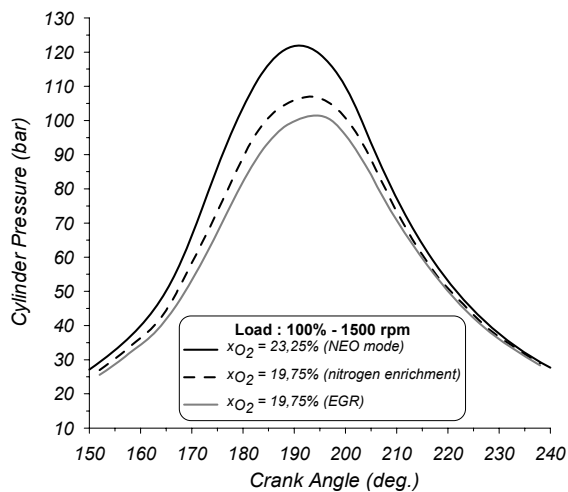


FIGURE 5. Calculated cylinder pressure traces at 1500 rpm and 100% load, for 19.75 (%) oxygen mass fraction in the inducted mixture using (i) air inlet nitrogen enrichment and (ii) EGR.

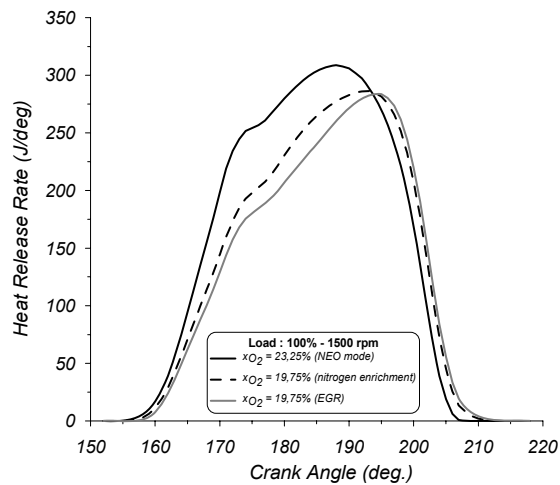


FIGURE 6. Calculated heat release rate traces at 1500 rpm and 100% load, for 19.75 (%) oxygen mass fraction in the inducted mixture using (i) air inlet nitrogen enrichment and (ii) EGR.

Figures 7A-B and 8A-B illustrate the variation of the calculated peak cylinder pressure and maximum cylinder temperature as a function of the oxygen mass fraction of the inducted mixture. The results correspond to 65% and 100% of full engine load conditions, for two strategies examined i.e. nitrogen enrichment and EGR, at 1500 rpm engine speed. In the same figures the normal engine operating point is also given, that corresponds to 23.2 (%) oxygen mass fraction (NEO mode). Since both maximum cylinder pressure and temperature are critical parameters affecting the mechanical and the thermal strength of engine structure, the study of the effect of the examined strategies on maximum cylinder pressure and temperature is of particular interest. By examining these figures, it is revealed that the maximum cylinder pressure decreases with the increase of the percentage of air nitrogen-enrichment resulting thus in lower cylinder charge temperatures. This is attributed to the decrease of the gaseous fuel combustion rate, due to the retardation of the flame front. The effect becomes more evident at full engine load conditions, where the decrease of the maximum cylinder temperature is up to 10%. For both loads examined, the decrease of the maximum cylinder pressure is not so severe (up to 10% at part load, and up to 8% at high load). Regarding the effect of EGR on both maximum cylinder pressure and temperature, it is observed that for all test cases examined, the increase of EGR leads also to the decrease of the maximum cylinder pressure and temperature. Despite the smooth decrease of the maximum temperature, the maximum cylinder pressure starts to decrease slightly with an increase of EGR until a certain limit, where a further increase of EGR leads to a more intense decrease of the maximum combustion pressure. The effect becomes more evident at high load. Eventually, it should be mentioned, that under EGR operating mode, the lower heat release rate and the higher specific heat capacity of the cylinder charge are the main reasons for the lower and delayed appearance of the maximum combustion pressure, compared to the respective values observed under NEO and air inlet nitrogen enrichment operating modes.

Figures 9A-B depict the variation of the calculated duration of combustion as a function of the oxygen mass fraction of the inducted mixture. The results correspond to 65% and 100% of full engine load conditions, for two strategies examined i.e. intake-air nitrogen-enrichment and EGR, at 1500 rpm engine speed. In the same figures the normal engine operating point is also given, that corresponds to 23.2 (%) oxygen mass fraction (NEO mode). Examining these figures, it is

observed that for both engine loads examined, both strategies examined herein lead to a longer duration of combustion as compared to the respective one observed under NEO mode.

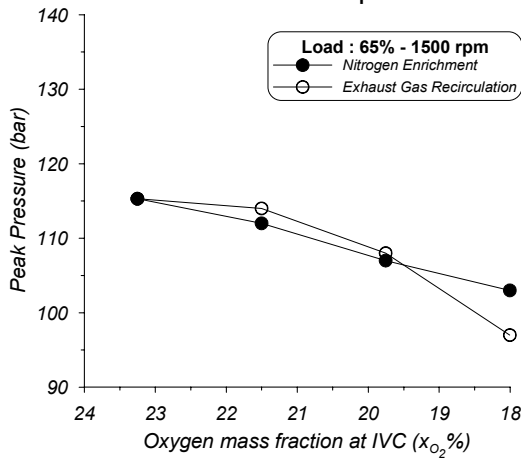


FIGURE 7A. Maximum pressure as a function of oxygen mass fraction of the inducted mixture, at 1500 rpm and 65% load, for (i) NEIM and (ii) EGR operating modes.

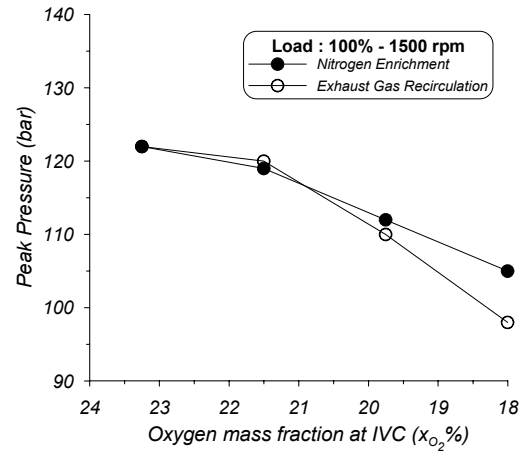


FIGURE 7B. Maximum pressure as a function of oxygen mass fraction of the inducted mixture, at 1500 rpm and 100% load, for (i) NEIM and (ii) EGR operating modes.

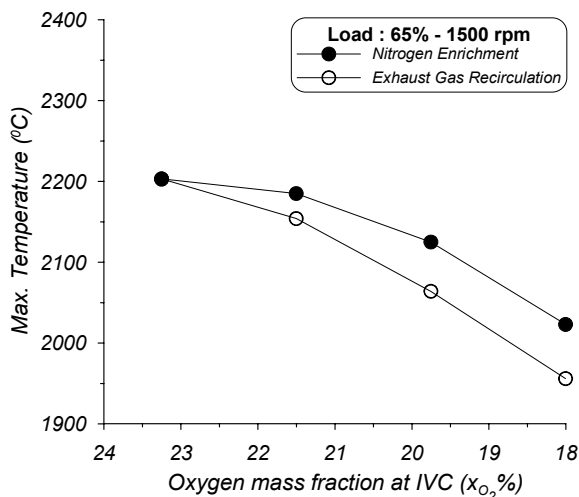


FIGURE 8A. Maximum temperature as a function of oxygen mass fraction of the inducted mixture, at 1500 rpm and 65% load, for (i) NEIM and (ii) EGR operating modes.

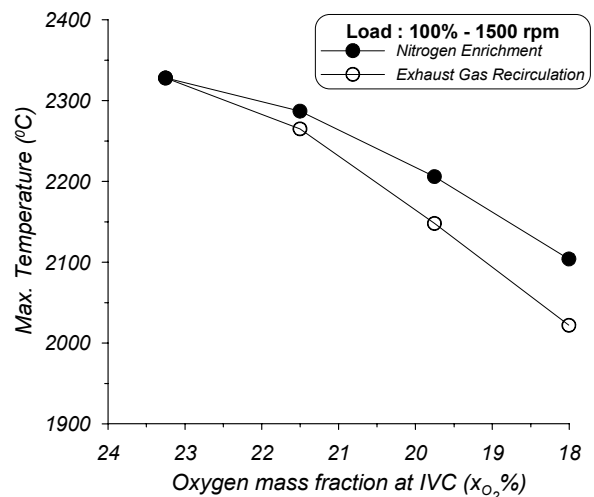


FIGURE 8B. Maximum temperature as a function of oxygen mass fraction of the inducted mixture, at 1500 rpm and 100% load, for (i) NEIM and (ii) EGR operating modes.

Specifically, nitrogen enrichment prolongs the duration of combustion and the specific effect becomes more intense at high load and high nitrogen percentages in the inducted mixture. This may be attributed, primarily, to the fact that nitrogen enrichment delays slightly the initiation of combustion. This emanates from the higher specific heat capacity of the mixture accompanied by the lower cylinder charge conditions occurring at the spark timing, compared to the respective values under NEO operating mode.

According to Figures 9A-B, it is observed that, despite the fact that the lower total air excess ratios, caused by the presence of EGR, is a critical factor favoring the flame propagation mechanism contributing, thus, to an improvement of the natural gas combustion quality, as EGR percentage increases the duration of combustion also increases. This specific effect is ascribed

primarily to the low cylinder charge temperature, due to the higher specific heat capacity of the cylinder charge and also to the slower combustion rate of the natural gas.

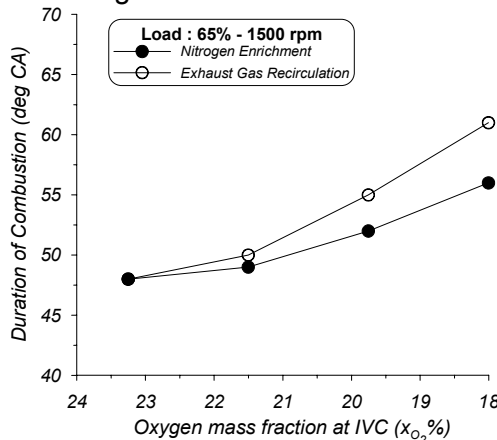


FIGURE 9A. Duration of Combustion as a function of oxygen mass fraction of the inducted mixture, at 1500 rpm and 65% load, for (i) NEIM and (ii) EGR operating modes.

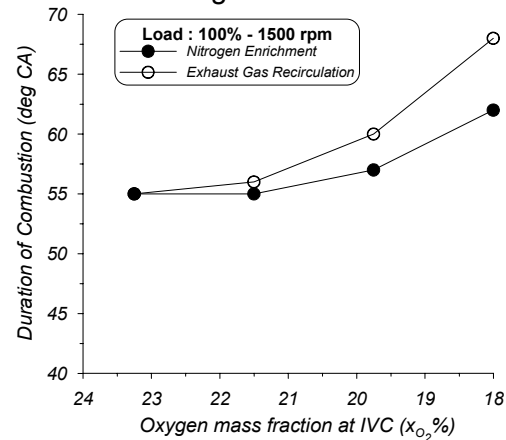


FIGURE 9B. Duration of Combustion as a function of oxygen mass fraction of the inducted mixture, at 1500 rpm and 100% load, for (i) NEIM and (ii) EGR operating modes.

Figures 10A-B illustrate the variation of the calculated brake specific fuel consumption (bsfc) as a function of the oxygen mass fraction of the inducted mixture. The results correspond to 65% and 100% of full engine load conditions, for two strategies examined i.e. nitrogen enrichment and EGR, at 1500 rpm engine speed. In the same figures the normal engine operating point is also given (NEO mode). It must be noted here that the computed bsfc is estimated from the calculated brake power output and the calculated mass flow rate of the natural gas. Moreover, brake power output is estimated from the calculated indicated power output (i.e. calculated from cylinder pressure diagram) and the mechanical efficiency that is predicted through a simple simulation sub-model. Observing these figures, it is revealed that for both loads examined, the increase of the nitrogen percentage in the inducted mixture results to an increase of bsfc since the combustion of the fuel becomes more ineffective. As far as the effect of EGR percentage on bsfc is concerned, it is revealed that the presence of EGR affects also the brake engine efficiency. Specifically, for both loads examined, the increase of the EGR percentage leads initially to a slight increase of the total brake specific fuel consumption, while a further increase of the EGR beyond a critical percentage results to a more intense deterioration of engine efficiency. This specific deterioration is ascribed primarily to the longer ignition delay period, which affects negatively the heat release rate, especially during the initial stages of combustion process. At the same time, the improvement of the gaseous fuel combustion quality, which is caused by the reduction of the total air excess ratio (i.e. lower total air excess ratio leads to faster flame speed), does not contribute considerably to the improvement of engine efficiency.

Comparative Evaluation of the Effects of Intake-Air Nitrogen-Enrichment and EGR on SI Natural Gas NO and CO Emissions

Figures 11A-B illustrate the variation of the calculated specific NO emissions as a function of the oxygen mass fraction of the inducted mixture. Theoretical results are presented at 65% and 100% of full engine load conditions, for the two strategies examined herein i.e. nitrogen enrichment and EGR, at 1500 rpm engine speed. In the same figures predictions for the normal engine operating point are also given. It is well known [2-4] that the formation of NO is favored in general by high gas temperatures and near stoichiometric mixture conditions towards the lean.

Observing figures 11A-B, it is revealed that, for both loads examined, specific NO concentration under nitrogen enriched inducted mixture (NEIM) operating mode is lower compared to the one observed under NEO mode. For the same load, the burning temperature observed under NEIA mode is lower compared to the respective one under NEO mode. Moreover, nitrogen enrichment depletes effectively oxygen concentration in the cylinder charge. Thus, the lower oxygen concentration in combination with the lower burning temperatures provides a possible explanation about the lower NO concentrations observed under NEIM operating modes compared to the respective ones under NEO operating mode.

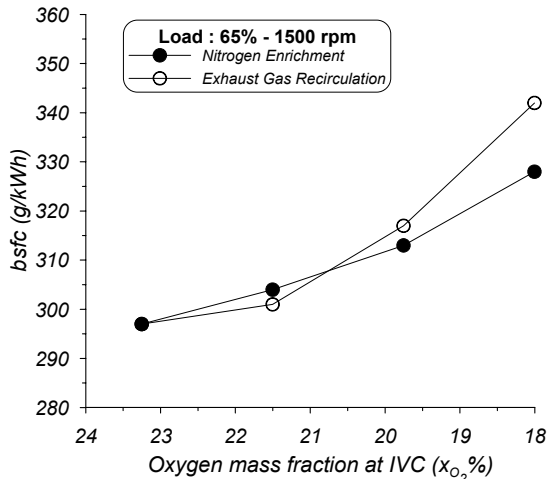


FIGURE 10A. Brake specific fuel consumption as a function of oxygen mass fraction of the inducted mixture, at 1500 rpm and 65% load, for (i) NEIM and (ii) EGR operating modes.

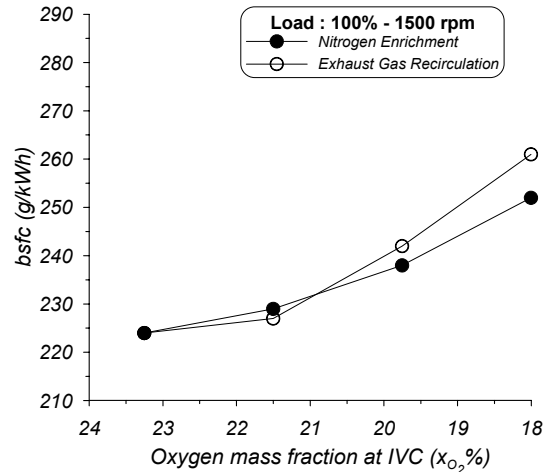


FIGURE 10B. Brake specific fuel consumption as a function of oxygen mass fraction of the inducted mixture, at 1500 rpm and 100% load, for (i) NEIM and (ii) EGR operating modes.

As far as the effect of EGR on specific NO emissions is concerned, it is revealed that the increase of EGR percentage results also in a decrease of specific NO emissions. This may be attributed to the delayed, relative to TDC, initiation of combustion due to the increase of the ignition delay period. Furthermore, the increase of EGR percentage results to lower charge temperature caused by the higher specific heat capacity of the cylinder charge and, moreover, it leads to a reduction of the oxygen availability in the cylinder charge. The aforementioned parameters restrain the NO formation mechanism. By examining figures 11A-B it is revealed that for high load examined, NO emissions seems to be more sensitive to EGR rather than to nitrogen enrichment of the inducted air. Inferentially, by comparing the results obtained from both strategies examined, it is revealed that for an existent SI engine, running at high load, the curtailment of the emitted NO without serious deterioration of engine efficiency may be achieved with nitrogen enrichment of the inducted air instead of using EGR.

Figures 12A-B show the variation of the calculated specific CO emissions as a function of the oxygen mass fraction of the inducted mixture. The results correspond to 65% and 100% of full engine load conditions, for two strategies examined i.e. nitrogen enrichment and EGR, at 1500 rpm engine speed. In the same figures predictions for the normal engine operating point are also given. As known [2-4], CO formation rate depends on the relative air/fuel ratio, the unburned gaseous fuel availability and the cylinder charge temperature. The latter two parameters control the rate of fuel decomposition and oxidation [2-4].

Observing figures 12A-B, it is revealed that the decrease of oxygen mass fraction of the inducted mixture using nitrogen enrichment results in a negligible variation of CO emissions. Specifically, the increase of nitrogen concentration in the charge mixture causes a slight reduction of the total air/fuel ratio. This leads to a negligible effect on both CO formation and

oxidation rates, due to the decreased charge temperature. Thus, the emitted CO concentrations observed under NEIA operating mode seem to be almost the same with the respective ones observed under normal engine operating mode. On the other hand, the increase of EGR percentage results to an increase of CO emissions. Specifically, the increase of EGR percentage causes an increase of the ignition delay period, which suppresses the progress of the gaseous fuel combustion process, a situation that affects negatively (i.e. increase) the emitted carbon monoxide. On the other hand, the increase of EGR percentage promotes slightly CO oxidation rate, due to the lower total air-fuel excess ratio, which leads to a slight acceleration of the flame front and, thus, to a slight improvement of the gaseous fuel combustion rate. Nonetheless, the aforementioned improvement contributes insignificantly to the reduction of the emitted CO, since it occurs late. Observing the results, it is revealed that for high engine operating point the effect of EGR on CO emissions is more intense compared to the respective effect caused by the nitrogen enrichment of the inducted air.

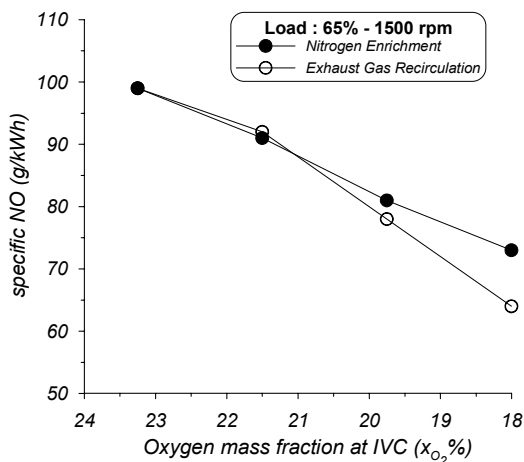


FIGURE 11A. Specific NO concentration as a function of oxygen mass fraction of the inducted mixture, at 1500 rpm and 65% load, for (i) NEIM and (ii) EGR operating modes.

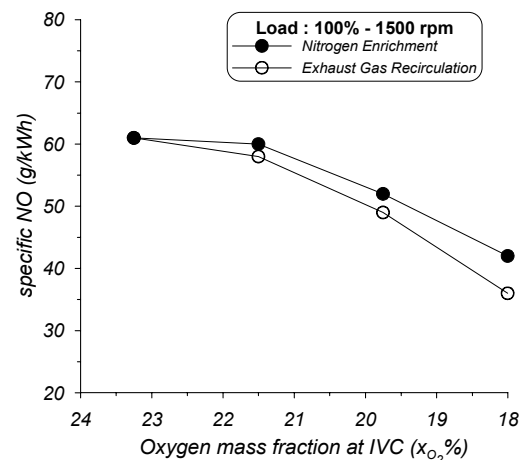


FIGURE 11B. Specific NO concentration as a function of oxygen mass fraction of the inducted mixture, at 1500 rpm and 100% load, for (i) NEIM and (ii) EGR operating modes.

CONCLUSIONS

In the present work, an existing two-zone phenomenological model has been used to examine the effect of (i) nitrogen enrichment of the inducted air and (ii) EGR, on performance characteristics and pollutant emissions of a natural gas spark ignited engine. A good coincidence between calculated and measured values under normal composition of the inducted air (NIA) operation was observed for performance characteristics, NO and CO emissions. Specifically, the model predicts with reasonable accuracy the absolute values but most important it predicts the trends of the combustion and pollutants formation mechanisms with various engine operating parameters.

Acknowledging the predictive ability of the two-zone combustion model, it was used to examine the effect of the aforementioned strategies on engine performance parameters, NO and CO emissions. From the evaluation of the theoretical findings, the following conclusions can be summarized as below:

- the increase of nitrogen mass fraction in the inducted mixture, results to:
 - deterioration of engine efficiency. The effect is more evident at intermediate load and high N_2 mass fractions in the inducted mixture.

- decrease of the maximum cylinder pressure, which at high N₂ mass fractions in the inducted mixture is up to 8%.
- decrease of the specific NO concentration. The effect is more evident at high N₂ mass fractions in the inducted mixture for both loads examined.
- an almost negligible variation of the specific CO concentration.
- the increase of EGR percentage, results to:
 - deterioration of engine efficiency. The effect is more evident at high load and high EGR percentages.
 - decrease of the maximum cylinder pressure, which at high EGR percentage is up to 12%.
 - decrease of the specific NO concentration. The effect is more evident at high load and high EGR percentages.
 - increase of the specific CO concentration. At high load and high EGR percentage the specific increase is up to 30%.

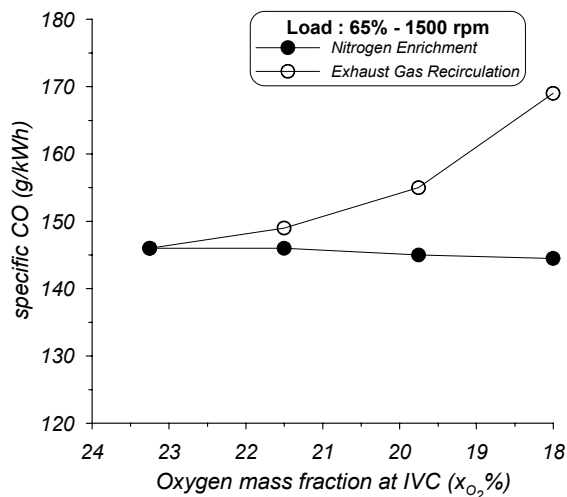


FIGURE 12A. Specific CO concentration as a function of oxygen mass fraction of the inducted mixture, at 1500 rpm and 65% load, for (i) NEIM and (ii) EGR operating modes.

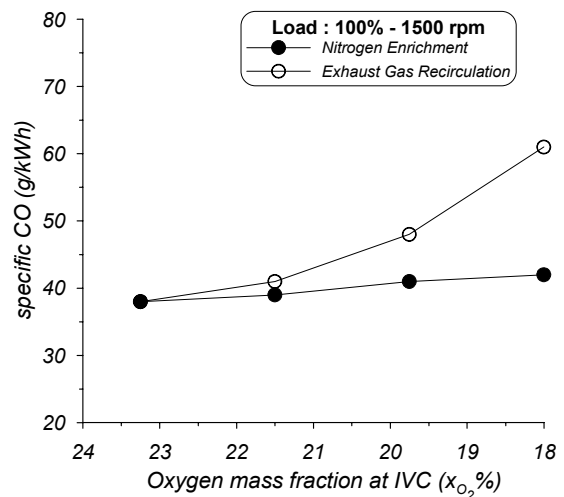


FIGURE 12B. Specific CO concentration as a function of oxygen mass fraction of the inducted mixture, at 1500 rpm and 100% load, for (i) NEIM and (ii) EGR operating modes.

In general, the increase of nitrogen percentage in the inducted mixture could be a promising solution for reducing NO emissions as compared to EGR. At low percentages, the specific strategy does not bring serious problems to engine performance characteristics. However, at high engine loads, the excessive increase of the nitrogen enrichment percentage beyond a certain limit may be proven to be harmful to engine performance characteristics (i.e. brake efficiency, engine power output). At the same time, the simultaneous increase of both parameters, at both low and high engine load conditions, does not bring any serious problem to engine operational lifetime, since the maximum cylinder pressure is lower compared to the respective one observed under normal engine operation. The results of this preliminary investigation are encouraging and urge us to prolong our theoretical investigation to examine the combined effect of other engine parameters (i.e. ignition timing, etc) on performance characteristics of an existing spark-ignited engine fuelled with natural gas. This is currently under progress and results will be given in the near future. Even though it is difficult to generalize the findings of the current preliminary investigation, we believe that they are important since the reduction of NO emissions on existing SI natural gas engines is extremely important.

REFERENCES

1. Korakianitis T, Namasivayam AM, Crookes RJ. Natural-gas fueled spark-ignition (SI) and compression-ignition (CI) engine performance and emissions. *Prog Energy Combust Sci* 2011;37:89-112.
2. Heywood J.B. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. New York: McGraw–Hill, 1988.
3. Ferguson, C.R. *Internal Combustion Engines – Applied Thermosciences*, John Wiley, New York, 1986
4. Benson, R.S. and Whitehouse, N.D. *Internal Combustion Engines*, Pergamon Press, Oxford, 1979
5. Karim, G.A. and Ali, I.A. Combustion, knock and emission characteristics of a natural gas fuelled spark ignition engine with particular reference to low intake temperature conditions, *Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers*, Vol. 189, pp.139–147, 1975.
6. Krishnan S.R., Biruduganti M., Mo Y., Bell S.R., Midkiff K.C., Performance and Heat Release Analysis of a Pilot-Ignited Natural Gas Engine. *J. of Engine Research* 2002;3:171-183.
7. Srinivasan K.K., Krishnan S.R., Midkiff K.C., Improving Low Load Combustion, Stability and Emissions in Pilot-Ignited Natural Gas Engines. In *Proceedings of IMechE 2006, J. of Automobile Engineering* 2006;220:229-239.
8. Liss, W.E. and Thrasher, W.H., Natural Gas as a Stationary Engine and Vehicular Fuel, SAE Paper No 912364.
9. Unich, A., Bata, R.M. and Lyons, D.W., Natural Gas: A Promising Fuel for I.C. Engines, SAE Paper No 930929.
10. Poola R.B., Stork, K.C., Sekar, R.R., Callaghan, K. and Nemser, S., Variable Air Composition With Air Separation Membrane: A New Low Emissions Tool for Combustion Engines, SAE Transactions, 1998, 106, pp. 332-346.
11. Wong, H.C., Beck, N.J. and Chen, S.K., The Evolution of Compression Ignition Natural Gas Engines for Low Emission Vehicles, 2000, ASME Paper No 2000-ICE-318.
12. Biruduganti, M., Gupta, S. and Sekar, R., Low Temperature Combustion Using Nitrogen Enrichment to Mitigate NOx from Large Bore Natural Gas Fuelled Engines, ASME Paper No ICES2008-1616.
13. Biruduganti, M., Gupta, S., McConnel, S. and Sekar, R., Nitrogen Enriched Combustion of a Natural Gas Engine to Reduce NOx Emissions, ASME Paper No ICEF2004-843.
14. Papagiannakis R.G., Rakopoulos C.D., Hountalas D.T and Giakoumis E.G., Study of the performance and exhaust emissions of a spark-ignited engine operating on syngas fuel, *Int. J. Alternative Propulsion*, Vol. 1, No. 2/3, 2007
15. GE Jenbacher – Technical Report Laminar Flame Speed versus Air Fuel Ratio – Experience in Woodgas Plants, June 2005, Jenbach, Austria.
16. Papagiannakis R.G., Zannis T.C., Hountalas D.T. and Kotsiopoulos P.N., Study of Performance and Exhaust Emissions of a Spark-Ignited Engine operating with Nitrogen Enrichment of Intake Air, ECOS Paper, 2011.
17. Srinivasan K. K., Krishnan S. R., Qi Y., Midkiff K. C. and Yang H., Analysis of diesel pilot-ignited natural gas low temperature combustion with hot exhaust gas recirculation. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2007, 179:9,1737 -1776
18. Pirouzpanah V. , Khoshbakhti Saray R, Sohrabi A. and Niaei A., Comparison of thermal and radical effects of EGR gases on combustion process in dual fuel engines at part loads, *J. of Energy Conversion and Management*, 2007, 48, 1909-1918
19. Pirouzpanah V., Khoshbakhti Sarai R., Reduction of emissions in an automotive direct injection diesel engine dual-fuelled with natural gas by using variable exhaust gas recirculation. *Proc. Instn Mech. Engrs Part D: J. Automobile Engineering*, 2003, 217, 719-725.
20. Krishnan, S.R., Srinivasan, K.K., Singh, S., Bell, S.R., Midkiff, K.C., Gong, W., Fiveland, S. and Willi, M., Strategies for reduced NOx emissions in pilot-ignited natural gas engines., ASME-WA Meeting, Proc. ICEF, 2002, 39, 361-367.
21. Kusaka J., Okamoto T., Daisho Y., Kihara R., Saito T., Combustion and exhaust gas emission characteristics of a diesel engine dual- fueled with natural gas. Society of Automotive Engineers of Japan, Inc. and Elsevier Science, *JSAE Review*, 2000, 21, 489-496
22. Ishida M, Tagai T, Ueki H. Effect of EGR and preheating on natural gas combustion assisted with gas-oil in a diesel engine. *JSME Int J*, 2003;46:124-30.

23. Abd Alla GH. Using exhaust gas recirculation in internal combustion engines: a review. *Energy Convers Manage*, 2002, 43:1027-42.
24. Blizard, N.C. and Keck, J.C. Experimental and Theoretical Investigation of Turbulent Burning Model for Internal Combustion Engines, SAE Paper No. 740191.
25. Lucas, G.G. and James, E.H., Computer Simulation of a Spark Ignition Engine, SAE Paper No. 730053.
26. Lavoie, G. Correlations of Combustion Data for a SI Engine Calculations-Laminar Flame Speed, Quench Distance and Global Reaction Rates, SAE Paper No. 780229.
27. Bayraktar H. Experimental and theoretical investigation of using gasoline-ethanol blends in spark ignition engines. *J. of Renewable Energy* 30, 11, pp. 1733-1747, 2005.
28. Annand, W.J.D. Geometry of spherical flame propagation in a disc-shaped combustion chamber, *Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 12, pp.146–149, 1970.
29. Annand, W.J.D. Heat transfer in the cylinders of reciprocating internal combustion engines, *Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers*, Vol. 177, pp.973–990, 1963
30. Vickland, C.W., Strange, F.M., Bell, R.A. and Starkman, E.S. A consideration of the high temperature thermodynamics of internal combustion engines, *Transactions of the SAE*, Vol. 70, pp.785–793, 1962
31. Lavoie, G.A., Heywood, J.B. and Keck, J.C. Experimental and theoretical study of nitric oxide formation in internal combustion engines, *Combustion Science and Technology*, Vol. 1, pp.313–326, 1970
32. Al-Himyary TJ, Karim GA. A correlation for the burning velocity of methane – Air mixtures at high pressures and temperatures. *ASME Trans, J Eng Gas Turbines Power* 1987;109:439-42.

Feasibility Analysis on a Steam Rankine Cycle to Recover Heat from a Gas Turbine used on a Naval Vessel

Efthimios G. Pariotis*, Ioannis Katsanis and Ioannis Roumeliotis

*Laboratory of Naval Propulsion Systems, Section of Naval Architecture and Marine Engineering,
Department of Naval Sciences, Hellenic Naval Academy, End of Hatzikiriakou Ave., 18539
Piraeus, Greece
pariotis@snd.edu.gr, Tel.: +30 210 4581663; Fax: +30 211 7701574.*

Abstract. The design concept of some special purpose naval vessels requires the usage of gas turbines as prime mover engines, which offer high power density and high flexibility on the variation of the engine load. However, one of the disadvantages of the gas turbines compared to their main competitors, the diesel engines, is their lower fuel efficiency. The comparison becomes ever worse when referring to the part load engine conditions, especially for the legacy gas turbines installed in some vessels of the Hellenic Navy. The part load operation is of paramount importance for the case of marine propulsion, since the engines operate most of the time at part load. Apart from the economic impact of the relatively high fuel consumption of the installed gas turbines, there are also operational issues that arise and have to be considered. The engine's fuel consumption affects the planning of the required fuel supply chain and the operational range of the vessel. In the present study, a preliminary feasibility analysis of installing a waste heat recovery bottoming Rankine cycle with steam as a working medium is conducted, in order to estimate the improvement of the fuel consumption over the entire operating range for a gas turbine used as a base prime mover at the Hellenic Navy. For this purpose, a gas turbine performance model is used to calculate the flue gas properties (temperature and mass flow rate) during the engine off-design operation and is coupled with a thermodynamic model that simulates the Rankine cycle and predicts the thermodynamic properties of water/steam at all operating conditions. The analysis takes into account constraints regarding the available space for installing the various components and especially the exhaust gas heat exchanger (HRSG), as well as the lower limit of the exhaust gas temperature to avoid condensation. From this preliminary investigation it has been confirmed that with the proposed configuration, a significant improvement on the overall (combined) efficiency can be obtained ranging from 33% at full power to 53% at 25% of the gas turbine load, providing a technically feasible solution to the problem of low gas turbine engine efficiency, especially at part load operation. Moreover, at the same time, this technique provides tactical benefits, since it lowers the exhaust gas temperature which consequently affects the infrared "signature" of the ship, making its tracking by the enemy harder.

Keywords: Gas Turbines, Waste heat recovery, Steam Rankine cycle, COGAS.

INTRODUCTION

The classical heat engine cycles for power generation in steam and gas turbine plants are those associated with the names of Rankine and Joule-Brayton [1]. The temperature-entropy diagrams for these cycles are shown in Figs. 1A and 1B respectively. The Rankine cycle is the basis of steam power plant, with steady flow through a boiler, a turbine driving a generator delivering electrical or mechanical power, a condenser and a feed-pump. The Joule-Brayton constant pressure cycle is the basis of the gas turbine power plant, with steady flow of air (or gas) through a compressor, the heater, the turbine, and the cooler within a closed circuit. The turbine drives both the compressor and the generator delivering electrical power or provides mechanical power on a power shaft.

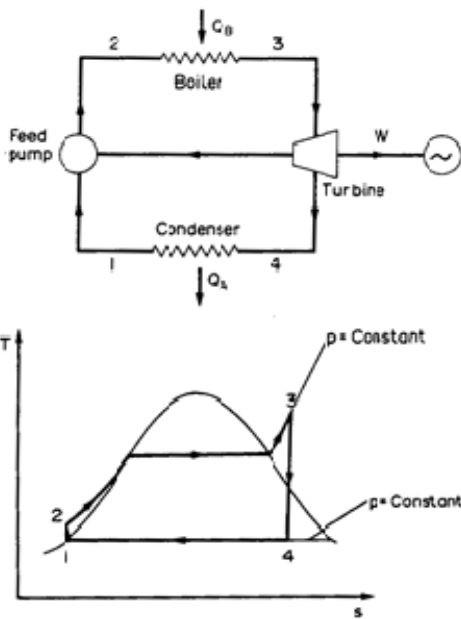


FIGURE 2A. Rankine cyclic heat engine [1]

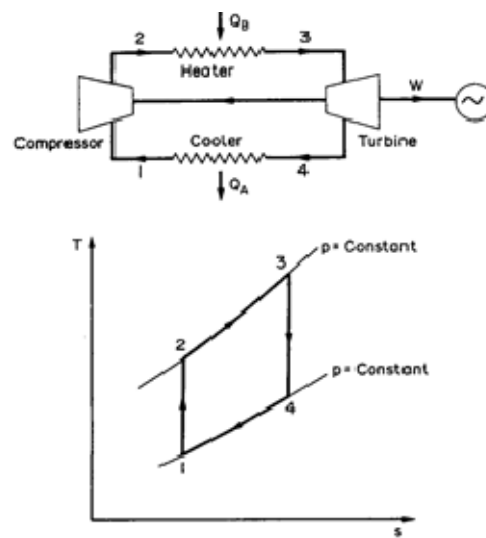


FIGURE 1B. Joule – Brayton cyclic heat engine [1]

One particularly important field of study for conventional power plant design is that of the "combined plant". A broad definition of the conventional "combined cycles" is the cycles that are coupled to work together, in such a way that the heat rejected from the one power cycle (as dictated by the 2nd Law of thermodynamics) which is called upper or topping cycle, becomes the heat source for the other which is called lower or bottoming cycle, in order to produce more useful power. In practice the "upper" plant is often open circuit, not cyclic. In this way it becomes feasible to produce greater work output for a given heat (or fuel energy) supply, i.e. improved energy efficiency. Using the second Law of Thermodynamics it is proved that the maximum efficiency of a heat engine is achieved when it is operated according to the reversible Carnot cycle between a given (maximum) constant temperature (T_B) of heat supply (Q_B) and a given (minimum) temperature (T_A) of heat rejection (Q_A) (according to the temperature –entropy diagram shown in Fig. 2). Its thermal efficiency is given by the following expression:

$$\eta_{TH} = \frac{W}{Q_B} = \frac{Q_B - Q_A}{Q_B} = \frac{T_B \Delta S - T_A \Delta S}{T_B \Delta S} = \frac{T_B - T_A}{T_B} \quad (1)$$

Increasing the high temperature (T_B) or reducing the low temperature of the cycle (T_A) leads to higher energy efficiency. Although in practice it is not feasible to develop an engine working based on the Carnot cycle, this thermodynamic cycle is treated as the measure of excellence when studying power producing cycles under given boundary conditions (i.e. given temperatures of the “hot” source and the “cold” sink).

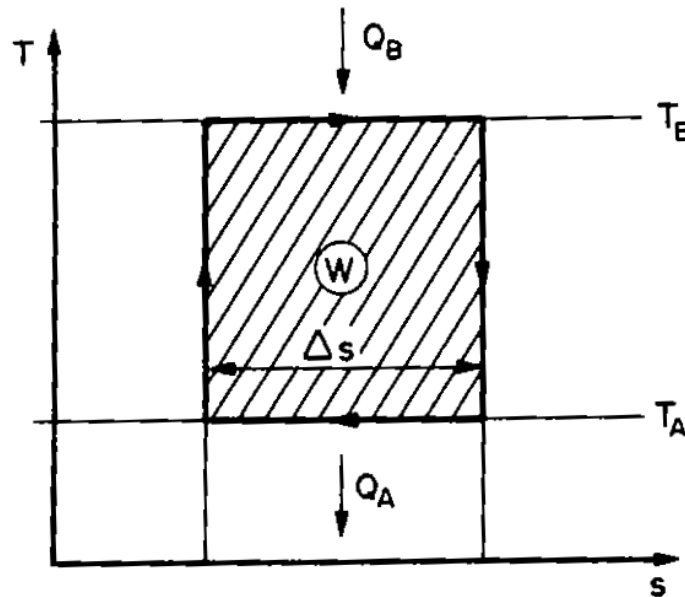


FIGURE 2. Typical Temperature-entropy diagram for a Carnot power plant

There are two features of the Carnot power plant which are responsible for its maximum thermal efficiency [1]:

- all process involved are reversible;
- all heat is supplied at the maximum (specified) temperature (T_B) and all heat is rejected at the lowest (specified) temperature (T_A).

In an attempt to achieve high thermal efficiency, the designer of a conventional power plant investigates alternative ways to raise T_B and lower T_A . In Fig. 3 it is shown how this affects the (Rankine) steam power plant. Firstly, lower rejection temperature (T_A) is achieved by lowering condenser pressure, and it is an important feature of the cycle that all heat is rejected at the lowest temperature.

Secondly, efforts are made to raise the mean temperature of heat supply T_B temperature, by

- raising the boiler pressure;
- reheating between turbine blades
- feed heating (bleeding steam from the turbine to heat the condensate before it is fed to the boiler plant)

Whether such modifications to achieve increased thermal efficiency justify the extra capital required is a matter for economic study; thermodynamics is not always the sole criterion. In this search for higher efficiency, the designer of the conventional power plant is maximizing the work output (W) for a given heat supply (Q_B).

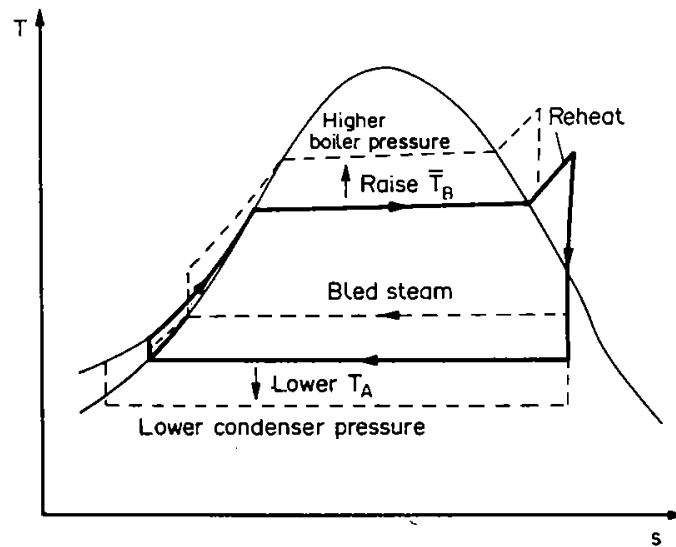


FIGURE 3. Common Modifications of the basic Rankine cycle to increase thermal efficiency

In the design process of a combined cycle power plant, the objective is to optimize the overall system performance, which sometimes does not directly mean that each of the system's components (upper and lower cycle) operate at their most effective operating conditions [2, 3, 4]. To make this clearer, consider a combined power plant, consisted by two separate power plants (H and L) combined as shown in Fig. 4. Heat rejected (Q_{HL}) from the "higher" (topping) plant (H), with a thermal efficiency η_H , is used to the lower (bottoming) plant L (as a heat source), which operate with a thermal efficiency η_L . The two plants may use different working mediums. The work output from the lower cycle is

$$W_L = \eta_L Q_{HL} \quad (2)$$

But

$$Q_{HL} = Q_B (1 - \eta_H) \quad (3)$$

where Q_B is the heat supplied to the upper plant, which delivers work

$$W_H = \eta_H Q_B \quad (4)$$

Thus the total work output is

$$W = W_H + W_L = \eta_H Q_B + \eta_L (1 - \eta_H) Q_B = Q_B (\eta_H + \eta_L - \eta_H \eta_L) \quad (5)$$

The thermal efficiency of the combined plant is therefore

$$\eta_{TH} = \frac{W}{Q_B} = \eta_H + \eta_L - \eta_H \eta_L = \eta_H + \eta_L (1 - \eta_H) \quad (6)$$

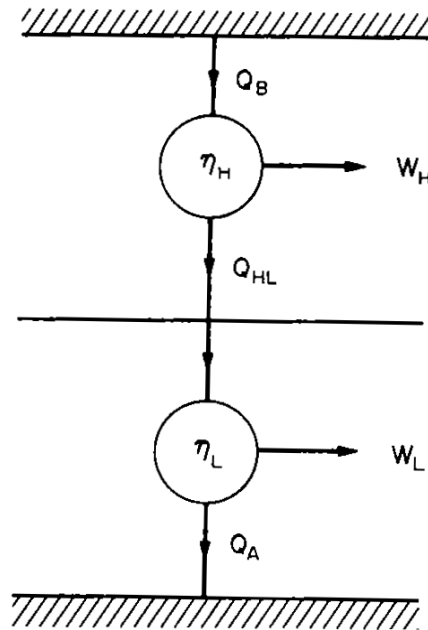


FIGURE 4. Combined power plant

The advantages are clear. The basic efficiency of the upper cycle has been increased by: $\eta_L(1 - \eta_H)$, using its rejected heat to generate power in the lower cycle.

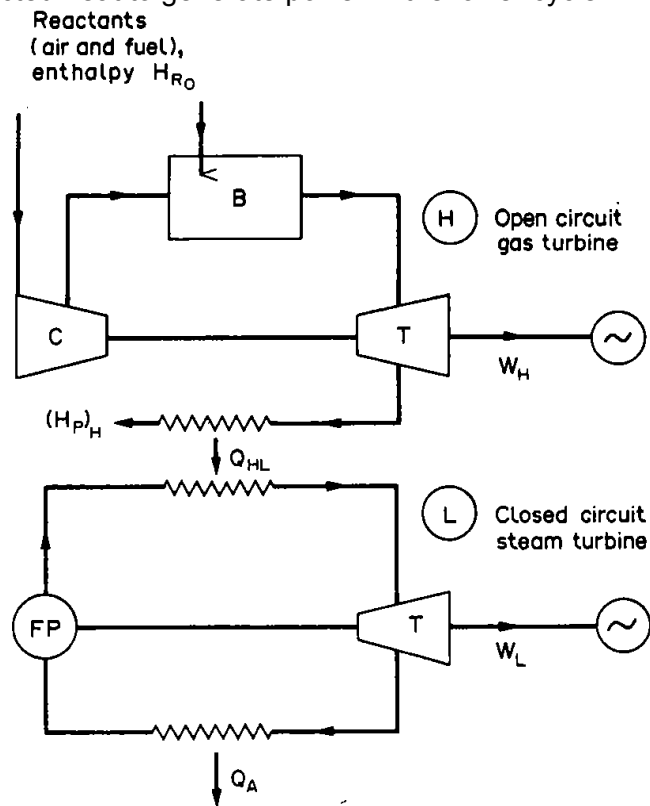


FIGURE 5. Gas turbine/steam turbine combined power plant

When the upper cycle is consisted by a gas turbine, one of the most familiar ways to further exploit the energy of the exhaust gases is to combine the upper cycle with a bottom Rankine cycle equipped with a steam turbine. A typical configuration is the one shown in figure 5. The combination of an open cycle gas turbine with a water/steam cycle, commonly known as the combined cycle, offers several advantages [4, 5]:

- Air/Exhaust gas is a straightforward medium that can be used in modern gas turbines at high turbine inlet temperature levels (above 1200°C), providing the optimum prerequisites for a good topping cycle.
- Steam/water is inexpensive, widely available, non-hazardous, and suitable for medium and low temperature ranges, being ideal for the bottoming cycle.

In this case the combined efficiency of the plant can be expressed by the following equation:

$$\eta_{CC} = \frac{\eta_{GT} Q_{GT} + \eta_{ST} Q_{GT}(1 - \eta_{GT})}{Q_{GT}} = \eta_{GT} + \eta_{ST}(1 - \eta_{GT}) \quad (7)$$

Differentiation makes it possible to estimate how the overall combined plant efficiency is affected by a change in the efficiency of the gas turbine:

$$\frac{\partial \eta_{CC}}{\partial \eta_{GT}} = 1 + \frac{\partial \eta_{ST}}{\partial \eta_{GT}(1 - \eta_{GT})} - \eta_{ST} \quad (8)$$

Thus, increasing the gas turbine efficiency improves the overall efficiency only if:

$$\frac{\partial \eta_{CC}}{\partial \eta_{GT}} > 0 \quad (9)$$

which leads to:

$$-\frac{\partial \eta_{ST}}{\partial \eta_{GT}} < \frac{1 - \eta_{ST}}{1 - \eta_{GT}} \quad (10)$$

The last equation shows that improving the gas turbine efficiency is helpful only if it does not cause a high drop in the efficiency of the bottoming cycle (η_{ST}). Table 1 indicates that when the efficiency of the gas turbine is raised, there is a limit on the allowable decrease of the bottom rankine cycle efficiency, in order this to have a positive effect on the overall combined cycle efficiency. For example, steam process efficiency can be reduced from 30% to 27.8% ($\frac{\partial \eta_{ST}}{\partial \eta_{GT}} = \frac{27.8 - 30}{35 - 30} =$ in case the gas turbine efficiency is raised from 30% to 35% to keep the overall combined-cycle efficiency.

TABLE 1. Example of the allowable reduction in the bottoming cycle efficiency η_{ST} when the gas turbine efficiency η_{GT} increases from 30% to 35% or 40%, in order to keep the overall combined-cycle efficiency.

η_{GT}	0.3	0.35	0.4
$-\frac{\partial \eta_{ST}}{\partial \eta_{GT}}$	1.0	1.08	1.17

IMPLEMENTATION OF A COMBINED CYCLE FOR MARINE APPLICATIONS

The recent changes in the emission legislation with the burdens on the maximum content of sulfur in the marine fuels, as well as, the inherent advantages of the gas turbines as prime movers, together with the development of advanced systems with high overall efficiency, have grown the interest regarding the usage of gas turbines as prime movers for vessels instead of using diesel engines [4, 6, 7, 8, 9]. Especially for the navy, gas turbines offer high flexibility on the operating conditions, low demand in maintenance and high power density, which make them ideal for specific types of vessels (i.e. combatants) [10]. However, the operational demands and the growing fuel prices have raised skepticism regarding the relatively low overall engine efficiency of the gas turbines used in the Hellenic Navy, as well as in the foreign Navies worldwide. One of the solutions proposed is the modification of the existing gas turbine power plants, by adding a bottoming cycle (Rankine) working with steam/water in order to recover a portion of the heat rejected to the environment with the exhaust gases. This excess power could be offered to cover a portion of the electric loads of the ship (reducing the fuel consumption of the auxiliary engines), or could be provided as propulsion power through an appropriate gear box. The US Navy has studied such alternatives since the 80s and the conclusions derived are positives [10].

In the present work a preliminary investigation is conducted in order to explore the feasibility of adding a bottom cycle (i.e. Rankine with steam as the working medium) to the existing gas turbine configuration which is used as the basic propulsive power unit on a combatant vessel of the Hellenic Navy. In this first part of our research work, the investigation is limited to the determination of the possible power increment and the corresponding improvement of the overall system efficiency taking into account specific limitations which exist, regarding the allowable lower exhaust gas temperature and the dimensions of the heat exchanger used for the exhaust gas heat recovery (Heat Recovery Steam Generator, i.e. HRSG).

Gas Turbine Model

In order to model the off – design operation of the gas turbine a generic, zero-dimensional non-linear adaptive performance model is used [12]. The model is based on the logic that a gas turbine is an assembly of different components (modules). Each component is identified and modelled according to the kind of aero-thermodynamic process it materializes. For each component, if \mathbf{Y}_{IN} is the vector of the independent variables at its inlet and \mathbf{Y}_{OUT} the corresponding vector at its outlet, then in order to find the values at the component exit an equation of the following form must be solved.

$$g(\bar{\mathbf{Y}}_{IN}, \bar{\mathbf{Y}}_{OUT}) = 0 \quad (11)$$

This equation usually derives from conservation laws, as well as from existing experience in components operation. It may consist of analytical relations, possibly including empirical constants (e.g. duct pressure loss), or a set of curves (e.g. turbo-machinery component maps). Additional equations express the compatibility of operation between the different components, imposing “matching” conditions, as for example, power balance between the high pressure turbine and compressor. In this way a set of equations, which have to be simultaneously satisfied by the fluid parameters, is formed. The solution of this system of equations, non-linear in nature, is achieved numerically. Different types of numerical techniques can be employed, as

for example described by Stamatis et al. [13]. The solution of this system of equations, for an operating point as specified by the ambient conditions and the selected engine control variable (e.g. engine load, Turbine Entry Temperature etc.), gives the full cycle details, and the performance parameters are uniquely defined for off-design operation.

The model is capable of simulating all existing gas turbine configurations from single shaft engines, up to a three spool engines with power turbine with intercooling, reheating, recuperation and water injection at various positions along the engine. The model layout and the system of equations to be solved are modified in accordance with the engine configuration under consideration. 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 Entry Temperature (TET), Compressor Discharge Pressure (CDP), load etc. depending on the engine configuration.

In order to be capable to simulate a specific engine the model can be adapted to available, engine specific data by employing the adaptive modelling technique, introduced by Stamatis et al. [14]. The basic idea behind adaptive modelling is that component characteristics (e.g compressor map) are allowed to change through appropriate modification factors. The values of these factors are determined by requiring that available engine performance data are matched by the engine model. In this way, at the end of the adaptation procedure, a set of components characteristics is produced which are capable to reproduce the specified engine operation with great accuracy (e.g Tsalavoutas et al. [15]).

The gas turbine selected as a test case in the present study, is a twin spool – three shaft engine of 4MW nominal power and a corresponding thermal efficiency of 29.4%. This engine type is used as the cruising engine (two engines of this type) of a specific marine vessel type of the Hellenic Navy, in a COGOG configuration. Due to the fact that the majority of the vessel's operational duty is covered by the cruising gas turbines, this engine type is used for the investigation of the exhaust gas heat recovery technique.

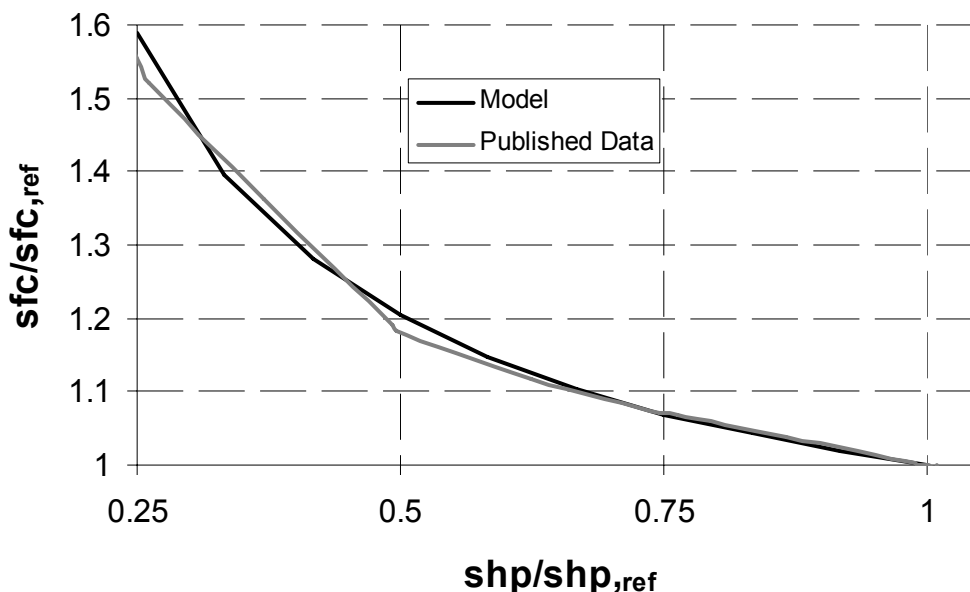


FIGURE 6. Predicted and published values [15] of the gas turbine versus load.

In order to build a reliable model capable to predict the engine's off-design operation, the model has been adapted to available data. The results presented by Tsalavoutas et al. [15] indicate that the model can simulate the off-design operation of the engine with good accuracy. The calculated by the model specific fuel consumption (sfc) compared with published values [15]

versus the operating load is presented in Figure 6. The adapted model is used for calculating the exhaust flow properties (mass flow, temperature and composition) at specific operating points.

Heat Recovery Steam Generator Design

One of the most important parts of the Rankine cycle is the heat recovery steam generator (HRSG) since it is the component of the cycle which is responsible for the exhaust heat recovery (and the production of steam, with adequate thermodynamic properties). This component of the bottoming cycle contributes considerably to the system's weight and volume. These two parameters are crucial for marine applications in general and even more crucial when the application concerns a naval vessel. In general there are two types of Heat recovery steam generators (HRSG): The once-through type and the drum-type.

In drum-type HRSGs the water/steam separation and water retention is conducted in a steam drum. A HRSG of drum-type can be built in two basic constructions, based on the direction of the gas turbine exhaust flow through the boiler: vertical HRSG and horizontal HRSG [2] as shown in Figure 7. In vertical designs, the heat transfer tubes are horizontal, suspended from uncooled tube supports located in the gas path. Often this design requires circulating pumps in order to assure constant circulation within the evaporator (that's why often they are called forced-circulation HRSGs). In a horizontal design, the circulation through the evaporator takes place entirely by gravity, based on the density difference of water and boiling water mixtures (often called natural-circulation HRSG). The heat transfer tubes are vertical, and essentially self-supporting. Earlier the vertical designs had several advantages compared with horizontal designs, with respect to space requirement and start-up performance. However, the natural-circulation HRSGs have been improved, and current designs offer performance comparable with the forced-circulation designs [2].

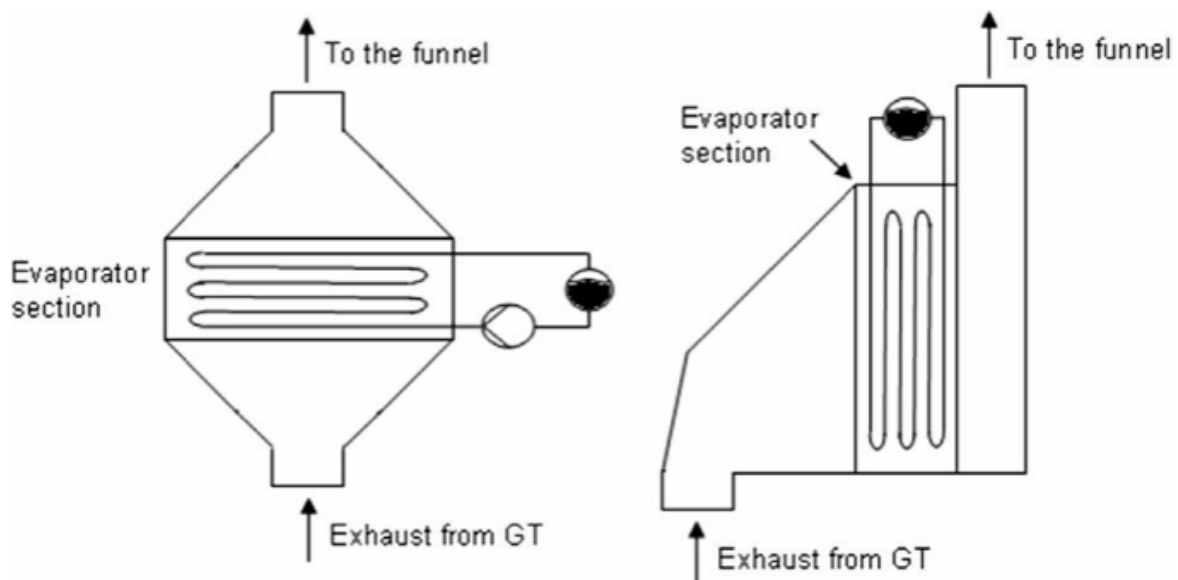


FIGURE 7. Schematic figures of vertical (left) and horizontal (right) HRSGs [2].

Another feature that needs to be considered when selecting HRSG arrangement is whether a by-pass stack which permits the operation of the gas turbine without the HRSG (and steam turbine) in service is desirable. Such feature would increase the cost and occupy space. An

important drawback with the drum-type HRSG is that for high live-steam pressures the operational flexibility is restricted. Combined cycles used for marine applications are often operated in cycling duties with frequent load changes and start-up cycles. Such operation causes high thermal stresses on parts within the HRSG, especially on the drum. Thus, the loading rate, for example during start-up, is primarily constrained by the drum.

On the other hand a once-through HRSG is basically one tube, featuring the economizer, the evaporator and the super-heater. Water enters at one end and steam leaves at the other, eliminating the drum and circulation pumps. Since it contains no drum, it provides the desired high thermal flexibility. However, as all the water mass flow should evaporate when flowing through the HRSG, the area requirement of the evaporator section is large. In a HRSG of drum-type, the water is re-circulated and only a portion of the flow is evaporated at the time, thereby requiring less heat transferring area.

Previous work on the use of combined cycles for marine applications does not provide a coherent picture on the optimum choice of the HRSG type. Taking into account the space limitations which apply on a naval vessel, in this study a once-through heat exchanger is considered with vertical gas flow mounted directly over the gas turbine, as shown in figure 8. Such a design would minimize ground-floor and space requirements. Additionally, a vertical arrangement is associated with a low cost and it provides a good exhaust gas distribution across the boiler heating surfaces. On the other hand, this configuration may set some obstacles to the maintenance of the gas turbine, but taking into account the very limited available space this configuration seems to be the optimum solution.

In this HRSG, the feed water is introduced at the gas outlet and is moved through the core until it leaves the other end at the desired condition (superheated). The steam exit conditions are controlled by the feed-water flow rate. A low water flow rate produces high superheat, high minimum wall temperatures of the heat exchanger tubes and low heat recovery. This control feature is utilized in this study since focus has been given to maintain a minimum exhaust gas temperature at the exit of the boiler (economizer) above the sulfur-acid dew point. Specifically, this limit value was assumed equal to 135°C, which is slightly above the dew point of the specific gas turbine exhaust gas. It is noticed that in the Greek Navy the standard fuel used in the gas-turbine-powered combatants has a maximum sulfur content equal to 1% [16].

HRSG Design

To simplify the simulation procedure, the dimensions of the HRSG are calculated based on relevant studies which have already been conducted by the US Navy. Specifically the case study examined in [10] has been taken as a reference for the present work, where the bottom steam Rankine cycle has been applied on a LM2500 gas turbine which is used for propulsion of a combatant ship. Therefore the main design parameters of the HRSG used in the present study have been determined by appropriately scaling the corresponding data of this reference work. The HRSG has tubes with a nominal 3/4 inch diameter and nine fins per inch. These tubes are arranged in a staggered tube bank, while, no feed-water heating is considered, which means that the condenser water is fed directly to the economizer inlet. As far as the HRSG's dimensions, these are assumed to be proportional to the ones of the reference HRSG. Specifically, the height of the HRSG is set equal to 2.40m (which corresponds to the ship's deck-height), while the cross sectional area is determined so that the mean exhaust gas velocity at full engine load (4 MW), is identical to the one used in the aforementioned reference study. In this way, similar flow conditions are expected to exist, which makes the assumption of similar exhaust gas pressure losses and overall heat transfer conditions to be trustworthy. In the reference study the design exhaust gas flow rate is equal to 45.4 kg/s (corresponding to a power of 8.95 MW), and the dimensions of the boiler are: Length=2.7m, Width=2.7, Height=2.40m, with a total heat transfer area equal to 1230 m². Taking into account that at the present study, the

gas turbine's exhaust gas mass flow rate at full power is equal to 18.3 kg/h, it can be concluded that the corresponding dimensions of the assumed HRSG are: Length=1.71m, Width=1.71, Height=2.40m, with a total heat transfer area equal to 495,79 m².

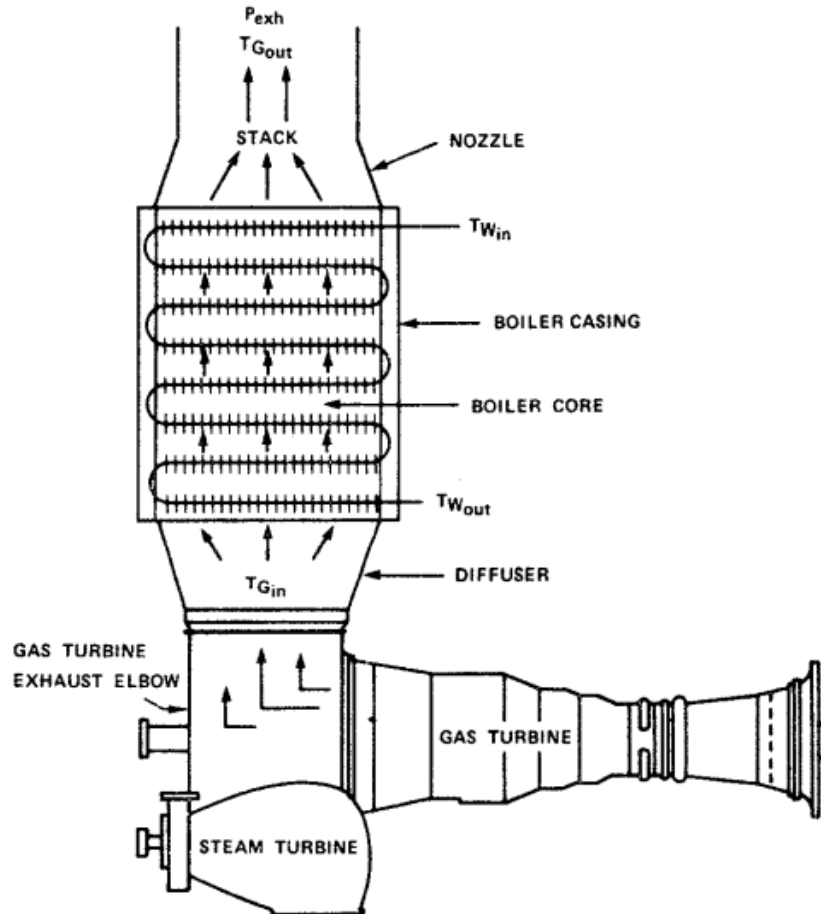


FIGURE 8. Schematic diagram of the once-through HRSG [10]

To further simplify the simulation procedure, the overall heat transfer coefficient U_{mean} from the gas side to water / steam, is assumed to be constant at the whole HRSG length and equal to the mean value of the one which has been calculated in the reference study [10] since the flow conditions of the two streams of working mediums and especially the ones corresponding to the gas-side, which possesses the higher resistance to the heat transfer are similar with the ones which apply to the present study. Thus, the overall heat transfer coefficient U_{mean} is assumed to be equal to 0.060 W/m²C [8, 10, 17].

Rankine Cycle Simulation Procedure

For this preliminary feasibility study a simple configuration of the combined power plant is examined, which comprises by: a Gas turbine power plant (following the Bryton cycle) and a simple Rankine cycle (bottom cycle), as shown in fig. 9.

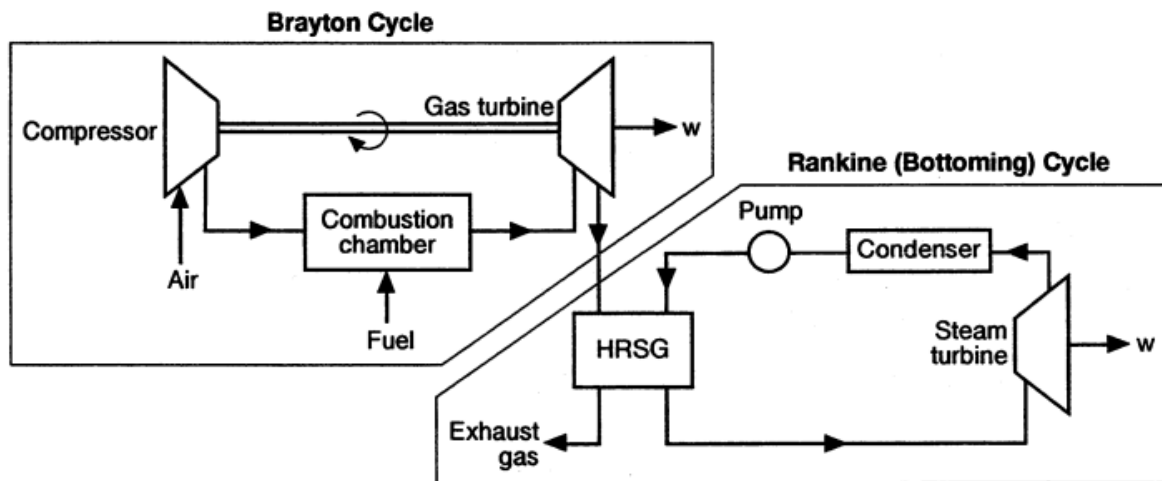


FIGURE 9. Configuration of the Combined Cycle examined (Gas-Turbine / Water-Steam Rankine Cycle)

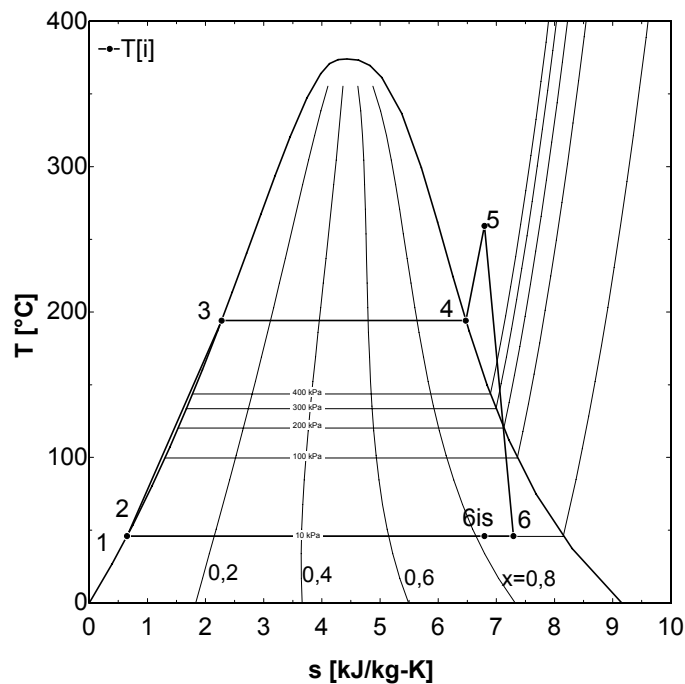


FIGURE 10. Thermodynamic processes of the Rankine cycle examined

This bottoming cycle is composed by four main components: a pump, a heat exchanger (HRSG), a steam turbine / generator and a condenser. As shown in fig. 10 the thermodynamic cycle for the steam/water working fluid considered, includes the following processes: a compression process in the pump (process 1-2), with an isentropic coefficient equal to $\eta_{is,p}=0.90$, an isobaric heat transfer process in the heat exchanger (processes 2-3-4-5), an expansion process through the steam turbine with an isentropic coefficient $\eta_{is,t}=0.80$ (process 5-6), and an isobaric heat transfer process in the condenser (process 6-1). The HRSG is assumed to be consisted by three parts: the economizer, the boiler and the super-heater (while these parts are considered to have “moving” boundaries depending on the operating conditions). The process (2-3) takes place in the economizer, the process (3-4) takes place in the boiler and the process (4-5) takes place in the super-heater. In the analysis conducted, it has been assumed

that the steam quality at point 6_{is} is equal to $x_{\text{limit}}=0.82$ [10], which ensures that problems associated with steam condensation at the late stages of the steam turbine are avoided.

The pump supplies the working fluid to the heat exchanger, where the working fluid is heated and vaporized removing heat from the exhaust gases. The working fluid leaves the heat exchanger in saturated or superheated state (in order to fulfill the criterion which has been set for the steam quality after the expansion in the steam turbine). The high enthalpy steam is then expanded in the expander (turbine), which provides additional power to the vessel (electric or propulsion). After the expander, the working fluid enters the condenser where it condensates (using another heat exchanger, utilizing the sea water as the medium to absorb the latent heat of water/steam condensation). Having this in mind, the condenser pressure has been set constant and equal to $P_{\text{cond}}=10,1$ kPa for all cases examined, so that a safe temperature difference between the working medium (water/steam) and the sea-water is ensured.

The mathematical model of the simple Rankine Cycle uses the thermodynamic energy conservation equations. The model considers a steady state operation with negligible kinetic and potential energy effects.

The pump power is given by the following equation:

$$W_p = \dot{m}_c * (h_2 - h_1) \quad (12)$$

The heat absorbed by the working fluid (steam) from the exhaust gases in the HRSG is given by:

$$\dot{Q}_{\text{HRSG}} = \dot{m}_c * (h_5 - h_2) \quad (13)$$

The turbine power is calculated using the following equation:

$$\dot{W}_{\text{turbine}} = \dot{m}_c * (h_5 - h_6) \quad (14)$$

while the isentropic coefficient of the steam turbine is assumed to be equal to $n_{t,\text{is}}=0.80$ and is defined as:

$$n_{t,\text{is}} = \frac{h_5 - h_6}{h_5 - h_{6,\text{is}}} \quad (15)$$

The total heat transfer rate from the exhaust gases to the Rankine working medium (water / steam), inside the HRSG is evaluated using the following equation:

$$\dot{Q}_{\text{GT,gas}} = \dot{m}_h * c_{p,\text{gas}} * (T_{h,\text{in}} - T_{h,\text{out}}) \quad (16)$$

Assuming that no heat losses occur at the HRSG, all the heat absorbed by the hot exhaust gas, is transferred to the water/steam, thus:

$$\dot{Q}_{HRSG} = \dot{Q}_{GT, gas} \quad (17)$$

Analogous expressions can be written for each part of the HRSG i.e. economizer, boiler and super-heater, through which the exhaust gas temperature at each part of the HRSG can be derived:

$$\dot{Q}_{ECON} = \dot{m}_c * (h_3 - h_2) = \dot{m}_h * c_{p, gas} * (T_{h,3} - T_{h,out}) \quad (18)$$

$$\dot{Q}_{BOILER} = \dot{m}_c * (h_4 - h_3) = \dot{m}_h * c_{p, gas} * (T_{h,2} - T_{h,3}) \quad (19)$$

$$\dot{Q}_{SUPERHTR} = \dot{m}_c * (h_5 - h_4) = \dot{m}_h * c_{p, gas} * (T_{h,in} - T_{h,2}) \quad (20)$$

The temperature ($T_{h,in}$) of the exhaust gas at the inlet of the HRSG, is an input parameter at each operating point examined, and is obtained using the adapted gas turbine performance model. In the following table 3, the properties of the exhaust gas at the HRSG's inlet are shown at the examined engine loads.

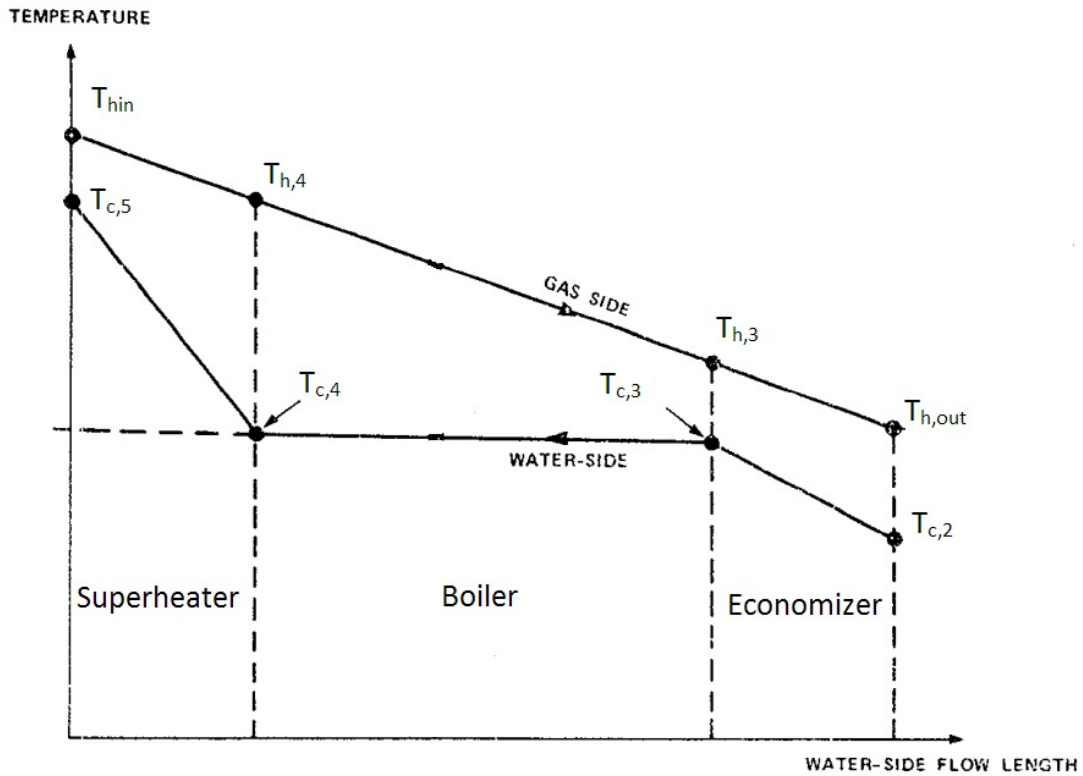


FIGURE 11. Temperature profile of the exhaust gas and water/steam inside the HRSG

As far as the outlet temperature ($T_{h,out}$) of the exhaust gas from the HRSG, a lower limit has been set to avoid gas condensation and the relevant problems due to the sulfur content of the fuel. In the present study the lowest acceptable temperature for the $T_{h,out}$ is set equal to 135 °C [10, 18] and is determined by solving the system of the equations already presented.

Finally, a minimum temperature difference has been assumed between the inlet gas temperature and the outlet steam temperature, which is equal to $(T_{hin}-T_{c,5})\geq 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ [9], for all the

operating conditions examined. Therefore the temperatures of the exhaust gas and water/steam at each part of the HRSG are predicted and the temperature profile of both streams is shown in fig.11. The last criterion used in the present study in order to solve the system of the aforementioned equations is related to the mass flow rate which passes through the steam turbine. It is known from the gas dynamics that a steam turbine behaves in a manner similar to a nozzle, which means that for a pressure ratio across the nozzle greater than approximately two (which is the case in the present study), the mass flow rate maximizes, the turbine is assumed

choked and the corrected mass flow $\frac{\dot{m}_c * \sqrt{T_0}}{P_0}$ takes a constant value, as shown in Fig.12 [19].

More specifically the turbine's mass flow rate is also influenced by the wheel-speed Mach number which is presented by: $\frac{N}{\sqrt{T_0}}$, thus a similar flow rate / pressure ratio relationship is

experienced as shown in fig. 13, where, $\vartheta = \frac{T_0}{T_{ref}}$ and $\delta = \frac{P_0}{P_{ref}}$. Since the effect of the corrected rotational speed is relatively small and there are no extractions it can be assumed that the steam turbine operates at a specific corrected mass flow for the whole operation envelope.

TABLE 3. Exhaust gas properties at the inlet of the HRSG

Gas Turbine Power (kW)	Exhaust gas mass flow rate (kg/s)	Exhaust gas Temperature (oC)	Gas Turbine Efficiency (%)
1000,00	12,00	346,90	18,50
1333,33	13,06	360,80	21,08
1666,67	14,03	374,40	22,97
2000,00	14,80	390,00	24,40
2333,33	15,57	405,40	25,60
2666,67	16,24	419,70	26,63
3000,00	16,80	435,60	27,50
3333,33	17,33	451,10	28,17
3666,67	17,87	465,70	28,84
4000,00	18,30	479,80	29,40

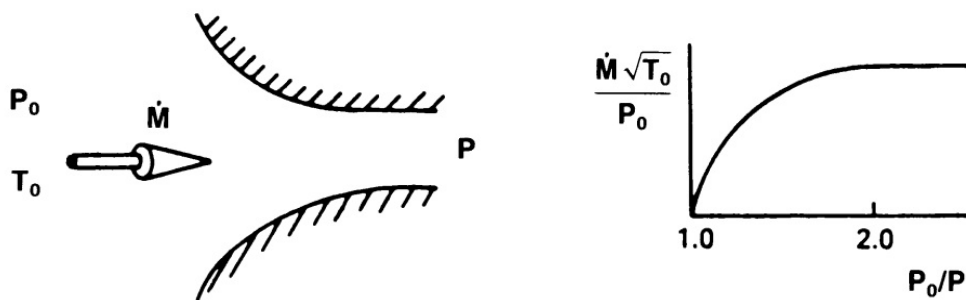


FIGURE 12. Variation of the mass flow rate through a nozzle as a function of the pressure ratio [19]

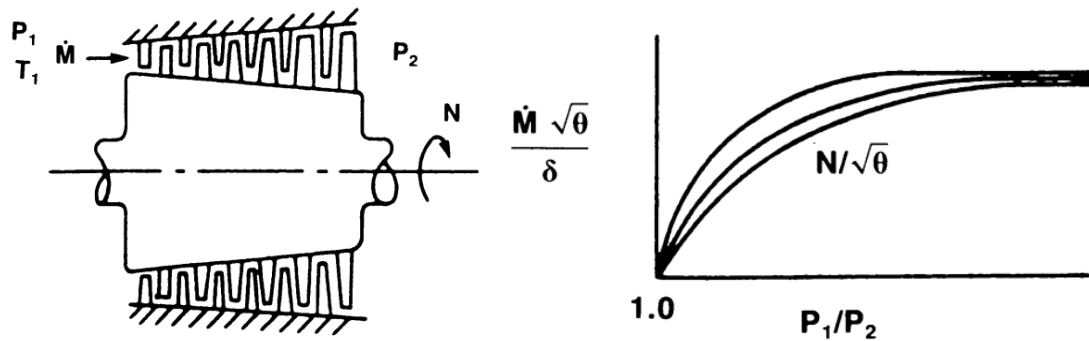


FIGURE 13. Variation of the mass flow rate through a steam turbine as a function of the pressure ratio and the wheel speed N [19].

In this study it has been assumed that the steam turbine used in the Rankine cycle would operate with a similar corrected mass flow as the one used in the reference study [10]. This assumption is required to justify that the predicted values of the steam/water mass flow rates and the pressure ratios are valid and correspond to the ones used in real-life applications.

Results and Discussion

As already mentioned, the purpose of the present work is to investigate in which extend it would be possible to recover the heat from the exhaust gases produced by a gas turbine used for the propulsion (at low and cruising speeds) of a combatant ship of the Hellenic Navy. To this scope the simulated exhaust gas temperatures and mass flow rates are used as input data (Table 3) into the simulation model developed for the Rankine cycle and the potential of heat recovery is examined over the whole operating range of the specific engine (i.e. from 1000 kW to 4000 kW). Following the same computational procedure for each engine load examined, the following parameters are determined:

- Mass flow rate of the Rankine cycle working medium: \dot{m}_c
- The saturation pressure of the water / steam in the HRSG: $P_2=P_3=P_4=P_5$
- The temperature of the water / steam at the entrance and exit of the HRSG: T_2 and T_5
- The outlet temperature of the exhaust gas from the HRSG: $T_{h,out}$
- The power produced by the steam turbine: $\dot{W}_{turbine}$
- The power absorbed by the pump which circulates the water/steam: \dot{W}_p
- The efficiency of the Rankine cycle defined as:

$$n_{st} = \frac{\dot{W}_{turbine} - \dot{W}_p}{\dot{Q}_{HRSG}} \quad (21)$$

- The overall efficiency of the combined cycle (Gas turbine ./ Rankine Cycle) defined as:

$$n_{CC,real} = \frac{(\dot{W}_{turbine} - \dot{W}_p) + P_{GT}}{P_{GT} / n_{GT}} \quad (22)$$

where P_{GT} is the power produced by the gas turbine and n_{GT} is the gas turbine efficiency, both given as input to the model developed. It should be noticed that the combined efficiency $n_{CC,real}$ calculated from the equation above differs from the theoretical one n_{CC} as defined in equation (7). This is attributed to the fact that in the definition of the n_{CC} (theoretical efficiency) it has been assumed that all the heat rejected by the gas turbine, is absorbed by the bottoming cycle, which is not the case in real life applications due to the space limitations as far as the HRSG is concerned and the low temperature limit imposed to avoid condensation of the exhaust gas.

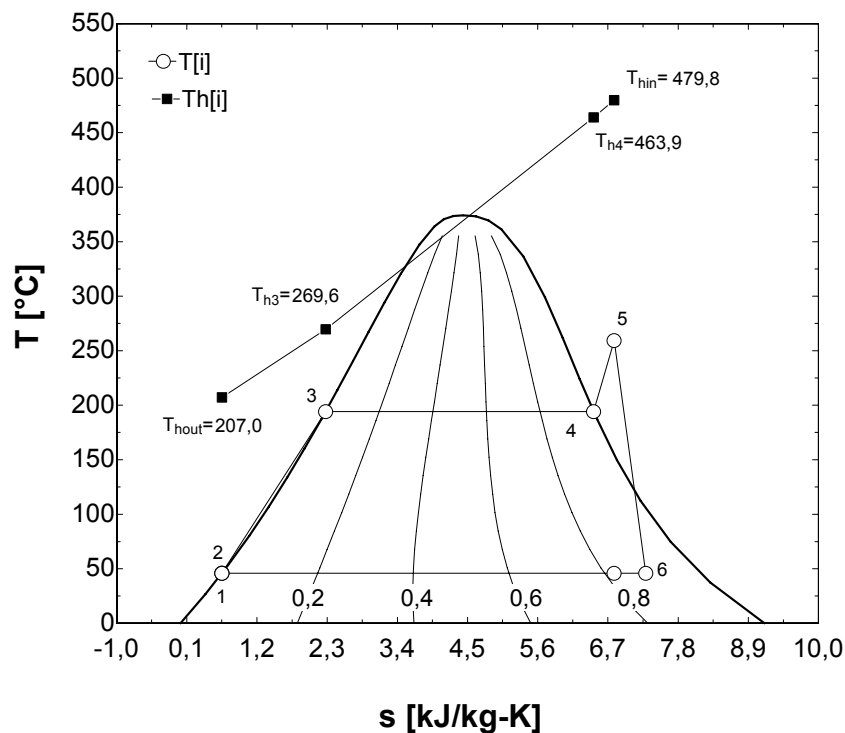


FIGURE 14. T-s process diagram of the Rankine Cycle – Temperature profile of the exhaust gas inside the HRSG, for the case of high gas turbine load (4000 kW)

By solving the above system of equations, the thermodynamic properties of the working medium (steam/water) and the corresponding temperature of the exhaust gas at each stage of the HRSG is estimated, as shown in fig 14. This case corresponds to a gas turbine power equal to 4000 kW (max. engine power). As observed, the main portion of the exhaust gas heat is absorbed in the HRSG to heat up the water (in the economizer) and evaporate it (in the boiler), while a small amount is absorbed for superheating. At the exit of the steam turbine, the steam quality is assumed to be higher than $x=0,82$, which ensures that the operation of the steam turbine (late stages) is not affected by the condensed steam. In fig. 15 is shown schematically, the corresponding temperature profile of the exhaust gas stream as it passes through the HRSG and the thermodynamic properties of the water/steam following the bottom Rankine cycle, when the gas turbine power is equal to 1000 kW (low load case). In this case it is obvious that the temperature difference between the two fluids (gas and water/steam) in the HRSG is

significantly lower compared with the full engine load case, and the portion of the heat recovered from the exhaust gases which is used for steam superheating is negligible. However, even in these cases the temperature of the exhaust gas at the exit of the HRSG is higher than the limit value which in this study has been set equal to 135 °C.

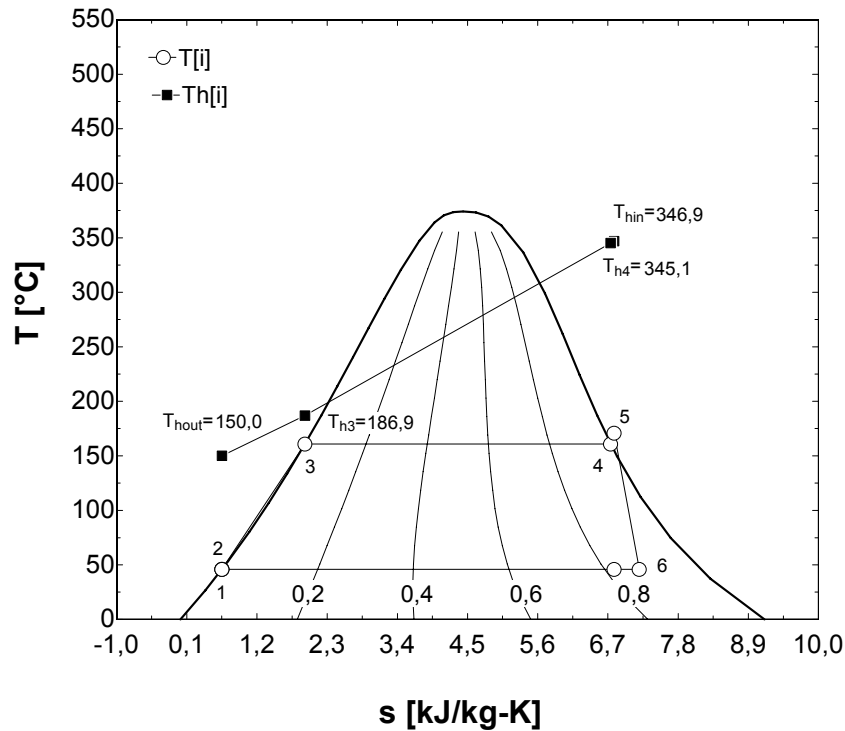


FIGURE 15. T-s process diagram of the Rankine Cycle – Temperature profile of the exhaust gas inside the HRSG, for the case of low gas turbine load (1000 kW)

Effect of Gas Turbine Engine Load on the Combined Cycle Parameters

In fig.16 is shown how the exhaust gas temperature varies as it enters and exits from the HRSG (T_{hin} and T_{hout} respectively). At the same figure, the superheated steam temperature before entering the steam turbine is shown (T_5). It is observed, that as the gas turbine load increases that exhaust gas temperature increases and the corresponding steam temperature increases too. Moreover, the exhaust gas temperature at the exit of the HRSG at all cases examined is kept higher than 135 °C which is the limit set to avoid gas condensation.

The heat recovered by the exhaust gas is used to raise the temperature and pressure of the working fluid, keeping the flow number of the steam turbine constant. The mass flow rate of the water/steam used as the working medium in the Rankine cycle, together with the saturated steam pressure are shown in fig. 17, as a function of the gas turbine power. It is observed, that both these parameters increase as the gas turbine power increases, as expected, since the available heat in the exhaust gases increases. Moreover, the saturated steam pressure is limited to relative low values (max. 14 bar), which makes the requirements regarding the strength of the materials used for the installation to be moderate. The power produced in the steam turbine also increases as the gas turbine power increases, as shown in fig. 18. At the same figure the power consumed by the circulating pump is plotted and as observed, this is only a small portion of the available steam turbine power (due to the high density of the pumped saturated water).

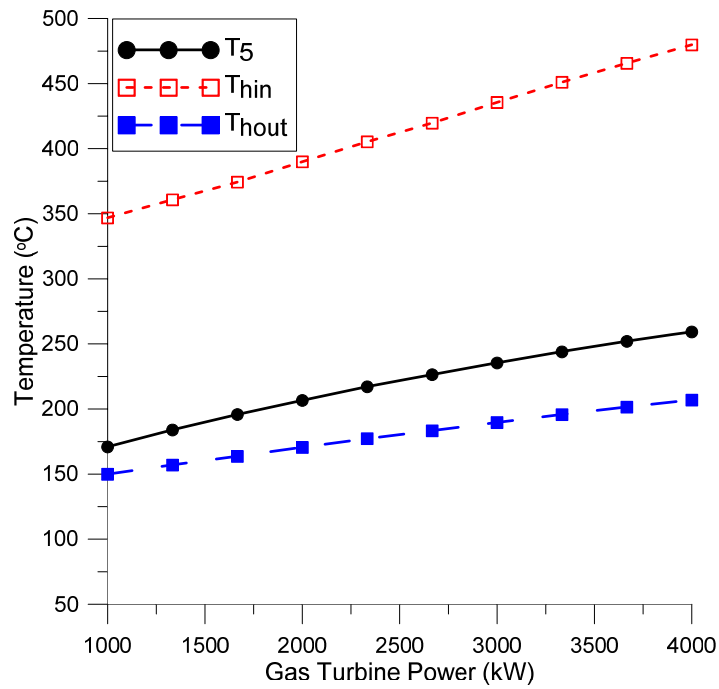


FIGURE 16. Effect of gas turbine power on the exhaust gas temperature before and after the HRSG and on the super-heated steam temperature before the steam turbine (T_5).

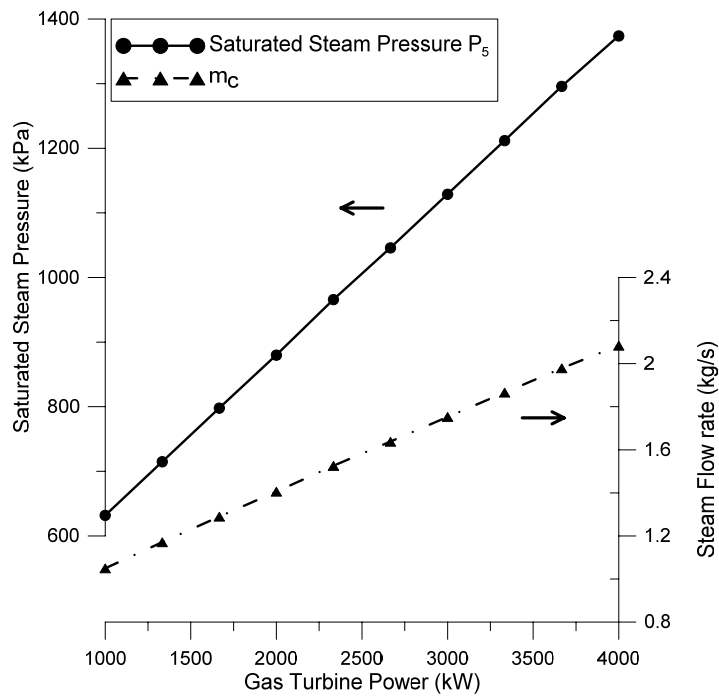


FIGURE 17. Effect of gas turbine power on the saturated steam pressure (P_5) and the steam mass flow rate (\dot{m}_c)

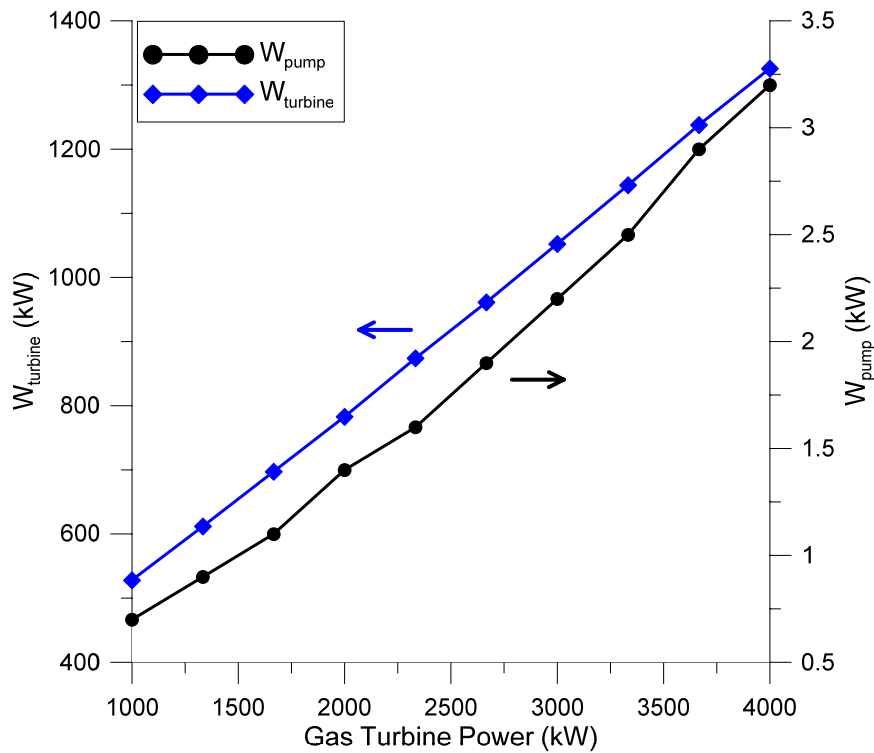


FIGURE 18. Variation of the produced steam turbine power and the circulation pump power demand, as a function of the gas turbine power.

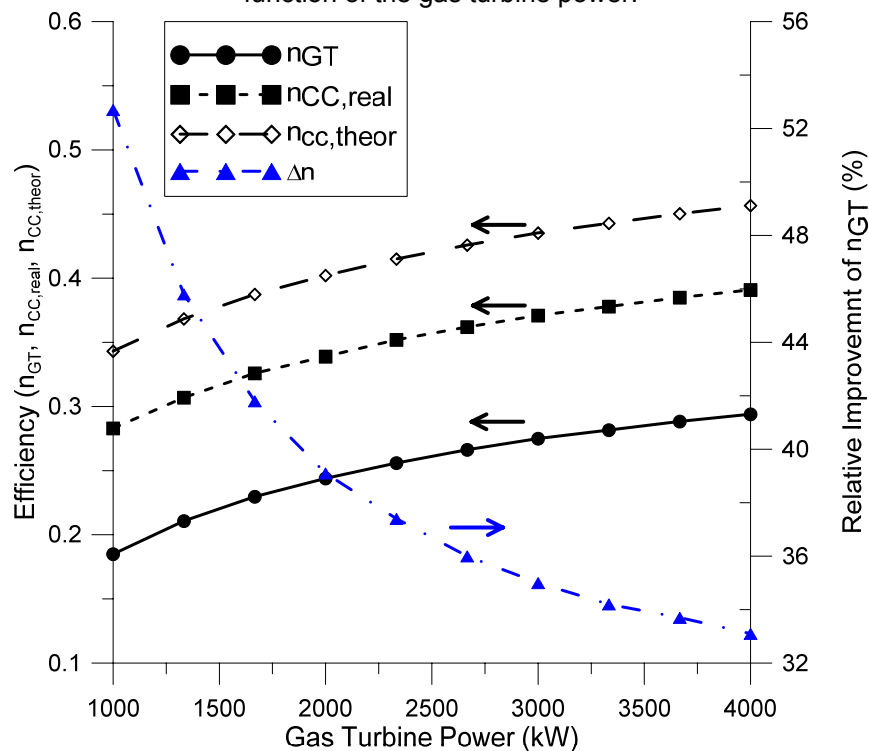


FIGURE 19. Variation of the gas turbine efficiency n_{GT} , the combine cycle efficiency $n_{CC,real}$, the theoretical combined cycle efficiency $n_{CC,theor}$ and the relative improvement of the combined cycle efficiency compared to the simple gas turbine power plant efficiency as a function of the gas turbine power.

In fig. 19 it is shown a comparison between the initial gas turbine efficiency n_{GT} and the one obtained using the proposed combined cycle configuration $n_{CC,real}$ at all the range of operating conditions examined (Gas turbine power from 1000 kW to 4000 kW). As observed, the combined cycle efficiency is significantly higher than the one of the simple gas turbine, ranging from 28%÷39%, while being higher at high engine loads. At the same figure, the theoretical efficiency of the combined cycle $n_{CC,theor}$ is shown, as being calculated using equation (7). It is observed that if there were no restrictions regarding the size of the heat exchangers and the outlet temperature of the exhaust gases, it would be (theoretically) possible to further increase the benefit obtained using the combined cycle, and the combined cycle efficiency could range from 34%÷46%. However, even with the conservative configuration of the combined cycle which has been examined, the relative improvement on the gas turbine thermal efficiency ranges from 53% at low load to 33% at high load (as shown in fig. 19), which is very challenging. It is noticed that the greater improvement is observed at low load conditions where the thermal efficiency of the gas turbine is lower. This is very important for the marine applications since a significant portion of the vessel's duty is spent at low load conditions.

CONCLUSIONS

In the present work, a parametric investigation has been conducted, to investigate the possible improvement on the combined cycle efficiency and the corresponding net power production, which can be obtained by adding a bottoming Rankine cycle with a steam turbine on an existing gas turbine engine which is used for propulsion on a combatant vessel of the Hellenic Navy. To this scope a simple model has been developed based on the conservation of energy, for the Rankine cycle simulation and the HRSG. From this preliminary study, it has been concluded that such a combined cycle configuration, could offer significant improvement on the combined cycle engine efficiency, while at the same time, it is accompanied with a significant increase on the net available power and a corresponding decrease on the exhaust gas temperature. These findings are challenging and indicative of the potential benefit (economic and tactical) which could be obtained for the Hellenic Navy by adopting such techniques. However, a more detailed investigation should be conducted, regarding mainly the heat transfer processes at the HRSG and the condenser, to ensure that the required volume and weight of this installation is affordable based on the specific needs of the vessel.

REFERENCES

1. Horlock JH. Combined power plants, including combined cycle gas turbine (CCGT) plants. Malabar, Florida: Krieger Publishing Company; 2002
2. Fredrik Haglind, "A review on the use of gas and steam turbine combined cycles as prime movers for large ships. Part I: Background and design", Energy Conversion and Management 49 (2008) 3458–3467
3. Kehlhofer RH, Warner J, Nielsen H, Bachmann R. Combined-cycle gas and steam turbine power plants. 2nd ed. Tulsa, Oklahoma: PennWell; 1999
4. Merz CA, Pakula TJ. The design and operational characteristics of a combined cycle marine power plant. ASME paper 72-GT-90, 1972
5. Mills RG. Greater ship capability and energy saving with combined-cycle machinery. Nav Eng J 1977;89:17–25
6. MAN B&W Diesel A/S.:Waste Heat Recovery Systems. Copenhagen Denmark, 2007
7. WARTSILA Diesel A/S.:Energy savings and environmental benefits via Exhaust Gas Heat Recovery
8. V. Ganapathy , "Heat-Recovery Steam Generators: Understand the Basics", CHEMICAL ENGINEERING, August 1996
9. Katsanos CO, Hountalas DT, Pariotis EG. Thermodynamic analysis of a Rankine cycle applied on a diesel truck engine using steam and organic medium. Energy Convers Manage 2012;60:68–76.

10. Muench,R. K. ; Knauss,D. T. ; Purnell,J. G., "A study of waste-heat-boiler size and performance of a conceptual marine cogas system", David W Taylor Naval Ship Research and Development Center Bethesda Md, Feb 1980
11. Fredrik Haglind, "A review on the use of gas and steam turbine combined cycles as prime movers for large ships. Part I: Background and design", Energy Conversion and Management, Volume 49, Issue 12, December 2008, Pages 3458-3467, ISSN 0196-8904, 10.1016/j.enconman.2008.08.005
12. Roumeliotis I., Mathioudakis K., Aretakis N. "Performance analysis of twin-spool water injected gas turbines using adaptive modeling", ASME paper No. GT2003-38516.
13. Stamatis A., Kamboukos Ph., Aretakis N., Mathioudakis K., 2002, "On Board Adaptive Models: A General Framework and Implementation Aspects," ASME Paper No. GT-2002 -30622.
14. Stamatis A., Mathioudakis K., Papailiou D.K., 1990, "Adaptive Simulation of Gas Turbine Performance," ASME J Eng Gas Turbines Power, 112(2), pp. 168-175
15. Tsalavoutas A., S. Pothos, Mathioudakis K., Stamatis A., 1999, "Monitoring the performance of a twin-spool 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.
16. Petry, B. R., "Acid Dew-Point Determination for Gas Turbine, Waste Heat Recovery Units," DTNSRDC Report PAS-77-29, Mar 1978
17. Kays, W. M- and A. L. London, "Compact Heat Exchangers", McGraw-Hill, 1964
18. Petry, B. R., "Acid Dew-Point Determination for Gas Turbine, Waste Heat Recovery Units," DTNSRDC Report PAS-77-29, Mar 1978
19. William G. Steltz , Book chapter "26. STEAM TURBINES", Mechanical Engineers' Handbook: Energy and Power, Volume 4, Third Edition, Edited by Myer Kutz, by John Wiley & Sons, Inc

The Design and Development of a Mechanical Faults Simulation Test Rig for Educational Purposes

Doumouras G.^a, Aretakis N.^a, Roumeliotis I.^b, Mathioudakis K.^a

^a *Laboratory of Thermal Turbomachines
National Technical University of Athens, Athens, Greece*
^b *Section of Naval Architecture & Marine Engineering
Hellenic Naval Academy, Piraeus, Greece*

Abstract. The paper describes the process of designing and developing a mechanical faults simulation test rig to support courses on gas turbine diagnostic methods. In this context the test rig is designed to reinforce students understanding in rotor dynamics, instrumentation and measurements analysis, acquiring at the same time experience on mechanical faults symptoms and diagnosis. The design was undertaken by a student, as part of fulfilling the requirements for obtaining a Mechanical Engineering Degree. The design requirements for fulfilling the defined educational objectives are discussed, as are the construction details of the test rig. The instrumentation and the data acquisition system characteristics are also presented, along with sample results of simulated representative faults that have significant value for educational purposes. Finally the benefits accruing from the use of the test rig as part of an educational procedure are discussed, as are the educational benefits for the student that has undertaken the project.

Keywords: Educational experimental apparatus, Vibration measurements, Gas turbine diagnosis

PACS: 0.1.50.My, 46.40.-f

INTRODUCTION

Vibration measurements are a vital part of the gas turbine condition monitoring systems and of the preventive maintenance technique. Vibration level is representative of the engine mechanical condition and each system has a specific healthy vibration range, depending on the manufacturing tolerances. Mechanical faults or engine degradation are usually connected to increased vibration level, thus diagnostic information can be acquired by proper analysis of vibration measurements. According to Boyce [1] vibration analysis coupled with engine performance analysis is an unbeatable tool as a total diagnostic system leading to maximum power plant utilization and significant cost savings.

In order to fully exploit the diagnostic data available in vibration measurements the engineers should have a clear understanding of rotor dynamics, instrumentation characteristics, statistical techniques used in vibration analysis and if possible some hands on experience of the typical faults that occur in rotating turbomachinery components. A method to convey to students the needed knowledge and experience is by using a suitable experimental test rig to support the

theory of vibration analysis and fault identification. Although such test rigs can be found in the market [2], an approach that can be followed is to build such a facility.

The decision of designing and building the test rig was based on a number of benefits that this approach offers. An obvious benefit is that the construction can be tailored made, to suit the educational vision of the teacher and the courses objectives. This approach also allows the cost to be kept well below the market price of similar commercial test rigs. The main drive however is the fact that the design and development process can itself contribute to the education. The first aspect is that the student responsible for the design of the test rig is involved on an integrated project that deals with many disciplines of his studies, while at the same time it provides the satisfaction of seeing something calculated and drawn on “paper” to be actually materialized. A second very important aspect is that having the outcome of a student project on display and usage to future generations give them confidence on their knowledge and motivate them to pursue similar integrated projects. Based on this reasoning the work was offered as a student diploma project and materialized by a final year student in cooperation with the Laboratory of Thermal Turbomachines of National Technical University of Athens (LTT/NTUA) staff [3].

The present paper describes the design and development of the test rig, which is capable to simulate mechanical failures that occur in turbomachines, in a controlled environment and is fitted with typical instrumentation found in the field. The instrumentation and the data acquisition system characteristics are presented, along with sample results of simulated representative faults that have significant value for educational purposes. Finally the benefits accruing from the use of the test rig as part of an educational procedure are discussed, as are the educational benefits for the student that has undertaken the project.

DESIGN OF THE TEST RIG

Malfunctions in turbomachines are categorized both by their causes and their effects in operation. Two of the most common and most frequently appeared malfunctions in turbomachines are unbalance and misalignment.

Unbalance is a situation in which some asymmetry exists in the geometry of a rotating part of a machine with respect to the axis of rotation which has the result that the axis of inertia of the rotating part is different from its axis of rotation. There are four different types of unbalance, as seen in Figure 1.

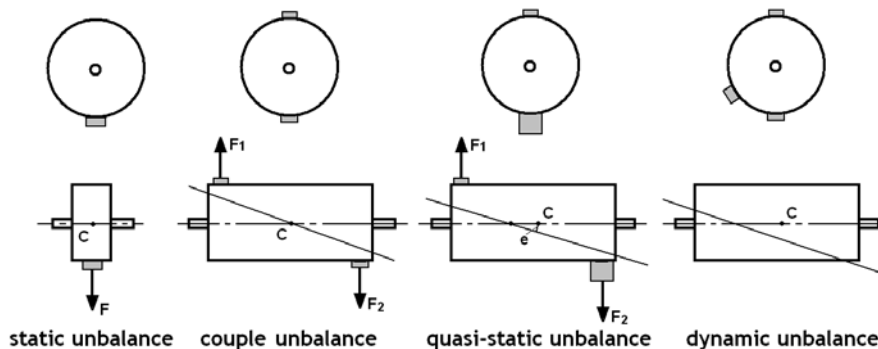


FIGURE 3. Types of Unbalance

Static unbalance appears when the centre of gravity lies off the rotation axis, while the axis of inertia is parallel to the axis of rotation. In this case the vibrations of both shaft ends will be in phase. Couple unbalance is defined as the condition of unbalance where the inertia axis crosses the axis of rotation on the gravity centre. Even though the shaft is statically balanced, it tends to vibrate about its center when it is rotated, while the vibrations of the shaft ends are in

opposite phase (180 deg difference). Quasi-static unbalance is made up of a static unbalance and a couple unbalance. Quasi-static unbalance is the condition of unbalance where the inertia axis crosses the axis of rotation at a point different from gravity centre. The vibrations of shaft ends have unequal amplitudes but in phase. The fourth type of unbalance is dynamic unbalance and it is the most common type encountered in machinery. Dynamic unbalance is defined as unbalance where the axis of inertia and the axis of rotation do not intersect and they are not parallel. Dynamic unbalance often exhibits different amplitudes of vibration at each end of the shaft. In addition most often it exhibits phase angles that are neither in phase nor directly opposite from one another. Couple unbalance, quasi-static unbalance and dynamic unbalance cannot be corrected in a single plane but require corrections to be made in two or more planes.

Misalignment in couplings can appear in three basic types, as seen in Figure 2. The first is a parallel offset. In this type of misalignment, the two shafts can be offset vertically, horizontally or in a combination of both. The second type is angular misalignment. In this type of alignment, the angularity again can be in the vertical plane, the horizontal plane or in both planes. In most cases misalignment in couplings occur as a combination of both types.

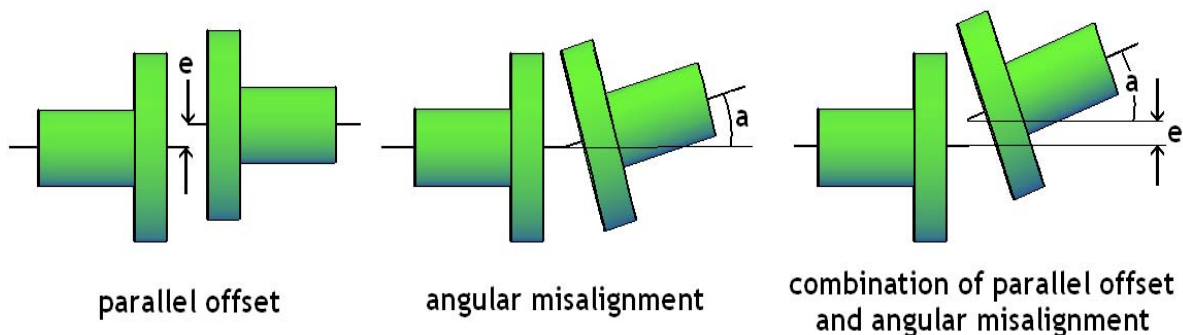


FIGURE 4. Types of Misalignment

Since misalignment and unbalance are the most common faults encountered in practice it was decided to design the test rig in order to simulate these two faults. An unbalanced shaft can easily be simulated by placing additional masses to specific positions to a properly balanced shaft. In order to simulate misalignment a coupling is needed in order to have the ability to move the shaft relative to the coupling. According to these rough guidelines the test rig should consist of a shaft with drilled holes at specific positions (unbalance), two bearing houses for the shaft, a motor, a suitable coupling, and a mechanism that will allow the movement of the shaft ends relative to the coupling (misalignment).

The test rig is tailored for supporting courses on gas turbine diagnosis, thus the shaft selected should be relevant to the topic, but also of relatively small dimensions.

Concerning the needed measurements the vibrations, in the form of velocity, or acceleration should be measured at the bearing positions. The use of proximity sensors could be problematic since the sensor must be close to the shaft, thus it wouldn't be possible to simulate cases of extreme misalignment without risking the probe integrity. Also rotational speed should be measured with good accuracy in order to characterize vibration frequency components.

Finally in order to increase the impact and the interactivity of the laboratory exercise, the results, in the form of faults signatures should be promptly available to the students. For this purpose a program that can analyze the vibration measurements in real time and produce power spectra in a graphical environment should be used.

DEVELOPMENT OF THE TEST RIG

The main part of the test rig is the rotating shaft. As discussed it should be relevant to the topic of turbomachinery. A small turbocharger shaft including the compressor and the turbine is ideal for this purpose, since it contains the turbomachinery components, giving a “real life” experience to the students. The selected shaft, which is a small turbocharger shaft, can be seen in Figure 3. The turbine rotor consists of 50 vanes and the compressor rotor consists of 20 blades. The total length of the shaft is 486 mm and its total weight is 6.9kg.

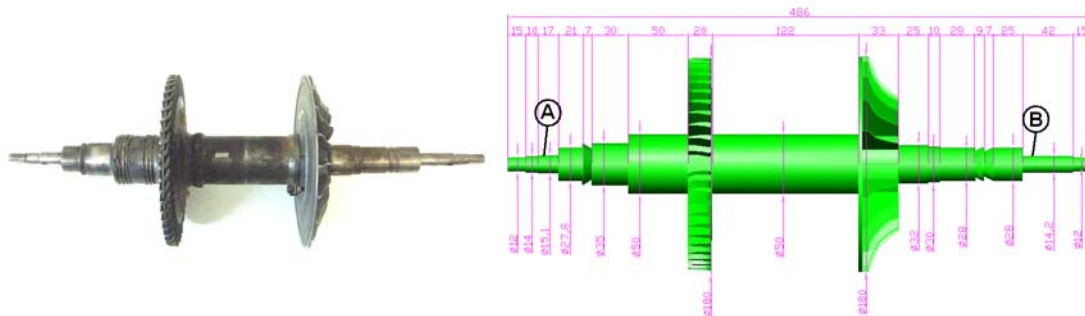


FIGURE 3. The selected shaft, its dimensions and seating positions (A, B)

The shaft was decided to be seated at two points (points A and B, Figure 3). The bearings used are deep groove ball bearings with an inner diameter of 15mm. The bearings can accept strong radial forces but can also accept axial forces. For their adaption to the shaft a ring was used.

In order to have the ability to balance the shaft, but also to simulate unbalance the addition or removal of masses from specific places around the rotating axis should be possible. In order to achieve this holes are drilled at the turbine and the compressor planes. At each plane 8 holes are drilled. Their radial position is 53.75mm for the turbine plane and 46mm for the compressor plane. The angle between two holes is constant and equal to 45 degrees for both planes. Added masses are small screws of different length.

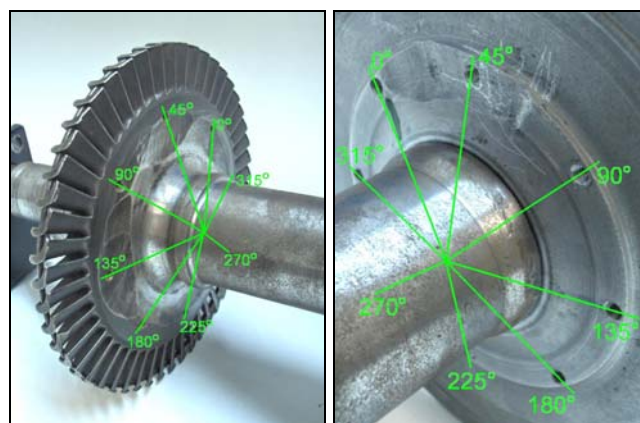


FIGURE 4. Places for balancing masses at turbine and compressor plane

In order to simulate misalignment the two shaft seatings should be capable of vertical movement. An appropriate mechanism identical for the two seatings has been constructed and can be seen in Figure 5. The main seating part is L shaped (item 1) which is also part of the

bearing house. Side to side holes have been drilled in order to allow the pins (items 2) to slide inside item 1. Item 1 is risen by a screw rod (item 3). A clockwise turn of the rod results to the tightening of item 1 to the seating assembly. A counterclockwise turn of the rod results to the vertical rise of item 1. Since both shaft ends should be capable of vertical movement for the purpose of misalignment simulation the coupling of the shaft to the motor couldn't be a commercial one. This is due to the fact that commercial couplings use elastic rings in order to minimize misalignment effects. A non elastic coupling was designed and constructed. The coupling consists of two separate parts, one fitted to the shaft and one fitted to the motor. The electromotor shaft and the rotating shaft have been properly formed in order to make possible the conjunction of coupling parts to them with screws. Conjunction of coupling parts to each other uses M6 screws placed in side to side drilled $\text{Ø}6$ holes (6 holes drilled symmetrically to rotating axis). The constructed coupling can be seen in Figure 6.

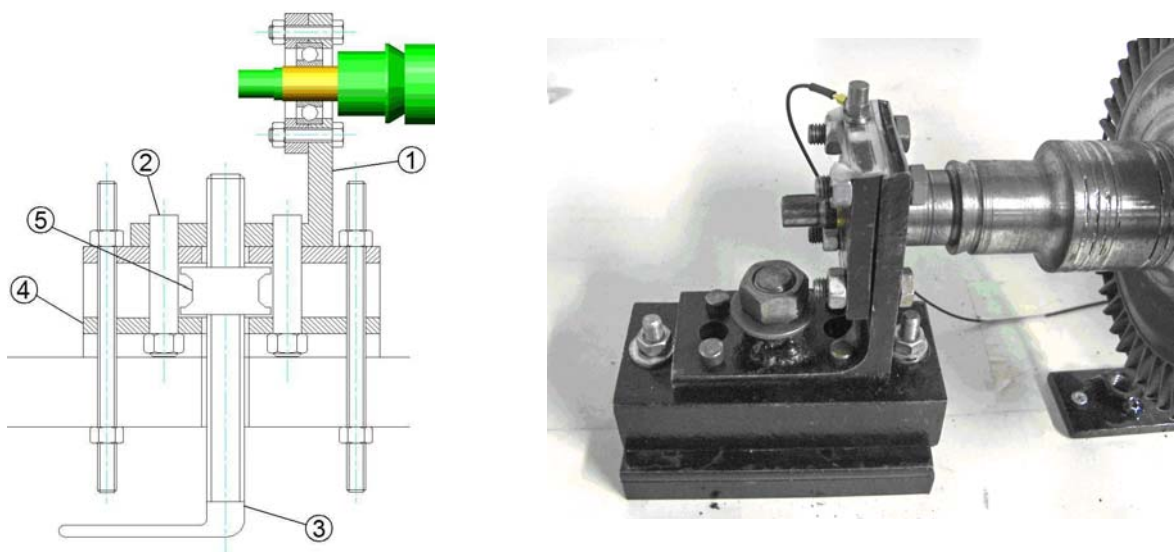


FIGURE 5. The seating assembly

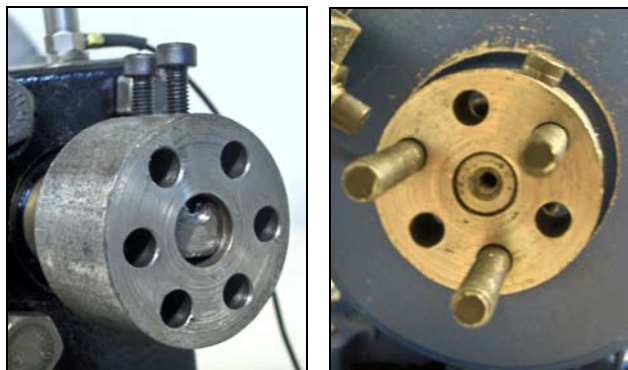


FIGURE 6. Coupling parts

The motor selected is a 3-phase induction electromotor. The electromotor has a rated power value of 0.18kW, it is connected with a 220V supply power, and the value of the field current is 0.9A with a frequency of 50Hz. Power factor value is $\cos\varphi=0.8$. The rated speed is 2890rpm and the slide value is about $s=5\%$. The electromotor is driven by an inverter, allowing the control of the shaft's angular velocity. The inverter has a frequency width of 5 to 50 Hz. An inductive

sensor is used for the angular velocity measurement and is placed close to the coupling as seen Figure 7. The sensor signal is led to a frequency voltage converter and the angular velocity is presented in a LED display either in rpm or Hz units.

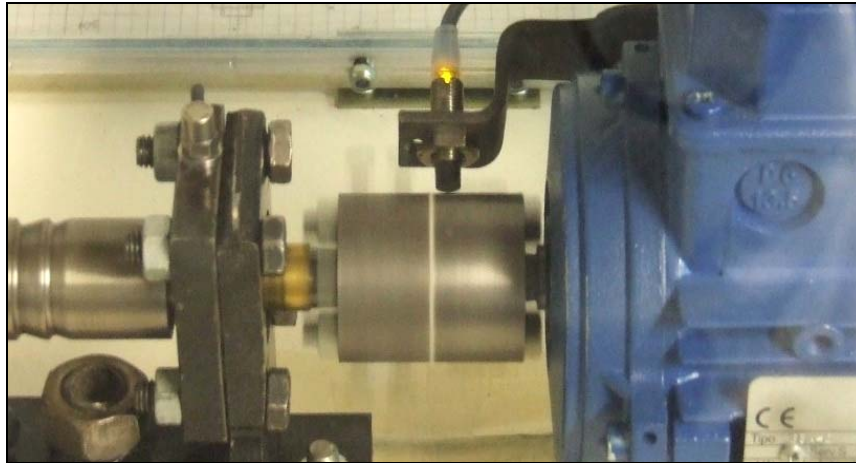


FIGURE 7. Coupling and inductive sensor

In order to measure vibration level, two accelerometers are used, one for each bearing. The accelerometer placed at A position (Figure 3) measures the vibrations for the turbine plane and the accelerometer placed at B position measures the vibrations for the compressor plane. Each accelerometer is mounted on top of the bearing housing using an appropriate magnetic disk, while it is insulated in order to prevent the current's frequency value to pass through the accelerometers and to the vibration signals. Accelerometers' sensitivity is 0.313 pC/ms^{-2} . Each accelerometer is connected with a charge amplifier. The amplifier use low-pass filters in order to cut off high frequencies and consequently to avoid "aliasing" frequencies appearance during the signal processing. Upper and lower frequency cut off limits, as well as the accelerometers' sensitivities are the basic amplifier parameters and can easily be determined by the operator via switches at amplifier's front side. Signal output uses a BNC port at amplifier's back side.

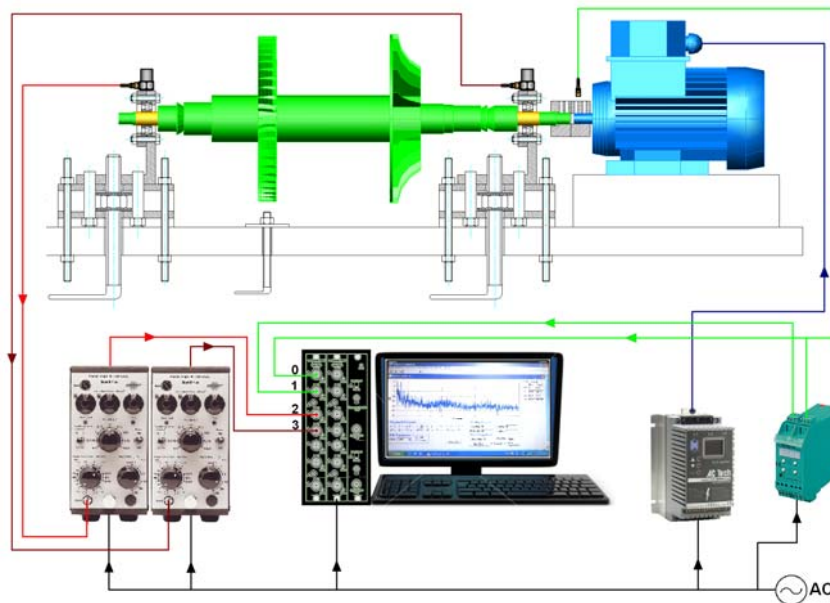


FIGURE 8. Test Rig Measuring Chain and Signals flow diagram

Measurements signals are led to the processing unit. The unit consists of a laptop, equipped with a data acquisition card having maximum total sampling frequency of 500 kHz and 12-bit accuracy. BNC ports are used as the card's interface with the signals. The signals acquired and analyzed are the angular velocity, inductive sensor pulse signal and the amplified vibration signals of the two accelerometers. The data processing is materialized using in-house software, which allows the analysis of acquired vibration signals using Fast Fourier Transformation (FFT) while the results in the form of power spectra and of power spectra differences from a reference condition are presented through a graphic interface environment. The parameters of the measurements analysis, such as the number of samples for FFT are set by the user, as is the range, gain and slope values for each channel. The measuring chain and the flow diagram of the measurements are presented in Figure 8.

Rotating parts of the test rig can be dangerous both for the operator and the students. So it was decided to place a plexiglas-made cover over the rotating parts. The cover is properly designed to allow the observation of the rotating shaft during operation, while a switch guarantees that the test rig wouldn't operate when the hood is open. The cover consists of an aluminum frame which upholds three 5mm plexiglas sheets. The finished test rig can be seen in Figure 9.

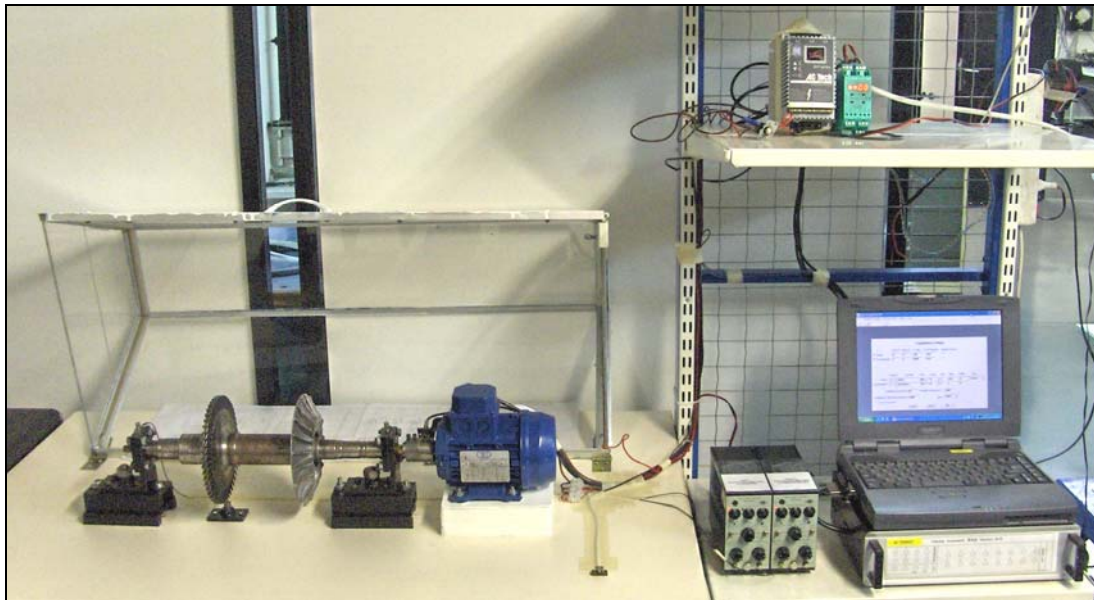


FIGURE 9. The test rig

PROCEDURE AND RESULTS OF THE LABORATORY EXERCISE

A typical laboratory exercise routine, along with sample results is presented in order to verify that the test rig operates as expected and to highlight some of the educational objectives that can be accomplished. The primary objective of the laboratory exercise is for the students to understand the basic principles of diagnosis and to acquire knowledge and experience on the instrumentation, the measuring chain needed to perform vibration measurements and the analysis needed in order to gain diagnostic information. Also the importance of faults signatures should be clear, as should be the actual pattern of the simulated faults signatures. At the same time the students should understand the concept of balancing and its importance.

Prior to starting the laboratory exercise the measuring chain is presented and analyzed, while elements of rotor dynamics theory and vibration measurements, already covered during lectures, are discussed. Following, the “healthy” power spectra at the two planes (compressor and turbine) for a specific rotational speed are established. These power spectra are set as the reference condition in order to calculate power spectra differences when the faults will be implanted. This step highlights the basic principle of diagnosis: “A change on the condition of a mechanical system changes the physical quantities and parameters that describe the system’s operation. Measuring the physical quantities change relative to their reference (healthy) values can lead to the finding of the root causes of the system’s condition change”. During the data acquisition the adjustments of the amplifier are examined, the students can directly see the effect of changing the settings to the power spectra and understand the logic and experience behind the selected setting.

Having established the reference power spectra, the next step is the simulation of unbalance. Prior to fault simulation the teacher discusses with the students elements of rotor dynamics theory and describes mechanical and turbomachinery components faults that may result to unbalance. Such kinds of faults are fouling or erode during operation, foreign object damage and thermal effects, shaft sag, and rotor stator rubs [4].

Following the theoretical discussion, unbalance of the turbine and of the compressor is simulated. Firstly a mass of 24 gr is added at the compressor plane, at the position of 135° counterclockwise and the power spectra difference from the reference ones for the two accelerometers are acquired. The power spectra differences, as seen in the GUI of the data acquisition program are presented in Figure 10.

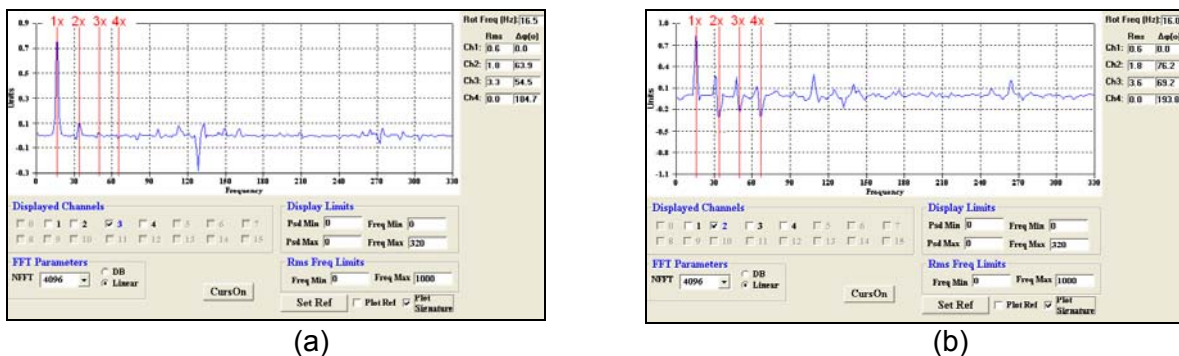


FIGURE 10. Power spectra differences (fault signature) for compressor unbalance calculated from (a) the compressor plane accelerometer and (b) the turbine plane accelerometer

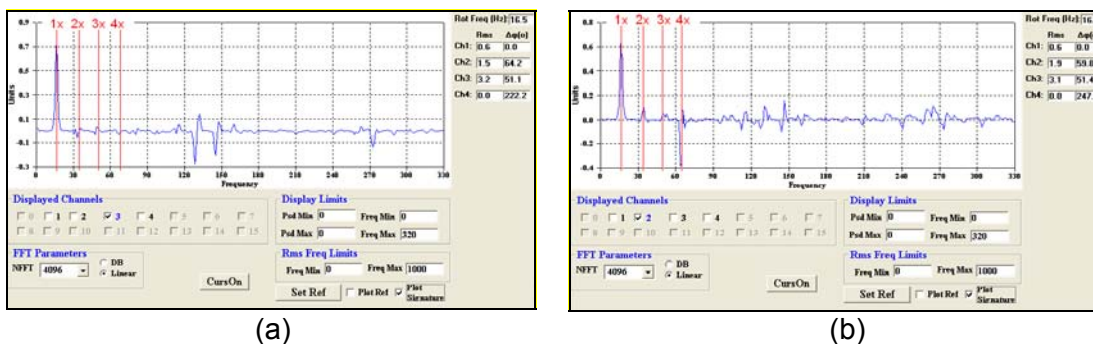


FIGURE 11. Power spectra differences (fault signature) for turbine unbalance calculated from (a) the compressor plane accelerometer and (b) the turbine plane accelerometer

The same routine (addition of a 24 gr mass at the position of 135° counterclockwise) is repeated for simulating turbine unbalance and the corresponding power spectra differences are acquired (Figure 11).

From the results presented it is evident that the expected signature of unbalance is produced by the test rig. Specifically according to the literature [1,5] unbalance produce an increase of the vibration level at 1x of the shaft rotational speed frequency. In this way the students verify the theoretical knowledge through observation.

The test rig is stopped and the simulation of misalignment starts. Using the test rig as an example the teacher discuss about real word cases of misalignment and the operational problems that may arise such as excessive vibrations which will trip the engine and bearing failures. Also the most probable causes for misalignment such as improper mounting and expansion of the gear housing in case of power production gas turbines [1] are discussed, along with the parameters that define the misalignment tolerance, such as coupling length and type of bearings.

In order to simulate misalignment the shaft end connected to the motor via the coupling is moved vertically via the seating's mechanism described. The power spectra and the faults signatures are acquired and promptly analyzed. The results can be seen in Figure 12.

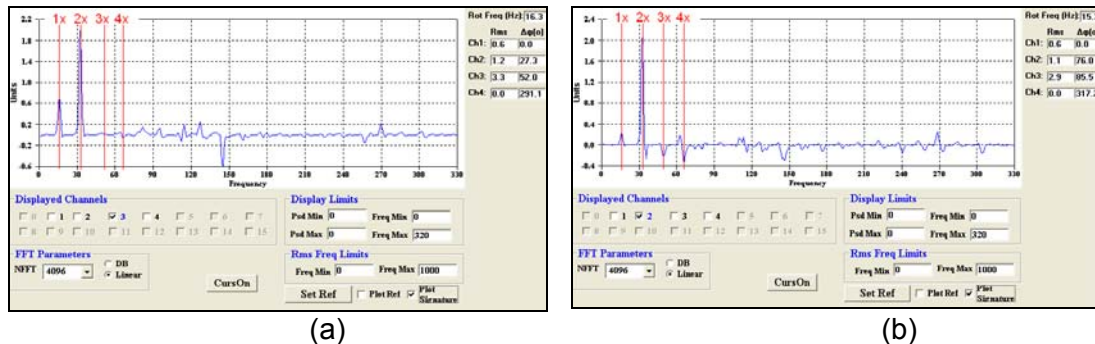


FIGURE 12. Power spectra differences (fault signature) for misalignment calculated from (a) the compressor plane accelerometer and (b) the turbine plane accelerometer

From the results presented it is evident that the expected signature of misalignment is produced by the test rig. Specifically according to the literature [1,5] misalignment produce an increase of the vibration level at 2x of the shaft rotational speed frequency. In this way the students verify the theoretical knowledge through observation.

In order to further increase the insight of the students, homework is assigned based on the measurements taken during the unbalance simulation. The objective of the homework is to find the balancing masses and their radial position that should to be added at the compressor and turbine plane in order to balance the shaft. The method that has to be implemented is the standard two-plane influence coefficient method [6].

EDUCATIONAL ASPECTS

The test rig developed during a diploma thesis by an Engineering student is currently used for supporting courses on gas turbine diagnostic methods. In this context it has educational value for both the student that designed and constructed the test rig and for the students that use it.

As a laboratory exercise, as discussed above, it teaches in an experiential way the basic principle of diagnosis. It enhances the understanding of concepts, such as vibration level, power spectrum and faults signature, which are of paramount importance for applying diagnostic

methods. At the same time the students learn how to set up a measuring chain for monitoring vibrations of a rotating system and they use the knowledge gained to answer to a real life problem (shaft balancing). Another important aspect of the exercise is the verification of the theoretical knowledge through observation in real time and in a controllable environment.

Concerning the student that designed and participated in the construction of the test rig, the procedure has several educational aspects. Execution of a project of this type requires the continual avocation with the subject and the student works within the Laboratory facilities cooperating with technicians and with the supervisor, thus emulating real working environment conditions. The student worked in the workshop and used the lab infrastructure, including tools, materials, electronic equipment and instrumentation, thus gaining experience in many engineering disciplines. The student was encouraged to take initiatives for solving the engineering problems that arose during the project, while he was responsible for contacting vendors and manufacturers, gaining experience to the field of project planning and enhancing his decision making abilities.

The fact that the test rig has been developed by a diploma thesis project has its unique merit in the educational process. Specifically it gives students confidence for their knowledge and motivate them to pursuit similar multidisciplinary projects, as for example the building of a contra-rotating compressor facility that has been assigned to two students the years following this project and was concluded by them [7,8] .

SUMMARY

The process for designing and setting up a mechanical fault simulation test rig has been described. The design process has been described, starting with the initial requirements and going through specific choices for the final layout. The way choices were made was presented, on the basis of serving in the best way the educational purpose that the test rig is mainly destined for. The test procedure and sample results have been presented, verifying the successful operation of the test rig and confirming the effectiveness of the design choices. The education aspects and expected benefits, for either students involved projects for setting up an installation, or students using the test rig as a support to the diagnostic related courses were highlighted.

REFERENCES

1. M. P. Boyce, "Gas Turbine Engineering Handbook", Gulf Professional Publishing, 3rd edition, ISBN 0-88415-732-6, (2006)
2. Kasarda M., "A Rotating Machinery Course at Virginia Tech Developed with Industry Support", ASME paper GT-2002-30154, (2006)
3. Doumouras G., "Modal Testing for Vibration Diagnosis and Development of a Mechanical Faults Simulation Test Rig", NTUA, Diploma Thesis (2007)
4. Norfield D., "Practical Balancing of Rotating Machinery", Elsevier, ISBN 10: 1-85-617465-4, (2006)
5. Girdhar P., Scheffer C., "Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance", Elsevier, ISBN: 978-0-7506-6275-8, (2004)
6. Dimarogonas, A., "Vibration for Engineers". Prentice Hall, ISBN 978-0134562292, (1996)
7. Katsikis G., "Design and Development of a Test Rig for Counter-Rotating Blade Rows", NTUA, Diploma Thesis (2008)
8. Ampatis C., "Components Design and Construction, First operation and Measurements on Counter Rotating Blade Rows Test Rig", NTUA, Diploma Thesis (2010)

Forensic engineering methodology to assess the Maintenance, Repair and Overhaul (MRO) procedures for Gas Generator Turbine Cooling Plates

D.G.Karalis^a and N.E.Melanitis^a

^aHellenic Navy, Hellenic Naval Academy, Mechanics & Materials Division, Marine Materials Laboratory, Hazjikyriakou Avenue, Piraeus 185 39, Greece

Abstract. Investigation was carried out on a set of cooling plates obtained from a gas generator turbine (GGT). The need for the assessment of the durability and remaining operational life of the gas generator turbine component was identified, following a recommendation by the manufacturer for the early replacement of the cooling plates. The current study applied a forensic engineering and failure analysis methodology to assess the Maintenance, Repair and Overhaul (MRO) procedures of high reliability components. From the results of the current investigation it was finally deduced that, in spite the fact that the plates seemed to be macroscopically in good condition, certain metallurgical observations sustained the claim for early component replacement.

Keywords: Gas generator turbine, cooling plate, coated nickel superalloy, failure analysis, forensic engineering methodology.

INTRODUCTION

A set of eight cooling plates from a gas generator turbine were delivered to the Marine Materials Laboratory following a recommendation by the manufacturer for earlier replacement due to changes to the specifications. The eight cooling plates were obtained from an engine that is depicted schematically in figure 1.

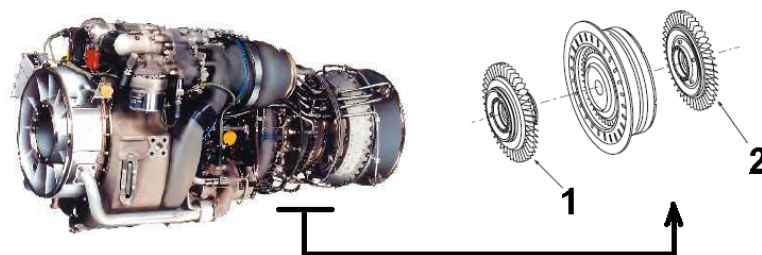


FIGURE 1. General view of the engine (left) and part of the gas generator turbine (right).

The engine consists of the compressor (cold section), the gas generator turbine (hot section) and the power turbine (power turbine section). The gas generator turbine contains the stage 1 gas generator turbine rotor (item 1 in figure 1), the stage 2 gas generator turbine rotor (item 2 in figure 1) and the gas generator stator (shown between the items 1 and 2 in figure 1). The gas

generator turbine rotors are bolted to the compression section of the engine and as the exhaust gases turn the gas generator turbine rotor, the compressor also turns. This makes the system self-sustaining. The gas turbine and the compressor rotate at 44700 RPM whereas the power turbine rotates at 20900 RPM. The items 1 and 2 that are presented in figure 1 consist of the cooling plates, the disk and the blades. These are depicted in large scale in figure 2.

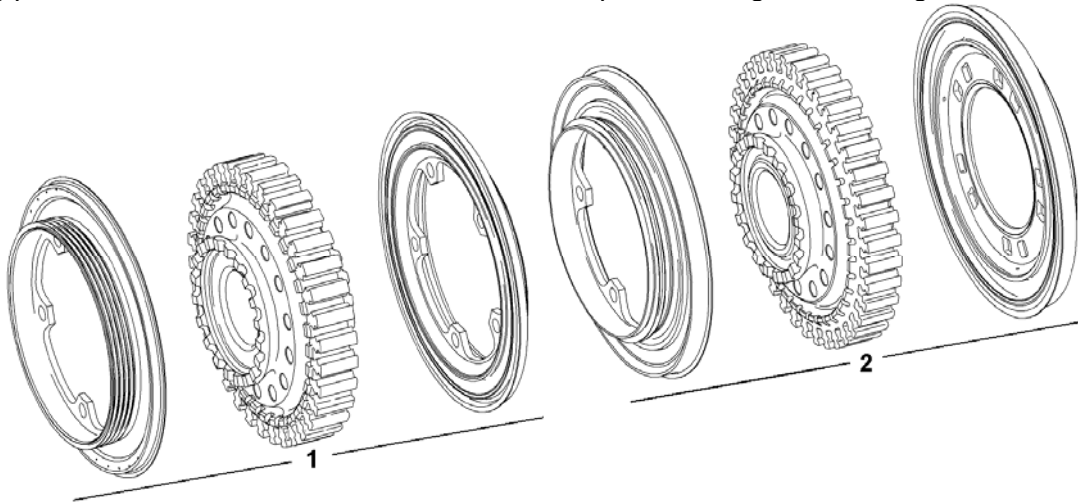


FIGURE 2. Gas generator turbine rotor parts. From left to right: stage 1 forward cooling plate, stage 1 disk (blades not shown), stage 1 aft cooling plate, stage 2 forward cooling plate, stage 2 disk (blades not shown), stage 2 aft cooling plate.

As seen from figure 2, these thin machined cooling plates are mounted on both sides of each disc in order to constrain cooling air to follow the most effective path. The plates consist of a short cylindrical body of 20 mm height and a circular flange of 148 mm diameter. The stage 1 forward cooling plate contains continuous circumferential projections along the short cylindrical body similar to a thread. The full stage 1 gas generator turbine is depicted in figure 3 (item 1 in figure 1).



FIGURE 3. The gas generator turbine rotor with the blades positioned around the rotor disk. The cooling plates are fixed with five bolts on the rotor disk. Notice the sand-color of the blades.

The aim of the current paper is to investigate whether the manufacturer recommendation for early replacement of the cooling plates was an apt advice. This will be carried out by investigating the potential existence of wear, cracking or any other evidence of structural degradation of the plates. Thus the validity of the manufacturer recommendation will be assessed and the owner of the gas generator will be consulted accordingly. In addition to the above the current study seeks to establish a set of failure analysis tools and criteria as an assessment methodology for the usability of non-failed critical engine components.

EXPERIMENTAL PROCEDURE

Macroscopic investigation was realized optically, by naked eye and by using a SSM stereomicroscope. **Microstructural analysis** was realized in mounted cross-sections of the material obtained from the flange of the disk. Manual grinding was performed using MetaServ grinding devices and successive abrasive papers up to #2400 grid followed by fine polishing using diamond and silica suspensions. Cleaning was performed using ethanol followed by hot air stream drying. Etching was performed using 7.5 mL HF, 2.5 mL HNO₃, 200 mL CH₃OH etchant. Etching time was 5 minutes. **Metallographic observation** was carried out using an AusJena metallurgical microscope. **Hardness testing** was performed employing a calibrated Indentec Rockwell A Hardness tester applying 60 kg of force. **Fractographic observation** was conducted to cleaned specimens employing a JEOL Scanning Electron Microscope. Locations for optical and electronic observation were also assisted by **Finite Element Analysis** results. Energy Dispersive X-ray Spectroscopy was used for **local chemical analysis** whereas X-ray Fluorescence was employed for **global chemical analysis** of the coating using Seiko SII, SEA 1200 VX analyzers. **Non-destructive fluorescent penetrant inspection** (Type I, Method B, Level 4) was also carried out on the cooling plates.

INVESTIGATION

Data Relevant to Cooling Plates History

The engine manufacturer recommendation for early replacement of the cooling plates was provided on the basis of advanced life-estimation numerical models results that have been recently developed by the manufacturer, as a part of its Maintenance, Repair and Overhaul (MRO) procedures. It is well understood that any premature replacement strongly influences the overall cost of the engine maintenance, whereas disregarding of the recommendation may influence the reliability of the rotor parts, the safety of the engine and crew.

Macroscopic observation

All delivered plates were in visually good condition, a fact that made the manufacturer recommendation to look excessive. Macroscopic observation carried out by naked eye on the delivered eight cooling plates did not reveal any signs of global plastic deformation or permanent global distortion. The three most strained plates (with respect to total hours in operation) had some sand deposited on their surface which is attributed to the coastal environment where the specific gas generator was operating (see the color of the whole set in

figure 3). After cleaning of the specimens it was revealed that they were deposited with a protective coating. As depicted in figure 4, in four out of the eight plates, the protective coating was worn (lost) or fractured exposing the substrate of the plate to the surrounding combustion gasses.

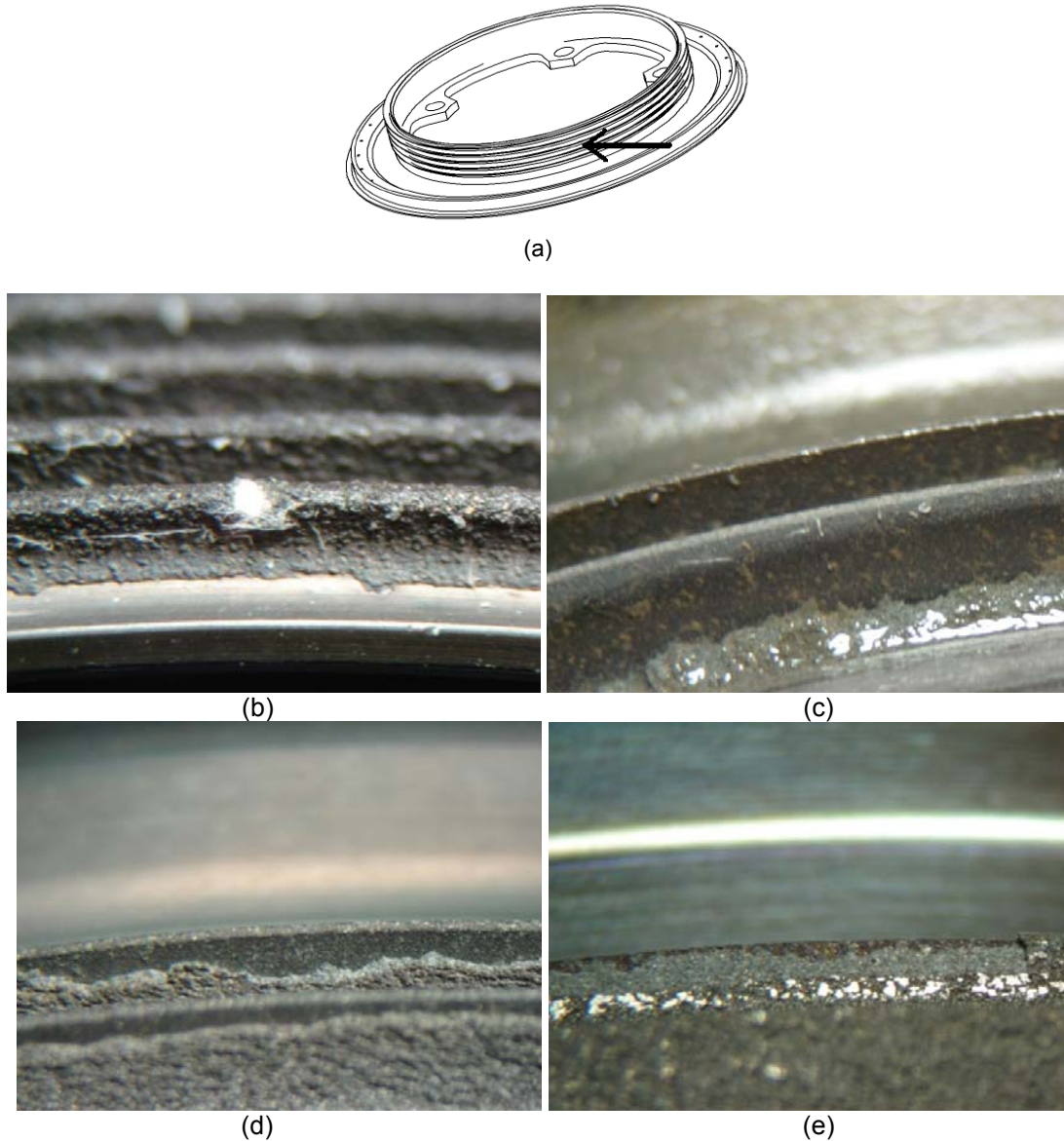


FIGURE 4. (a) Observation of the thread. (b)-(d) Existence of worn coating (lost) in three different plates. (e) In one plate the coating has been fractured.

Fracture and local plastic deformation of a structural element contained in one cooling plate was also identified as depicted in figure 5. Further detailed observation of the surface of the eight plates did not reveal any cracked areas. The latter was also confirmed by the non-destructive fluorescent penetrant inspection.

SEM Microfractography, SEM/EDS and XRF analysis

In order to further examine the plates for potential cracks and wear, Scanning Electron Microscopy was used. For this reason specimens from the most strained plate (stage 1 forward cooling plate) were prepared. Chemical analysis of a cross section of the flange (coating excluded) using SEM/EDS presented the chemical composition shown in table 1 and figure 6b.

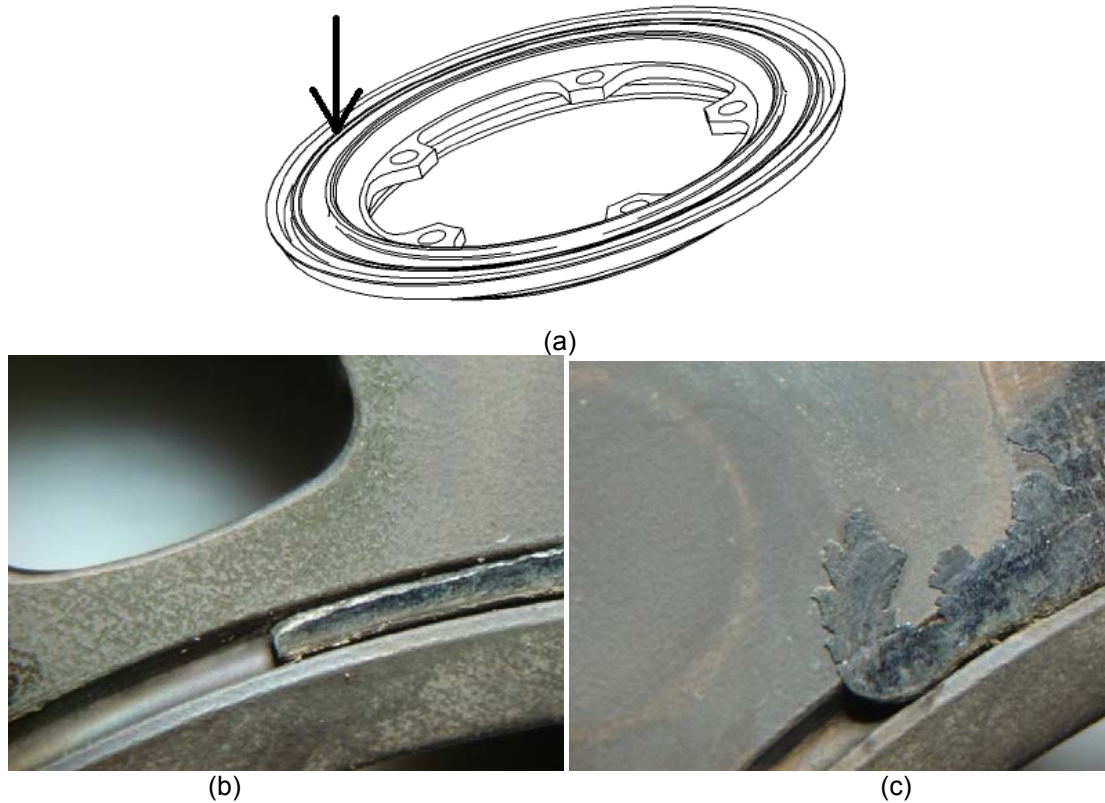


FIGURE 5. (a) Observation of the flange of one plate. (b) Fractured structural element. (c) Plastically deformed structural element.

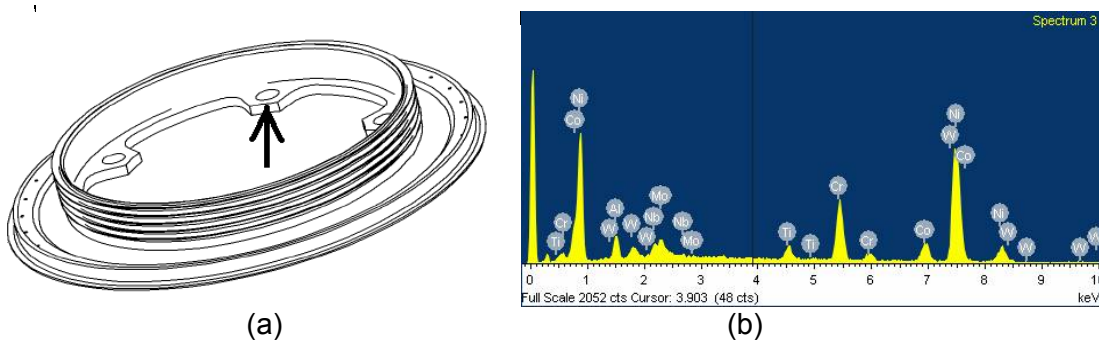


FIGURE 6. (a) Specimen location for the SEM/EDS chemical analysis. (b) Results of SEM/EDS chemical analysis

TABLE 1. Chemical composition of a cross section of the flange (coating excluded)

Element	Al	Ti	Cr	Co	Ni	Nb	Mo	W
---------	----	----	----	----	----	----	----	---

%w/w	4	3	13.5	7.5	bal	5.9	4	4
------	---	---	------	-----	-----	-----	---	---

Detailed examination of the specimens revealed the existence of worn surfaces on the plate's coating. More specifically, three different zones of non-uniform wear of the coating were identified on the flange of the plate as shown in figure 7.

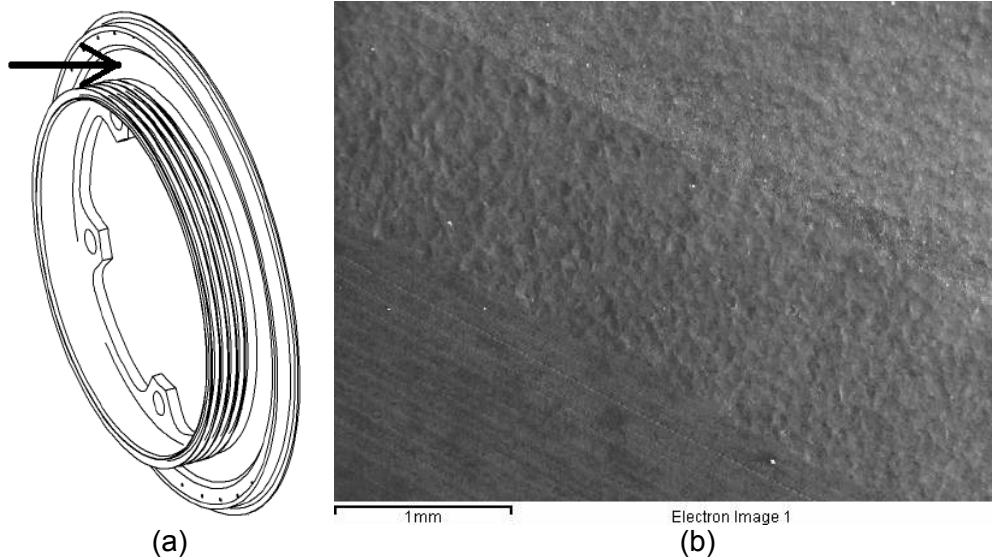


FIGURE 7. (a) Observation of the flange. (b) Existence of three different zones of non-uniform wear of the coating.

Qualitative local chemical analysis of the worn coated surface using both SEM/EDS and XRF revealed the existence of the elements shown in Table 1 plus some small amounts of Fe as shown in figure 8.

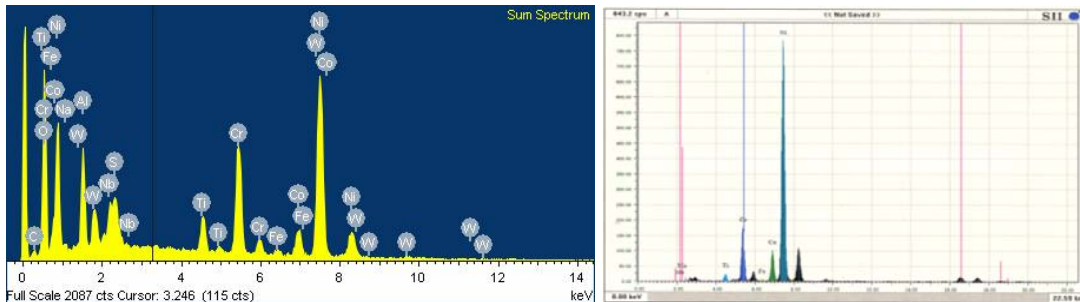


FIGURE 8. Local qualitative chemical analysis of worn coating (a) SEM/EDS results. (b) XRF results

Non uniform wear and extensive cracking was identified on the thread of the plate. More specifically, at the bottom of the thread, which is less exposed to the gasses, good coherence between the coating's matrix and the reinforcing grains was identified. Furthermore no signs of wear or cracking were existent on the coated surface. On the other hand, at the tip of the thread that is more exposed to the surrounding environment, extensive cracking, erosive wear and grain removal from the coating's matrix were identified. The results are depicted in figure 9.

The SEM/EDS chemical analysis results of the coating at the worn tip of the thread are presented in Table 2 and figure 10. No cracking was identified at any other location of the plate.

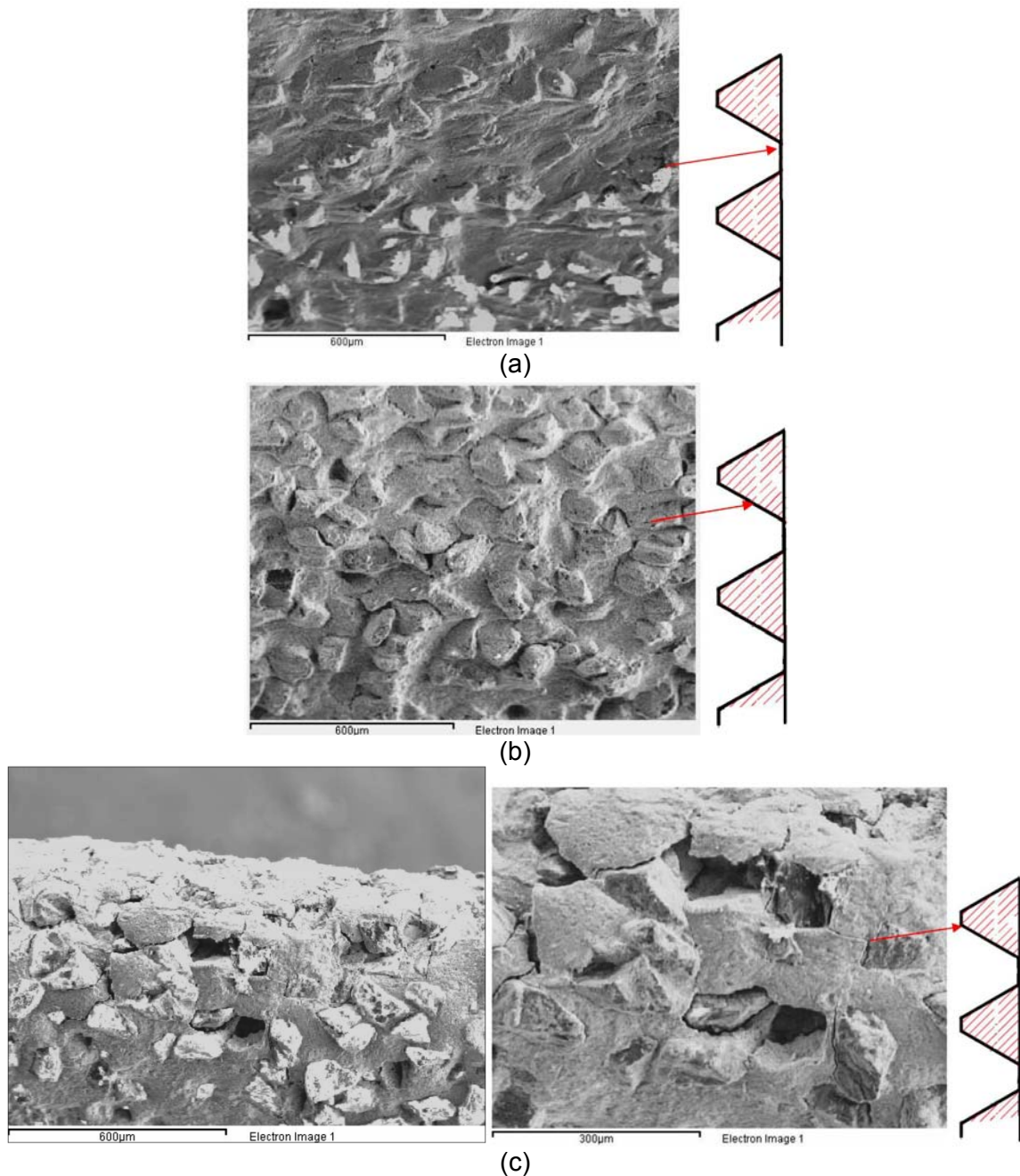


FIGURE 9. (a) Almost intact coating at the bottom of the thread. (b) The intermediate area of the thread presenting erosive wear, partial cracking and partial grain removal. (c) Tip of the thread presenting extensive cracking, erosive wear and grain removal from the coating's matrix.

TABLE 2. Chemical composition of the worn coating at the tip of the thread

Element	Al	W	Si	Fe	Ni
%w/w	11	7	23	2	bal

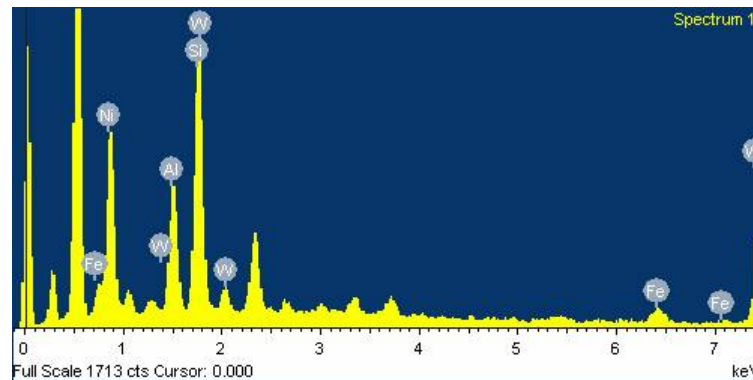


FIGURE 10. Local chemical analysis results by SEM/EDS of the worn coating at the tip of the thread

Microstructural Analysis

Specimens for microstructural analysis were prepared from a cross section of the thread of the plate in order to investigate whether the identified cracks of the coating (depicted in figure 9) have penetrated the substrate material. The investigation did not identify any cracks propagating through the substrate nickel superalloy. Strongly eroded coating and removal of the reinforcing grains from the coating's matrix were identified. The maximum thickness of the coating was measured equal to 110 μm whereas the minimum thickness was 20 μm at some locations. The analysis also revealed that the microstructure of the nickel matrix contained resolved precipitates. No blocky carbides were identified. The hardness of the plate was measured equal to 73 HRA (450 HV). The microstructural analysis results are depicted in figure 11.

Calculations and Finite Element Analysis

In order to identify the critical locations with respect to maximum stress a three dimensional linear thermo-mechanical finite element model of the most strained plate (stage 1 forward cooling plate) was set up using ALGOR® commercial code. The model contained in total 3163 flat shells (plates) and beam elements that were used to model the thread. The model was assigned with the mechanical properties of a typical Ni annealed alloy (density 8.22 gr/cm^3 , modulus of elasticity 207 GPa, Poisson ratio 0.31, thermal coefficient of expansion $13.1 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ and shear modulus of elasticity 76 GPa). Coating, gas pressure, friction, rabbit loads, bolt clamp loads and manufacturing process were not included in the analysis. The nodes of the model at the holes of the flange where fixation with the disk takes place were totally fixed. The stress free reference temperature of the model was set equal to 298 K (25 °C). Two different load cases were analyzed. In load case 1 (LC1), the centrifugal loads due to rotation at nominal speed of 44700 RPM were taken into account whereas thermal strains were totally ignored. In load case 2 (LC2), the uniform temperature of the plate was set equal +100 K above the stress free reference temperature in order to let the thermal strains develop on the model, whereas the centrifugal loads were not accounted for in the analysis. The results of the FE analysis are shown in figure 12. The common 10-color contour legend refers to maximum and minimum displacement or stress: the maximum displacement of the legend refers to 0.2 mm whereas the minimum to 0 mm. The maximum stress of the legend refers to 1158 MPa whereas the minimum to -1158 MPa.

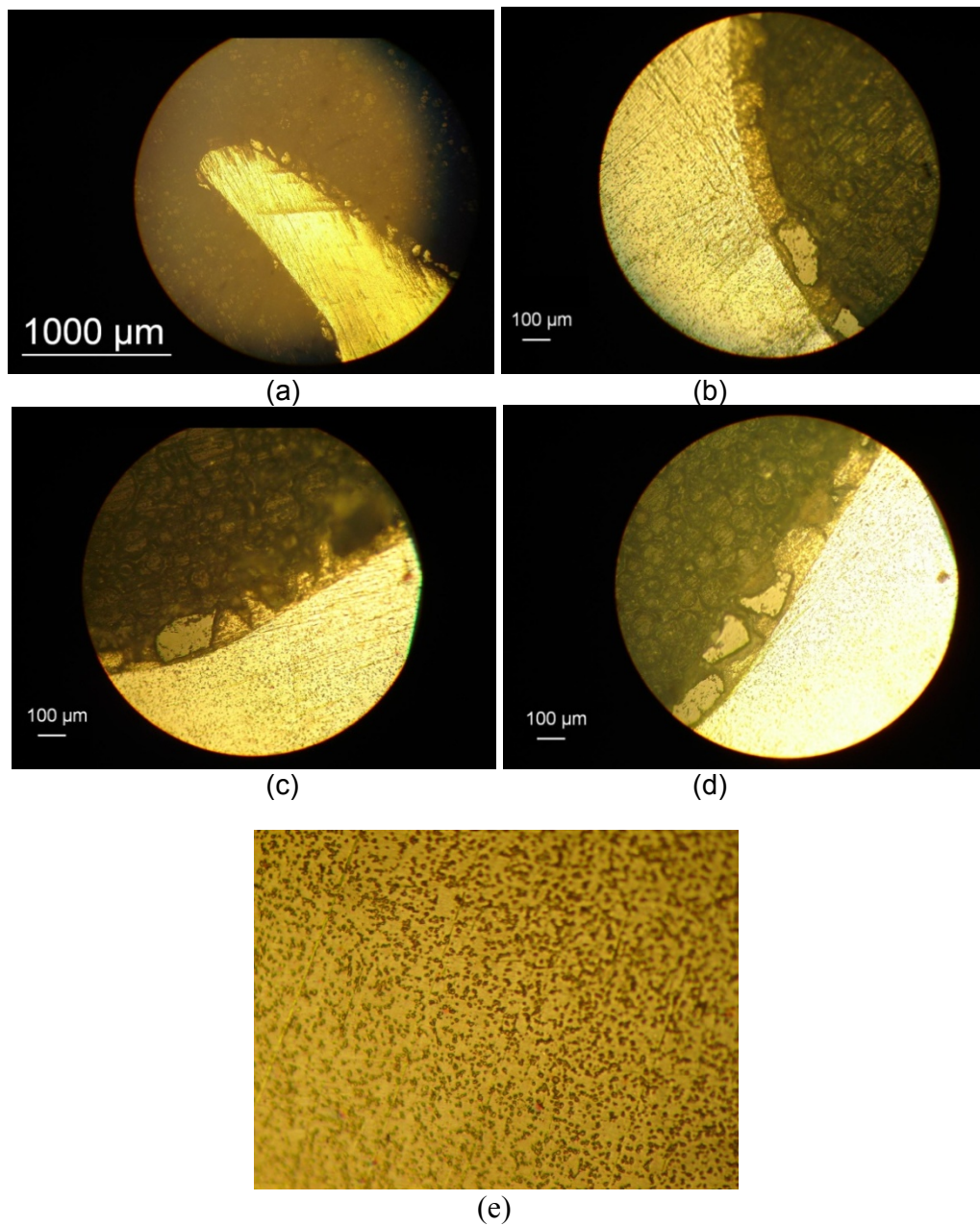


FIGURE 11. (a) Part of the thread with the worn coating. (b) Almost intact coating. (c)-(d) Coating showing grain removal and erosive wear. No cracks penetrating the substrate material were identified. (e) Microstructure of the substrate containing resolved precipitates (x250).

Here it has to be emphasized, that in real world the forward cooling plate, the rotor disk and the aft cooling plate although being fixed together, are allowed to expand due to temperature increase at bigger degree compared to the case simulated previously (total fixation); thus the thermal stress results presented in figure 12 represent a conservative solution. From the FEA results it is deduced that the critical sites for optical observation are located at the vicinity of holes of the flange where the fixations with the bolts exist, at the intersection of the flange and the thread and the thread as well. Notice, that the FEA results presented herein provide only a

global indication of some of the critical areas with respect to failure and are presented as supplementary information to the laboratory investigation results.

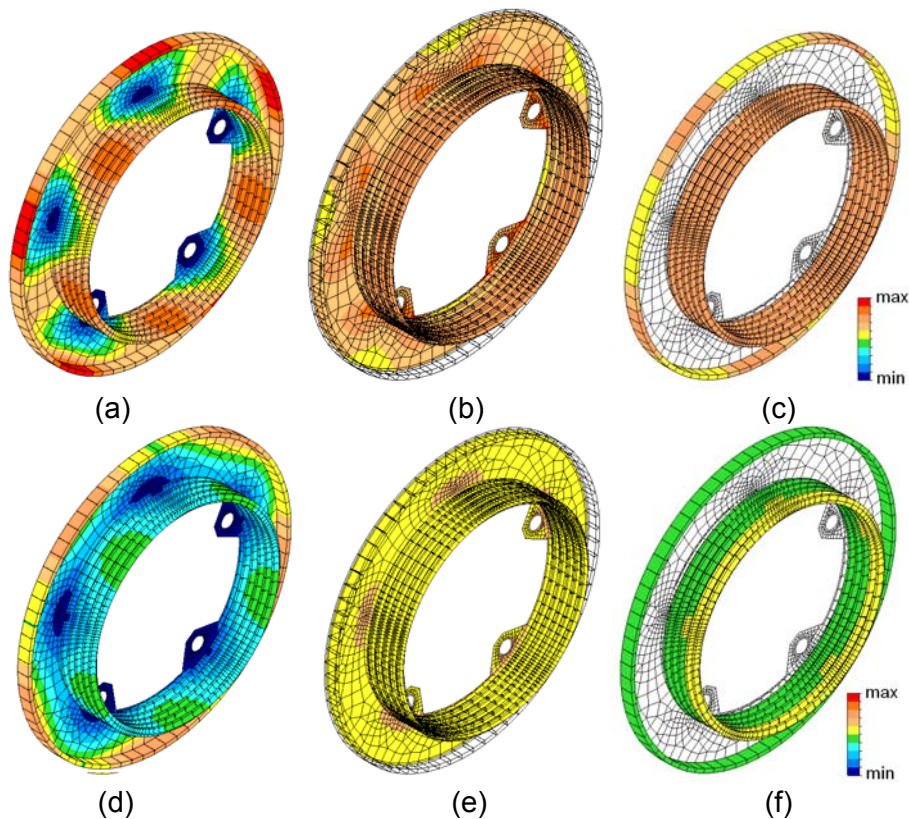


FIGURE 12. (a) LC1: Magnitude of displacements due to rotation. (b) LC1: Von Mises centrifugal stress on flat shells. (c) LC1: Worst centrifugal stress on beams. (d) LC2: Magnitude of displacements due to temperature increase. (e) LC2: Von Mises thermal stress on flat shells. (f) LC1: Worst thermal stress on beams.

DISCUSSION, CONCLUSION AND RECOMMENDED ACTIONS

From the findings of the current investigation the following are deduced:

- a. The plates are made from a coated high strength nickel superalloy [1, 2].
- b. The microstructure of the nickel matrix contained resolved precipitates.
- a. On the coating of the plates, nickel as long as aluminum, tungsten, silicon and iron were detected.
- b. Four out of eight plates exhibited worn coating at the thread (eroded or lost coating).
- c. One out of eight plates presented fractured coating at the thread (coating loss).
- d. One out of eight plates exhibited local plastic deformation and fracture of its structural elements.
- e. None of the eight cooling plates presented any cracking in macro scale that could be identified by naked eye or by using a typical laboratory stereo-microscope.
- f. Nondestructive testing did not reveal the existence of any crack in macro scale in any of the plates.

- g. Localized observation at all locations of the most strained plate using Scanning Electron Microscopy did not reveal any micro crack propagating through the substrate material of the plates.
- h. The most strained plate (stage 1 forward cooling plate) presented non-uniform wear of the coating on its flange. The latter is probably attributed to the contact with the joining machinery (see also figure 1). Erosive wear of its coating at the thread was identified. Extensive cracking of the eroded coating and coating loss was also observed.
- i. Microstructural analysis from a sample of the most strained plate (stage 1 forward cooling plate) confirmed the existence of severely worn, eroded, cracked and lost coating but did not identify any cracks penetrating through the substrate material. The thickness decrease of the coating at some areas was equal to 80%.

Nickel alloys are used for a wide variety of applications, the majority of which are designed to take advantage of the corrosion resistance and/or heat resistance properties of these alloys. Nickel superalloys are used in turbine compressor blades and discs, shafts, spacers, fasteners, miscellaneous jet engine hardware; space shuttle turbo pump seals, afterburner components, combustion chamber liners, nozzles, vanes, rings, turbine exhaust weldments, structural parts, etc [1, 2, 3]. Nickel is a versatile element and will alloy with most metals. Complete solid solubility exists between nickel and copper; wide solubility ranges between iron, chromium, and nickel make possible many alloy combinations. The face centered cubic structure of the nickel matrix (γ) can be strengthened by solid-solution hardening, carbide precipitation, or precipitation hardening. Cobalt, chromium, molybdenum, tungsten, titanium, and aluminum are all solid-solution hardeners in nickel. Aluminum, titanium and niobium are strong γ' -Ni₃(Al,Ti) and γ'' -Ni₃Nb precipitate formers, which when present in a high nickel matrix provide significant strengthening of the material. Tungsten, titanium, niobium, molybdenum and chromium act as carbide formers. Aluminum and chromium provide oxidation resistance [1-3]. Because high temperature failures normally initiate at the grain-boundary interfaces, it is a common practice to reduce the grain boundary interfaces or completely eliminate them [4].

The temperature at the entrance of the turbine can be considerably high. Therefore to keep the structural parts from degradation, both complex cooling schemes and coatings are often used. High temperature coatings are designed to increase the life of the underlying alloy during service. In general, nickel-based alloy coatings show good high-temperature wear and corrosion resistance. They have good wear resistance after adding tungsten and molybdenum elements to the alloy. Nickel based coatings are used in applications when wear resistance combined with oxidation or hot corrosion resistance is required [5-13]. Two generic coating types are used for similar applications: diffusion coatings and overlay coatings. Both types of coatings result in a surface layer enriched in oxide-forming elements to promote formation of a protective oxide layer. In general, the use of protective coatings can greatly increase the lives of nickel base superalloys for operating conditions in which the oxidation or hot corrosion resistance of the base material is unacceptable. However, the protective coatings themselves are subject to degradation under engine operating conditions and thus have limited lives. Degradation of the protective coating can affect the integrity of the substrate material leading to its failure [4-13].

From the results presented above it is finally deduced that the protective coating of the plates was degraded, eroded and lost in several areas, exposing the substrate material to the aggressive gas environment. It is thus concluded that, in spite of the fact that the plates seemed to be macroscopically in good condition, the identified wear may substantially contribute to onset of failure, as literature indicates [1,4-13].

The test protocol that was applied in current expert report has included Macroscopic investigation in combination with Non-destructive Inspection for identification of global distortion or defects, Microstructural analysis combined with Metallographic observation, Hardness testing and global Chemical Analysis for material characterization, Fractographic observation and local Chemical Analysis for identification of fractographic mechanisms realized in micro scale and finally Finite Element Analysis for better understanding of operational response. The results of the aforementioned tests and analyses that have been often employed in failure analyses can be used in order to assess the maintenance, repair and overhaul procedure of high reliability components.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank the military and civil personnel of the Telecommunication and Electronics Media Factory of the Hellenic Military Aviation for their help in conduction of the nondestructive testing and SEM/EDS analysis. Authors also acknowledge that current work was made possible by the assistance of the military personnel of the Hellenic Helicopter Naval Base.

REFERENCES

1. ASM handbook, Vol. 5, Surface Engineering; 1994.
2. ASM handbook, Vol. 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials; 1990.
3. ASM handbook, Vol. 9, Metallography and Microstructures; 2004.
4. ASM handbook, Vol. 11, Failure Analysis and Prevention; 2002.
5. T.S. Sidhu, S. Prakash, R. D. Agrawal, Hot corrosion and performance of nickel-based coatings, *Current Science* 90 (2006) 41-47.
6. R. Sivakumar, B.L. Mordike, High temperature coatings for gas turbine blades: A review, *Surface and Coatings Technology* 37 (1989) 139-160.
7. AS. Osyka, AI. Rybnikov, S.A Leontiev, N.V. Nikitin, I.S. Malashenko, Experience with metal/ceramic coating in stationary gas turbines, *Surface and Coatings Technology* 76-77 (1995) 86-94.
8. G.W. Goward, Progress in coatings for gas turbine airfoils, *Surface and Coatings Technology* 108-109 (1998) 73-79.
9. N. Eliaz, G. Shemesh, R.M. Latanison, Hot corrosion in gas turbine components, *Engineering Failure Analysis* 9 (2002) 31-43.
10. M.J. Pomeroy, Coatings for gas turbine materials and long term stability issues, *Materials and Design* 26 (2005) 223-231.
11. I. Gurrappa, A. Sambasiva Rao, Thermal barrier coatings for enhanced efficiency of gas turbine engines, *Surface & Coatings Technology* 201 (2006) 3016-3029.
12. R. Rajendran, M.D. Ganeshachar, Jivankumar, T. Mohana Rao, Condition assessment of gas turbine blades and coatings, *Engineering Failure Analysis* 18 (2011) 2104-2110.
13. R. Rajendran, Gas turbine coatings – An overview, *Engineering Failure Analysis* 26 (2012) 355-369.

PART B:

ELECTRICAL ENGINEERING and COMPUTER SCIENCE

Availability Investigation of Free Space Optical Links with Time Diversity for Turbulence Channels Modeled with the K-Distribution

A.N. Stassinakis, G.G. Chronopoulos and H.E. Nistazakis

*Department of Electronics, Computers, Telecommunications and Control, Faculty of Physics,
National and Kapodistrian University of Athens, Athens, 15784, Greece
e-mails: {a-stasinakis;grigchronop;enistaz}@phys.uoa.gr*

Abstract. The terrestrial free space optical (FSO) communication systems, are attaining license free, high bandwidth access and security with low installation and operation cost. On the other hand, their main disadvantage is the continuous variations of the characteristics of the electromagnetic beam's propagation path, which is the atmosphere, causing performance mitigation on system's availability and performance. A very important phenomenon which induces these variations is the atmospheric turbulence. In order to minimize its influence on the characteristics of the FSO links, many techniques have been investigated and among them, the diversity techniques have attracted significant research interest. In this work, we investigate the availability, by means of their outage probability estimation, of FSO communication links which are using the time diversity configuration, over strong atmospheric turbulence channels modelled with the K-distribution. For this setup, we derive closed form mathematical expressions for the estimation of outage probability for various atmospheric turbulence strengths. Finally, we present numerical results for many cases with various turbulence strengths and time diversity characteristics.

Keywords: K-distribution, Diversity Techniques, Atmospheric Turbulence, Outage Probability, Wireless Optical Communication Systems.

PACS: 42.79.Sz, 92.60.hk.

INTRODUCTION

The terrestrial outdoor wireless communication systems which are using the optical frequencies, i.e. the free space optical (FSO) communication systems, are combining many advantages such as, license free, high bandwidth access and security with low installation and operation cost, [1]-[4]. Obviously, the propagation path for the electromagnetic beam is the atmosphere. Thus, any change of its characteristics causes performance variations. One of them, is the atmospheric turbulence which represents a very significant availability and performance mitigation factor [1], [2], [4]-[10], affecting both, intensity and phase of the optical signal [11]. This phenomenon, for the case of a typical outdoor line-of-sight, point-to-point optical link causes even rapid fluctuations at the irradiance of the signal at the receiver's end. As a result, the optical channel is showing randomly time-varying characteristics due to the so-

called scintillation effect, [1], [2], [5]-[8], which are decreasing the FSO system's availability and performance.

In order to counterbalance the influence of the turbulence effect on the availability and performance of FSO links, the diversity techniques have attracted significant attention by many research groups [11]-[18]. This technique is used in RF communication systems and most of the times is realized in space, in time or in wavelength. For the spatial diversity, [12]-[16], the optical communication system uses multiple transmitters and/or receivers at different places which are transmitting and receiving copies of the same part of the information signal. For the links with time diversity [17]-[19], there is only one trans-receiver pair, but the information signal is retransmitted more than once at different time slots. Finally, the systems which are using the wavelength diversity, [11], [19]-[21], use a composite transmitter and the signal is transmitted at the same time at different wavelengths towards a number of wavelength-selected receivers.

In this work we investigate the availability of FSO communication systems which are using the time diversity schemes over strong atmospheric turbulence channels modelled with the K-distribution [22]-[24]. For this point-to-point configuration, which consists of one transmitter and one receiver, in each side of the link [18], [19], we study its availability by means of the outage probability estimation for various atmospheric turbulence conditions. For the estimation of this metric we derive closed form mathematical expressions.

The rest of this paper is organized as follows: in section II we analyze the basic characteristic of the FSO link with time diversity and we present the channel model. In section III, we derive the mathematical expression for the estimation of the outage probability while, in section IV we present the corresponding numerical results and in section V we outline the conclusions.

SYSTEM AND CHANNEL MODEL

In an FSO link that uses time diversity schemes, the signal is transmitted in multiple copies, M , in different time slots. Thus, every copy is transmitted through the same spatial channel but with different turbulence characteristics each time due to the fact that it is a very rapidly varying phenomenon. As mentioned above, this system is using only one transmitter and one receiver in each side of the optical link. Hence, this procedure can be emulated as to send each copy in different receivers at the same time, i.e. similar as a system with one transmitter (single input) and multiple receivers (multiple outputs) - SIMO).

This link with time diversity can be described by using a binary input and continuous output with intensity modulation – direct detection (IM/DD) and the modulation we use is on-off keying (OOK). The channel is assumed to be memoryless, stationary with independent and identically distributed intensity (i.i.d) fast fading statistics with additive Gaussian noise (AWGN). Thus, as it is mentioned above, in order to model the FSO link with time diversity which is sending M times each part of the signal, we assume that the FSO link can be studied as a communication system with one transmitter and M receivers. Thus, the statistical channel model is given as [15], [18], [19]:

$$y_m = s_m x + n = \eta_m x I_m + n, \quad m = 1, \dots, M \quad (1)$$

where y_m represents the signal arriving at the receiver, s_m is the instantaneous gain and is equal to ηI_m where η is the effective photo-current conversion ratio of the receiver while I_m is the instantaneous normalized irradiance at the receiver, x is the modulated signal that is transmitted and takes the values "0" or "1" and finally, n is the AWGN with zero mean and variance $N_0/2$.

For the cases of strong turbulence conditions, the induced fading can be assumed as a random process that follows the K-distribution [15], [22]-[24]. The corresponding probability density function (pdf) is given as [23]:

$$f_{I_m}(I_m) = \frac{2(b_m)^{\frac{1+b_m}{2}}}{\Gamma(b_m)} I_m^{\frac{1+b_m}{2}-1} K_{b_m-1}\left(2\sqrt{b_m I_m}\right) \quad (2)$$

where $K_\nu(\cdot)$ stands for the modified Bessel function of the second kind of order ν , $\Gamma(\cdot)$ is the gamma function while the parameter b_m is related to the effective number of discrete scatterers [22]-[24].

The corresponding cumulative distribution function (cdf) for the K-distribution is calculated by integrating (2) and concludes to the following expression [15], [23]:

$$F_{I_m}(I_m) = \frac{(b_m I_m)^{\frac{1+b_m}{2}}}{\Gamma(b_m)} G_{1,3}^{2,1} \left(b_m I_m \left| \begin{array}{c} 1-b_m \\ 2 \\ \frac{1-b_m}{2}, \frac{b_m-1}{2}, -\frac{1+b_m}{2} \end{array} \right. \right) \quad (3)$$

where $G_{p,q}^{m,n}[\cdot]$ stands for the Meijer G-function, [25].

Next, we define the instantaneous electrical signal-to-noise ratio (SNR) as $\xi_m = (\eta I_m)^2 / N_0 = s_m^2 / N_0$, [10], [18], and the average electrical SNR as $\mu = (\eta E[I_m])^2 / N_0$, [10], [18], [26], where $E[\cdot]$ stands for the expected value of the normalized irradiance I_m . Using the expressions of ξ_m and μ_m in (2) and after a power transformation of I_m , the pdf of K distribution for ξ_m is obtained in the following form [15], [23]:

$$f_{\mu_m}(\mu_m) = \frac{(b_m)^{\frac{1+b_m}{2}}}{\Gamma(b_m)} \frac{\xi_m^{\frac{1+b_m}{4}-1}}{\mu_m^{\frac{1+b_m}{4}}} K_{b_m-1} \left(\sqrt[4]{\frac{16b_m \xi_m}{\mu_m}} \right) \quad (4)$$

while the corresponding cdf of K-distribution has the following form [15], [23]:

$$F_{\xi_m}(\xi_m) = \frac{(b_m)^{\frac{1+b_m}{2}}}{\Gamma(b_m)} \left(\frac{\xi_m}{\mu_m} \right)^{\frac{1+b_m}{4}} G_{1,3}^{2,1} \left(b_m \sqrt{\frac{\xi_m}{\mu_m}} \left| \begin{array}{c} 1-b_m \\ 2 \\ \frac{1-b_m}{2}, \frac{b_m-1}{2}, -\frac{1+b_m}{2} \end{array} \right. \right) \quad (5)$$

OUTAGE PROBABILITY OF THE FSO LINK WITH TIME DIVERSITY

The above cdf can conclude to a mathematical expression for the estimation of the outage probability of the FSO communication systems with time diversity, over turbulent channels modeled with the K distribution. This metric, represents the probability that the instantaneous electrical SNR falls below a critical threshold, ξ_{th} , which represents the receiver's sensitivity limit

and thus, it is a particularly important parameter for systems' designing [10], [18], [19]. The outage probability for each one of the M copies of the signal is given as [10], [18], [19], [27]:

$$P_{out,m} = \Pr(\xi_m \leq \xi_{th}) = F_{\xi_m}(\xi_{th}), \quad (6)$$

In this section we will derive the expression for the outage probability of an FSO link when the turbulence channel is modeled by K-distribution and the system uses time diversity. Due to the independence of outage probability of each copy of the M copies of the signal that will be transmitted, the outage probability of the FSO link can be estimated as [12], [18], [19]:

$$P_{out,M} = \prod_{m=1}^M \Pr(\xi_m \leq \xi_{th}) = \prod_{m=1}^M F_{\xi}(\xi_{th}) \quad (7)$$

Thus, from (5) and (7) we conclude the following finite product for the estimation of the probability of error for the FSO time diversity scheme over strong turbulence conditions:

$$P_{out}(\xi_{th}) = \prod_{m=1}^M \left[\frac{b_m^{\frac{1+b_m}{2}}}{\Gamma(b_m)} \left(\frac{\xi_{th}}{\mu_m} \right)^{\frac{1+b_m}{4}} G_{1,3}^{2,1} \left(b \sqrt{\frac{\xi_{th}}{\mu_m}} \left| \begin{matrix} 1-b_m \\ 2 \end{matrix} \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. \frac{1-b_m}{2}, \frac{b_m-1}{2}, -\frac{1+b_m}{2} \right) \right] \quad (8)$$

The above expression, i.e. Eq. (8), can be further simplified by taking into account that the FSO link is using time diversity. Thus, in this scheme, as mentioned above, is using only one pair of trans-receiver in each side of the optical link and as a result, the spatial propagation path, for all the copies of the information signal, is the same. Thus, we can assume accurately, that the value of b_m , of Eqs (4) and (5), as well the average electrical SNR, μ_m , remain, practically, invariable for all the M transmitted copies [18], [19]. Hence, in (8) we can assume $b=b_1=b_2=\dots=b_M$ and $\mu=\mu_1=\mu_2=\dots=\mu_M$, as well, [18], [19].

Using the above assumptions the expression of Eq. (8) results to the following closed form mathematical expression for the estimation of FSO system's availability through the estimation of its outage probability for strong atmospheric turbulence channels modeled with the K-distribution:

$$P_{out}(\xi_{th}) = \left[\frac{b^{\frac{1+b}{2}}}{\Gamma(b)} \left(\frac{\xi_{th}}{\mu} \right)^{\frac{1+b}{4}} G_{1,3}^{2,1} \left(b \sqrt{\frac{\xi_{th}}{\mu}} \left| \begin{matrix} 1-b \\ 2 \end{matrix} \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. \frac{1-b}{2}, \frac{b-1}{2}, -\frac{1+b}{2} \right) \right]^M \quad (9)$$

It is important to mention here that the expression (8) can be used for many types of diversity, such as spatial, wavelength, etc, while the expression (9) stands for the time diversity scheme. Additionally, this expression, i.e. Eq. (9), estimates the total probability of outage of an FSO link with time diversity over strong turbulence conditions. It is worth mentioning here that this result, i.e. Eq. (9), generalizes the expression of the outage probability of the single FSO point-to-point link without diversity, obtained in [23].

NUMERICAL RESULTS

Using the mathematical expressions obtained in Eqs (8) and (9), the outage probability estimation of an FSO link with time diversity under strong atmospheric turbulence conditions modelled with the K distribution, is feasible. By studying quantitatively these expressions it is clear that this technique improves the system's availability without need of extra trans-receivers, in each side of the FSO links. On the other hand, due to the finite bandwidth of the channel and the one and only spatial propagation path, the performance of the link is decreasing, as shown in [18], [19], [28]. Thus, in order to design an FSO link with time diversity, in practice, we should choose the correct diversity strength, i.e. the value of M , according to the requirements of each FSO link.

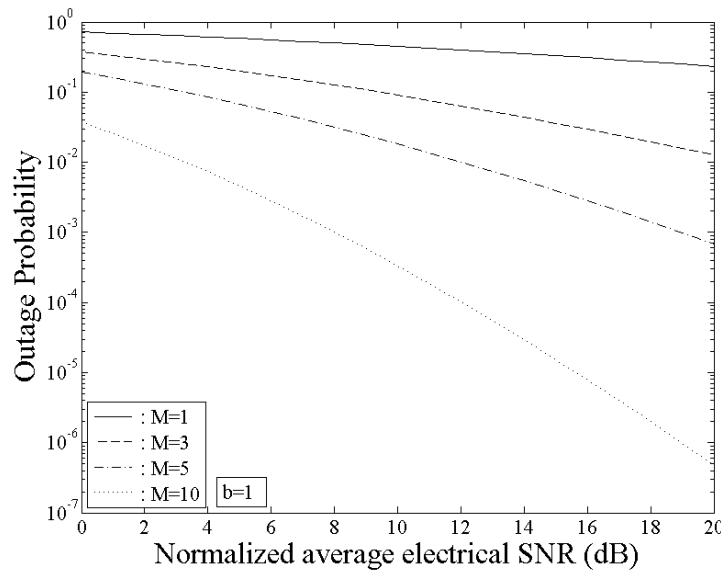


FIGURE 5. Outage probability, P_{out} , of an FSO link with time diversity, modeled with the K-distribution, versus the normalized average electrical SNR, μ/ξ_{th} , with $b=1$ and various values of time diversity parameter M .

In this section, we present the availability results for the FSO links with time diversity, using the extracted mathematical expressions of Eq. (9). The important parameters of the FSO link which are modelled with the K distribution, are the number of repetitions of the information signal, M , the normalized average electrical SNR at the receiver, μ/ξ_{th} , and the parameter b . For the parameter b we choose three values, i.e. 1, 7 and 15, where the smaller values correspond to stronger turbulence conditions. On the other hand, for the time diversity parameter, M , we consider the values 1, which corresponds to an FSO link without diversity, 3, 5 and 10.

In Figure (1) we present the results for the case of very strong turbulence conditions, i.e $b=1$. It is obvious that for the case without diversity, even the smaller value of outage probability, i.e for large value of the normalized average electrical SNR, is giving a very large value which is not acceptable for FSO communication links. Thus, the same link with strong, $M=5$, or stronger, $M=10$, time diversity achieves much better values for this probability metric. It is obvious that for larger values of M , the availability improvement would be better, but, as mentioned above, further increase of M , will result in significant decrease of the effective (practical) bit rate of the system [18], [19], [28].

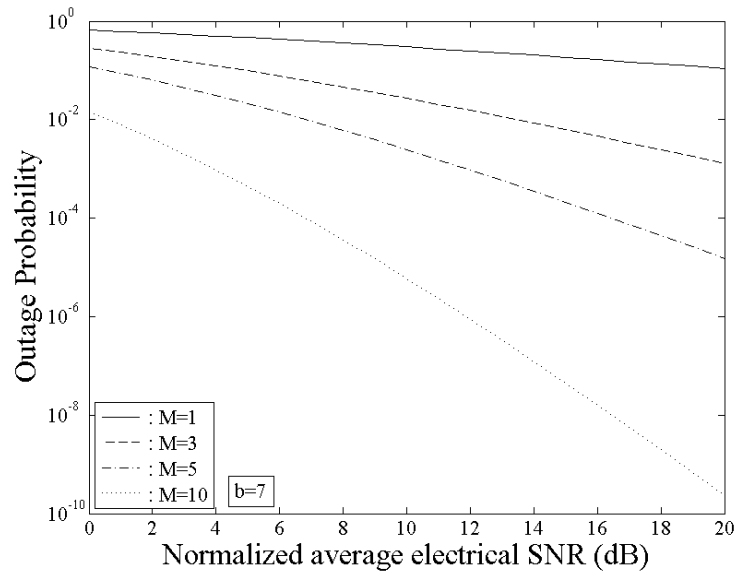


FIGURE 2. Outage probability, P_{out} , of an FSO link with time diversity, modeled with the K-distribution, versus the normalized average electrical SNR, μ/ξ_{th} , with $b=7$ and various values of time diversity parameter M .

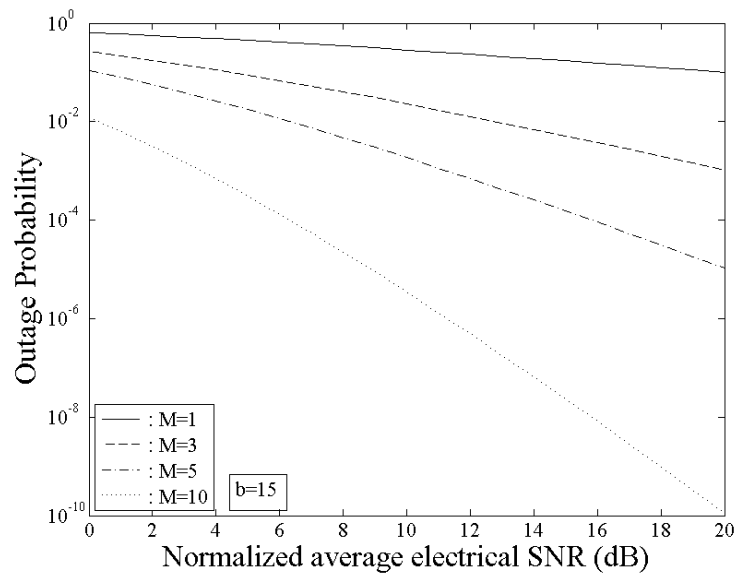


FIGURE 3. Outage probability, P_{out} , of an FSO link with time diversity, modeled with the K-distribution, versus the normalized average electrical SNR, μ/ξ_{th} , with $b=15$ and various values of time diversity parameter M .

The above conclusion, is clear for larger values of b , i.e. for weaker atmospheric turbulence conditions than those of Figure (1). Thus, in Figures (2) and (3) we present the corresponding results for $b=7$ and 15. In both cases, it is obvious that the values of outage probability, without time diversity, i.e. $M=1$, are smaller than those of the previous case with $b=1$, but they are still large and not acceptable for practical FSO links, even for large values of normalized average electrical SNR. This situation is much better when the time diversity scheme is used. As we can

observe in Figures (2) and (3), for time diversity values, $M=5$ and $M=10$, the link can easily achieve very small values of this probability and thus the system can be easily characterized as one with very high availability.

CONCLUSIONS

In this work we investigated an FSO system which is using a time diversity scheme in order to increase its availability against atmospheric turbulence effect. More specifically, we investigate the capabilities of a terrestrial, outdoor, FSO link with time diversity, which is working under strong turbulence conditions modeled with the K-distribution. For this case we extract both, general and more specific, closed form mathematical expressions for the estimation of the link's availability through the estimation of outage probability. We prove that this technique can decrease significantly the system's probability of outage without need of extra trans-receivers in each side of the link. Moreover, in the section with the numerical results, using the above derived mathematical expressions, we show that the achieved improvement of the link's availability characteristics are significant and consequently, the whole system can be described as one with very high availability.

REFERENCES

1. H. Henniger, and O. Wilfert, "An Introduction to Free-Space Optical Communications," *Radioengineering*, vol. 19, iss. 2, pp. 203-212, 2010.
2. Z. Ghassemlooy and W.O. Popoola, "Terrestrial Free-Space Optical Communications", book chapter in "Mobile and Wireless Communications: Network Layer and Circuit Level Design", Salma Ait Fares and Fumiyuki Adachi (Ed.), ISBN: 978-953-307-042-1, InTech, 2010.
3. D. Keddar and S. Arnon, Urban Optical Wireless Communication Networks: the Main Challenges and Possible Solutions, *IEEE Opt. Com.* (2004) S1-S7.
4. S. Arnon, Optical Wireless Communications, *Encycl. Opt. Eng.*, Marcel Dekker Inc. New York, (2003), pp. 1866-1886.
5. A.K. Majumdar, Free-Space Laser Communication Performance in the Atmospheric Channel, *J. Opt. Fiber Commun. Rep.*, 2 (2005) 345-396.
6. L.C. Andrews, R.L. Phillips, C.Y. Hopen, Laser Beam Scintillation with Applications, SPIE Optical Engineering Press, (2001).
7. W.O. Popoola, Z. Ghassemlooy, C.G. Lee and A.C. Boucouvalas, Scintillation Effect on Intensity Modulated Laser Communication Systems - A Laboratory Demonstration, *Optics and Laser Technology*, 42, 4 (2010) 682-692.
8. L.C. Andrews, M.A. Al-Habash, C.Y. Hopen, and R.L. Phillips, Theory of Optical Scintillation: Gaussian Beam Wave Model, *Waves in Random Media*, 11 (2001) 271-291.
9. H.E. Nistazakis, E.A. Karagianni, A.D. Tsigopoulos, M.E. Fafalios, and G.S. Tombras, "Average capacity of optical wireless communication systems over atmospheric turbulence channels", *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, Vol. 27, no. 8, pp. 974-979, (2009).
10. H.E. Nistazakis, T.A. Tsiftsis and G.S. Tombras, Performance Analysis of Free-Space Optical Communication Systems Over Atmospheric Turbulence Channels, *IET Communications*, 3, 8 (2009) 1402-1409.
11. R. Rachmani, and S. Arnon, "Wavelength Diversity in Turbulence Channels for Sensor Networks," *IEEE 26th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel, IEEEI 2010*, art. no. 5661946, pp. 915-918, 2010.
12. A.N. Stassinakis, H.E. Nistazakis, and G.S. Tombras, "Comparative Performance Study of One or Multiple Receivers Schemes for FSO Links Over Gamma Gamma Turbulence Channels", *Taylor & Francis Group, Journal of Modern Optics*, Vol. 59, Iss. 11, pp. 1023-1031, 2012.

13. S.M. Navidpour, M. Uysal, and M. Kavehrad, "BER Performance of Free Space Optical Transmission with Spatial Diversity," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 6, iss. 8, pp. 2813-2819, 2007.
14. E.J. Shin, and V.W.S. Chan, "Optical Communication Over the Turbulent Atmospheric Channel using Spatial Diversity," *Conference Record / IEEE Global Telecommunications Conference*, vol. 3, pp. 2055-2060, 2002.
15. T.A. Tsiftsis, H.G. Sandalidis, G.K. Karagiannidis, and M. Uysal, "Optical Wireless Links with Spatial Diversity Over Strong Atmospheric Turbulence Channels," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 8, iss. 2, art. no. 4786457, pp. 951-957, 2009.
16. Z. Wang, W.-D. Zhong, S. Fu, and C. Lin, "Performance Comparison of Different Modulation Formats Over Free-Space Optical Turbulence Links with Space Diversity Reception Technique," *IEEE Photonics Journal*, vol. 1, iss. 6, pp. 277-285, 2009.
17. F. Xu, A. Khalighi, P. Caussé, and S. Bourennane, "Channel Coding and Time-Diversity for Optical Wireless Links," *Optics Express*, vol. 17, iss. 2, pp. 872-887, 2009.
18. H.E. Nistazakis, "A Time-Diversity Scheme for Wireless Optical Links Over Exponentially Modeled Turbulence Channels", *Elsevier, Optik -International Journal for Light and Electron Optics*, in press.
19. H.E. Nistazakis and G.S. Tombras, "On the use of Wavelength and Time Diversity in Optical Wireless Communication Systems over Gamma-Gamma Turbulence Channels", *Elsevier, Journal of Optics & Laser Technology*, Vol. 44, Iss. 7, pp. 2088-2094, 2012.
20. E. Wainright, H.H. Refai, and J.J. Sluss Jr., "Wavelength Diversity in Free-Space Optics to Alleviate Fog Effects", *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, vol. 5712, art. no. 16, pp. 110-118, 2005.
21. R. Purvinskis, D. Giggenbach, H. Henniger, N. Perlot, and F. David, "Multiple Wavelength Free-Space Laser Communications," *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, vol. 4975, pp. 12-19, 2003.
22. M. Uysal, S.M. Navidpour and J. Li, "Error Rate Performance of Coded Free Space Optical Links Over Strong Turbulence Channels", *IEEE Communications Letters*, Vol. 8, no 10, 2004.
23. H.G. Sandalidis, T.A. Tsiftsis, "Outage probability and ergodic capacity of free-space optical links over strong turbulence", *Electronics Letters*, Vol. 44, no. 1, p.p. 46 – 47, 2008.
24. H.E. Nistazakis, A.D. Tsigopoulos, M.P. Haniyas, C.D. Psychogios, D. Marinos, C. Aidinis, and G.S. Tombras, Estimation of Outage Capacity for Free Space Optical Links Over I-K and K Turbulent Channels, *Radioengineering*, 20, 2 (2011) 493-498.
25. V.S. Adamchik, O.I. and Marichev, "The Algorithm for Calculating Integrals of Hypergeometric Type Function and its Realization in Reduce System," *Proc. International Conference on Symbolic and Algebraic Computation*, pp. 212-224, Tokyo, Japan, 1990.
26. X. Zhu, and J.M. Kahn, Free-Space Optical Communications Through Atmospheric Turbulence Channels, *IEEE Trans. on Commun.*, 50, 8 (2002) 1293-1300.
27. W.O. Popoola, Z. Ghassemlooy and E. Leitgeb, BER and Outage Probability of DPSK Subcarrier Intensity Modulated Free Space Optics in Fully Developed Speckle, *Journal of Communications*, 4, 8 (2009) pp. 546-554.
28. A.D. Tsigopoulos, "Maximum Effective Bit Rate Estimation for Wireless Optical Communication Links with Time-Diversity Over Strong Turbulence Channels", *Nausivios Chora 2012*, submitted.

Maximum Effective Bit Rate Estimation for Wireless Optical Communication Links with Time-Diversity Over Strong Turbulence Channels

Andreas D. Tsigopoulos

*Dept. of Battle Systems, Naval Operations, Sea Studies, Navigation,
Electronics and Telecommunications,
Hellenic Naval Academy, Hadjikyriakou ave, Piraeus 18539, Greece
e-mail: atsigo@snd.edu.gr*

Abstract. The free space optical communication systems exhibit significant research and commercial interest in the last few years due to their capability of achieving optical wireless communications with high and secure data rate transmission and low installation and operational cost, without need of licensing. On the other hand, the unstable conditions of the atmosphere, which is the propagation path of the laser beam that carries the information signal, and especially the atmospheric turbulence effect, affects mainly its intensity and causes random irradiance fluctuations at the receiver's end. This phenomenon causes a significant reduction in the system's availability and performance (BER). In order to overcome this reduction, many methods have been studied, from which the diversity techniques are a very efficient solution. In this work, we investigate a time-diversity scheme for free space optical channels under strong turbulence conditions modeled with the K distribution. We concentrate on the estimation of the maximum effective bit rate of the link, which is limited by the finite capacity of the optical channel, as well as on the multiple transmission of the same part of the information signal in order to achieve much better performance characteristics using the time diversity scheme. Thus, we extract closed form mathematical expressions for the estimation of the maximum effective bit rate, for both, fast and slow, fading statistics. Finally, we present numerical results for many practical cases.

Keywords: K-distribution, Time diversity, Free Space Optical Communication Systems, Atmospheric Turbulence, Maximum Effective Bit Rate, Channel Capacity.

PACS: 42.79.Sz, 92.60.hk.

INTRODUCTION

Free space optical (FSO) communication systems enable the communication between two points with a laser beam using the atmosphere as a channel. This kind of wireless communication has many advantages compared to other methods, such as high speed of data transfer (bit-rate), no need of license to transmit in this band of frequencies, low installation and operation cost. On the other hand, the unstable conditions of the atmosphere and especially the atmospheric turbulence effect, affects the intensity of the laser beam causing random irradiance

fluctuations at the receiver's end. So, the atmosphere is a channel with randomly time varying characteristics [1]-[8].

Thus, it is obvious that the atmospheric turbulence is a mitigation factor for the performance and reliability of the FSO link, due to the induced scintillation effect [4]-[10]. In order to overcome this influence, many techniques have been investigated. The diversity schemes represent one of them [11]-[19]. In this technique, the information signal is sent more than once, using different spatial paths, i.e. spatial diversity, different wavelengths, i.e. wavelength diversity, different polarizations, i.e. polarization diversity, or different time slots, i.e. time diversity [16], [19]. Thus, each copy of the information signal propagates through a channel with different characteristics and obviously the probability of error is decreasing as well as the probability of outage of the FSO system.

In this work, we are studying an FSO communication link over atmospheric turbulence channel by assuming strong turbulence conditions modeled with the K-distribution [20]-[22], with a time diversity scheme. In this configuration, the main advantage is the requirement of one and only trans-receiver pair which is sending the same information signal more than once in different time slots. On the other hand, taking into account that the channel's capacity is finite, this technique reduces the actual effective maximum bit rate of the link. Thus, we present mathematical expressions for the estimation of this limit for both, slow and fast, fading statistics of the wireless connection.

The rest of this work is organized as follows: in Section II, we introduce the considered FSO system and channel model for the time diversity scheme. In Section III, we derive closed-form mathematical expressions for the estimation of the maximum effective bit rate of the FSO link for slow and fast fading statistics, while in Section IV, we present numerical results for the system's reliability and performance for various link's parameters. Final conclusions are presented in Section V.

THE FSO CHANNEL MODEL WITH TIME DIVERSITY

As mentioned above, for the FSO links with time diversity, only a single pair of transmitter and receiver is needed and the information signal is sent more than once using different time slots. Thus, this diversity scheme can be emulated with an FSO communication system which is using one transmitter that transmits M copies of the signal at M different time-slots and one receiver for these M copies. Hence, this operation is equivalent to the combined operation of one transmitter transmitting through M channel/branches and M receivers at the receiving end, similar with the Single Input Multiple Output (SIMO) communication systems [19].

The system's input is binary and the output continuous intensity modulation/direct detection (IM/DD), with On-Off keying (OOK) modulation. Moreover, the channel is characterized as stationary and memoryless with independent and identically distributed intensity (i.i.d) fading statistics, with additive white Gaussian noise (AWGN). In this case, the statistical channel model can be expressed as in [14], [15], [23]:

$$r_m = s_m x + n = \eta x I_m + n, \quad m = 1, \dots, M \quad (10)$$

where y_m is the signal at the receiver for each one of the M copies of the information signal, $s_m = \eta_m I_m$ is the instantaneous intensity gain, η is the effective photo-current conversion ratio of the receiver, I_m is the normalized irradiance arrived in each receiver, x is the modulated signal (taking the binary values "0" or "1"), and n represents the additive white Gaussian noise (AWGN) with zero mean and variance equal to $N_0/2$, [24], [25].

For strong atmospheric turbulence conditions modeled with the K distribution, the probability density function (pdf) of this model is given in [21], as:

$$f_{I_m}(I_m) = \frac{2(a_m)^{\frac{1+a_m}{2}}}{\Gamma(a_m)} I_m^{\frac{a_m-1}{2}} K_{a_m-1}(2\sqrt{a_m I_m}) \quad (11)$$

where $K_\nu(\cdot)$ is the modified Bessel function of the second kind of order ν and $\Gamma(\cdot)$ is the gamma function. In addition, a_m represents a parameter that is generally associated with the number of scatterers forming the random component of the optical field [20]-[22]. By integrating (2), we conclude the corresponding cumulative distribution function (cdf), which has the following expression [21]:

$$F_{I_m}(I_m) = \frac{(a_m I_m)^{\frac{1+a_m}{2}}}{\Gamma(a_m)} G_{1,3}^{2,1} \left(b_m I_m \left| \begin{array}{c} 1-a_m \\ 2 \\ \frac{1-a_m}{2}, \frac{a_m-1}{2}, -\frac{1+a_m}{2} \end{array} \right. \right) \quad (12)$$

Next, we define the instantaneous electrical signal-to-noise ratio (SNR) as $\xi_m = (\eta I_m)^2 / N_0 = s_m^2 / N_0$, [25], and the average electrical SNR as $\mu_m = (\eta E[I_m])^2 / N_0$, [25], [26], with $E[\cdot]$ being the expected value of the normalized irradiance of the m th copy of the information signal I_m . Thus, the pdf and the cdf of ξ_m , for the K distribution, are given as [21]:

$$f_{\xi_m}(\xi_m) = \frac{(a_m)^{\frac{1+a_m}{2}}}{\Gamma(a_m)} \frac{\xi_m^{\frac{1+a_m-1}{4}}}{\mu_m^{\frac{1+a_m}{4}}} K_{a_m-1} \left(\sqrt[4]{\frac{16a_m^2 \xi_m}{\mu_m}} \right) \quad (13)$$

and

$$F_{\xi_m}(\xi_m) = \frac{(a_m)^{\frac{1+a_m}{2}}}{\Gamma(a_m)} \left(\frac{\xi_m}{\mu_m} \right)^{\frac{1+a_m}{4}} G_{1,3}^{2,1} \left(\sqrt[4]{\frac{a_m^2 \xi_m}{\mu_m}} \left| \begin{array}{c} 1-a_m \\ 2 \\ \frac{1-a_m}{2}, \frac{a_m-1}{2}, -\frac{1+a_m}{2} \end{array} \right. \right) \quad (14)$$

where $G_{p,q}^{m,n}[\cdot]$ is the Meijer G-function, [27].

For a time diversity scheme, due to the fact that we use one pair of transmitter and receiver and consequently the spatial propagation path is the same, we can assume that the value of a_m , of Eqs (4) and (5), as well the average electrical SNR, μ_m , remain invariable for all the M copies of the transmitted signal [19]. Hence, the pdf and the cdf for ξ_m , is obtained from (4) and (5) by assuming that $a=a_1=a_2=\dots=a_M$ and $\mu=\mu_1=\mu_2=\dots=\mu_M$, [19] and we have the following mathematical forms, [21]:

$$f_{\xi_m}(\xi_m) = \frac{a^{\frac{1+a}{2}} \xi_m^{\frac{a-3}{4}}}{\Gamma(a) \mu^{\frac{1+a}{4}}} K_{a-1} \left(\sqrt[4]{\frac{16a^2 \xi_m}{\mu}} \right) \quad (15)$$

and

$$F_{\xi_m}(\xi_m) = \frac{a^{\frac{1+a}{2}}}{\Gamma(a)} \left(\frac{\xi_m}{\mu} \right)^{\frac{1+a_m}{4}} G_{1,3}^{2,1} \left(\sqrt{\frac{a^2 \xi_m}{\mu}} \left| \begin{matrix} 1-a \\ 2 \end{matrix} \right. \begin{matrix} 1-a \\ 2, \frac{a-1}{2}, -\frac{1+a}{2} \end{matrix} \right) \quad (16)$$

MAXIMUM EFFECTIVE BIT RATE OF THE LINK WITH TIME DIVERSITY

It is well known that the time diversity schemes decrease the outage probability of the FSO links, as well as their probability of error, and as a result, increase their availability, reliability and performance [16], [19]. On the other hand, due to the fact that the time diversity schemes are using one trans-receiver pair and the capacity of the channel is finite, the main disadvantage of this technique is that the multiple transmissions of the same parts of the information signal, decrease the maximum practical rate of data transmission. In this section, we will use significant mathematical expressions for FSO links without diversity, in order to investigate the maximum effective bit rate of the link with time diversity, R' . Obviously, this quantity is lower than the maximum bit rate of the link, R , due to the fact that it represents the practical rate of bit transmission, taking into account that with this technique, the same bit, occupies the trans-receiver M different time slots. The maximum bit rate, R , that can be transmitted through a single channel with fast fading statistics is determined by its average capacity, C_{av} , [19], [28]-[31], which represents the practically achievable error-free bit-rate transmission. While, for the case of slow fading statistics [19], [22], [32], [33], the value of R is estimated by its outage capacity, C_{out} , which stands for a metric that equals to the guaranteed capacity for channel realizations with a probability of $(1-r)$, i.e. $\Pr[C < C_{out}] = r$, [19], [22], [32], [33]. Thus, taking into account that the time diversity scheme uses only one FSO channel, the average (outage) channel capacity of the whole scheme, coincides with R for the case of fast (slow) fading statistics [19].

Hence, we can derive a new mathematical expression for R , using the expressions obtained in [21], [22]. Thus, for M copies of the same bits of the information signal, the maximum effective bit rate of the time diversity FSO link, could be defined as [12], [19]:

$$R' = \frac{R}{M} \equiv \frac{C}{M} \quad (17)$$

where C equals either to C_{av} or to C_{out} , according to the channel's fading statistics. Thus, by substituting in Eq. (8) the results obtained in Refs [21] and [22] for average and outage channel's capacity, respectively, we conclude to the following closed form mathematical expressions for the estimation of the maximum effective bit rate, R'_{av} and R'_{out} , that are derived for both types of fading statistics, respectively:

$$R'_{av} = \frac{a^{\frac{1+a}{2}} B}{4\pi M \ln(2) \Gamma(a) \mu^{\frac{\alpha+1}{4}}} G_{2,6}^{6,1} \left(a^2 \left| \begin{array}{c} \frac{1+a}{4}, \frac{3-a}{4} \\ \frac{a-1}{2}, \frac{a+1}{4}, \frac{1-a}{4}, \frac{3-a}{4}, -\frac{1+a}{4}, -\frac{1+a}{4} \end{array} \right. \right) \quad (18)$$

and

$$r = \frac{(2^{MR'_{out}/B} - 1)^{\frac{\alpha+1}{4}}}{(\sqrt{\mu}/\alpha)^{\frac{\alpha+1}{4}} \Gamma(a)} G_{1,3}^{2,1} \left(a \sqrt{\frac{2^{MR'_{out}/B} - 1}{\mu}} \left| \begin{array}{c} \frac{1-a}{2} \\ \frac{1-a}{2}, \frac{a-1}{2}, -\frac{1+a}{2} \end{array} \right. \right) \quad (19)$$

with B being the channel's bandwidth, while the quantity $(1-r)$ represents the probability of channel realizations where the capacity, C_{out} , is guaranteed.

NUMERICAL RESULTS

Using the expressions (9) and (10), we are able to present the maximum effective bit rate and the outage capacity as a function of the average electrical SNR, for the FSO link that uses time diversity scheme, for different parameter values. More specifically, we have the case without time diversity, $M=1$ and two cases with diversity, i.e. $M=3$ and $M=5$, for two values of parameter α , i.e. 1 and 3.

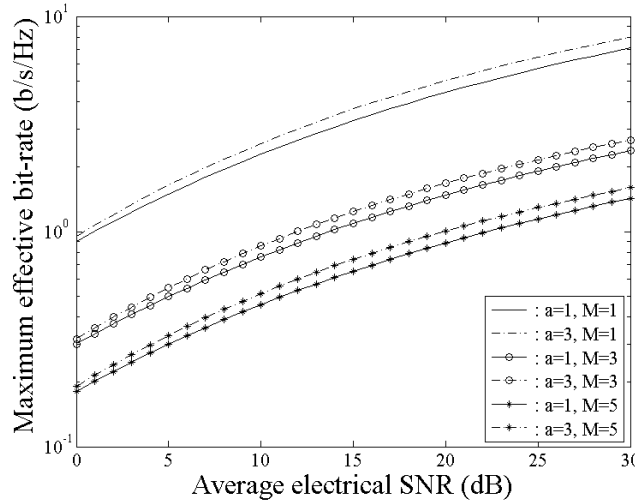


FIGURE 1. Normalized maximum effective bit rate, R_{av}/B , of an FSO link with time diversity versus the average electrical SNR, μ , for various values of M and α .

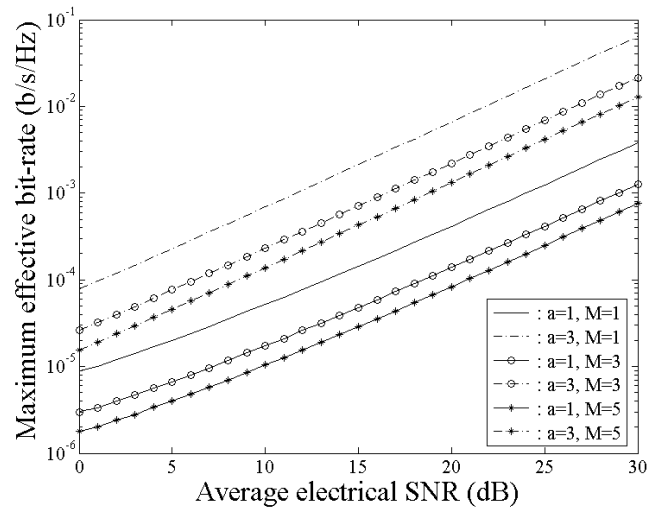


FIGURE 2. Maximum effective bit rate, R_{out}/B , of an FSO link with time diversity versus the average electrical SNR, μ , for various values of M and α .

In Fig. (1), we present the results for the maximum effective bit rate. We can see that as the parameter α increases, the bit-rate of the channel increases too, as it was expected. Moreover, in Fig. (1) it is clear that the use of time diversity technique decreases the maximum effective bit rate of the channel of the FSO link. This result in the time diversity scheme is due to the fact that the same information signal must be sent multiple times at different time slots.

In Fig. (2), we present the corresponding results for the maximum effective bit – rate, obtained from the outage capacity with $r=0.01$ (i.e. percentage rate 1%) which is a typical value in order to estimate the outage capacity.

CONCLUSIONS

In this work we estimated the maximum effective bit rate that an FSO communication link with time diversity, can achieve, under strong atmospheric turbulence conditions, modeled with the K distribution. This bit rate represents the practical maximum bit rate that such a system can attain due the fact that these systems are using one and only trans-receiver pair and the channel's capacity is finite. We derive closed form mathematical expressions for the estimation of this metric for both cases of fading statistics, i.e. fast and slow. Through the obtained expressions, we presented various numerical results for the maximum effective bit rate, for different values of SNR arriving at the receiver and the time diversity parameter. These results clearly demonstrate that although time diversity techniques, achieve improved availability and performance (BER) of an FSO link, they lead to a decrease of the maximum bit rate.

REFERENCES

1. D. Keddar, and S. Arnon, "Urban Optical Wireless Communication Networks: the Main Challenges and Possible Solutions," *IEEE Opt. Com.*, pp. S1-S7, 2004.
2. S. Arnon, "Optical Wireless Communications," *Encycl. Opt. Eng.*, Marcel Dekker Inc. New York, pp. 1866-1886, 2003.

3. H. Henniger, and O. Wilfert, "An Introduction to Free-Space Optical Communications," *Radioengineering*, vol. 19, iss. 2, pp. 203-212, 2010.
4. A.K. Majumdar, "Free-Space Laser Communication Performance in the Atmospheric Channel," *J. Opt. Fiber Commun. Rep.*, vol. 2, pp. 345-396, 2005.
5. W.O. Popoola, and Z. Ghassemlooy, "BPSK Subcarrier Intensity Modulated Free-Space Optical Communications in Atmospheric Turbulence," *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, iss. 5-8, pp. 967-973, 2009.
6. L.C. Andrews, R.L. Phillips, C.Y. Hopen, *Laser Beam Scintillation with Applications*, SPIE Optical Engineering Press, (2001).
7. L.C. Andrews, M.A. Al-Habash, C.Y. Hopen, and R.L. Phillips, *Theory of Optical Scintillation: Gaussian Beam Wave Model*, *Waves in Random Media*, 11 (2001) 271-291.
8. Z. Ghassemlooy and W.O. Popoola, "Terrestrial Free-Space Optical Communications", book chapter in "Mobile and Wireless Communications: Network Layer and Circuit Level Design", Salma Ait Fares and Fumiyuki Adachi (Ed.), ISBN: 978-953-307-042-1, InTech, 2010.
9. M.H. Mahdieh and M. Pournoury, *Atmospheric Turbulence and Numerical Evaluation of Bit Error Rate (BER) in Free-Space Communication*, *Optics and Laser Technology*, 42, 1 (2010) 55-60.
10. W.O. Popoola, Z. Ghassemlooy, C.G. Lee and A.C. Boucouvalas, "Scintillation effect on intensity modulated laser communication systems - a laboratory demonstration", *Optics & Laser Technology*, vol. 42, pp. 682-692, 2010.
11. R. Rachmani, and S. Arnon, "Wavelength Diversity in Turbulence Channels for Sensor Networks," *IEEE 26th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel, IEEEI 2010*, art. no. 5661946, pp. 915-918, 2010.
12. H.E. Nistazakis and G.S. Tombras, "On the use of Wavelength and Time Diversity in Optical Wireless Communication Systems over Gamma-Gamma Turbulence Channels", *Elsevier, Journal of Optics & Laser Technology*, Vol. 44, Iss. 7, pp. 2088-2094, 2012.
13. S.M. Navidpour, M. Uysal, and M. Kavehrad, "BER Performance of Free Space Optical Transmission with Spatial Diversity," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 6, iss. 8, pp. 2813-2819, 2007.
14. T.A. Tsiftsis, H.G. Sandalidis, G.K. Karagiannidis, and M. Uysal, "Optical Wireless Links with Spatial Diversity Over Strong Atmospheric Turbulence Channels," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 8, iss. 2, art. no. 4786457, pp. 951-957, 2009.
15. A.N. Stassinakis, H.E. Nistazakis, and G.S. Tombras, "Comparative Performance Study of One or Multiple Receivers Schemes for FSO Links Over Gamma Gamma Turbulence Channels", *Taylor & Francis Group, Journal of Modern Optics*, Vol. 59, Iss. 11, pp. 1023-1031, 2012.
16. F. Xu, A. Khalighi, P. Caussé, and S. Bourennane, "Channel Coding and Time-Diversity for Optical Wireless Links," *Optics Express*, vol. 17, iss. 2, pp. 872-887, 2009.
17. E. Wainright, H.H. Refai, and J.J. Sluss Jr., "Wavelength Diversity in Free-Space Optics to Alleviate Fog Effects", *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, vol. 5712, art. no. 16, pp. 110-118, 2005.
18. E.J. Shin, V.W.S. Chan, *Optical Communication Over the Turbulent Atmospheric Channel using Spatial Diversity*, *Conference Record / IEEE Global Telecommunications Conference 3*, (2002) 2055-2060.
19. H.E. Nistazakis, "A Time-Diversity Scheme for Wireless Optical Links Over Exponentially Modeled Turbulence Channels", *Elsevier, Optik -International Journal for Light and Electron Optics*, in press.
20. M. Uysal, S.M. Navidpour and J. Li, "Error Rate Performance of Coded Free Space Optical Links Over Strong Turbulence Channels", *IEEE Communications Letters*, Vol. 8, no 10, 2004.
21. H.G. Sandalidis, T.A. Tsiftsis, "Outage probability and ergodic capacity of free-space optical links over strong turbulence", *Electronics Letters*, Vol. 44, no. 1, p.p. 46 - 47, 2008.
22. H.E. Nistazakis, A.D. Tsigopoulos, M.P. Haniyas, C.D. Psychogios, D. Marinos, C. Aidinis, and G.S. Tombras, *Estimation of Outage Capacity for Free Space Optical Links Over I-K and K Turbulent Channels*, *Radioengineering*, 20, 2 (2011) 493-498.
23. R. Purvinskis, D. Giggenbach, H. Henniger, N. Perlot, and F. David, "Multiple Wavelength Free-Space Laser Communications," *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, vol. 4975, pp. 12-19, 2003.
24. H.E. Nistazakis, V.D. Assimakopoulos, and G.S. Tombras, "Performance Estimation of Free Space Optical Links Over Negative Exponential Atmospheric Turbulence Channels," *Elsevier OPTIK*, vol. 122, pp. 2191-2194, 2011.

25. A. Katsis, H.E. Nistazakis, and G.S. Tombras, "Bayesian and frequentist estimation of the performance of free space optical channels under weak turbulence conditions", *Journal of the Franklin Institute*, vol. 346, pp. 315-327, 2009.
26. X. Zhu, and J.M. Kahn, "Free-Space Optical Communications Through Atmospheric Turbulence Channels," *IEEE Trans. on Communications*, vol. 50, iss. 8, pp.1293-1300, 2002.
27. V.S. Adamchik, O.I. and Marichev, "The Algorithm for Calculating Integrals of Hypergeometric Type Function and its Realization in Reduce System," *Proc. International Conference on Symbolic and Algebraic Computation*, pp. 212-224, Tokyo, Japan, 1990.
28. H.E. Nistazakis, E.A. Karagianni, A.D. Tsigopoulos, M.E. Fafalios, and G.S. Tombras, "Average capacity of optical wireless communication systems over atmospheric turbulence channels", *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, Vol. 27, no. 8, pp. 974-979, (2009).
29. H.E. Nistazakis, G.S. Tombras, A.D. Tsigopoulos, E.A. Karagianni, and M.E. Fafalios, "Capacity estimation of optical wireless communication systems over moderate to strong turbulence channels", *Journal of Communications and Networks*, Vol. 11, Iss. 4, pp. 387-392, (2009).
30. F. Lazarakis, G.S. Tombras, and K. Dangakis, Average Channel Capacity in a Mobile Radio Environment with Rician Statistics, *IEICE Trans. Commun.*, E77-B, 7 (1994) 971-977.
31. C. Liu, Y. Yao, Y.X. Sun, J.J. Xiao and X.H. Zhao, Average Capacity Optimization in Free-Space Optical Communication System Over Atmospheric Turbulence Channels with Pointing Errors, *Optics Letters*, 35, 19 (2010) 3171-3173.
32. S. Furrer, P. Coronel and D. Dahlhaus, Simple Ergodic and Outage Capacity Expressions for Correlated Diversity Ricean Fading Channels, *IEEE Transaction on Wireless Communications*, 5, 7 (2006) 1606-1609.
33. A. Belmonte and J.M. Kahn, Capacity of coherent free-space optical links using atmospheric compensation techniques, *Optics Express*, 17, 4 (2009) 2763-2773.
34. A.N. Stassinakis, G.G. Chronopoulos and H.E. Nistazakis, " Availability Investigation of Free Space Optical Links with Time Diversity for Turbulence Channels Modeled with the K-Distribution ", Nausivios Chora 2012, submitted.

Σύγκριση Απλοποιημένης Μεθόδου Πραγματικής Συχνότητας με Μεθόδους Κατανεμημένης Ενίσχυσης στη Σχεδίαση Ενισχυτή Χαμηλού Θορύβου για Εφαρμογές Ευρείας Ζώνης 3.1-10.6 GHz

Νικόλαος Χατζηαθανασίου^α και Ευαγγελία Καραγιάννη^β

^αΕθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών, Τομέας Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών

^βΣχολή Ναυτικών Δοκίμων, Τομέας Συστημάτων Μάχης, Ναυτικών Επιχειρήσεων, Θαλασσίων Επιστημών, Ναυτιλίας, Ηλεκτρονικών και Τηλεπικοινωνιών

Abstract. A Simplified Real Frequency Technique (SRFT) is being implemented with MATLAB in order to design a Low Noise Amplifier (LNA) for UWB (Ultra Wide Band) applications, working in the 3.1-10.6 GHz frequency zone. Additionally two other designs are being examined based on the distributed amplification method, in order to compare the techniques and highlight the advantages of the new SRFT technique.

Keywords: Low Noise Amplifier, Ultra-Wide Band, Simplified Real Frequency Technique, Distributed Systems, Microwave Integrated Circuits, Design, Optimization.

PACS: 85.40.Qx, 84.30.Le, 06.20.fb, 06.30.Ft, 84.40.Xb, 84.30.Vn, 84.40.Dc, 89.20.Ff, 02.50.Ng

ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ ULTRA WIDE BAND

Ο ενισχυτής που σχεδιάζεται στην παρούσα εργασία προορίζεται για συσκευές που υποστηρίζουν την τεχνολογία Ευρείας Ζώνης Ultra-Wide Band (UWB). Πρόκειται για μια ασύρματη τεχνολογία που έχει σαν στόχο να υποστηρίζει υπηρεσίες μεταφοράς δεδομένων σε πάρα πολύ υψηλούς ρυθμούς. Γι' αυτό και το διατιθέμενο φάσμα συχνοτήτων είναι πολύ μεγάλο.

Σύμφωνα με την Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής (FCC) το UWB αναφέρεται σε κάθε τεχνολογία με εύρος ζώνης που είτε υπερβαίνει τα 500 MHz ή το 20% της κεντρικής συχνότητας λειτουργίας. Το Φεβρουάριο 2002 η FCC κατοχυρώνει για την τεχνολογία UWB το διάστημα συχνοτήτων 3.1 -10.6 GHz και το Νοέμβριο 2005 η Ένωση Εθνικών Τηλεπικοινωνιών Αμερικής (ITU) εκδίδει έκθεση συστάσεων γι' αυτήν την τεχνολογία. Η FCC όρισε ως μέγιστο όριο εκπομπής ισχύος από τους πομπούς UWB την τιμή -41.3 dBm/MHz [1]. Πρόκειται για πολύ χαμηλή τιμή που είναι της τάξης του θορύβου που προκαλούν διάφορες οικιακές συσκευές.

Το UWB εμφανίζεται σε δύο εκδοχές [2]: Το παλμικό (pulsed UWB) και το UWB με χρήση OFDM (Ορθογωνική Πολύπλεξη με Διάρθρωση Συχνότητας) ή άλλες συναφείς τεχνολογίες παράλληλων φερόντων. Η πρώτη εκδοχή είναι η πλέον διαδεδομένη. Εδώ, το εκπεμπόμενο σήμα αποτελείται από πολύ στενούς παλμούς. Μερικά ελκυστικά χαρακτηριστικά του pulsed

UWB είναι τα εξής: Ανοχή σε φαινόμενα multipath, διότι η διάρκεια του παλμού UWB είναι πολύ μικρότερη από την εξαπλώση χρονοκαθυστέρησης. Αυτό σημαίνει ότι τα αντίγραφα του σήματος λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης θα φτάσουν στο δέκτη πολύ μετά την άφιξη του κανονικού σήματος [3]. Όμως, ακριβώς γι' αυτό το λόγο, θα υπάρξουν προβλήματα διασυμβολικής παρεμβολής. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ότι στην περίπτωση των παραδοσιακών τεχνικών μετάδοσης, απαιτούνται τοπικοί ταλαντωτές και μίκτες για τη διαμόρφωση του φέροντος για την εκπομπή και για την αποδιαμόρφωση στη λήψη, κάτι που δε συμβαίνει στο UWB. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα πολύ υψηλού ρυθμού μετάδοσης και τέλος λόγω της χαμηλής ισχύος εκπομπής, δεν απαιτείται ενισχυτής ισχύος για τη μετάδοση όπως συμβαίνει με άλλες τεχνικές μετάδοσης.

Γενικά, πρόκειται για τεχνολογία που προορίζεται για επικοινωνίες και προσωπικά δίκτυα κλειστού χώρου. Χαρακτηριστική εφαρμογή της τεχνολογίας αυτής είναι η ασύρματη μεταφορά δεδομένων Video μεταξύ συσκευών που υποστηρίζουν το εν λόγω πρότυπο. Άλλες εφαρμογές του UWB είναι η απεικόνιση μέσω ραντάρ, συλλογή δεδομένων από αισθητήρες, εφαρμογές εντοπισμού και παρακολούθησης ακριβείας κ.α.

ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΗΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ

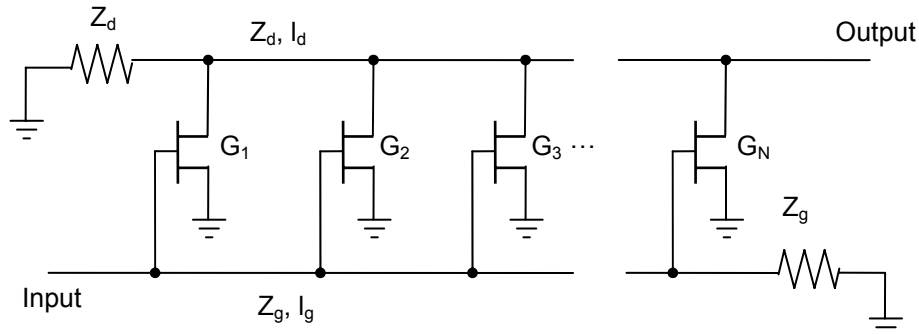
Στους συμβατικούς ενισχυτές που βασίζονται σε τρανζίστορ (αλλά και παλιότερα στους ενισχυτές λυχνιών κενού) υπάρχει ένας εγγενής περιορισμός στο γινόμενο κέρδος επί εύρος συχνοτήτων που μπορεί να επιτευχθεί. Αυτό σημαίνει ότι δεν μπορεί κανείς να σχεδιάσει ένα ενισχυτή που να λειτουργεί και σε πολύ υψηλές συχνότητες και σε πολύ υψηλό κέρδος. Έτσι κάνουμε πάντοτε ένα συμβιβασμό στις απαιτήσεις μας. Ανάλογα με την εφαρμογή μπορούμε να σχεδιάσουμε ένα ενισχυτή μεγάλου κέρδους σε σχετικά μικρό εύρος ζώνης ή ένα ενισχυτή που επιτυγχάνει μέτριο κέρδος σε μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων. Ο εγγενής αυτός περιορισμός έγκειται στις παρασιτικές χωρητικότητες που έχουν τα τρανζίστορ στην είσοδο και την έξοδο τους [4]. Έτσι αν βάλουμε στη σειρά δύο ενισχυτικές βαθμίδες, με τη δεύτερη να ενισχύει το σήμα από την έξοδο της πρώτης, τότε φυσικά το κέρδος θα αυξηθεί στις χαμηλές συχνότητες, αλλά θα μειώνεται στις υψηλές λόγω της συνολικής αυξημένης χωρητικότητας.

Ο παραπάνω περιορισμός αίρεται με την εφαρμογή της κατανεμημένης ενίσχυσης. Στους κατανεμημένους ενισχυτές οι χωρητικότητες εισόδου και εξόδου που περιορίζουν το εύρος ζώνης των τρανζίστορ, απορροφούνται σε γραμμές μεταφοράς που συνδέουν τα τρανζίστορ μεταξύ τους. Η γραμμή μεταφοράς (ιδανική) δεν παραμορφώνει με κανένα τρόπο ένα σήμα και έχει απεριόριστο εύρος ζώνης. Μία όψη αυτού είναι το γεγονός ότι η αντίσταση Z που παρουσιάζει η γραμμή (η χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής) έχει μία σταθερή (θετική) τιμή σε όλες τις συχνότητες. Επομένως σύμφωνα με τη σχέση

$$A_V(f) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = g \cdot Z(f) \quad (1)$$

όπου g η διαγωγιμότητα ($I_{out} = g \cdot V_{in}$), το κέρδος του ενισχυτή είναι επίσης σταθερό με τη συχνότητα. Τώρα η σχέση (1) μας λέει ότι μπορούμε να αυξήσουμε το κέρδος του ενισχυτή αν αυξήσουμε το g . Αυτό μπορεί να γίνει για παράδειγμα αν οδηγήσουμε το σήμα εισόδου σε πολλά ίδια τρανζίστορ και μετά "συλλέξουμε" το ρεύμα που δίνει το καθένα και το οδηγήσουμε στο φορτίο μας. Με αυτόν τον τρόπο η ισοδύναμη διαγωγιμότητα του ενισχυτή πολλαπλασιάζεται κατά το πλήθος των τρανζίστορ. Αυτή η οδήγηση του σήματος εισόδου στα τρανζίστορ, καθώς και η οδήγηση του ρεύματος εξόδου των στο φορτίο γίνονται με τη χρήση των γραμμών μεταφοράς που απορροφούν τις χωρητικότητες των τρανζίστορ. Το τίμημα που πληρώνει κανείς για την επέκταση της λειτουργίας του ενισχυτή σε μεγάλες συχνότητες είναι η χρονική καθυστέρηση που υφίσταται το σήμα εξόδου κατά τη διέλευσή του από την γραμμή

μεταφοράς μέχρι να φθάσει στο φορτίο. Σε εφαρμογές που αυτή η καθυστέρηση δεν διαδραματίζει σπουδαίο ρόλο, η χρησιμοποίηση του κατανεμημένου ενισχυτή είναι εφικτή. Το κυκλωματικό διάγραμμα ενός κατανεμημένου ενισχυτή φαίνεται παρακάτω.



ΣΧΗΜΑ 6. Κατανεμημένος Ενισχυτής

Βλέπουμε ότι υπάρχουν δύο γραμμές μεταφοράς. Η μία από αυτές χρησιμοποιείται για να μεταφέρει το σήμα προς ενίσχυση στον ακροδέκτη της πύλης Gate των τρανζίστορ και η δεύτερη παραλαμβάνει το ενισχυμένο από κάθε τρανζίστορ σήμα στον ακροδέκτη εξόδου Drain και το οδηγεί προς το φορτίο. Από τις ονομασίες των δύο αυτών ακροδεκτών η γραμμή εισόδου ονομάζεται Gate line και η γραμμή εξόδου Drain line. Η Gate line έχει χαρακτηριστική αντίσταση Z_g και η Drain line Z_d .

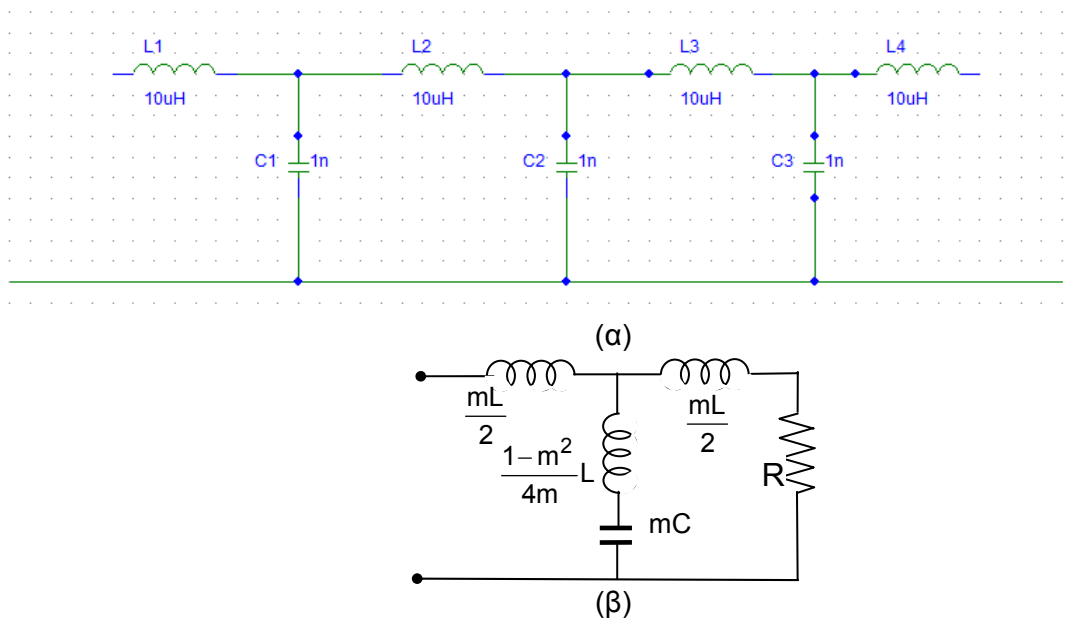
Η ενίσχυση έγκειται στο μηχανισμό λειτουργίας του τρανζίστορ και μοντελοποιείται ως μία πηγή ρεύματος εξαρτώμενη από την τάση εισόδου. Το ρεύμα που δίνει το κάθε τρανζίστορ προστίθεται με το ρεύμα των υπολοίπων με αποτέλεσμα να έχουμε στο φορτίο μεγάλο ρεύμα. Στην ουσία πρόκειται για μία διάταξη παράλληλων μονοπατιών ρεύματος, τα οποία συναντούνται για να δώσουν το επιθυμητό μεγάλο ρεύμα στην έξοδο. Προκειμένου τα ρεύματα αυτά να προστίθεται εν φάση θα πρέπει το χρονικό διάστημα που απαιτείται για να διανύσει το σήμα την απόσταση ανάμεσα σε δύο τρανζίστορ στις δύο γραμμές μεταφοράς να είναι το ίδιο. Αυτό επιτυγχάνεται με κατάλληλη επιλογή των μηκών l_g , l_d και των παραγόντων διάδοσης φάσης (phase propagation factor) β_g , β_d στις δύο γραμμές μεταφοράς, ώστε να ισχύει $\beta_g \cdot l_g = \beta_d \cdot l_d$. Τερματίζουμε τις δύο γραμμές μεταφοράς στο ένα άκρο τους με αντιστάσεις ίσες με την χαρακτηριστική αντίσταση των δύο γραμμών, προκειμένου να μην έχουμε ανακλάσεις. Επίσης τερματίζουμε τη γραμμή εξόδου με ένα φορτίο που έχει αντίσταση ίση με τη χαρακτηριστική αντίσταση Z_d της γραμμής για να έχουμε μέγιστη μεταφορά ισχύος. Από την παραπάνω περιγραφή συμπεραίνουμε ότι το κέρδος ενίσχυσης είναι ανάλογο με το πλήθος των τρανζίστορ. Σε ένα κατανεμημένο ενισχυτή με N το πλήθος τρανζίστορ που έχουν διαγωγιμότητα g_m , το

κέρδος τάσης A_v στο φορτίο Z_d είναι $A_v = \frac{N \cdot g_m \cdot Z_d}{2}$. Ο παράγοντας $\frac{1}{2}$ οφείλεται στο γεγονός

ότι το ρεύμα στη θύρα εξόδου σε κάθε τρανζίστορ έχει δύο συνιστώσες. Η μία κατευθύνεται προς το φορτίο και η άλλη απορροφάται χωρίς ανακλάσεις στην άλλη άκρη της γραμμής εξόδου. Η παραπάνω σχέση μας δείχνει ότι μπορούμε να μεγαλώνουμε το κέρδος απεριόριστα με τη χρησιμοποίηση ολοένα και περισσότερων τρανζίστορ. Επίσης από την ανάλυση αυτή προκύπτει ότι κέρδος είναι ομοιόμορφο.

Αντί των γραμμών μεταφοράς που στην επίπεδη (planar) τεχνολογία είναι συνήθως μικροταινίες μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε και τεχνητές γραμμές μεταφοράς αποτελούμενες από συγκεντρωμένα (lumped) στοιχεία, όπως πυκνωτές και πηνία. Αυτό γινόταν σε περασμένες δεκαετίες όταν οι δυνατότητες της επίπεδης τεχνολογίας ήταν περιορισμένες και δεν μας επέτρεπαν να έχουμε κυκλώματα με τα ενεργά στοιχεία (τρανζίστορ) αλλά και τα παθητικά (γραμμές μεταφοράς, πηνία, πυκνωτές) ολοκληρωμένα πάνω στο ίδιο υπόστρωμα. Μία

τεχνητή γραμμή μεταφοράς για τη gate line και τη drain line μπορεί να έχει τη μορφή του σχήματος 2.



ΣΧΗΜΑ 2. (α) Τεχνητή γραμμή μεταφοράς (β) m -παραγώμενο φίλτρο (m -derived filter) ως τερματισμός της γραμμής

Μία παραλλαγή του κατανεμημένου ενισχυτή είναι ο ενισχυτής μήτρας (matrix amplifier) στον οποίο χρησιμοποιούνται περισσότερα του ενός τρανζίστορ ανά βαθμίδα ώστε κάθε βαθμίδα να δίνει μεγαλύτερο κέρδος ή να έχει καλύτερη συμπεριφορά στις υψηλότερες συχνότητες. Έτσι για παράδειγμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν ενισχυτικό κύτταρο η σειριακή τοπολογία (cascade) [5].

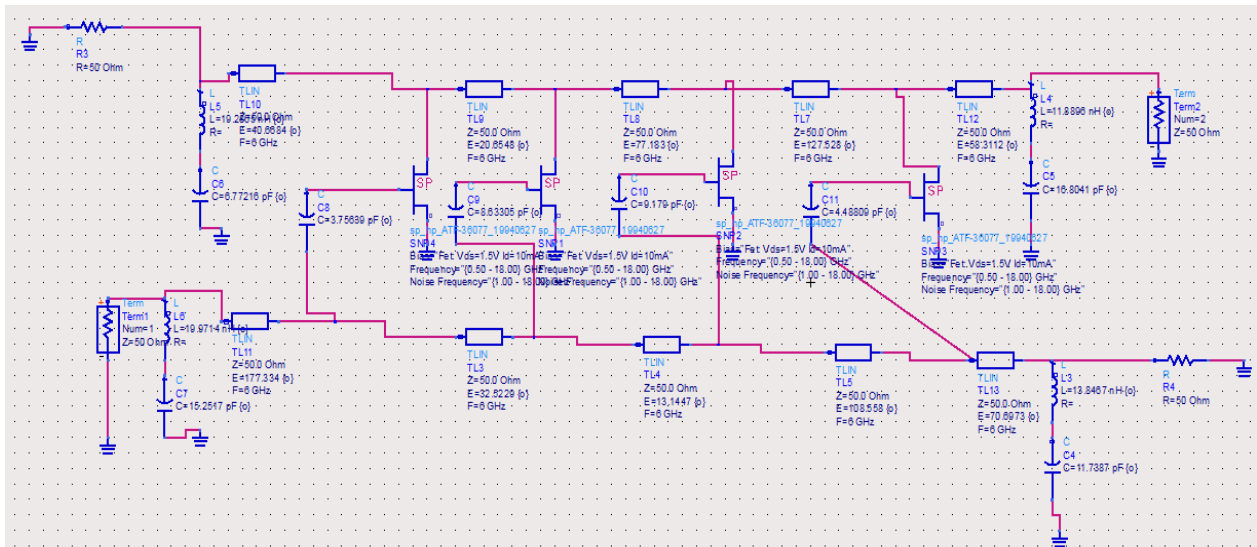
Μία συνήθης τακτική για την αύξηση του εύρους ζώνης του κατανεμημένου ενισχυτή μέσω της μείωσης της ανά μέτρο χωρητικότητας της γραμμής μεταφοράς στην πύλη και την αύξηση της ισχύος εξόδου, είναι η σύνδεση ενός πυκνωτή κατάλληλης χωρητικότητας $q \cdot C_{gs}$ στην πύλη των τρανζίστορ [6], [7], [8], [9].

Όσον αφορά την επίδοση των κατανεμημένων ενισχυτών ως προς το θόρυβο, στο [10] περιγράφεται το γεγονός ότι για σχετικά μεγάλο αριθμό τρανζίστορ η εικόνα θορύβου μειώνεται. Στον θόρυβο των κατανεμημένων ενισχυτών συμβάλλουν οι αντιστάσεις τερματισμού και ο εσωτερικός θόρυβος των FETs.

1^η Σχεδίαση: Κατανεμημένος Ενισχυτής Χαμηλού Θορύβου

Το τρανζίστορ που χρησιμοποιήσαμε για τον κατανεμημένο ενισχυτή είναι το PHEMT ATF-36077 από την AVAGO TECHNOLOGIES. Είναι ένα ψευδομορφικό High Electron Mobility Transistor που βασίζεται σε GaAs και λειτουργεί με εξαιρετικά μικρό θόρυβο. Όταν είναι κατάλληλα προσαρμοσμένο στην είσοδό του επιτυγχάνει εικόνα θορύβου που κυμαίνεται μεταξύ 0.3 dB στο 1GHz μέχρι 0.65 dB στα 18GHz. Το δε κέρδος ισχύος πέφτει από τα 25 dB σε DC λειτουργία στα 15 dB σε συχνότητα 16 GHz.

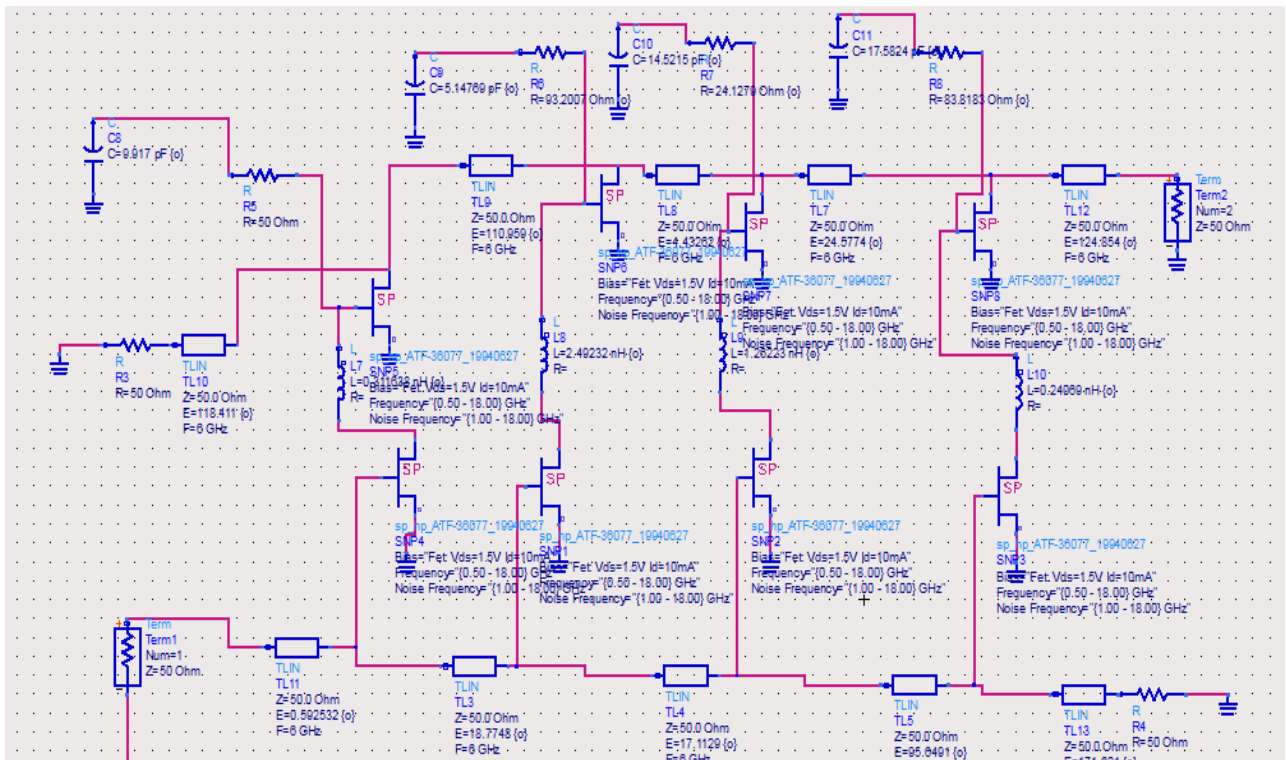
Στο σχήμα 5, από τις γραφικές παραστάσεις (α), (β) και (γ), παρατηρούμε ότι το κέρδος είναι μέτριο, η εικόνα θορύβου εφάμιλλη με αυτήν που παρουσιάζεται στο [10] και ο συντελεστής ανάκλασης εισόδου είναι μέτριος.



ΣΧΗΜΑ 3. Η σχεδίαση του LNA

2^η Σχεδίαση: Matrix Amplifier

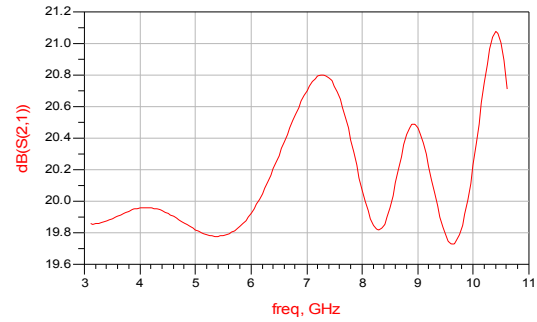
Μπορούμε να βελτιώσουμε το παραπάνω φτωχό κέρδος του ενισχυτή χρησιμοποιώντας ένα matrix amplifier, όπως παρουσιάζεται στο [11].



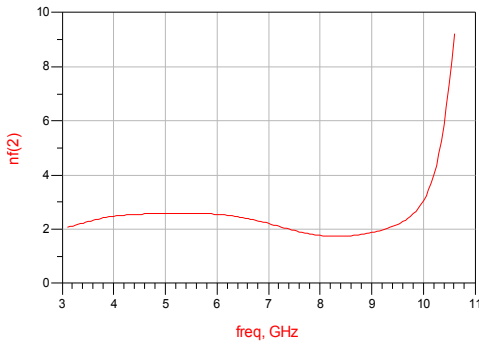
ΣΧΗΜΑ 4. Matrix Amplifier



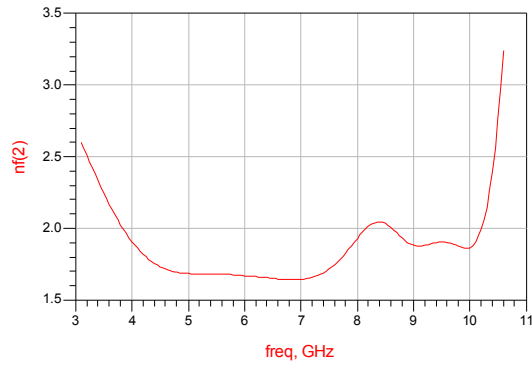
(α)



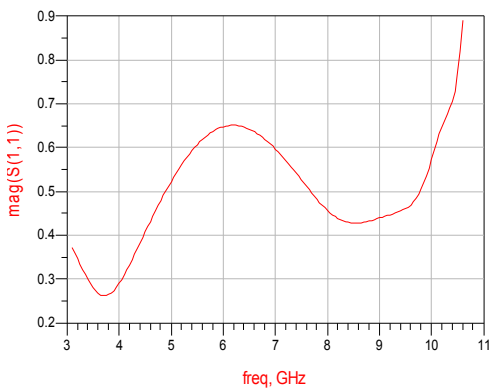
(δ)



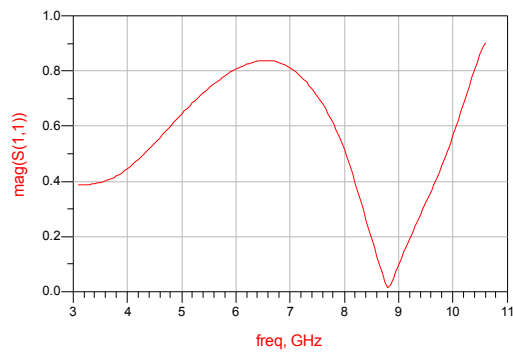
(β)



(ε)



(γ)



(στ)

ΣΧΗΜΑ 5. Η επίδοση των ενισχυτών όσον αφορά το κέρδος (α), (δ), την εικόνα θορύβου (β), (ε) και το συντελεστή ανάκλασης εισόδου (γ), (στ). Η πρώτη στήλη (α), (β) και (γ) είναι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του κατανομμένου ενισχυτή του σχήματος 1, ενώ η δεύτερη στήλη (δ), (ε) και (στ) είναι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του matrix amplifier του σχήματος 2.

Κάθε ενισχυτικό κύτταρο στον παραπάνω καταναμημένο ενισχυτή αποτελείται από δύο FETs συνδεδεμένα σε σειρά σε συνδεσμολογία κοινής πηγής. Με το κύκλωμα αυτό αυξάνεται κατά πολύ η ισοδύναμη διαγωγιμότητα του ενισχυτικού κυττάρου σε σχέση με τη διαγωγιμότητα του καθενός τρανζίστορ ξεχωριστά. Το πηνίο L (peaking inductor) χρησιμοποιείται για τη βελτίωση της απόκρισης συχνότητας στις υψηλές συχνότητες.

Χρησιμοποιώντας κατάλληλες τιμές για την αντίσταση R και τον πυκνωτή C, καθώς και για το πηνίο L μπορούμε να κάνουμε την ισοδύναμη διαγωγιμότητα περίπου σταθερή στο διάστημα συχνοτήτων που μας ενδιαφέρει. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήσαμε τη βελτιστοποίηση του ADS από την οποία φάνηκε ότι ο ενισχυτής έχει πολύ καλή επίδοση χωρίς τη χρήση των πυκνωτών $q \cdot C_{GS}$ και των m-derived filter τερματισμών.

Το σχηματικό στο ADS παρουσιάζεται στο σχήμα 4.

Παρατηρούμε ότι το κέρδος είναι περίπου 20-21 dB, δηλαδή σχεδόν διπλάσιο σε σχέση με τον προηγούμενο καταναμημένο ενισχυτή. Επίσης τόσο ο συντελεστής ανάκλασης εισόδου όσο και η εικόνα θορύβου είναι σαφώς καλύτεροι.

ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ

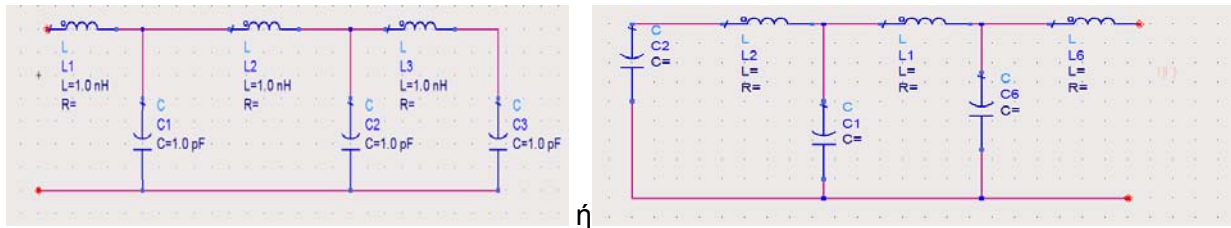
Η απλοποιημένη μέθοδος πραγματικής συχνότητας (Simplified Real Frequency Technique - SRFT)[12] αποτελεί μία παραλλαγή της μεθόδου που εισήγαγε το 1979 ο Carlin [13]. Πρόκειται για μία αριθμητική μέθοδο βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείται κατά κόρο για τη σχεδίαση κυκλωμάτων προσαρμογής ενός τρανζίστορ σε εφαρμογές μεγάλου εύρους συχνοτήτων. Οι περισσότερες αριθμητικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στα διάφορα σχεδιαστικά πακέτα CAD προϋποθέτουν καταρχήν από το χρήστη να επιλέξει μία λογική κυκλωματική τοπολογία με κάποιες αρχικές τιμές. Στη συνέχεια η επίδοση του κυκλώματος βελτιστοποιείται με την κατάλληλη αλλαγή των τιμών των παθητικών στοιχείων που συνθέτουν το κύκλωμα. Η βελτιστοποίηση αυτή γίνεται βάσει μίας αντικειμενικής συνάρτησης (objective function) που θέτει ο χρήστης και στην οποία αποτυπώνεται η επιθυμητή απόκριση του κυκλώματος που θέλει να σχεδιάσει. Πρόκειται για μία συνάρτηση των τιμών των παθητικών στοιχείων $X \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ του κυκλώματος προσαρμογής, καθώς και των δεδομένων αντίστασης $Z_L=R_L+jX_L$ (ή αγωγιμότητας ή παραμέτρων σκέδασης) του φορτίου (Load) κεραίας ή ενισχυτή που θέλουμε να προσαρμόσουμε σε μία ζώνη συχνοτήτων ω . Ένα παράδειγμα αντικειμενικής συνάρτησης προς βελτιστοποίηση είναι το Κέρδος Ισχύος Μεταφοράς (Transducer Power Gain) TPG που ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος στο φορτίο προς τη διαθέσιμη ισχύ που δίνει μία γεννήτρια στην είσοδο. Επιθυμούμε να είναι όσο γίνεται πιο μεγάλο και σταθερό στη ζώνη συχνοτήτων που μας ενδιαφέρει. Σε μαθηματικούς όρους, θέλουμε το $T=T(\omega, Z_L, X_1, X_2, \dots, X_n)$ να προσεγγίζει την τιμή T_0 που επιλέγει ο χρήστης. Έτσι, σχηματίζουμε μία συνάρτηση σφάλματος $\epsilon(\omega) = T(\omega, R_L(\omega), X_L(\omega), X_1, X_2, \dots, X_n) - T_0$, την οποία θέλουμε να ελαχιστοποιήσουμε. Στην τεχνική βιβλιογραφία υπάρχουν πολλά αριθμητικά πακέτα ελαχιστοποίησης της παραπάνω συνάρτησης, αλλά είναι συνήθως κατάλληλα μόνο για κυκλώματα στενού εύρους ζώνης με συνήθως δύο μόνο άεργα στοιχεία (πυκνωτές/πηνία).

Επιπλέον, το πρόβλημα ελαχιστοποίησης της συνάρτησης σφάλματος $\epsilon(\omega)$ καθίσταται έντονα μη γραμμικό. Η απλοποιημένη μέθοδος πραγματικής συχνότητας παρακάμπτει την παραπάνω δυσκολία με το να εκφράζει τους συντελεστές σκέδασης του στη μορφή:

$$S_{ij} = \frac{h(p)}{g(p)} = \frac{h_n p^n + h_{n-1} p^{n-1} + \dots + h_1 p + h_0}{g_k p^k + \dots + g_1 p + g_0} \quad (2)$$

Στη συνέχεια κατασκευάζουμε τη συνάρτηση σφάλματος συναρτήσε των συντελεστών σκέδασης της παραπάνω μορφής και η ελαχιστοποίηση γίνεται πλέον ως προς τους

συντελεστές h_i του πολυωνύμου $h(p)$ πράγμα που όπως αποδεικνύεται καθιστά το πρόβλημα μη γραμμικό, αλλά με μη γραμμικότητα τάξης δύο, ανεξάρτητα από το πλήθος των στοιχείων του κυκλώματος. Στη θεωρία της βελτιστοποίησης είναι γνωστό ότι, αν η μη γραμμικότητα της αντικειμενικής συνάρτησης είναι τάξης μεγαλύτερης του δύο, τότε κάποιος μπορεί να παγιδευτεί σε τοπικά ελάχιστα και η ίδια η σύγκλιση της αριθμητικής μεθόδου είναι αμφίβολη. Επιπλέον, σε αυτές τις περιπτώσεις το τελικό αποτέλεσμα είναι πολύ εξαρτώμενο από τις αρχικές αυθαίρετες τιμές των μεταβλητών που υπεισέρχονται στη βελτιστοποίηση. Από την άλλη μεριά στην SRFT η μη γραμμικότητα είναι τάξης δύο - και η σύγκλιση είναι σχεδόν βέβαιη. Η κυκλωματική τοπολογία είναι αυτή ενός βαθυπερατού L-C φίλτρου όπως φαίνεται στο σχήμα 6.



ΣΧΗΜΑ 6. Προσομοίωση γραμμής μεταφοράς

Το αν φίλτρο αυτό θα ξεκινά με ένα παράλληλο πυκνωτή ή με ένα εν σειρά πηνίο, προκύπτει από τη σύνθεση της αντίστασης εισόδου του, όπως θα δούμε παρακάτω.

Στην SRFT, είναι δυνατόν το κύκλωμα προσαρμογής να αποτελείται και από γραμμές μεταφοράς. Σε αυτήν την περίπτωση θεωρούμε ότι όλες οι γραμμές έχουν το ίδιο ηλεκτρικό μήκος και η βελτιστοποίηση γίνεται ως προς τη χαρακτηριστική αντίστασή τους. Υπάρχει η δυνατότητα το κύκλωμα να περιέχει και μετασχηματιστές που ως γνωστόν μπορούν ιδανικά να μετασχηματίζουν και αντιστάσεις σε άπειρο εύρος ζώνης. Η χρήση μετασχηματιστών δίνει περισσότερους βαθμούς ελευθερίας, αλλά στην πράξη είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθούν σε ένα κύκλωμα.

Επιπλέον, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσει στην παραπάνω βασική L-C τοπολογία και εν σειρά πυκνωτές ή πηνία εν παραλλήλω που κάνουν τη διάταξη μας ζωνοπερατή.

Τα βασικά βήματα στην υλοποίηση ενός αλγορίθμου βασισμένου στην SRFT είναι τα εξής:

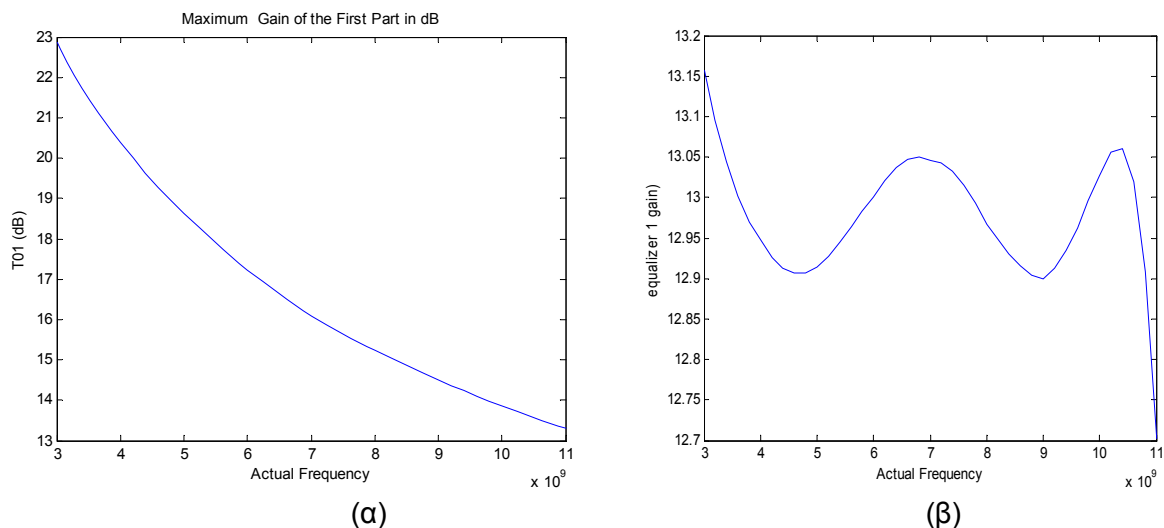
- 1) Αρχικοποίηση των συντελεστών h_i του πολυωνύμου $h(p) = h_n p^n + h_{n-1} p^{n-1} + \dots + h_0$ που εμφανίζεται στον αριθμητή του συντελεστή ανάκλασης (κανονικοποιημένο ως προς τη μοναδιαία αντίσταση) $S=h(p)/g(p)$ της σχέσης (2) του κυκλώματος προσαρμογής (equalizer). Η αρχικοποίηση αυτή είναι αυθαίρετη αν και μπορείς κανείς να κάνει μία αρχικοποίηση που να έχει νόημα για το πρόβλημά μας [14].
- 2) Με βάση την επιλογή του αριθμού k της σχέσης (2) είναι δυνατό να βρεθούν οι συντελεστές g_i του πολυώνυμου $g(p)$ που εμφανίζεται στον παρανομαστή του συντελεστή ανάκλασης (κανονικοποιημένο ως προς τη μοναδιαία αντίσταση) $S=h(p)/g(p)$ του προσαρμοστικού κυκλώματος (equalizer). Τα βήματα για την κατασκευή του πολυωνύμου αυτού περιγράφονται στο [16] και βασίζονται στο γεγονός ότι το προσαρμοστικό κύκλωμα είναι χωρίς απώλειες.
- 3) Έχοντας πλέον κατασκευάσει (αρχικοποιήσει) το συντελεστή ανάκλασης S εκφράζουμε τη συνάρτηση σφάλματος συναρτήσεως του S και των παραμέτρων σκέδασης του φορτίου που θέλουμε να προσαρμόσουμε (οι παράμετροι σκέδασης για το φορτίο πρέπει να είναι φυσικά γνωστοί εκ των προτέρων). Το φορτίο αυτό μπορεί να είναι είτε παθητικό, όπως μία κεραία, είτε ενεργό όπως ένα FET.
- 4) Ελαχιστοποιούμε τη συνάρτηση σφάλματος με τον αλγόριθμο ελαχίστων τετραγώνων. Έτσι βρίσκουμε το βελτιστοποιημένο πολυώνυμο $h(p)$.

- 5) Επαναλαμβάνουμε το βήμα 2) για να βρούμε το βέλτιστο πολυώνυμο $g(p)$.
- 6) Κατασκευάζουμε το συντελεστή ανάκλασης $S=h(p)/g(p)$ και από αυτόν την αντίσταση εισόδου $Z_{in} = \frac{1-S}{1+S} = \frac{g(p)-h(p)}{g(p)+h(p)}$ που είναι ένα ρητό πολυώνυμο ως προς p .
- 7) Η διαδικασία που οδήγησε στα πολυώνυμο g από το πολυώνυμο h στο βήμα 5) εξασφαλίζει ότι η αντίσταση εισόδου $Z_{in} = \frac{1-S}{1+S} = \frac{g(p)-h(p)}{g(p)+h(p)}$ είναι συνθέσιμη [15] με ένα δίκτυο L-C.
- C. Σε μαθηματική ορολογία το πολυώνυμο $g(p) = g_k p^k + g_{k-1} p^{k-1} + \dots + g_0$ είναι Hurwitz, δηλαδή με ρίζες μόνο στο τρίτο και τέταρτο τεταρτημόριο του μιγαδικού επιπέδου και θετικούς πραγματικούς συντελεστές. Εκφράζοντας το Z_{in} στην μορφή μερικών κλασμάτων είναι δυνατή η εξαγωγή των τιμών των χωρητικότητων και των αυτεπαγωγών του δικτύου L-C τερματισμένου σε μοναδιαία αντίσταση.

3^η Σχεδίαση: Μέθοδος SRFT

Ακολουθώντας το [16] υλοποιήσαμε ρουτίνες στο Matlab για τη σχεδίαση προσαρμοστικών κυκλωμάτων στην είσοδο και έξοδο και του P-HEMT ATF-36007 της AVAGO στη ζώνη 3-11 GHz. Η συχνότητα κανονικοποίησης ήταν $f_{norm}=11$ GHz. Η υλοποίηση αυτή δεν περιλαμβάνει μετασχηματιστές, ούτε εν σειρά πυκνωτές ή εν παραλλήλω πηνία. Η σχεδίαση έγινε σε δύο βήματα. Στο πρώτο βήμα σχεδιάστηκε το προσαρμοστικό κύκλωμα εισόδου έχοντας το FET τερματισμένο από τη μεριά εξόδου σε χαρακτηριστική αντίσταση 50 Ohm.

Ο στόχος τον οποίο θέσαμε στη συνάρτηση σφάλματος προέκυψε μετά από εύρεση του μέγιστου κέρδους ισχύος μεταφοράς TPG (Transducer Power Gain) που μπορεί να δώσει ένα μονόδρομο τρανζίστορ, όταν είναι βέλτιστα προσαρμοσμένο στην είσοδο από κάποιο ιδεατό κύκλωμα, στο διάστημα συχνοτήτων που μας ενδιαφέρει. Το TPG αυτό δίνεται από την σχέση (3).



ΣΧΗΜΑ 7. (α) Μέγιστο κέρδος με προσαρμοσμένη την είσοδο και (β) Βελτιστοποιημένο κέρδος με κύκλωμα προσαρμογής εισόδου.

$$T_{01} = \frac{|S_{21}(\omega)|^2}{1 - |S_{11}(\omega)|^2} \quad (3)$$

Η σχέση αυτή ισχύει σαν μία πρώτη εκτίμηση για το τρανζίστορ μας, αφού αυτό δεν είναι μονόδρομο. Η γραφική παράσταση της σχέσης αυτής ως προς τη συχνότητα φαίνεται στο σχήμα 7(α).

Το TPG έχοντας ένα προσαρμοστικό κύκλωμα στην είσοδο του FET δίνεται από τη σχέση:

$$T_1(\omega) = \frac{|S_{21F}|^2 |S_{21}|^2}{|1 - S_{22F} S_{11}|^2} \quad (4)$$

όπου S_{21F} και S_{22F} είναι οι παράμετροι σκέδασης που αναφέρονται στο κύκλωμα προσαρμογής. Το S_{21F} αναφέρεται στη μεταφορά ισχύος από αριστερά προς τα δεξιά και το S_{22} στο συντελεστή ανάκλασης της ισχύος που προσπίπτει από το FET προς τα αριστερά στο προσαρμοστικό κύκλωμα. Είναι $S_{22F} = h_F/g_F$ και $S_{21F} = 1/g_F$. Ο στόχος που θέσαμε είναι το TPG να είναι ίσο με 13 dB, δηλαδή το ελάχιστο στην παραπάνω γραφική παράσταση του σχήματος 7(α).

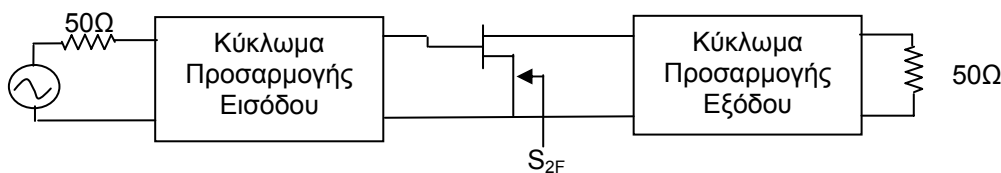
Έτσι η συνάρτηση σφάλματος error1 είναι η εξής :

$$\text{error1} = 10 \log \left(\frac{|S_{21F}|^2 \cdot |S_{21}|^2}{|1 - S_{22F} S_{11}|^2} \right) - 13 \quad (5)$$

Χρησιμοποιήσαμε μία τυχαία αρχικοποίηση για το διάνυσμα h, με $h = [-1 \ 1 \ -1 \ 1 \ -1]$. Το h έχει 5 στοιχεία με αποτέλεσμα το τελικό κύκλωμα να έχει 5 παθητικά στοιχεία. Η βελτιστοποίηση είχε ως αποτέλεσμα το TPG που φαίνεται στο σχήμα 7(β). Όπως παρατηρούμε πρόκειται για μία πολύ καλή προσέγγιση.

Στο δεύτερο στάδιο προσθέτουμε και το κύκλωμα προσαρμογής εξόδου του τρανζίστορ και βελτιστοποιούμε το ολικό TPG. Επειδή όμως το τρανζίστορ που χρησιμοποιούμε είναι εκ κατασκευής καλά προσαρμοσμένο στην αντίσταση των 50 Ohms, το προσαρμοστικό κύκλωμα εξόδου μπορεί να προσφέρει μία μικρή μόνο βελτίωση. Ας προσπαθήσουμε λοιπόν το κύκλωμα αυτό να προσφέρει μια σταθερή ενίσχυση 0.7 dB. Οπότε θέτουμε ως στόχο το τελικό TPG να είναι $13 + 0.7 = 13.7$ dB (τα 13 dB προκύπτουν από το TPG του προηγούμενου σταδίου).

Το κύκλωμά μας θα έχει τη μορφή [17] του σχήματος 9.



ΣΧΗΜΑ 9. Ενισχυτής με κυκλώματα προσαρμογής στην είσοδο και την έξοδο

Το τελικό TPG που βελτιστοποιείται στο βήμα αυτό δίνεται από την εξής σχέση :

$$T_2(\omega) = T_1(\omega) \cdot \frac{|S_{21B}|^2}{|1 - S_{2F} S_{11B}|^2} \quad (6)$$

όπου $T_1(\omega)$ είναι το TPG που επιτεύχθηκε στο προηγούμενο στάδιο, $S_{21B} = 1/g_B$ είναι η παράμετρος μεταφοράς ισχύος στο δεύτερο κύκλωμα προσαρμογής – κύκλωμα προσαρμογής

εξόδου (back end matching network) από αριστερά προς δεξιά, και S_{2F} είναι η παράμετρος σκέδασης που φαίνεται στο παραπάνω σχήμα και ισούται με

$$S_{2F} = S_{22} + \frac{S_{12}S_{21}S_{22F}}{1 - S_{11}S_{22F}} \quad (7)$$

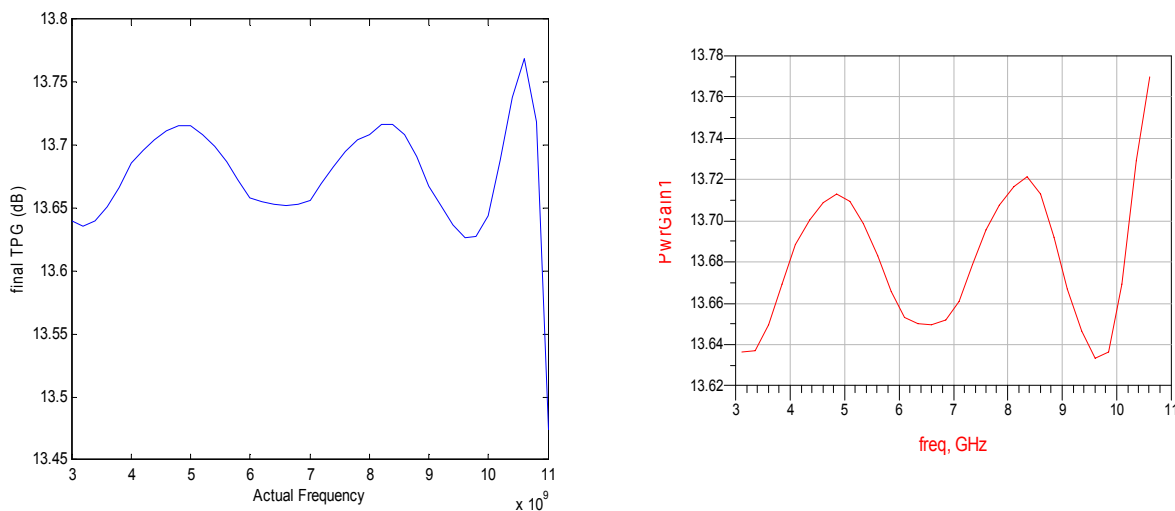
Το S_{22F} στην παραπάνω σχέση ισούται με h_F/g_F όπου h_F, g_F είναι τα πολυώνυμα που περιγράφουν το πρώτο κύκλωμα προσαρμογής (εισόδου) και προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση του πρώτου σταδίου.

Η συνάρτηση σφάλματος (error function) αυτού του σταδίου δίνεται από τη σχέση:

$$\text{error}_2 = 10 \cdot \log(T_2(\omega)) - 13.7$$

Χρησιμοποιώντας και πάλι μία αυθαίρετη αρχικοποίηση $h=[-1 \ 1 \ -1 \ 1 \ -1 \ 1]$ (το κύκλωμα προσαρμογής θα περιέχει 6 στοιχεία) το TPG που επιτυγχάνεται παρουσιάζεται στο σχήμα 10(α).

Αυτή η γραφική παράσταση δεν προέκυψε από προσομοίωση στο ADS αλλά από υπολογισμό του TPG (στο MATLAB) συναρτήσε των παραμέτρων σκέδασης του τρανζίστορ και των συντελεστών ανάκλασης των κυκλωμάτων προσαρμογής εισόδου και εξόδου (equalizers) που προέκυψαν μετά από τη βελτιστοποίηση. Βλέπουμε ότι στο διάστημα 3-11 GHz έχουμε μία απόκλιση από το στόχο των 13.7 dB της τάξης του $-0.22\text{dB} < \Delta T < 0.07\text{dB}$. Ο στόχος επετεύχθη με άριστη προσέγγιση.



ΣΧΗΜΑ 10. (α) Τελικό κέρδος με τη SRFT (β) Κέρδος ισχύος μεταφοράς μετά την προσομοίωση

Τα πολυώνυμα που προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση είναι τα εξής :

Για το κύκλωμα προσαρμογής εισόδου είναι:

$$h_F = [0.7706 \ 1.2850 \ 0.7948 \ 0.6418 \ -0.1236 \ 0]$$

$$g_F = [0.7706 \ 2.6921 \ 4.4258 \ 4.7448 \ 3.0830 \ 1.0000]$$

Για το δεύτερο προσαρμοστικό κύκλωμα είναι :

$$h_B = [4.4353 \ 2.8273 \ 6.5209 \ 2.8844 \ 2.0559 \ 0.4783 \ 0]$$

$$g_B = [4.4353 \ 8.6576 \ 14.0695 \ 13.9405 \ 9.9071 \ 4.4769 \ 1.0000]$$

Για τη σύνθεση των κυκλωμάτων χρησιμοποιούμε μία ρουτίνα `synthesis.m` η οποία δέχεται στην είσοδό της τα αντεστραμμένα διανύσματα h, g και δίνει στην έξοδο τις τιμές των πυκνωτών και πηνίων που θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε. Έτσι έχουμε τις εξής τιμές:

$$L_1=0.7924 \text{ nH} \quad C_2=0.561 \text{ pF} \quad L_3=1.0682 \text{ nH} \quad C_4=0.367 \text{ pF} \quad L_5=0.2803 \text{ nH}$$

Για το κύκλωμα προσαρμογής εξόδου, η ρουτίνα `synthesis.m` μας δίνει :

$$L_1= 1.1007 \text{ nH} \quad C_2= 0.4477 \text{ pF} \quad L_3= 1.3901 \text{ nH} \quad C_4= 0.4859 \text{ pF} \quad L_5= 1.0939 \text{ nH} \quad C_6= 0.2235 \text{ pF}.$$

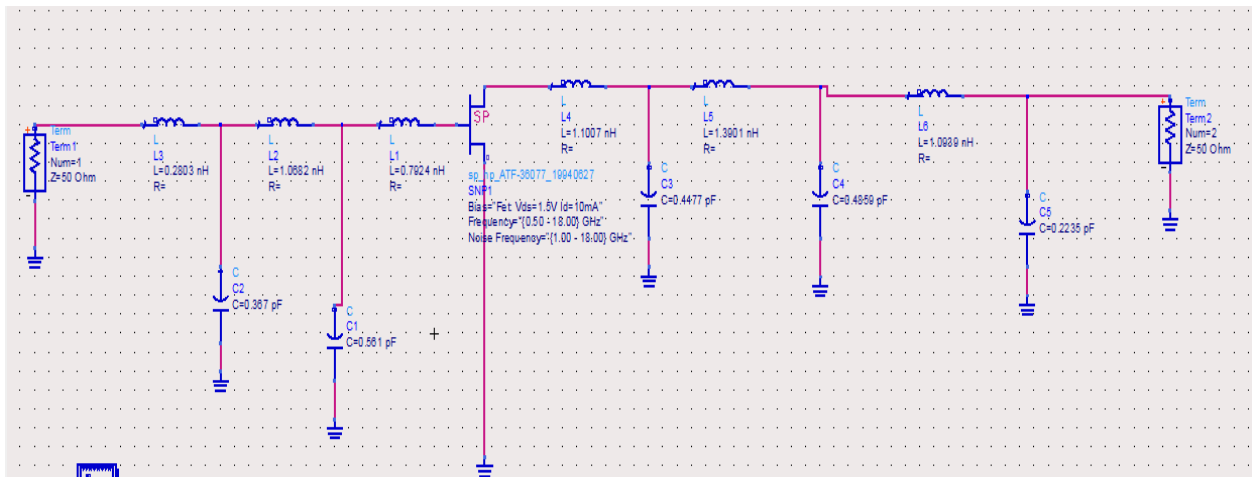
Αν χρησιμοποιήσουμε τώρα το κύκλωμα αυτό στο ADS θα προκύψει η σχεδίαση, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 11.

Κάνοντας προσομοίωση στο κύκλωμα αυτό στο διάστημα 3.1-10.6 GHz, προκύπτει το κέρδος ισχύος μεταφοράς που φαίνεται στο σχήμα 10(β).

Η προσομοίωση αυτή με το ADS συμφωνεί απολύτως με το TPG του σχήματος 10(α) που υπολογίσαμε θεωρητικά μέσω των βελτιστοποιημένων παραμέτρων σκέδασης των δύο κυκλωμάτων προσαρμογής. Αυτό σημαίνει ότι η σύνθεση των κυκλωμάτων είναι επιτυχής.

Θα πρέπει όμως να εξετάσουμε και την ευστάθεια του ενισχυτή. Θα θεωρήσουμε ότι στην είσοδο και έξοδο του συνδέονται φορτία 50Ω. Η συνθήκη για να είναι ευσταθής ο ενισχυτής στην είσοδο και έξοδο είναι οι συντελεστές ανάκλασης εισόδου και εξόδου να έχουν μέτρο μικρότερο του ένα. Βλέπουμε ότι και τα δύο μέτρα είναι μικρότερα του ένα σε όλο το διάστημα συχνοτήτων (σχήμα 12). Επομένως ο ενισχυτής είναι ευσταθής στην τυπική περίπτωση που στην είσοδο και έξοδό του συνδέονται φορτία των 50 Ω.

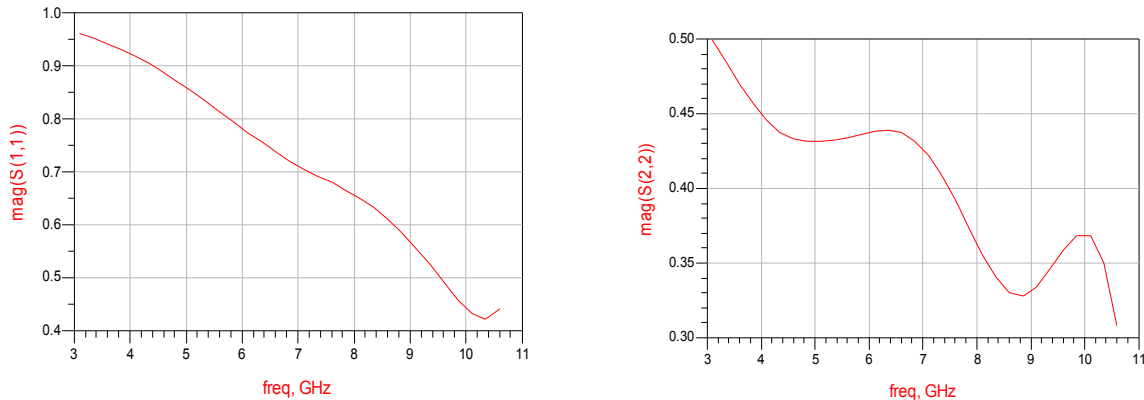
Τέλος πρέπει να δούμε και την εικόνα θορύβου στην έξοδο του ενισχυτή. Βλέπουμε ότι η μέγιστη εικόνα θορύβου είναι 1.04 dB (σχήμα 13) που είναι μία αποδεκτή τιμή.



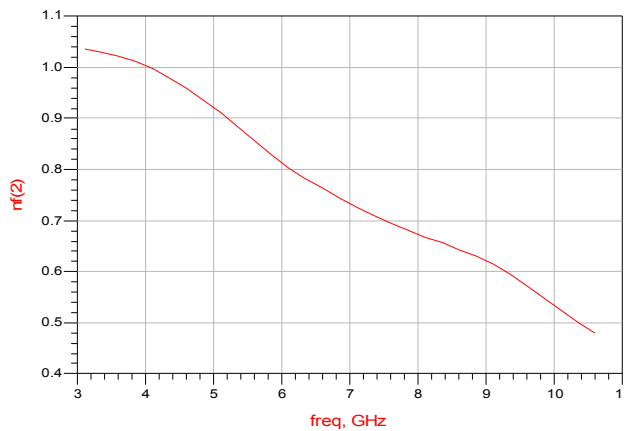
ΣΧΗΜΑ 11. Κύκλωμα Ενισχυτή υπό την SRFT

Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι σύμφωνα με το φύλλο δεδομένων του κατασκευαστή του PHEMT που χρησιμοποιούμε, το τρανζίστορ παρουσιάζει το φαινόμενο της σχετικά μικρής μόνο επιδείνωσης της εικόνας θορύβου όταν στην είσοδό του παρουσιάζεται σύνθετη αντίσταση λίγο ή πολύ διαφορετική από τη σύνθετη αντίσταση που καθιστά την εικόνα θορύβου τη μικρότερη δυνατή. Το φαινόμενο αυτό καθιστά δυνατή τη λειτουργία του τρανζίστορ ως ενισχυτή μικρού θορύβου σε μεγάλο εύρος ζώνης (broadband LNA). Η σύνθετη αντίσταση στην είσοδο μπορεί να έχει μεγάλες διακυμάνσεις σε ένα τόσο μεγάλο εύρος συχνοτήτων, αλλά αυτό επηρεάζει

ελάχιστο το θόρυβο στην έξοδο του ενισχυτή. Έτσι παρόλο που η παραπάνω βελτιστοποίηση με την SRFT που πραγματοποιήσαμε δεν έλαβε υπόψη την απαίτηση για μικρό θόρυβο η εικόνα θορύβου εξόδου είναι ανεκτή. Παρόλα αυτά οι Gunes και Bilgin ενσωμάτωσαν επιτυχώς στην Απλοποιημένη Μέθοδο Πραγματικής Συχνότητας και την απαίτηση για μικρό θόρυβο, αλλά και μικρό λόγο στασίμων κυμάτων [18]. Επίσης, όπως περιγράφεται στο [12], η SRFT μπορεί εύκολα να επεκταθεί και για την σύνδεση σε σειρά ενισχυτικών βαθμίδων με ενεργά στοιχεία.



ΣΧΗΜΑ 12. Απόκριση των (α) S_{11} και (β) S_{22}



ΣΧΗΜΑ 13. Εικόνα θορύβου

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Γενικά η απλοποιημένη μέθοδος πραγματικής συχνότητας (SRFT) είναι η πιο πολλά υποσχόμενη μέθοδος, όπως άλλωστε περιγράφεται στο [18]. Στην εργασία τους αυτή, οι Gunes και Bilgin κατάφεραν με συστηματικό τρόπο χρησιμοποιώντας τη SRFT να επιτύχουν τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα ως προς το σταθεροποιημένο κέρδος, την εικόνα θορύβου, και το λόγο στάσιμων κυμάτων. Συγκεκριμένα χρησιμοποίησαν τα δεδομένα από το datasheet του ενεργού στοιχείου για να βρουν τον καλύτερο δυνατό συνδυασμό για τα παραπάνω μεγέθη σε μία σειρά από συχνότητες για τις οποίες οι κατασκευάστριες εταιρίες έδιναν δεδομένα για τα

τρανζίστορ. Οι συνδυασμοί αυτοί αποτέλεσαν και τους στόχους προς επίτευξη μέσω της σύνθεσης των προσαρμοστικών κυκλωμάτων εισόδου και εξόδου με τη SRFT.

Στη δική μας εργασία δείξαμε ένα μόνο μέρος των δυνατοτήτων της SRFT υλοποιώντας κατάλληλες ρουτίνες στο MATLAB. Πραγματικά, με την SRFT πετύχαμε την καλύτερη δυνατή σταθεροποίηση του κέρδους του ενισχυτή (στην τιμή 14 dB) σε όλο το UWB φάσμα, πράγμα που είναι βασική απαίτηση στις τεχνολογίες UWB. Η εικόνα θορύβου επίσης ήταν πάρα πολύ καλή (0.7 db), όπως και ο συντελεστής ανάκλασης εξόδου (0.3 σε απόλυτους αριθμούς). Το μόνο μειονέκτημα στην υλοποίησή μας ήταν ο συντελεστής ανάκλασης στην είσοδο με μέση τιμή 0.75.

Στη σχεδίαση που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκε μόνο μία ενισχυτική βαθμίδα, με αποτέλεσμα το κέρδος να είναι μικρό, όμως ανεκτό για ένα ενισχυτή χαμηλού θορύβου. Μεγαλύτερο κέρδος επιτυγχάνουμε όταν χρησιμοποιούμε περισσότερα ενισχυτικά κύτταρα σε σειρά. Πράγματι, στη μέθοδο της κατανεμημένης ενίσχυσης, και μάλιστα στην περίπτωση του κατανεμημένου ενισχυτή μήτρας (matrix distributed amplifier) έχουν επιτευχθεί πολύ καλά αποτελέσματα, δεδομένης ιδιαίτερως της χαμηλής εικόνας θορύβου, πράγμα όχι συνηθισμένο για ένα κατανεμημένο ενισχυτή. Πιο συγκεκριμένα, πετύχαμε κέρδος γύρω στο 20.4 dB, εικόνα θορύβου 2 dB και μέτριο συντελεστή ανάκλασης εισόδου με τιμή 0.4.

Η απλοποιημένη μέθοδος πραγματικής συχνότητας έδωσε εξαιρετικά αποτελέσματα όσον αφορά στο κέρδος και στο θόρυβο, συγκρινόμενη με τις μεθόδους κατανεμημένης ενίσχυσης.

REFERENCES

1. FCC 02-48, Federal Communications Commission, April 22, 2002.
2. Stephen Wood, Roberto Aiello, *Essentials of UWB*, Cambridge University Press, 2008, pp.12-16.
3. Win, Scholtz, "On the Robustness of Ultra-Wide Bandwidth Signals in Dense Multipath Environments" *IEEE COMMUNICATIONS LETTERS* 2, 51-53 (1998).
4. Wong, *Fundamentals of distributed amplification*, Artech House, 1993, pp. 10-20.
5. Lee, *The design of CMOS radio-frequency integrated circuits*, second edition, Cambridge University press, 2004, pp. 248.
6. E. A. Karagianni, N. K. Uzunoglu, A Distributed Transmission Line Amplifier with Constant Gain Operating DC up to 40 GHz for Wideband Telecommunication Applications, 8th International Conference on Advances in Communications and Control, pp. 501-504,2001.
7. Bahl, *Fundamentals of RF and Microwave Transistor Amplifiers*, Wiley, 2009, pp. 72.
8. Kim, B, Tserng, H.Q, *Electronic Letters* 20, pp. 288-289 (1984)
9. Ayasli, Miller, Mozzi, Hanes, "Capacitively Coupled Traveling-Wave Power Amplifier", *IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES* 32, 1704-1709 (1984)
10. Aitchison, "The Intrinsic Noise Figure of the MESFET Distributed Amplifier", *IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES* 33, pp. 460-466 (1985).
11. Guan, Nguyen, "Low-power-consumption and high-gain CMOS distributed amplifiers using cascade of inductively coupled common-source gain cells for UWB systems", *IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES* 54 pp. 3278-3283 (2006).
12. Yarman, Carlin, "A Simplified Real Frequency Technique Applied to Broadband Multistage Microwave Amplifiers", *IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES* 30 pp. 2216-2222 (1982).
13. Carlin, Komiak, "A new method of broad-band equalization applied to microwave amplifiers", *IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES* 24, pp. 170-175 (1977).
14. Σχεδίαση Ενισχυτή Χαμηλού Θορύβου για Εφαρμογές Ευρείας Ζώνης 3.1-10.6GHz, Διπλωματική Εργασία, Νικόλαος Χατζηαθανασίου, ΕΚΠΑ, 2011.
15. Yarman, *Design of Ultra Wideband Antenna Matching Networks*, Springer, 2008, pp. 190-197.
16. Yarman, *DESIGN OF ULTRA WIDEBAND POWER TRANSFER NETWORK*, Wiley, 2010, pp.634-686
17. Yarman, *DESIGN OF ULTRA WIDEBAND POWER TRANSFER NETWORK*, Wiley, 2010, pp. 636
18. F. Gunes, C. Bilgin, "A GENERALIZED DESIGN PROCEDURE FOR A MICROWAVE AMPLIFIER: A TYPICAL APPLICATION EXAMPLE", *Progress In Electromagnetics Research* B10, pp. 1-19 (2008).

Implementation Limitations of STANAG 1008 Design Constraints for Pulsed Loads

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 *Technical University of Crete, Production Engineering & Management Department, Chania, 73100, 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. Crucial power quality problems in ship electric power systems, known as “voltage/frequency modulation”, are usually caused by specific type of loads known as “pulsed loads”. Pulsed loads require regularly or randomly repeated high power consumption in short time intervals. NATO standard, STANAG 1008, imposes two design 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. If these two inequalities are satisfied for a low voltage ship service power supply system, the voltage and frequency modulation will not exceed 2% and 0,5%, respectively. However, no well-based theoretical analysis of the phenomenon is used. The mathematical analysis of voltage/frequency phenomenon was presented in a series of two companion past papers proving that the phenomenon is depends on several parameters such as pulsed load period and duty cycle, the technical characteristics of the generators and their frequency and voltage controllers, the technical characteristics of the cable between the pulsed load and the generator etc. In this paper, the impact of the aforementioned parameters to STANAG 1008 design constraints for voltage and frequency modulation will be examined based on the theoretical analysis already developed by the authors. The effects of the respective parameters on STANAG 1008 pulsed load limit curves are presented and commented highlighting some of the issues to be addressed by future standards.

Keywords: Ship electric power system, STANAG 1008, pulsed loads, voltage and frequency modulation, modeling.

PACS: 84.70.+p

INTRODUCTION

In recent years Power Supply Quality (PSQ) for ship power systems has become a significant issue as the equipment installed on board is increasingly electrified. One of the most critical PSQ problems is “voltage and frequency modulation”. Generally, “modulation” is defined as “voltage and frequency periodic or quasi-periodic variations such as might be caused by

regularly or randomly repeated loading with frequency less than nominal” [1-3]. Pulsed loads provoke modulation, as they require high power for a very short time interval (in the order of a few seconds or even up to some milliseconds). This operation is often repeated on a regular or almost regular basis introducing a periodicity on the entire phenomenon.

The primary effects of pulse loading have been already studied in the context of voltage flicker, dynamic and transient stability, excitation of torsional frequencies in generators etc according to previous experience from continental power systems [4]. Pulse loading may also affect the operation of several subsystems of the ship such as radarscopes, communication and navigation equipment etc.

Voltage and frequency modulations are calculated as the difference between maximum and minimum values expressed as a percentage of the double of the nominal value as shown in (1) and (2):

$$M_V = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{2V_n} \quad (1)$$

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

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

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

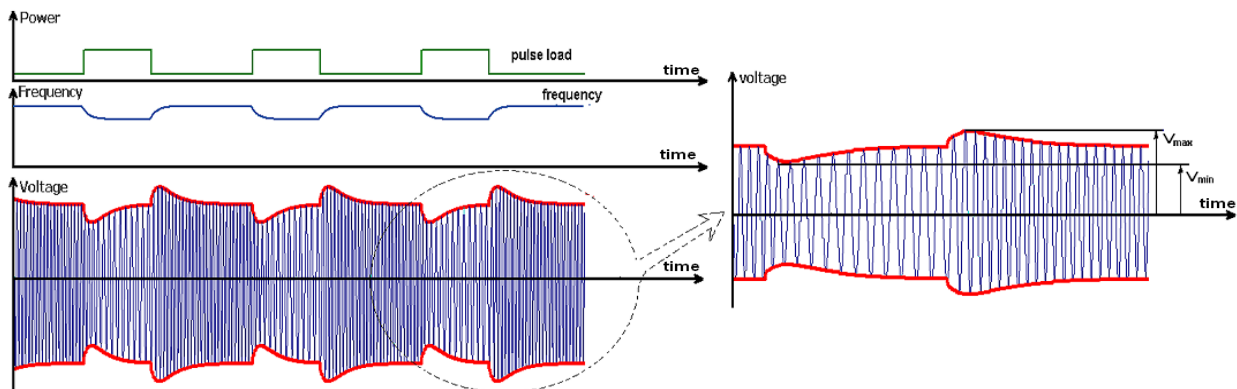


FIGURE 1. Frequency and voltage modulation caused by a rectangular pulsed load.

Up to now, few standards have dealt with this issue and have released relevant rules. Especially, in IEEE-45 the respective parameters have not been quantified [1], while USA-MIL-1399 [3] is overlapped with STANAG-1008 [2]. The following analysis will be based on STANAG 1008 (edition 9) [2], which is the NATO naval standard dealing with PSQ issues. It sets the limits of voltage and frequency modulation for the low voltage shipboard electrical power systems (440 V, 115 V, 60 Hz, 400 Hz) to 2% and 0.5%, respectively. STANAG 1008 deals only with the Ship Service Power Supply System excluding ship electric propulsion systems.

According to the design constraints of STANAG 1008 [8: Annex B § 9.d], in order voltage and frequency modulation not to exceed the aforementioned limits, reactive and active power of the pulsed load should satisfy the following inequalities:

$$\text{Voltage modulation: } \Delta Q < 0.065 \cdot S_S \quad (3)$$

$$\text{Frequency modulation: } \Delta P < 0.25 \cdot S_S \quad (4)$$

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. Considering the apparent power of the pulsed load ΔS and the power factor of the pulsed load $\cos\phi$, the inequalities (3) and (4) can be written as:

$$\text{Voltage modulation: } \cos\phi > \sqrt{1 - \left(a \cdot \frac{1}{\Delta S}\right)^2} : a = 0.065 \quad (5)$$

$$\text{Frequency modulation: } \Delta S \cdot \cos\phi < \beta : \beta = 0.25 \quad (6)$$

where α and β are the two parameters affecting the dimension of acceptable and unacceptable areas of operation. STANAG α , β parameters are fixed at 0.25 and 0.065, respectively. The respective graphical representation of inequalities (5), (6) is shown in Fig.2.

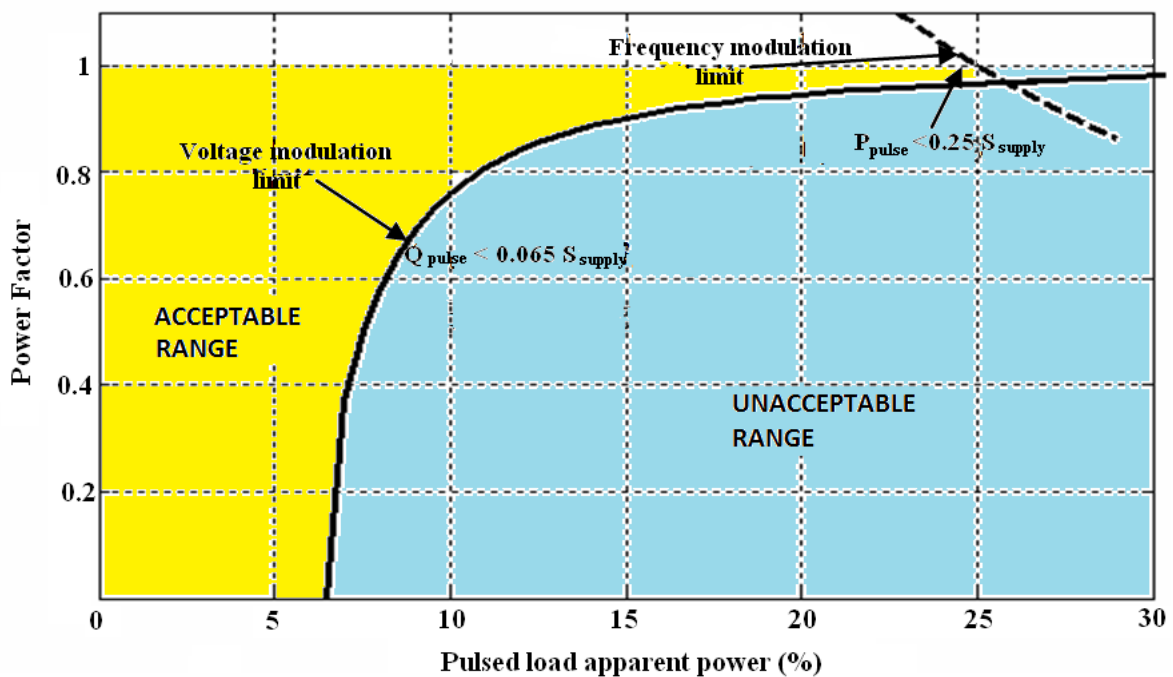


FIGURE 2. Limit curves for pulsed load operation according inequalities (5) and (6), where the acceptable and unacceptable range of pulsed load installed capacity is highlighted.

In previous papers of the authors [5-7], the electric power system of conventional ship and of All-Electric Ship has been examined proving 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 $\cos\phi$. However, additional parameters such as the pulse load period and 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, should be taken into account

Later, in a series of two companion papers [8-9] the theoretical analysis of the frequency and voltage modulation has been presented for a simplified ship power system respectively leading to more complex inequalities including all the above mentioned affecting parameters.

In this paper, the STANAG 1008 design constraints for voltage and frequency modulation will be examined based on the respective theoretical analysis of ship's simplified power system [8-9]. Emphasis will be placed on the effects of the respective parameters on the pulsed load limit curves of STANAG 1008 and the respective deviations caused by the variation of the parameters affecting voltage/frequency modulation will be demonstrated.

THEORETICAL ANALYSIS OF FREQUENCY & VOLTAGE MODULATION IN A SIMPLIFIED SHIP'S ELECTRIC POWER SYSTEM

Simplified Electrical Circuit of Ship Power System

The electric power system of a ship is considered as simplified as possible, as shown in Fig. 3 and proposed in [5]. The proposed simplified configuration can lead to the equivalent model of a conventional ship or an All Electric Ship. According to this approach, the bulk power produced by the equivalent synchronous generator is transferred to the load via a major electrical path with complex impedance $R+j\cdot X_C$. Automatic voltage and frequency regulators control the AC voltage and its frequency, respectively.

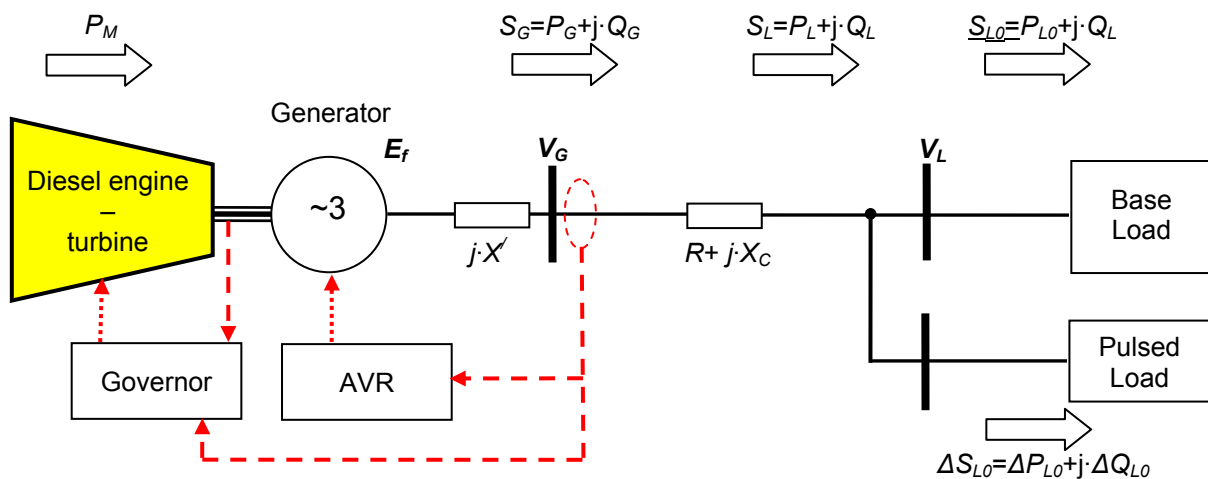


FIGURE 3. Equivalent topology of a ship electric power system.

For the following analysis the electric and mechanical parameters with the respective measurement units used, are listed next:

- E_F is the generator excitation voltage (V [volts] or p.u. [per unit]),
- V_G is the voltage at the generator ends (V or p.u.),
- V_L is the voltage at the load connection point (V or p.u.),
- E_{F0} is the generator excitation voltage (p.u.) before the occurrence of the pulsed load,
- V_{G0} is the voltage at the generator ends (p.u.) before the occurrence of the pulsed load,
- V_{L0} is the voltage at the load connection point (p.u.) before the occurrence of the pulsed load,
- T_M is the accelerating mechanical torque on generator shaft (Nm),
- T_G is the electromechanical torque on generator gap (Nm),
- P_M is the accelerating mechanical power on generator shaft (W or p.u.),

- S_G, P_G, Q_G are the apparent, the active and the reactive power produced by the generator respectively (VA or p.u., W or p.u., var or p.u.),
- S_S is the full rated apparent power of the supply at the occurrence of the pulsed load, which is the nominal base apparent power of the electric power system (VA),
- X is the equivalent sub-transient reactance of the generator (Ω or p.u.),
- R, X_C are the equivalent resistance and the equivalent reactance of the cables between generator output and load bus respectively (Ω or p.u., Ω or p.u.),
- S_L, P_L, Q_L are the apparent, the active and the reactive power of the system load respectively (VA or p.u., W or p.u., var or p.u.),
- S_{L0}, P_{L0}, Q_{L0} are the apparent, the active and the reactive power of the system base load (without the pulsed load) respectively (VA or p.u., W or p.u., var or p.u.),
- $\Delta S, \Delta P, \Delta Q$ are the apparent, the active and the reactive power of the system pulsed load respectively (VA or p.u., W or p.u., var or p.u.),
- ω, f are the ship electric power system cyclic frequency and the respective frequency (rad/s or p.u., Hz or p.u.),
- ω_0, f_0 is the ship electric power system base cyclic frequency and the respective base frequency (rad/s or p.u., Hz or p.u.),
- Δf is the frequency deviation from its nominal value and is equal to $1-f$ (p.u.),
- J is the generator rotor inertia constant ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$),
- J' is the generator rotor inertia constant (s), which is equal to $J\cdot\omega_0^2/S_S$,
- T is the pulsed load period (s),
- dc is the pulsed load duty cycle (-),
- $\cos\varphi$ is the pulsed load power factor (-),
- I_L, I_{Ld}, I_{Lq} are the system load current and the respective d-axis, q-axis components (A or p.u.),
- R_f, K_f are the frequency droop and the integral gain of the frequency regulator,
- K, K_V are the proportional and the integral gain of automatic voltage regulator respectively,
- M_f^{lim} is the frequency modulation limit (-),
- M_V^{lim} is the voltage modulation limit (-).

The supplied load consists of a base load (including electric propulsion in the case of All Electric Ship) and a pulsed load. A typical pulsed load profile as that shown in Fig. 4a is used for the analysis that follows. System pulsed load is modeled by the following expressions:

$$\Delta S(t) = \Delta S \cdot \sum_{n=0}^{\infty} [u(t-n\cdot T) - u(t-(n+dc)\cdot T)] \quad (7)$$

$$\Rightarrow \Delta P(t) = \Delta S \cdot \cos\varphi \cdot \sum_{n=0}^{\infty} [u(t-n\cdot T) - u(t-(n+dc)\cdot T)] \quad (8)$$

where $u(t)$ is the unit step-function.

Constant power load modeling approach is fairly accurate for the examined range of frequency and voltage deviation, provided that that loads in modern ship configurations are often interfaced with the grid via power electronic converters, which provide fast dynamic reactions. So the respective profile of the total load demand is presented in Fig. 4b.

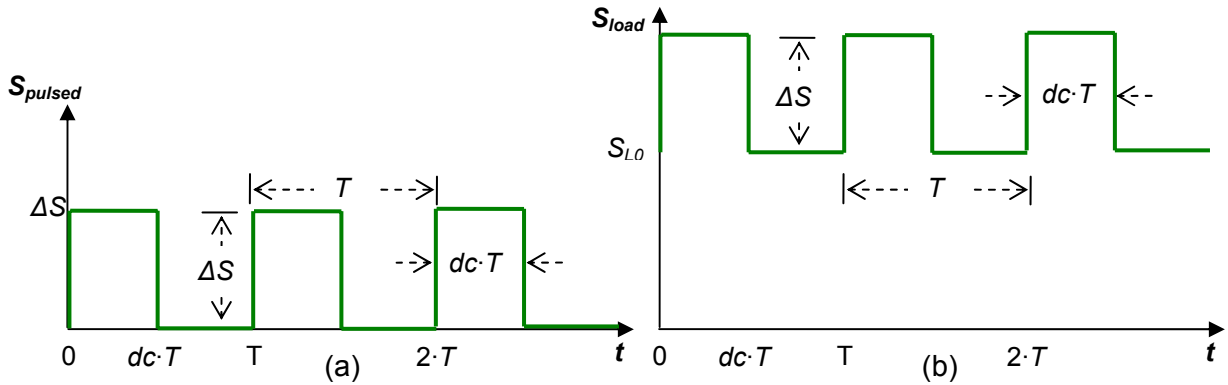


FIGURE 4. a) Pulsed load typical profile, b) total load typical profile.

Frequency Modulation Estimation

Here, the mathematical base of frequency modulation in the presence of pulsed load is presented. The detailed mathematical analysis can be found in [8].

If friction losses are neglected, then the motion equation of the generator rotor is:

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = T_M - T_G \quad (9)$$

Taking into consideration that P_M is the accelerating mechanical power, P_G the active power produced by the generator, ω is the rotor rotating speed, which is equal to frequency f in p.u., and $\Delta f = 1 - f$, equation (8) can be rewritten:

$$J' \cdot f \cdot \frac{d\Delta f}{dt} = \Delta P_G - \Delta P_M (p.u.) \quad (10)$$

If both primary and secondary frequency adjustment is taken into account, the frequency droop equation of the generator is:

$$\Delta P_M = R_f \cdot \Delta f + K_f \cdot \int_0^t \Delta f \cdot d\tau \quad (11)$$

Where, R_f is the frequency droop of the combination of the generator and its associated speed governor, K_f the integral gain of the speed controller.

Assuming that frequency is close to its nominal value ($f \approx 1$ p.u.) and taking into consideration the set of equations (8), (10) and (11) the following equation is obtained:

$$J' \cdot \frac{d\Delta f}{dt} = \Delta S \cdot \cos \varphi \cdot \sum_{n=0}^{\infty} [u(t - n \cdot T) - u(t - (n + dc) \cdot T)] - R_f \cdot \Delta f - K_f \cdot \int_0^t \Delta f \cdot d\tau \quad (12)$$

If

$$R_f^2 > 4 \cdot J' \cdot K_f \quad (13)$$

then by applying Laplace and inverse Laplace transformation to equation (12) frequency in time domain is equal to:

$$\Delta f(t) = \frac{\Delta S \cdot \cos \phi}{J' \cdot (p_2 - p_1)} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \left[\begin{array}{l} \left(e^{-p_1(t-nT)} - e^{-p_2(t-nT)} \right) \cdot u(t-nT) \\ - \left(e^{-p_1(t-(n+dc)T)} - e^{-p_2(t-(n+dc)T)} \right) \cdot u(t-(n+dc)T) \end{array} \right] \quad (14)$$

Where

$$p_1 = \frac{R_f - \sqrt{R_f^2 - 4 \cdot J' \cdot K_f}}{2 \cdot J'} \quad p_2 = \frac{R_f + \sqrt{R_f^2 - 4 \cdot J' \cdot K_f}}{2 \cdot J'} \quad (15)$$

According to (2) and taking into account the frequency function of eq. (14), frequency modulation becomes:

$$M_f = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{2f_n} = \frac{\Delta S \cdot \cos \phi \cdot c}{2 \cdot f_n \cdot \sqrt{R_f^2 - 4 \cdot J' \cdot K_f}} \quad (16)$$

with the parameter c calculated as follows:

$$c = c'(p_1, dc, T, t'_{\max 1}, t'_{\max 2}) - c'(p_2, dc, T, t'_{\max 1}, t'_{\max 2}) \quad (17)$$

where,

$$t'_{\max 1} = \max \left(\frac{1}{p_2 - p_1} \cdot \ln \left[\frac{p_2}{p_1} \cdot \frac{(e^{p_2 dc T} - 1)}{(e^{p_1 dc T} - 1)} \cdot \frac{(e^{p_1 T} - 1)}{(e^{p_2 T} - 1)} \right], 0 \right) \quad (18)$$

$$t'_{\max 2} = \min \left(\frac{1}{p_2 - p_1} \cdot \ln \left[\frac{p_2}{p_1} \cdot \frac{(e^{p_2 T} - e^{p_2 dc T})}{(e^{p_1 T} - e^{p_1 dc T})} \cdot \frac{(e^{p_1 T} - 1)}{(e^{p_2 T} - 1)} \right]; dc \cdot T \right) \quad (19)$$

$$c'(p, dc, T, t'_{\max 1}, t'_{\max 2}) = \frac{(e^{p dc T} - 1) \cdot e^{-p \cdot t'_{\max 1}} + (e^{p T} - e^{p dc T}) \cdot e^{-p \cdot t'_{\max 2}} - e^{p T} + e^{p dc T}}{e^{p T} - 1} \quad (20)$$

Taking into consideration STANAG-1008 constraint for frequency modulation, (M_f should be smaller than $M_f^{\lim} = 0.5\%$), then the following inequality is obtained:

$$\Delta S \cdot \cos \phi < \frac{2 \cdot M_f^{\lim} \cdot f_n \cdot J' \cdot (p_2 - p_1)}{c} \quad (21)$$

Inequality (21) defines a parabolic curve on the $S\text{-}\cos\phi$ plane, as it is also foreseen by STANAG-1008 (as shown in Fig. 2 and defined by inequality (4)) involving several parameters of ship electric power system model such as dc , T , R_f , J' , K_f which must be taken into account during the design of the electric power system. Moreover, it appears that the $S\text{-}\cos\phi$ limitation curve for frequency deviation is not unique as assumed in standards like STANAG-1008, but it depends on the system model parameters mentioned above. Inequality (21) has been

developed within time interval $t \in [0, \infty)$, while standards, like STANAG-1008, do not define the respective study time period of the frequency modulation.

R_f should not lie into the region defined by $R_f^2 = 4 \cdot J' \cdot K_f$ and $R_f^2 < 4 \cdot J' \cdot K_f$ as it might provoke significant frequency oscillations.

In general the respective upper limit for frequency modulation can be expressed by a general function of the following form for this simplified ship power system:

$$F_f(T, dc, J', K_f, R_f, \Delta S, \cos \varphi) \leq M_f^{\text{lim}} \quad (22)$$

Voltage Modulation Estimation

Here, the mathematical basis for the estimation of voltage modulation caused by pulsed loads is presented. The detailed mathematical analysis can be found in [9].

More specifically the electric behavior of the system shown in Fig. 3 is similar to the behavior of an RL circuit, where the RL circuit consists of the equivalent sub-transient reactance of the generator X' , the equivalent reactance X_C of the cables between generator output and load bus and the equivalent resistance R . The voltages at the ends of the RL branch, namely, the electromagnetic force E_F of synchronous generator and the load voltage V_L , are related with the current flowing through it by the following set of differential equations (all AC quantities are expressed to a rotating reference frame attached to voltage, V_L).

$$E_{Fd} = V_{Ld} + R \cdot I_{Ld} - (X' + X_C) \cdot I_{Lq} + \frac{X' + X_C}{\omega_0} \cdot \frac{dI_{Ld}}{dt} \quad (23)$$

$$E_{Fq} = \underbrace{V_{Lq}}_0 + R \cdot I_{Lq} + (X' + X_C) \cdot I_{Ld} + \frac{X' + X_C}{\omega_0} \cdot \frac{dI_{Lq}}{dt} \quad (24)$$

It is noted that the generator saturation has been ignored in this study.

The respective vector diagram is presented in Fig. 5, where phase angle θ is the load current phase angle with respect to load voltage vector V_L .

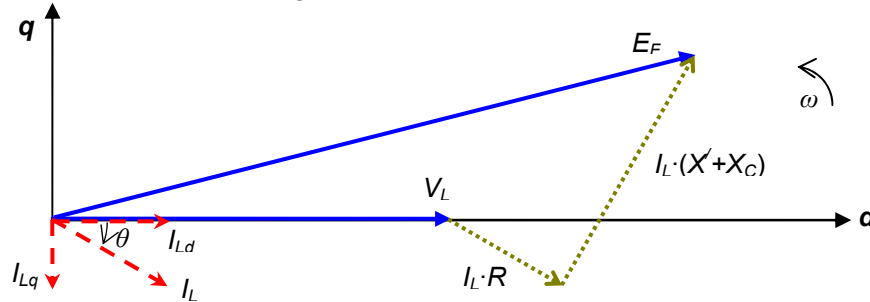


FIGURE 5. Vector diagram of simplified electrical circuit of ship power system.

For the operating conditions of the ship electric system studied in this paper, the so-called induction voltage terms (including current derivatives) in equations (23) and (24) can be neglected without affecting significantly the accuracy of the results [10, 11] and the following set of equations is formed:

$$E_{Fd} = V_{Ld} + R \cdot I_{Ld} - (X' + X_C) \cdot I_{Lq} \quad (25)$$

$$E_{Fq} = R \cdot I_{Lq} + (X' + X_C) \cdot I_{Ld} \quad (26)$$

The electromagnetic force E_F of synchronous generator is adjusted by the Automatic Voltage Regulator (AVR). For simplification purposes and without loss of generalization, a simple proportional – integral (PI) controller is assumed, while the generator bus is considered as the voltage control point. Thus, AVR can be modeled as following:

$$E_f = E_{f0} + K \cdot \Delta V_G + K_V \cdot \int_0^t \Delta V_G \cdot d\tau \quad (27)$$

with

$$\Delta V_G = V_{G0} - V_G = 1 - V_G \quad (28)$$

While

$$\Delta V_L = V_{L0} - V_L \quad (29)$$

$$\Delta S_L \cong S_L - S_{L0} \quad (30)$$

$$S_L = V_L \cdot I_L \text{ (root mean values)} \quad (31)$$

Where E_{F0} , V_{G0} , V_{L0} , S_{L0} are the synchronous generator electromagnetic force, the generator bus voltage, the load bus voltage and the system base load apparent power before the occurrence of the pulsed load, respectively.

Applying Laplace transformation, Taylor series expansion of E_F with respect to V_L and S_L approximated by 1st order terms and inverse Laplace transformation, load bus voltage variance is given by:

$$\Delta V_L(t) = \begin{cases} \Gamma_1 \cdot \Delta S \cdot \sum_{n=0}^{\infty} (u(t-n \cdot T) - (u(t-n \cdot T - dc \cdot T))) \\ + \Gamma_2 \cdot \Delta S \cdot \sum_{n=0}^{\infty} (e^{-\gamma \cdot (t-n \cdot T)} \cdot u(t-n \cdot T) - e^{-\gamma \cdot (t-n \cdot T - dc \cdot T)} \cdot (u(t-n \cdot T - dc \cdot T))) \end{cases} \quad (32)$$

where

$$V_{G0}^2 = 1 = V_{L0}^2 + \frac{R^2 + X_C^2}{V_{L0}^2} \cdot S_{L0}^2 + 2 \cdot (R \cdot \cos \varphi + X_C \cdot \sin \varphi) \cdot S_{L0} \quad (33)$$

$$V_{L0} = \sqrt{\frac{1 - 2 \cdot (R \cdot \cos \varphi + X_C \cdot \sin \varphi) \cdot S_{L0} + \left((2 \cdot (R \cdot \cos \varphi + X_C \cdot \sin \varphi) \cdot S_{L0} - 1)^2 - 4 \cdot (R^2 + X_C^2) \cdot S_{L0}^2 \right)^{1/2}}{2}} \quad (34)$$

$$E_{F0} = \left(V_{L0}^2 + \frac{R^2 + X^2}{V_{L0}^2} \cdot S_{L0}^2 + 2 \cdot (R \cdot \cos \varphi + X \cdot \sin \varphi) \cdot S_{L0} \right)^{1/2} \quad (35)$$

$$A_1 = \frac{R \cdot \cos \varphi + X \cdot \sin \varphi + \frac{R^2 + X^2}{V_{L0}^2} \cdot S_{L0}}{E_{f0}} \quad (36)$$

$$A_2 = \frac{V_{L0} - \frac{R^2 + X^2}{V_{L0}^3} \cdot S_{L0}^2}{E_{f0}} \quad (37)$$

$$B_1 = \frac{R \cdot \cos \varphi + X_C \cdot \sin \varphi + \frac{R^2 + X_C^2}{V_{L0}^2} \cdot S_{L0}}{V_{G0}} \quad (38)$$

$$B_2 = \frac{V_{L0} - \frac{R^2 + X_C^2}{V_{L0}^3} \cdot S_{L0}^2}{V_{G0}} \quad (39)$$

$$\Gamma_1 = \frac{B_1}{B_2} > 0 \quad (40)$$

$$\Gamma_2 = \frac{B_2 \cdot A_1 - B_1 \cdot A_2}{B_2 \cdot (A_2 + B_2 \cdot K)} > 0 \quad (41)$$

$$\gamma = \frac{B_2 \cdot K_V}{A_2 + B_2 \cdot K} \quad (42)$$

According to (1) and taking into account the voltage variance function of eq. (32), voltage modulation becomes:

$$M_V = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{2 \cdot V_n} = \frac{\max \Delta V_L - \min \Delta V_L}{2 \cdot V_n} = \frac{\Gamma_1 + \Gamma_2 \cdot \frac{2 \cdot e^{\gamma \cdot T} - e^{\gamma \cdot T \cdot (1-dc)} - 1}{e^{\gamma \cdot T} - 1} \cdot \Delta S}{2 \cdot V_n} \quad (43)$$

Taking into consideration STANAG-1008 constraint for voltage modulation, (M_V should be smaller than $M_V^{\lim} = 2\%$), the following inequality is obtained:

$$M_V < M_V^{\lim} \quad (44)$$

If it is assumed that $R \approx 0$, $V_n \approx 1$ p.u., $E_f \approx 1$ p.u., $X \approx X_C$, $X + X_C \approx 2 \cdot X$ and $1 - X^2 \cdot S_{L0}^2 \approx 1 - X_C^2 \cdot S_{L0}^2$, then (43) turns into,

$$M_V = \frac{\Delta S}{2} \cdot [Z_1 + Z_2 \sin \varphi] \quad (45)$$

with

$$Z_1 = \frac{X^2 \cdot S_{L0}}{1 - X^2 \cdot S_{L0}^2} + \frac{2 \cdot X' \cdot X \cdot S_{L0}}{(K+1) \cdot (1 - X^2 \cdot S_{L0}^2)^2} \cdot \frac{2 \cdot e^{\gamma \cdot T} - e^{\gamma \cdot T \cdot (1-dc)} - 1}{e^{\gamma \cdot T} - 1} \quad (46)$$

$$Z_2 = \frac{X}{1 - X^2 \cdot S_{L0}^2} + \frac{X' \cdot (1 + X^2 \cdot S_{L0}^2)}{(K + 1) \cdot (1 - X^2 \cdot S_{L0}^2)^2} \cdot \frac{2 \cdot e^{\gamma \cdot T} - e^{\gamma \cdot T \cdot (1 - dc)} - 1}{e^{\gamma \cdot T} - 1} \quad (47)$$

Then the following inequality is obtained:

$$\cos \varphi > \sqrt{1 - \left(\frac{Z_1}{Z_2}\right)^2 + \frac{4 \cdot M_V^{\text{lim}} \cdot Z_1}{Z_2^2} \cdot \frac{1}{\Delta S} - \frac{4 \cdot (M_V^{\text{lim}})^2}{Z_2^2} \cdot \frac{1}{\Delta S^2}} \quad (48)$$

Considering that the products $X^2 \cdot S_{L0}^2$, $X_C^2 \cdot S_{L0}^2$ and $X \cdot X_C \cdot S_{L0}$ are negligible, then (48) becomes,

$$\cos \varphi > \sqrt{1 - \left(\frac{\alpha}{\Delta S}\right)^2} \quad (49)$$

with

$$\alpha = \frac{2 \cdot M_V^{\text{lim}}}{X + \frac{X'}{(K + 1)} \cdot \frac{2 \cdot e^{\gamma \cdot T} - e^{\gamma \cdot T \cdot (1 - dc)} - 1}{e^{\gamma \cdot T} - 1}} \quad (50)$$

that is of the same form with the inequality proposed in STANAG 1008 (see eq. (5)).

Inequalities (44), (48) and (49) define limitation curves on the S-cos φ plane similar to the one foreseen by STANAG-1008, which however, include several parameters of ship electric power system model such as dc , T , K , K_I , X_C , X' , S_{L0} . Therefore, it can be concluded that S-cos φ limitation curve for voltage deviation is not unique as assumed in standards like STANAG-1008, but it depends on the system model parameters mentioned above which must be taken into account during the design of the ship electric power system. Inequalities (48) and (49) have been also developed within time interval $t \in [0, \infty)$, while standards, like STANAG-1008, do not define the respective study time period of the voltage modulation.

In general the respective upper limit for voltage modulation can be expressed by a general function of the following form:

$$F_V(T, dc, X_C, R, X', K, K_I, S_{L0}, \Delta S, \cos \varphi) \leq M_V^{\text{lim}} \quad (51)$$

NUMERICAL ANALYSIS OF FREQUENCY & VOLTAGE MODULATION IN A SIMPLIFIED SHIP'S ELECTRIC POWER SYSTEM

Simplified Electrical Circuit of a S Frigate Power System

The electric power system of a Hellenic Naval's S frigate consists of 4 generators Smit/Slikkerver DG 77/48/60 with nominal line to line voltage 450 V, nominal frequency 60 Hz, nominal apparent power 937,5 kVA, nominal active power 750 kW, nominal power factor 0,80 (ind.) and direct axis transient reactance 0,225 p.u. (for base power equal to the nominal power of one generator). The load demand of the frigate is usually between 500 to 1500 kVA with a typical average load of 750 kVA approximately, which is equal to 80% of the nominal apparent power of one generator. For reliability reasons two generators operate in parallel, while the other

two can be started in few seconds, if any of the two main generators is shut down or the demand load exceed a predifened limit.

For the rest of the analysis, the base voltage of the power system is 450 V and the system base apparent power is 1875 kVA ($\approx 2 \cdot 937,5$ kVA/generator). The respective direct axis transient reactance of the equivalent generator is obtained as 0,225 p.u. according to Millman's theorem. If the electromagnetic force, E_f , of each generator are of the same value then the equivalent E_f is also the same. The typical average load of 750 kVA corresponds to 0,4 p.u. of the system base apparent power. The generator rotor inertia constant (s) J' of the equivalent generator is the same with that of a single generator, with a typical value of 4 s.

Taking into consideration that the maximum voltage drop is 6% then the respective equivalent impedance of the cable can not exceed 0,15 p.u. for a typical average load of 750 kVA, and 0,075 p.u. for a maximum load of 1500 kVA. A typical value of impedance is considered of 0,0375 p.u.. It is noted that the ratio of impedance / resistance of a E1VV cable varies from 9,5 for cross-section of 1,5mm² to 1232 for cross-section of 300 mm². In this analysis, this ratio is assumed 50 corresponding to the cross-section of 10 mm², and the respective resistance 50 times smaller of the respective impedance, that is 0,00075 p.u..

Based on the respective theoretical analysis pulsed load period, T , can take any value with usual values between 1 ms to 10 s, while the duty cycle, $d.c.$, varies between 0% to 100%. The respective typical values of pulsed period and duty cycle are 1 s and 50%.

The parameters of the frequency regulator (frequency drop R_f and integral gain K_f) and automatic voltage regulator (proportional K and integral gain K_V) can be selected properly so that no operation problems occur. Respective typical values are: $R_f=20$, $K_f=10$, $K=5$, $K_V=5$.

Modulation Limitations for the Simplified Electrical Circuit of a S Frigate Power System: Basic Scenario

Based on the theoretical analysis the frequency modulation limit is estimated by ineq. (21) with $M_f^{\text{lim}} = 0.5\%$ (the STANAG-1008 limit) and the respective curve is presented together with the respective curves of STANAG 1008 for frequency and voltage modulation in Fig. 6. It is obvious that the unacceptable operating area due to frequency modulation increases, but large part of it is cancelled by the operating area determined by the STANAG 1008 voltage modulation (green dotted line). This means that there is an area of $S \cdot \cos\phi$ which is allowed by the STANAG-1008 curves, while it is not allowed by the theoretically obtained frequency modulation limit curve.

According to the analytical theoretical analysis the voltage modulation limit is estimated by ineq. (44) with $M_V^{\text{lim}} = 2.0\%$ (the STANAG-1008 limit) and the respective curve is presented together with the curves of STANAG 1008 for frequency and voltage modulation in Fig. 7. The respective unacceptable operating area due voltage modulation limit violation decreases significantly for big values of power factor ($\cos\phi > 0,4$). While for small values of power factor ($\cos\phi < 0,4$) the opposite behaviour occurs. This means that there is an area of $S \cdot \cos\phi$ which is allowed by the STANAG-1008 curves, while it is not allowed by the theoretically obtained voltage modulation limit curve.

If inequality (49) is used with $M_V^{\text{lim}} = 2.0\%$ (the STANAG-1008 limit), then Fig. 8 is obtained, where the unacceptable operating area due to voltage modulation limit violation has decreased more than the previous one for small values of power factor. However, in this case study it can not be used, as the equivalent impedance of the cables X_C is smaller than the equivalent direct axis transient reactance of the equivalent generator X' , while in inequality (49) $X_C \gg X'$ is assumed.

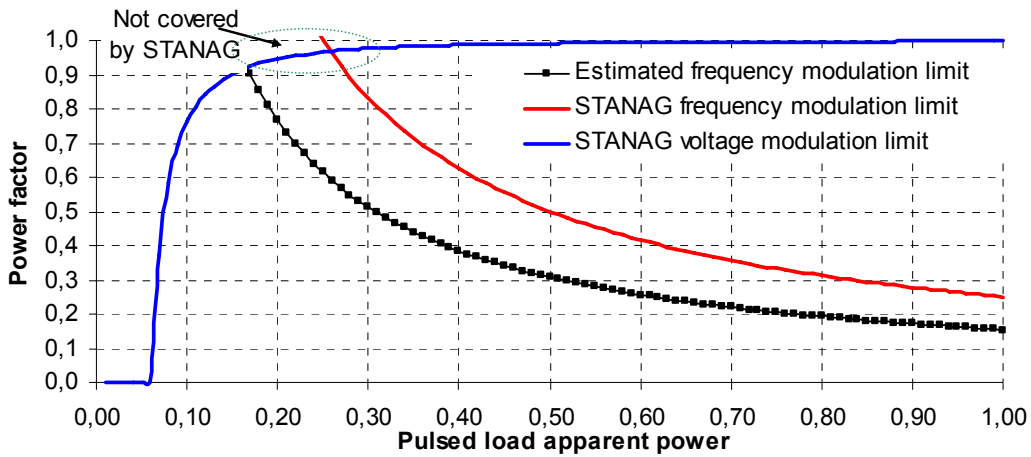


FIGURE 6. Power factor vs pulse load apparent power of the frequency modulation for the basic scenario of the simplified power system of an S frigate.

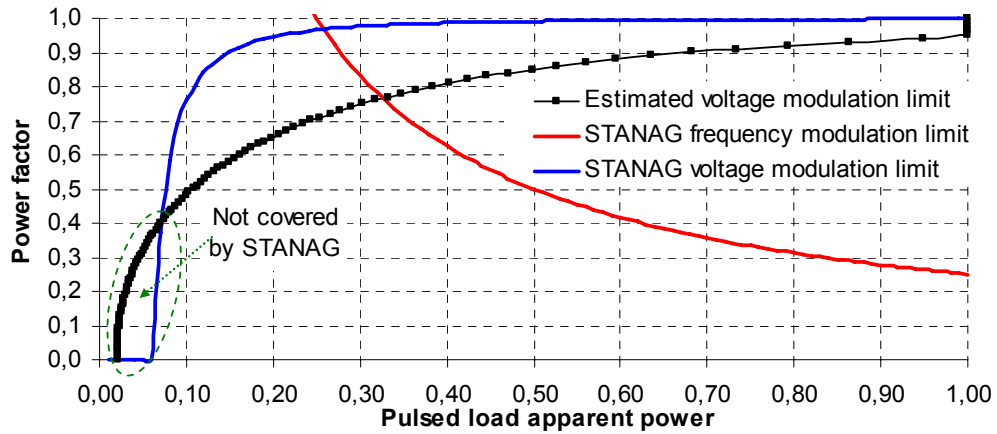


FIGURE 7. Power factor vs pulse load apparent power of the voltage modulation for the basic scenario of the simplified power system of an S frigate.

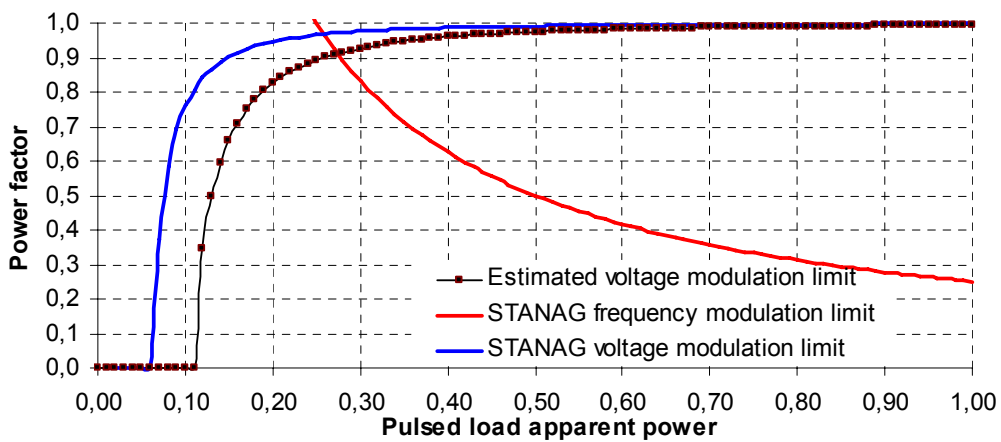


FIGURE 8. Power factor vs pulse load apparent power of the approximated voltage modulation for the basic scenario of the simplified power system of an S frigate.

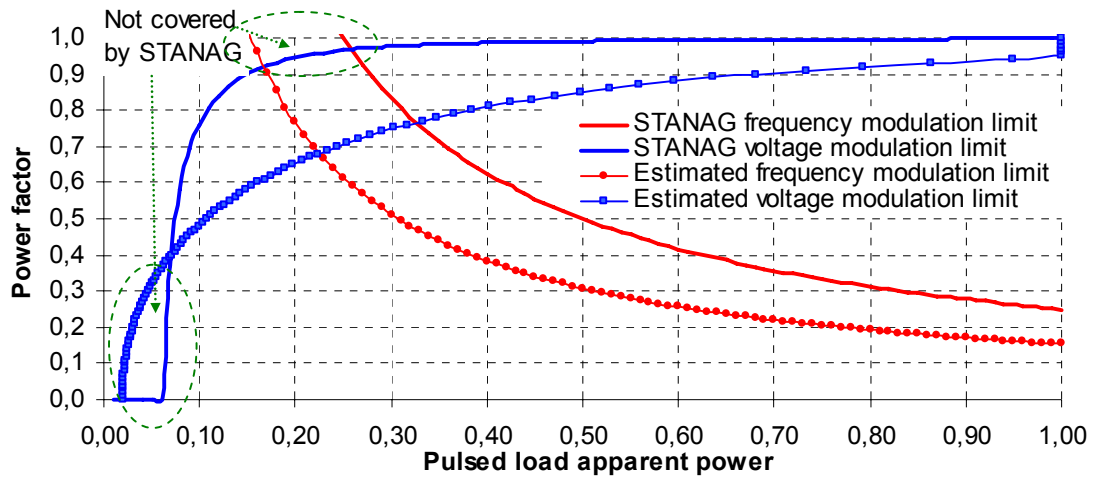


FIGURE 9. Power factor vs pulse load apparent power of the frequency modulation and the voltage modulation of the theoretical analysis for the basic scenario of the simplified power system of an S frigate.

In Fig. 9 the limit curves for the voltage and the frequency modulation are presented together with the respective ones of STANAG 1008, where the difference between the unacceptable operating areas between the theoretical analysis and STANAG 1008 becomes apparent. STANAG 1008 happens to be stricter than the theoretically obtained model in case of voltage modulation, especially for power factor larger than 0.4 in case of frequency modulation is more optimistic.

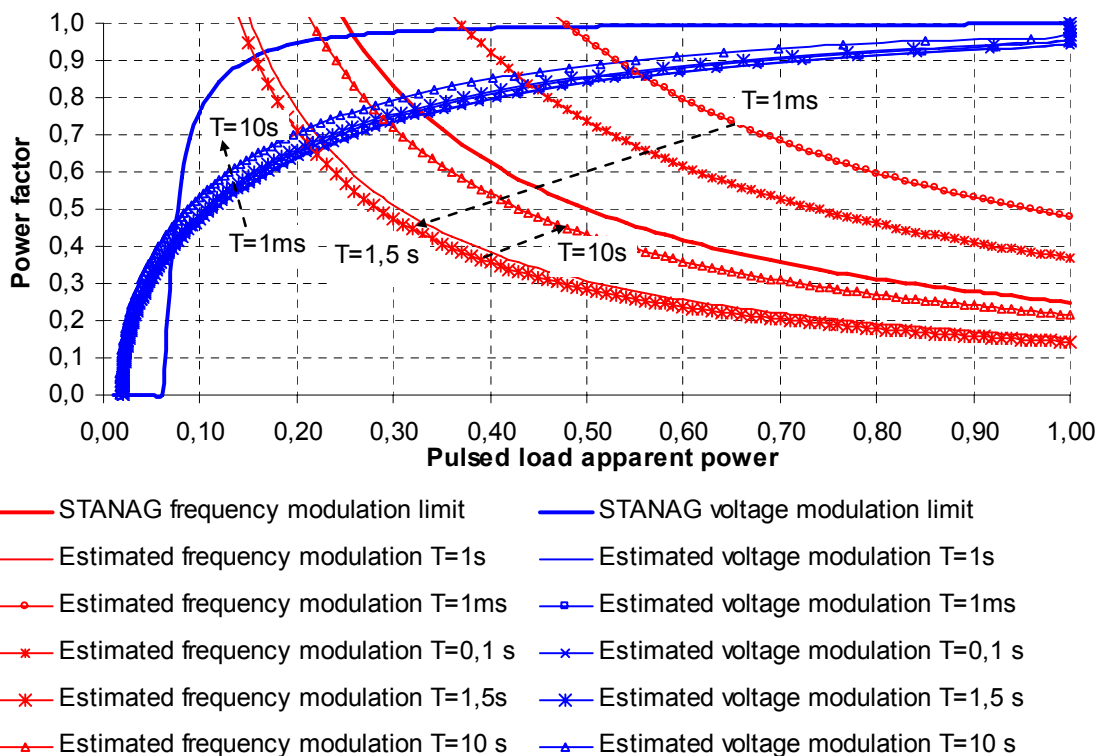


FIGURE 10. Power factor vs pulse load apparent power of the frequency modulation and the voltage modulation of the theoretical analysis for different values of the time period for the pulsed load of the simplified power system of an S frigate.

Modulation Limitations for the Simplified Electrical Circuit of a S Frigate Power System: Time Period of Pulsed Load

Pulsed load period affects both frequency and voltage modulation. The respective analysis has been developed for a range of values from 1 ms up to 10 s as following: from 1 ms up to 20 ms with a time step of 1 ms, from 20 ms up to 100 ms with a time step of 10 ms, from 200 ms up to 2 s with a step of 100 ms, from 2 s up to 10 s with a step of 1 s.

In Fig. 10 the respective results are presented. The unacceptable operating area due to frequency modulation limit violation increases for pulsed load period less than 1,5 s, while it decreases for larger values. The theoretical curve coincides to STANAG curve for $T=0,32s$, approximately. The unacceptable operating area of the theoretical analysis for pulsed load period greater than 0,32s is larger than the respective one of STANAG 1008.

The unacceptable operating area due to voltage modulation increases for pulsed load period ranging from 1 ms to 10 s. However, the impact is not significant while the unacceptable operating area obtained by the theoretical analysis is smaller than the respective one of STANAG 1008; especially for power factor values greater than 0,5.

Modulation Limitations for the Simplified Electrical Circuit of a S Frigate Power System: Duty Cycle of Pulsed Load

Pulsed load duty cycle $d.c.$ affects both frequency and voltage modulation. The respective analysis has been developed for a range of values from 1% up to 99% with a step of 1%.

In Fig. 11 the respective results for pulsed load duty cycle are presented. The unacceptable operating area due to frequency modulation limit violation increases until pulsed load duty cycle becomes equal to 65% ~ 70%; while it decreases for larger values. The theoretical curve coincides to STANAG's one for $d.c.= 20\%$, approximately. The unacceptable operating area as obtained by the theoretical analysis for pulsed load duty cycle greater than 20% is larger than the respective one as obtained by STANAG 1008.

The unacceptable operating area due to voltage modulation limit violation increases with pulsed load duty cycle, but the observed increase is small while the unacceptable operating area obtained by the theoretical analysis is smaller than STANAG's respective one for power factor larger than 0,5.

Modulation Limitations for the Simplified Electrical Circuit of a S Frigate Power System: Generation Rotor Inertia

Generator rotor inertia constant J affects only frequency modulation. The values of this parameter should satisfy the following inequality according to the respective theoretical analysis (see inequality (13)):

$$R_f^2 > 4 \cdot J' \cdot K_f \Rightarrow J' < \frac{R_f^2}{4 \cdot K_f} \quad (52)$$

Taking into consideration that in the basic scenario, $R_f = 20$, $K_f = 10$ Hz, then J should be smaller than 10 s. The respective analysis has been developed for J values ranging from 0 s up to 10 s as following: from 0 ms up to 30 ms with a step of 1 ms, from 30 ms up to 200 ms with a step of 10 ms, from 200 ms up to 9,9 s with a step of 100 ms, from 9,9 s up to 9,99 s with a step of 10 ms.

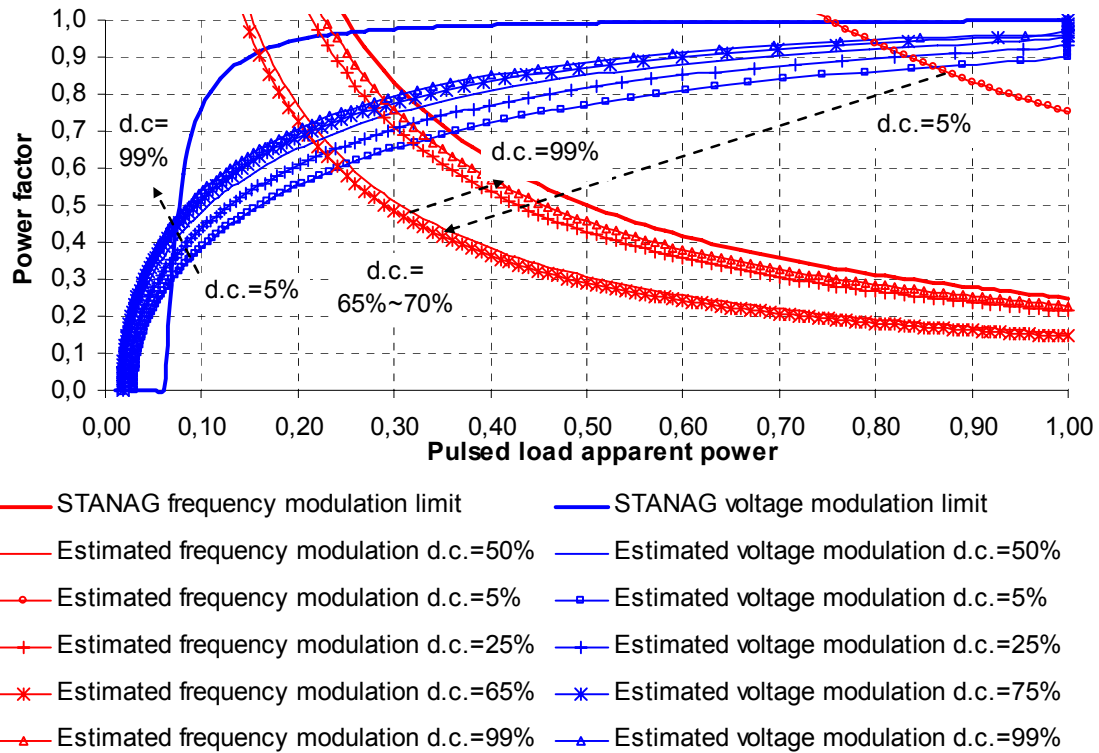


FIGURE 11. Power factor vs pulse load apparent power of the frequency modulation and the voltage modulation of the theoretical analysis for different values of the duty cycle for the pulsed load of the simplified power system of an S frigate.

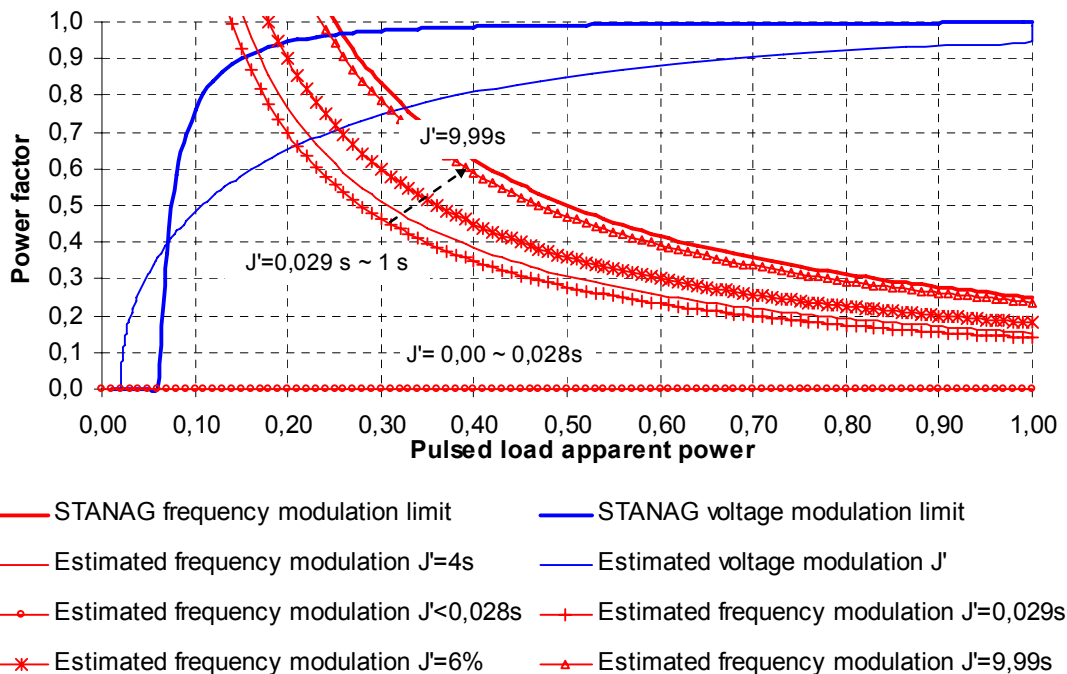


FIGURE 12. Power factor vs pulse load apparent power of the frequency modulation and the voltage modulation of the theoretical analysis for different values of the generator rotor inertia constant of the simplified power system of an S frigate ($0 \leq J' < 10$ s).

In Fig. 12, the respective results considering different values of generator rotor inertia constant are presented. The unacceptable operating area due frequency modulation violation decreases in a non-linear fashion, as generator rotor inertia increases. For extremely small values (not met in practice) the respective curve becomes horizontal. The theoretically obtained limit curve tends to coincide with STANAG's one for large values of J' . Values larger than 10 s lead to frequency oscillations and they should be avoided [8]. The unacceptable operating area as obtained by the theoretical analysis is larger than the respective one obtained by STANAG 1008. The effect of J' is limited practically, as J' can be calculated easily and it has not significant variations throughout generator life.

Modulation Limitations for the Simplified Electrical Circuit of a S Frigate Power System: Frequency Drop of Frequency Regulator

Frequency droop R_f applied to the generator frequency regulator affects only frequency modulation. The values of this parameter should satisfy the following inequality according to the respective theoretical analysis (see inequality (13)):

$$R_f^2 > 4 \cdot J' \cdot K_f \Rightarrow R_f > \sqrt{4 \cdot J' \cdot K_f} \quad (53)$$

Taking into consideration that in the basic scenario, $J' = 4$ s, $K_f = 10$ Hz, then the R_f should be larger than 12,649. The usual values of R_f lie between 20 and 100. The respective analysis has been developed for R_f ranging from 12,65 up to 150 as following: from 12,65 up to 13 with a step of 0,05, from 13 up to 20 with a step of 1, from 20 up to 150 with a step of 5.

In Fig. 13, the respective results are presented. The unacceptable operating area due frequency modulation limit violation decreases in a nonlinear fashion as R_f increases. The theoretically obtained curve coincides to STANAG's one for $R_f = 36$, approximately. R_f practically should be large enough so that the respective unacceptable operation area due to frequency modulation limit violation be suppressed. However, large values of R_f can lead to significant active power generation variations even for small variations of frequency, which is not desirable for system stability reasons.

Modulation Limitations for the Simplified Electrical Circuit of a S Frigate Power System: Integral Gain of Frequency Regulator

The integral gain of generator frequency regulator affects only frequency modulation. K_f should satisfy the following inequality according to the respective theoretical analysis (see inequality (13)):

$$R_f^2 > 4 \cdot J' \cdot K_f \Rightarrow K_f < \frac{R_f^2}{4 \cdot J'} \quad (54)$$

Taking into consideration that, $R_f = 20$ and $J' = 4$ s for the the basic scenario then K_f should be smaller than 25 Hz. It should also be positive, because, if $K_f = 0$ then no secondary frequency is possible leading to a permanent, "steady-state", frequency error [8]. The following analysis has been developed for K_f ranging from 1 mHz up to 25 Hz as following: from 1 mHz up to 20 mHz with a step of 1 mHz, from 20 mHz up to 100 mHz with a step of 10 mHz, from 100 mHz up to 1 Hz with a step of 100 mHz, from 1 Hz up up to 24 Hz with a step of 1 Hz, from 24,1 Hz up to 24,9 Hz with a step of 100 mHz.

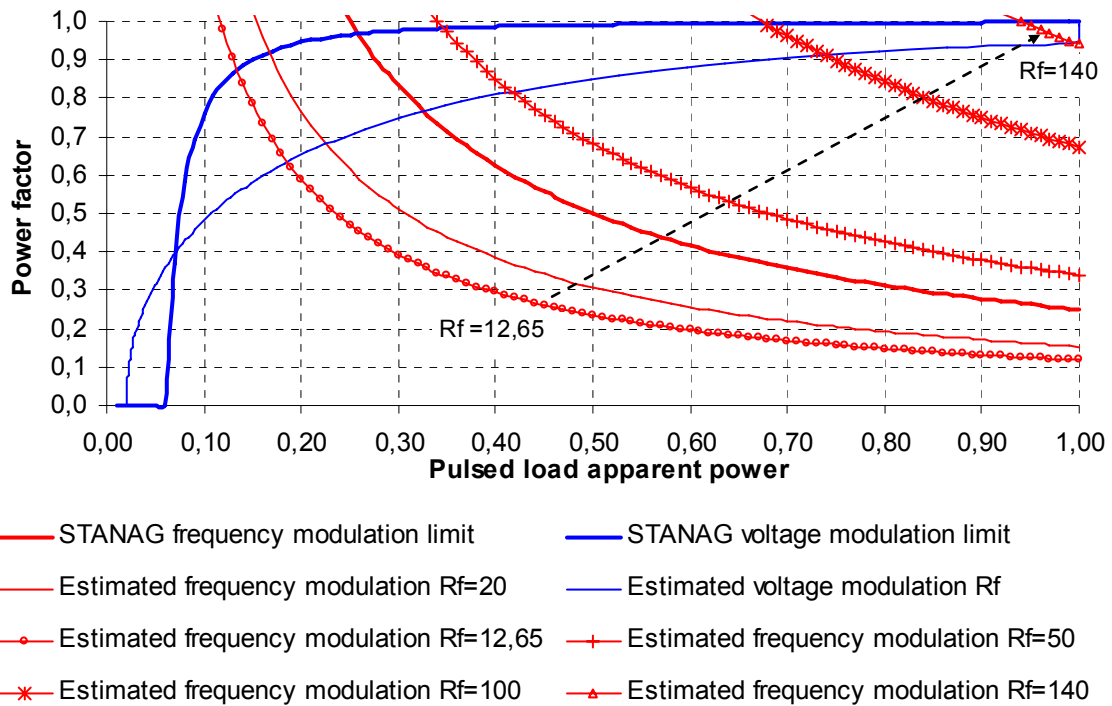


FIGURE 13. Power factor vs pulse load apparent power of the frequency modulation and the voltage modulation of the theoretical analysis for different values of the frequency drop of the frequency regulator of the simplified power system of an S frigate ($R_f \geq 12,65$).

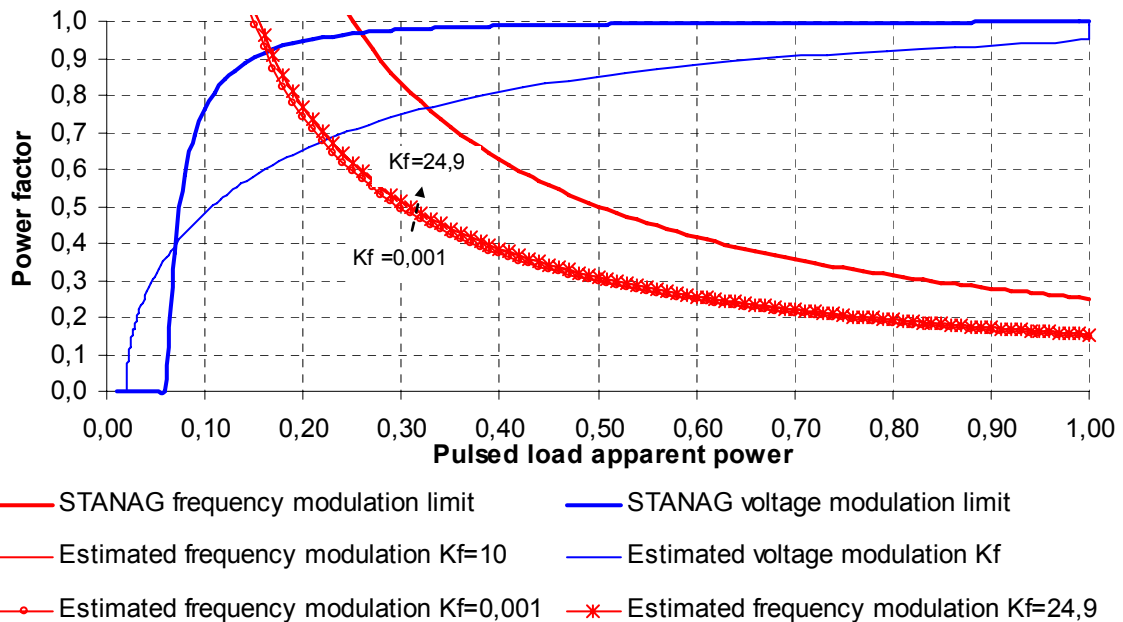


FIGURE 14. Power factor vs pulse load apparent power of the frequency modulation and the voltage modulation of the theoretical analysis for different values of the integral gain of the frequency regulator of the simplified power system of an S frigate ($0 < K_f < 25$ Hz).

In Fig. 14, the respective results are presented. The unacceptable operating area due to frequency modulation limit violation decreases extremely slightly, as K_f increases. Practically, the effect of K_f is very limited.

Modulation Limitations for the Simplified Electrical Circuit of a S Frigate Power System: Equivalent Reactance of Cables

The equivalent reactance of the cables X_C affects only voltage modulation. Taking into consideration maximum allowable voltage drop the following analysis has been developed for X_C ranging from 0 up to 0,075 p.u. with a step of 0,005 p.u..

In Fig. 15, the respective results are presented. The unacceptable operating area due to voltage modulation limit violation increases significantly as X_C increases. The unacceptable operating area as obtained by the theoretical analysis is smaller than the respective one of STANAG 1008 for all power factor values if X_C is smaller than 0,035 p.u.. However, if X_C is larger than 0,0385 p.u. then voltage modulation limit would not be satisfied for small pulsed load power factor, as it is obtained by the respective curves.

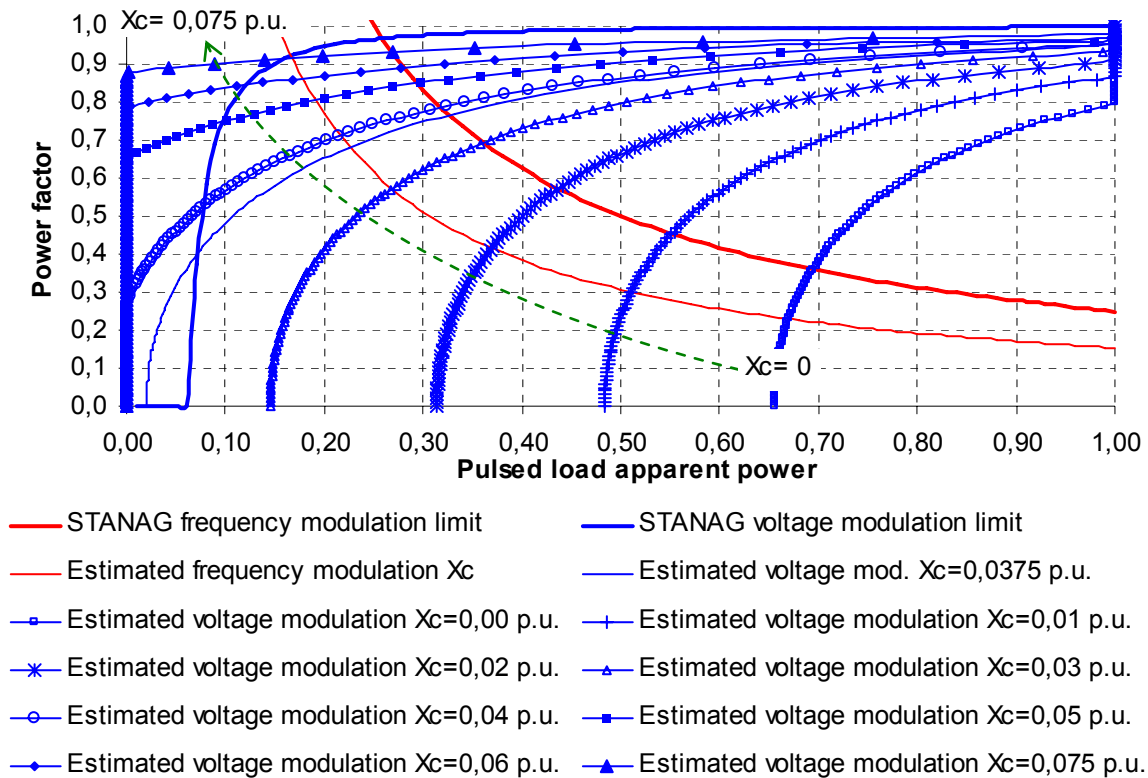


FIGURE 15. Power factor vs pulse load apparent power of the frequency modulation and the voltage modulation of the theoretical analysis for different values of the equivalent reactance of cables of the simplified power system of an S frigate ($0 \leq X_C \leq 0,075$ p.u.).

Modulation Limitations for the Simplified Electrical Circuit of a S Frigate Power System: Equivalent Resistance of Cables

The equivalent resistance of the cables, R , affects only voltage modulation. Taking into consideration the maximum allowable voltage drop and the proportion between cable reactance

and resistance the resistance can be 5 to 1500 times smaller than the respective reactance of usual cable types. Next, the effect of ratio r is investigated, where:

$$r < \frac{X_c}{R} \quad (55)$$

In Fig. 16, the respective results for different values of r are presented. The unacceptable operating area due to voltage modulation limit violation decreases slightly as r increases (cable resistance decreases). However, it should be noted that the critical affecting factor is the cable reactance.

Modulation Limitations for the Simplified Electrical Circuit of a S Frigate Power System: Equivalent Sub-transient Reactance of Generator

The equivalent sub-transient reactance of the generator, X' , affects only voltage modulation. Taking into consideration the practical limitations for the reactance of a synchronous machine it should vary from 9% up to 22% p.u. for turbo-generators, from 12% up to 30% for salient-pole generators with damper winding and from 20% up to 40% for salient-pole generators without damper winding [12]. The respective analysis has been developed for a range of values from 0,09 p.u. up to 0,040 p.u. with a step of 0,01 p.u..

In Fig. 17 the respective results are presented for variable X' . The unacceptable operating area due to voltage modulation limit violation increases slightly as X' increases. The effects of X' are practically limited as it can be calculated and it constitutes a technical characteristic throughout generator lifetime.

Modulation Limitations for the Simplified Electrical Circuit of a S Frigate Power System: Apparent Power of System Base Load without Pulsed Load

The apparent power of system base load S_{L0} affects voltage modulation only. S_{L0} varies from 0 p.u. up to 1 p.u. theoretically, although in a power system of two generators S_{L0} is limited to 0,5 p.u., so that, if one generator is shut down the other generator can take over all the remaining load. Here, the respective analysis has been developed for S_{L0} ranging from 0,00 p.u. up to 1,00 p.u. with a step of 0,01 p.u.. In Fig. 18, the respective results for different values of system base load apparent power are presented.

The unacceptable operating area due to voltage modulation limit violation increases slightly as S_{L0} increases. This is expected under the assumption the system remains stable and reliable. S_{L0} becomes a crucial affecting factor as it varies during ship power system operation. If S_{L0} is larger than 0,7 p.u. then voltage modulation limitation criterion would not be satisfied for small pulsed load power factor values according to the obtained limitation curves.

Modulation Limitations for the Simplified Electrical Circuit of a S Frigate Power System: Proportional Gain of Automatic Voltage Regulator of Generator

The proportional gain of generator automatic voltage regulator, K , affects only voltage modulation. Theoretically, K could take any positive value; however it can not be arbitrarily large as the ratio K/K_V should be small enough to ensure fast response of the Proportional-Integral Controller (PID).

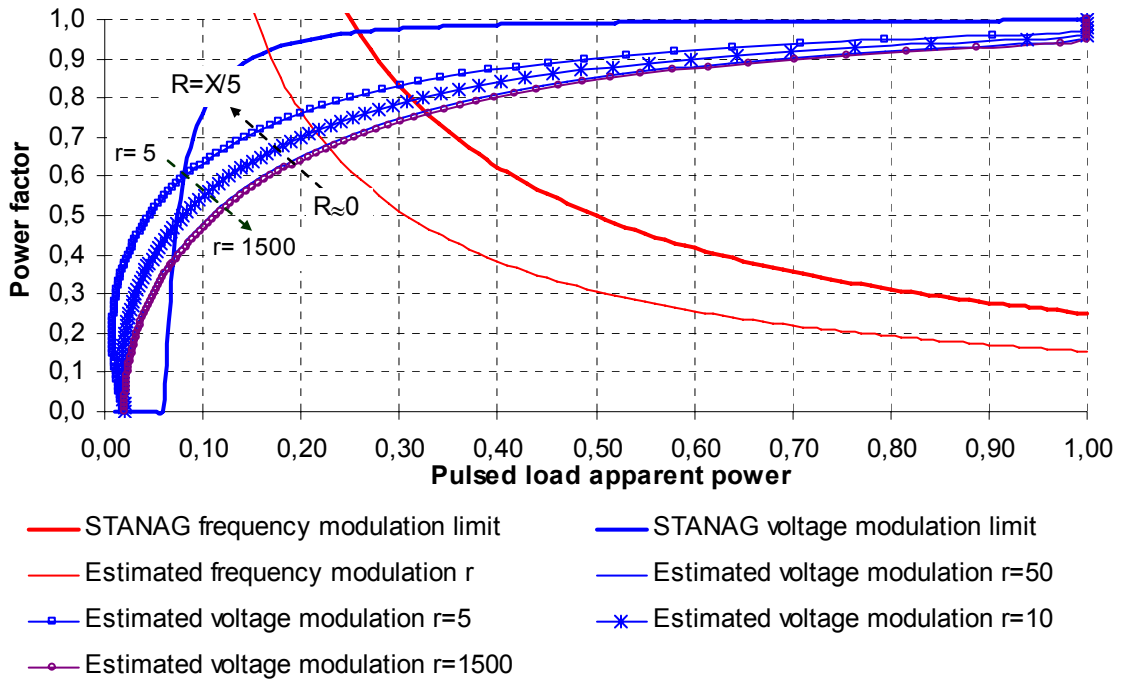


FIGURE 16. Power factor vs pulse load apparent power of the frequency modulation and the voltage modulation of the theoretical analysis for different values of the respective ratio between equivalent reactance to equivalent resistance of cables of the simplified power system of an S frigate ($5 \leq r \leq 1500$).

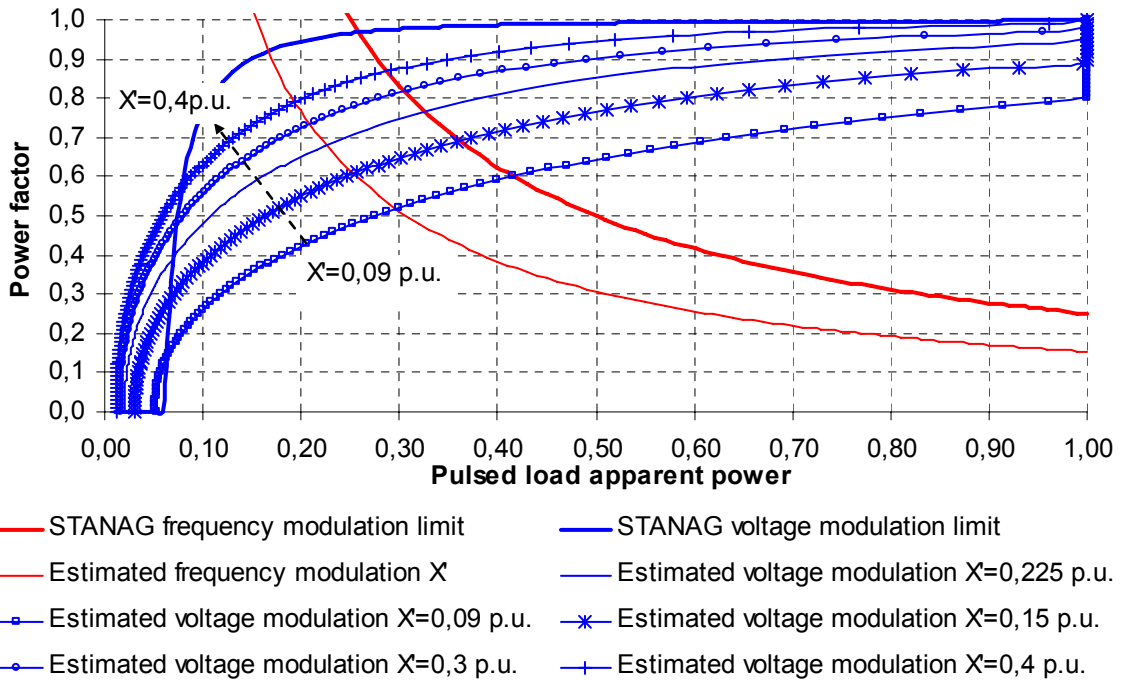


FIGURE 17. Power factor vs pulse load apparent power of the frequency modulation and the voltage modulation of the theoretical analysis for different values of the equivalent sub-transient reactance of generator of the simplified power system of an S frigate ($0,09 \text{ p.u.} \leq X' \leq 0,40 \text{ p.u.}$).

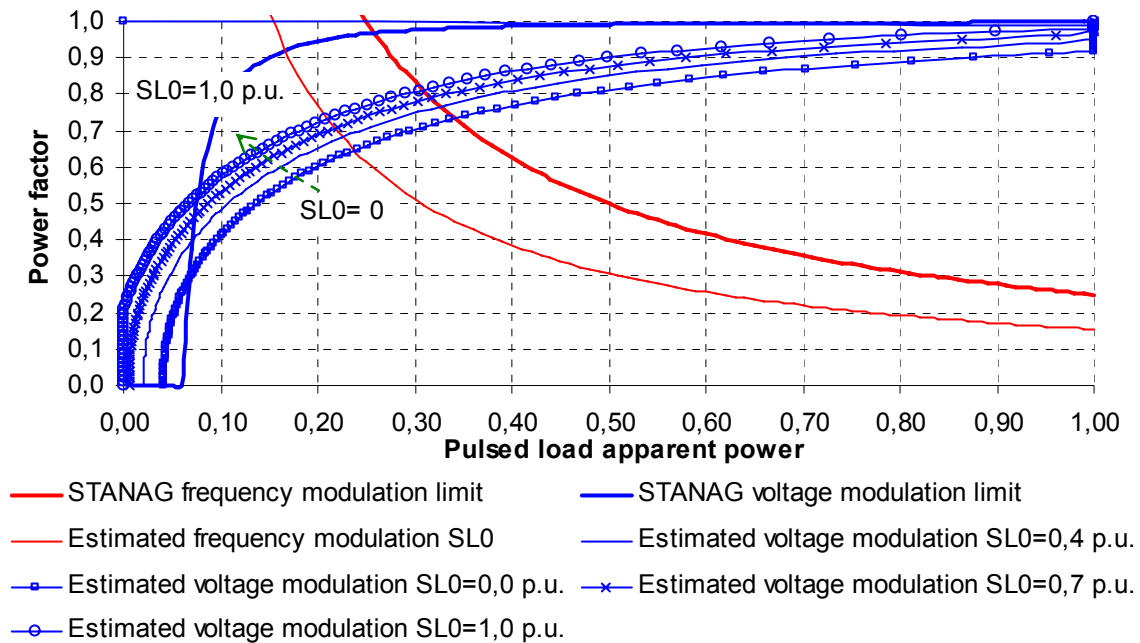


FIGURE 18. Power factor vs pulse load apparent power of the frequency modulation and the voltage modulation of the theoretical analysis for different values of the apparent power of the system base load of the simplified power system of an S frigate ($0,00 \text{ p.u.} \leq S_{L0} \leq 1,00 \text{ p.u.}$).

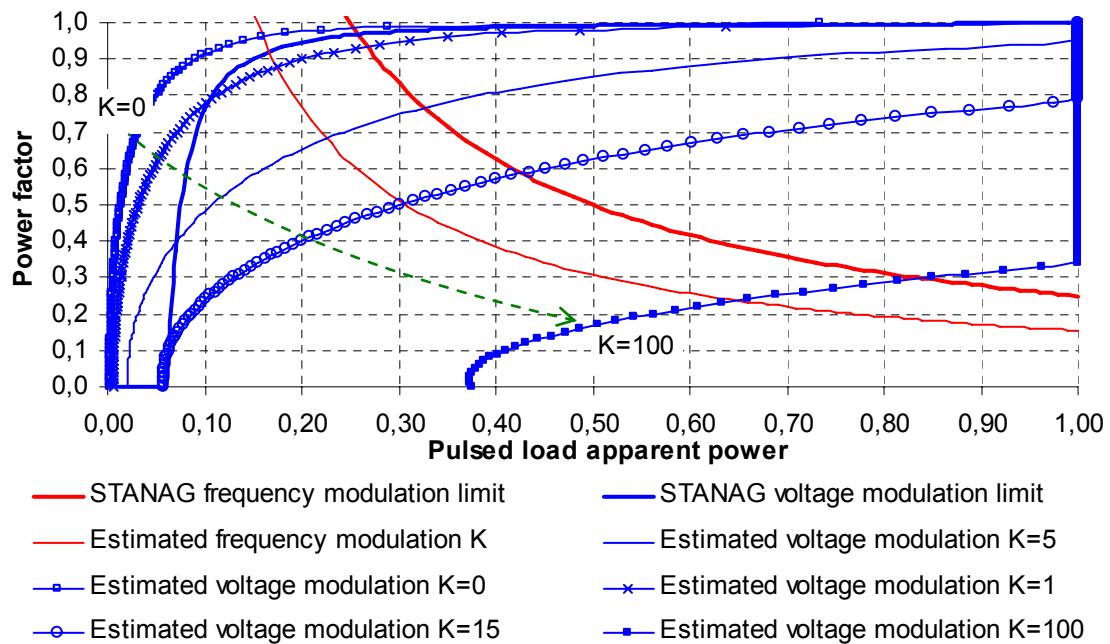


FIGURE 19. Power factor vs pulse load apparent power of the frequency modulation and the voltage modulation of the theoretical analysis for different values of the proportional gain of the automatic voltage regulator of the simplified power system of an S frigate.

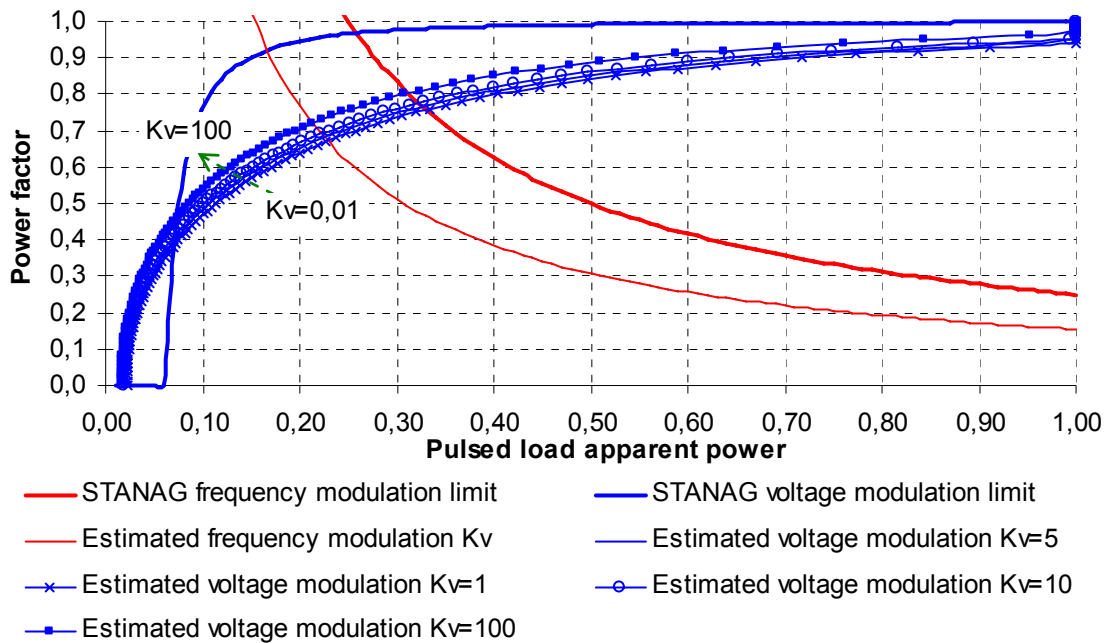


FIGURE 20. Power factor vs pulse load apparent power of the frequency modulation and the voltage modulation of the theoretical analysis for different values of the integral gain of the automatic voltage regulator of the simplified power system of an S frigate.

Here, the following analysis has been developed for K ranging from 0 up to 100 with a step of 1. In Fig. 19, the results for different values of K are presented. The unacceptable operating area due to voltage modulation decreases fast and in a nonlinear fashion as K increases. If K is larger than 16 then STANAG’s voltage modulation constraint is satisfied for any pulsed load.

Modulation Limitations for the Simplified Electrical Circuit of a S Frigate Power System: Integral Gain of Automatic Voltage Regulator of Generator

The integral gain K_v of generator automatic voltage regulator affects only voltage modulation. Theoretically, K_v could take any positive value; however as noted above the response time of the PID Controller depends on the ratio K/K_v . Here, the following analysis has been developed for K_v ranging from 0 up to 100, as following: from 0,01 up to 2 with a step of 0,01 and from 2 up to 100 with a step of 1.

In Fig. 20, the respective results for different values of K_v are presented. The unacceptable operating area due to voltage modulation limit violation increases slightly and in a nonlinear fashion as K_v increases. K_v should be positive as for zero value a non-zero voltage “steady-state” error would occur. It should also be large enough in order to obtain large K/K_v ratio, ensuring, in this way, fast response of PID controller.

The proper selection of the values of the PID controller parameters is a complex issue highly related with the dynamics of the of the power system and the generator itself.

CONCLUSIONS

In this paper, STANAG 1008 design constraints for frequency and voltage modulation have been examined applying the proper theoretical analysis in a simplified ship power system. The effects of several parameters such as pulsed load period and duty cycle, the technical characteristics of the generators and their frequency and voltage controllers, the technical characteristics of the cables connecting the pulsed load and generator etc, were examined. The conclusions drawn by the above analysis regarding the significance of the consequent effects are synoptically presented in Table 1.

TABLE (1). Significance of the effects of various parameters and STANAG shortcomings in the frequency/voltage modulation for the simplified ship power system.

Modulation	Frequency		Voltage	
Parameter	Significance	STANAG shortcoming	Significance	STANAG shortcoming
Pulsed load period	Very significant	Yes	Average	Yes ($\cos\phi < 0,5$)
Pulsed load duty cycle	Very significant	Yes	Significant	Yes ($\cos\phi < 0,5$)
Generator rotor inertia constant	Average	~	No	-
Frequency drop of frequency regulator	Very significant	Yes ($R_f < 36$)	No	-
Integral gain of frequency regulator	Extremely small	Yes, special cases ($K_f = 0$, etc.)	No	-
Equivalent reactance of cables	No	-	Extremely significant	Yes
Equivalent resistance of cables	No	-	Average	~
Equivalent sub-transient reactance of the generator	No	-	Significant	Yes
Apparent power of system base load without pulsed load	No	-	Significant	Yes
Proportional gain of the automatic voltage regulator	No	-	Very significant	Yes
Integral gain of the automatic voltage regulator	No	-	Small	~

In more detail, the effect of each studied parameter is analyzed next:

- **Pulsed load period, T :** It affects significantly frequency modulation, as the unacceptable operating area varies non-monotonically within the region of values studied, [1 ms, 10 s], with a critical value of T being equal to 1,5s for the case studied (see Fig. 10). Voltage modulation practically is not affected.
- **Pulsed load duty cycle, $d.c.$:** It affects significantly frequency modulation, as the unacceptable operating area varies non-monotonically within the region of values studied, [0%, 100%], with a critical value of $d.c.$ lying between 65%~70% (see Fig. 11). It also affects voltage modulation but not to the extent in case of frequency modulation.
- **Generator rotor inertia constant, J' :** It affects frequency modulation to a limited extent for practical values. This parameter could not be a design variable as it is a technical characteristic of generators.
- **Frequency drop of frequency regulator, R_f :** It affects frequency modulation. Especially, for small values of R_f the effect becomes very significant as the

unacceptable operating area increases considerably. Large values can be chosen for R_f while power system stability issues should be taken into consideration.

- **Integral gain of frequency regulator, K_f :** It affects frequency modulation to a limited extent as this parameter is determined mainly by the other parameters of the generator: rotor inertia J' and frequency droop, R_f .
- **Equivalent reactance of cables, X_c :** It affects only voltage modulation. The respective effect becomes extremely significant, as the increase of this parameter enlarges the unacceptable operating area. X_c could vary into a wide range of values, as it depends on the connection point of the different electric consumers and the equivalent reactance of each consumer which varies with time.
- **Equivalent resistance of cables, R :** It affects voltage modulation to a limited extent, as it is usually equal to 1/100 up to 1/50 of the respective cable reactance. Its effect is rather degraded by cable reactance effect.
- **Sub-transient reactance of generators, X' :** It affects voltage modulation to a significant extent as the increase of X' enlarges the unacceptable operating area. This parameter could not be a design variable as it is a technical characteristic of the generators.
- **System base load apparent power, S_{Lo} :** It affects voltage modulation to a significant extent as the increase of S_{Lo} enlarges the unacceptable operating area in a nonlinear and monotonical fashion. It varies significantly with time as it depends on the variation of the demand of the electric consumers.
- **Proportional gain of equivalent generator automatic voltage regulator, K :** It affects voltage modulation to a significant extent as the increase of K reduces considerably the unacceptable operating area. This parameter is a technical characteristic of generator controller.
- **Integral gain of generator automatic voltage regulator, K_v :** It affects voltage modulation to a rather limited extent. This parameter is a technical characteristic of generator controller and its value is selected taking into consideration the technical characteristics of the generators, voltage variation limit and the controller response.

The above analysis has proved that the S - $\cos\phi$ limitation curve proposed in STANAG 1008 is not unique. Furthermore, it is observed that the examined parameters of the power system model display in a non-linear fashion the S - $\cos\phi$ limitation curve. Under these circumstances it seems necessary that the aforementioned parameters (Table 1) affecting voltage and frequency modulation should be taken into consideration in future standards dealing with power quality issues in ship electric power systems.

The theoretical analysis which has been synoptically presented above aims to provide an answer to this problem. Alternatively, the whole power system should be simulated for different operation conditions so that the respective limits for frequency/voltage modulation be obtained. The presented work aims to be the motivation for further research on the topic and to provide general directions to follow for ship electric systems design issues dealing with pulse load integration.

REFERENCES

1. IEEE Std 45-1998, "IEEE Recommended Practice for Electrical Installations on Shipboard".
2. STANAG 1008, "Characteristics of Shipboard Electrical Power Systems in Warships of the NATO Navies", NATO, Edition 9, 24 Aug. 2004.
3. USA MIL-STD-1399(NAVY), "Interface standard for Shipboard systems – Section 300A – Electric Power, Alternating Current".

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. 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.
6. 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.
7. G. J. Tsekouras, F.D.Kanellos, J.M. Prousalidis, I.K. Hatzilau, "STANAG 1008 design constraints for pulsed loads in the frame of the All Electrical Ships", Nausivios Chora, A journal in Naval Sciences and Technology, vol. 3, 2010, pp. 115-154.
8. F.D.Kanellos, G. J. Tsekouras, J. Prousalidis, I.K. Hatzilau, "An effort to formulate frequency modulation constraints in Ship-Electrical Systems with Pulsed Loads", IET Electrical Systems in Transportation, vol. 1, issue 1, 2011, pp. 11-23.
9. F.D.Kanellos, G. J. Tsekouras, J. Prousalidis, I.K. Hatzilau, "Effort to formulate voltage modulation constraints in ship-electrical systems with pulsed loads", IET Electrical Systems in Transportation, vol. 2, issue 1, 2012, pp. 18-28.
10. P. Krause, "Analysis of Electric Machinery", McGraw-Hill, 1986.
11. Chee-Mun Ong, "Dynamic Simulation of Electric Machinery using Matlab/Simulink", Prentice Hall PTR, 1998.
12. H. Gremmel, G. Kopatsch. "Switchgear Manual", ABB AG Germany, 11th edition, 2008.

PART C:

NATURAL SCIENCES AND MATHEMATICS

Μέθοδοι Μετασχηματισμού του Ελλειψοειδούς εκ Περιστροφής σε Σφαιρική Επιφάνεια

Αθανάσιος Παλληκάρης

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

Περίληψη. Στην παρούσα μελέτη παρουσιάζονται και αξιολογούνται μέθοδοι μετασχηματισμού του ελλειψοειδούς εκ περιστροφής σε σφαιρική επιφάνεια. Παρουσιάζονται συναρτήσεις για τον ευθύ μετασχηματισμό «ελλειψοειδές δε σφαίρα» και για τον αντίστροφο μετασχηματισμό «σφαίρα σε ελλειψοειδές» για τις επόμενες τέσσερις περιπτώσεις: μετασχηματισμός σε «σφαίρα συμμορφίας» χωρίς γωνιακές παραμορφώσεις, σε «ισοδύναμη σφαίρα» χωρίς επιφανειακές παραμορφώσεις, σε «ισαπέχουσα στη διεύθυνση των μεσημβρινών σφαίρα» και σε «ισαπέχουσα στη διεύθυνση ενός παραλλήλου πλάτους σφαίρα». Η αξιολόγηση των μεθόδων μετασχηματισμού βασίστηκε στον υπολογισμό και στην ανάλυση της κατανομής των γραμμικών, επιφανειακών και γωνιακών παραμορφώσεων. Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης μπορούν να αξιοποιηθούν στην επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου για την χαρτογραφική απεικόνιση ολόκληρης, ή τμήματος της επιφάνειας της γης σύμφωνα με τις κατά περίπτωση επιθυμητές ιδιότητες, όπως μηδενισμός των γωνιακών ή των επιφανειακών παραμορφώσεων, ανάλογα με τον σκοπό για τον οποίο προορίζεται η χαρτογραφική απεικόνιση.

Λέξεις-Κλειδιά: χαρτογραφικές προβολές, παραμορφώσεις, διπλή απεικόνιση ελλειψοειδούς

Methods of Transforming the Ellipsoid of Revolution onto the Surface of a Sphere

Athanasios Pallikaris

Hellenic Naval Academy, Sea Sciences and Navigation Laboratory, Terma Hatzikyriakou Ave, Pireas Greece, TK 18539, palikaris@snd.edu.gr

Abstract. Methods of transformation of the surface of the ellipsoid of revolution onto the surface of a sphere are presented and evaluated. The methods can be used for the double projection of the ellipsoid onto a plane (ellipsoid to sphere, then sphere to plane) by the employment of map projections for which map transformation functions exist only for the sphere. Direct and inverse map transformation functions are presented and evaluated for four cases: transformation onto a “conformal sphere” without angle distortion, onto an “equivalent sphere” without area distortion, onto an “equidistant along the meridians sphere” and onto an “equidistant along a certain parallel sphere”. The assessment of the transformations has been conducted by numerical tests based on the calculation and analysis of the linear, angular and area distortions for each transformation.

Keywords: map projections, map distortion, double projection, ellipsoid

ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΟΥ ΕΛΛΙΠΣΟΕΙΔΟΥΣ ΕΚ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΟ

Η απεικόνιση της επιφάνειας του Ελλειψοειδούς εκ Περιστροφής (ΕΕΠ) σε επίπεδο πραγματοποιείται συνήθως με χρήση των συναρτήσεων f_1 και f_2 των (1) και (2), με τις οποίες πραγματοποιείται ο μετασχηματισμός των ελλειπτικών γεωδαιτικών συντεταγμένων (φ_i, λ_i) των σημείων της επιφάνειας του ΕΕΠ στις καρτεσιανές συντεταγμένες (x_i, y_i) του επιπέδου απεικόνισης (Σχ. 1). Ο μετασχηματισμός αυτός $[(\varphi_i, \lambda_i) \rightarrow (x_i, y_i)]$ αποτελεί το ευθύ πρόβλημα της αναλυτικής χαρτογραφίας, το οποίο αποτελεί βασικό εργαλείο της επιστημονικής έρευνας τόσο για την ανάλυση και αξιολόγηση των γνωστών χαρτογραφικών απεικονίσεων όσο για τη δημιουργία νέων χαρτογραφικών απεικονίσεων (χαρτογραφικών προβολών) ολόκληρης, ή μέρους της επιφάνειας της γης.

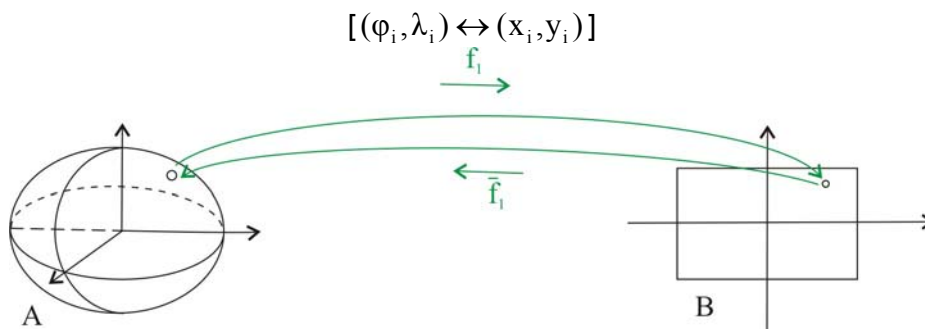
$$x_i = f_1 (\varphi_i, \lambda_i) \tag{1}$$

$$y_i = f_2 (\varphi_i, \lambda_i) \tag{2}$$

Ο αντίστροφος μετασχηματισμός των συντεταγμένων (x_i, y_i) , των σημείων του επιπέδου απεικόνισης στις ελλειπτικές γεωδαιτικές συντεταγμένες (φ_i, λ_i) των αντίστοιχων σημείων της επιφάνειας του ΕΕΠ $[(x_i, y_i) \rightarrow (\varphi_i, \lambda_i)]$ αποτελεί το αντίστροφο πρόβλημα της αναλυτικής χαρτογραφίας, στο οποίο χρησιμοποιούνται οι συναρτήσεις του αντίστροφου μετασχηματισμού g_1 και g_2 των (3) και (4).

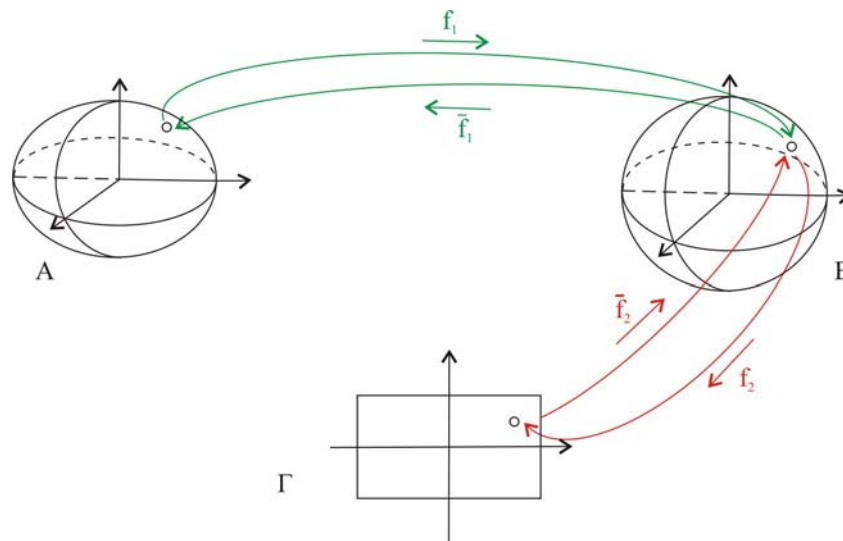
$$\varphi_i = g_1 (x_i, y_i) \tag{3}$$

$$\lambda_i = g_2 (x_i, y_i) \tag{4}$$



Σχήμα 1. Μετασχηματισμός της επιφάνειας του ΕΕΠ σε επίπεδο

Σε ορισμένες χαρτογραφικές απεικονίσεις συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται οι απλούστερες συναρτήσεις χαρτογραφικού μετασχηματισμού της σφαίρας. Η απλοποίηση αυτή έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς σε παραδοσιακούς έντυπους γεωγραφικούς άτλαντες για την απεικόνιση γεωγραφικών περιοχών πολύ μεγάλης έκτασης, οι οποίες καλύπτουν ένα ημισφαίριο ή και ολόκληρη την υδρόγειο σε πολύ μικρές κλίμακες, για τις οποίες δεν παρατηρούνται αξιόλογες διαφορές με τις αντίστοιχες απεικονίσεις του ΕΕΠ. Για τις σύγχρονες εφαρμογές σε περιβάλλον Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS), στις οποίες λόγω της δυνατότητας δυναμικής αλλαγής της κλίμακας απεικόνισης απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια απεικόνισης, ο μετασχηματισμός της επιφάνειας του ΕΕΠ σε επίπεδο είναι δυνατό να υλοποιηθεί με την εκτέλεση ενός ενδιάμεσου μετασχηματισμού της επιφάνειας του ΕΕΠ σε μια βοηθητική σφαίρα και στη συνέχεια με την απεικόνιση της σφαίρας σε επίπεδο (Σχ. 2) [Παλληκάρης 2010].



Σχήμα 2. Μετασχηματισμός της επιφάνειας του ΕΕΠ σε επίπεδο με ενδιάμεση απεικόνιση σε βοηθητική σφαίρα

Κατά τον ενδιάμεσο μετασχηματισμό της επιφάνειας του ΕΕΠ σε σφαίρα και ανάλογα με τις απαιτήσεις της εξεταζόμενης εφαρμογής, είναι δυνατό να εξασφαλιστεί η διατήρηση κάποιας βασικής ιδιότητας, όπως: μηδενισμός των γωνιακών παραμορφώσεων, μηδενισμός των επιφανειακών (εμβαδικών) παραμορφώσεων, μηδενισμός των γραμμικών παραμορφώσεων σε μία καθορισμένη διεύθυνση. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατό να προκύψουν διάφορες ενδιάμεσες σφαίρες με διαφορετικά χαρακτηριστικά εκάστη, όπως:

- Σφαίρα συμμορφίας, η οποία προκύπτει από το μετασχηματισμός της επιφάνειας του ελλειψοειδούς χωρίς γωνιακές παραμορφώσεις.
- Ισοδύναμη σφαίρα, η οποία προκύπτει από το μετασχηματισμός της επιφάνειας του ελλειψοειδούς χωρίς επιφανειακές (εμβαδικές) παραμορφώσεις, δηλαδή το εμβαδόν της επιφάνειας απεικόνισης (ισοδύναμης σφαίρας) είναι ίσο με το εμβαδόν της επιφάνειας αναφοράς (ελλειψοειδούς)
- Ισαπέχουσα στη διεύθυνση των μεσημβρινών σφαίρα, η οποία προκύπτει από το μετασχηματισμός της επιφάνειας του ελλειψοειδούς χωρίς γραμμικές παραμορφώσεις στη διεύθυνση των μεσημβρινών
- Ισαπέχουσα στη διεύθυνση των παραλλήλων σφαίρα, η οποία προκύπτει από το μετασχηματισμός της επιφάνειας του ελλειψοειδούς χωρίς γραμμικές παραμορφώσεις στη διεύθυνση των παραλλήλων

Στις προαναφερθείσες μεθόδους μετασχηματισμού της επιφάνειας του ΕΕΠ σε σφαίρα, η αντιστοιχία των ελλειπτικών γεωδαιτικών συντεταγμένων (φ , λ) ενός σημείου της επιφάνειας του ΕΕΠ και των σφαιρικών συντεταγμένων (φ' , λ') του σημείου αυτού στη σφαίρα, δίνεται από τις (4) και (5). Ο αντίστροφος μετασχηματισμός των γεωγραφικών συντεταγμένων (φ' , λ') ενός σημείου της επιφάνειας της βοηθητικής σφαίρας στις αντίστοιχες γεωδαιτικές συντεταγμένες (φ , λ) στην επιφάνεια του ΕΕΠ πραγματοποιείται με τις (5) και (6).

$$\varphi' = \varphi - A_2 \sin 2\varphi - A_4 \sin 4\varphi - A_6 \sin 6\varphi - A_8 \sin 8\varphi \quad (4)$$

$$\lambda = \lambda' \quad (5)$$

$$\varphi = \varphi' + B_2 \sin 2\varphi' + B_4 \sin 4\varphi' + B_6 \sin 6\varphi' + B_8 \sin 8\varphi' \quad (6)$$

όπου:

ϕ, λ : είναι το γεωδαιτικό πλάτος και το γεωδαιτικό μήκος ενός σημείου στην επιφάνεια του ΕΕΠ

ϕ', λ' : είναι το (σφαιρικό) γεωγραφικό πλάτος και το (σφαιρικό) γεωγραφικό μήκος ενός σημείου στην επιφάνεια της σφαίρας

Οι τιμές των συντελεστών $A_2, A_4, A_6, A_8, B_2, B_4, B_6$ και B_8 εξαρτώνται από την χρησιμοποιούμενη βοηθητική σφαίρα (σφαίρα συμμορφίας, ισοδύναμη σφαίρα, ισαπέχουσα σφαίρα).

ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ

Βασικές έννοιες και ορισμοί

Σύμφωνα με τις βασικές αρχές της θεωρίας των παραμορφώσεων των επιφανειών της διαφορικής γεωμετρίας, όπως αυτές εφαρμόζονται στην αναλυτική χαρτογραφία¹, κατά τον μετασχηματισμό μιας επιφάνειας αναφοράς (π.χ., του ΕΕΠ) σε μία επιφάνεια απεικόνισης δημιουργούνται γραμμικές, επιφανειακές και γωνιακές παραμορφώσεις. Για την αξιολόγηση των παραμορφώσεων αυτών χρησιμοποιούνται καταρχήν οι επόμενες παράμετροι, οι οποίες παρουσιάζονται σε όλα τα κλασικά συγγράμματα της αναλυτικής χαρτογραφίας².

Η **τοπική κλίμακα γραμμικής παραμόρφωσης μ** (local linear scale), ή απλά γραμμική παραμόρφωση κατά μήκος μιας διεύθυνσης σε ένα σημείο της επιφάνειας απεικόνισης είναι το κλάσμα του μήκους μιας στοιχειώδους γραμμής ds στο επίπεδο απεικόνισης προς το μήκος ds' της αντίστοιχης στοιχειώδους γραμμής στην επιφάνεια αναφοράς (ΕΕΠ ή σφαίρα). Για την ποσοτική μέτρηση της γραμμικής παραμόρφωσης συνήθως χρησιμοποιείται ο συντελεστής γραμμικής κλίμακας. Ο **συντελεστής γραμμικής κλίμακας** (linear scale factor) κατά μήκος μιας διεύθυνσης σε ένα σημείο της επιφάνειας απεικόνισης είναι το κλάσμα της τοπικής κλίμακας γραμμικής παραμόρφωσης προς την κύρια κλίμακα. Η **κύρια κλίμακα μ_0** (principal scale), γνωστή και ως συντελεστής απεικόνισης (representation factor) είναι η κλίμακα του μικρομένου γεωμετρικού μοντέλου της γης (ΕΕΠ ή σφαίρας) και ορίζεται ως το κλάσμα των αντίστοιχων ακτίνων του ισημερινού (για το μικρομένο και για το αρχικό μοντέλο).

Για την αποτελεσματικότερη ανάλυση των παραμορφώσεων, ο συντελεστής γραμμικής κλίμακας προσδιορίζεται θεωρώντας ότι η τιμή της κύριας κλίμακας είναι ίση με ένα. Με τον τρόπο αυτό η τιμή του συντελεστή γραμμικής κλίμακας είναι ίση με την τοπική κλίμακα γραμμικής παραμόρφωσης. Ο **συντελεστής γραμμικής κλίμακας στη διεύθυνση του μεσημβρινού** συμβολίζεται με h και ο **συντελεστής γραμμικής κλίμακας στη διεύθυνση του παραλλήλου** με k . Πολλές φορές οι συντελεστές αυτοί χρησιμοποιούνται με τη μορφή του σφάλματος γραμμικής κλίμακας, το οποίο υπολογίζεται από τις διαφορές: $(h-1)$ και $(k-1)$.

Η **τοπική κλίμακα επιφανειακής παραμόρφωσης** (local area scale), ή απλά επιφανειακή παραμόρφωση σε ένα σημείο του επιπέδου απεικόνισης είναι το κλάσμα του εμβαδού dE ενός στοιχειώδους τετραπλεύρου στο επίπεδο απεικόνισης προς το εμβαδό dE' του αντίστοιχου στοιχειώδους τετραπλεύρου στην επιφάνεια αναφοράς (ΕΕΠ ή σφαίρα). Για την ποσοτική μέτρηση της επιφανειακής παραμόρφωσης συνήθως χρησιμοποιείται ο συντελεστής επιφανειακής κλίμακας.

Ο **συντελεστής επιφανειακής κλίμακας p** (area scale factor) είναι το κλάσμα της τοπικής κλίμακας επιφανειακής παραμόρφωσης προς την κλίμακα επιφανειακής παραμόρφωσης στη **κεντρική γραμμή**, ή το **κεντρικό σημείο** της απεικόνισης. Μία γραμμή/ένα σημείο ονομάζεται

¹ (Richardus and Adler 1972), (Pearson 1990), (Bugayevskiy and Snyder 1995), (Yang, Snyder and Tobler 2000), (Grafarend and Krumm 2006).

² (Maling, 1973), (Snyder 1987), (Νάκος 2006).

κεντρική/ό, όταν οι γραμμικές, οι επιφανειακές και οι γωνιακές παραμορφώσεις στη γραμμή αυτή/(στο σημείο αυτό) έχουν τις ελάχιστες τιμές.

Πολλές φορές ο συντελεστής επιφανειακής κλίμακας χρησιμοποιείται με τη μορφή του σφάλματος επιφανειακής κλίμακας το οποίο υπολογίζεται από τη διαφορά: $(p-1)$.

Η γωνιακή παραμόρφωση, ορίζεται αποτελεσματικότερα με την αναφορά στις βασικές αρχές του θεωρήματος του Tissot και σε παραμέτρους της έλλειψης παραμόρφωσης. Σύμφωνα με το θεώρημα του Tissot (Richardus and Adler 1973):

- Κάθε στοιχειώδης κύκλος στην επιφάνεια της σφαίρας (ή του ΕΕΠ) απεικονίζεται στο επίπεδο ως έλλειψη γνωστή ως έλλειψη παραμόρφωσης, ή **δείκτη Tissot** (Σχ. 3).
- Σε κάθε σημείο της σφαίρας (ή του ΕΕΠ) υπάρχουν δύο διευθύνσεις που τέμνονται με γωνία 90° οι οποίες απεικονίζονται στο επίπεδο με γραμμές που τέμνονται επίσης με γωνία 90° . Οι διευθύνσεις αυτές λέγονται **κύριες διευθύνσεις**.
- Οι κύριες διευθύνσεις, ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη χαρτογραφική απεικόνιση, δεν αντιστοιχούν απαραίτητα στις διευθύνσεις του μεσημβρινού και του παραλλήλου.
- Η μέγιστη και η ελάχιστη τοπική κλίμακα γραμμικής παραμόρφωσης σε ένα σημείο, εμφανίζονται στις κύριες διευθύνσεις του μεγάλου και μικρού ημιάξονα της έλλειψης παραμόρφωσης αντιστοίχως.
- Όταν οι μεσημβρινοί και οι παράλληλοι στην επιφάνεια απεικόνισης σχηματίζουν γωνία 90° , η τοπική κλίμακα γραμμικής παραμόρφωσης στη διεύθυνση του μεσημβρινού είναι ίση με τη μέγιστη τοπική κλίμακα γραμμικής παραμόρφωσης a και η τοπική κλίμακα γραμμικής παραμόρφωσης στη διεύθυνση του παραλλήλου είναι ίση με την ελάχιστη τοπική κλίμακα γραμμικής παραμόρφωσης b .

Γωνιακή παραμόρφωση ω , κατά μήκος μιας διεύθυνσης σε ένα σημείο του επιπέδου απεικόνισης είναι η διαφορά μεταξύ των γωνιών u και u' , [$\omega = u - u'$] οι οποίες ορίζονται ως εξής:

- α.) Η γωνία u (Σχ. 3.α), αντιστοιχεί στη γωνία μεταξύ μιας τυχαίας διεύθυνσης X και της κύριας διεύθυνσης I της μέγιστης γραμμικής παραμόρφωσης στην επιφάνεια αναφοράς (ΕΕΠ, ή σφαίρα).
- β.) Η γωνία u' (Σχ. 3.β), αντιστοιχεί στη γωνία μεταξύ της απεικόνισης X' της τυχαίας διεύθυνσης (γραμμής) και της απεικόνισης της κύριας διεύθυνσης της μέγιστης γραμμικής παραμόρφωσης I'' στην επιφάνεια απεικόνισης (στο επίπεδο).

Εξισώσεις παραμορφώσεων

Κατά την απεικόνιση μιας τυχαίας επιφάνειας αναφοράς, τα σημεία της οποίας προσδιορίζονται με τις παραμέτρους (φ, λ) , οι οποίες δεν αναφέρονται απαραίτητα στο γεωγραφικό πλάτος και στο γεωγραφικό μήκος, σε μία επιφάνεια απεικόνισης (όχι κατ' ανάγκη σε επίπεδο), η γενική σχέση υπολογισμού της γραμμικής παραμόρφωσης μ σε οποιαδήποτε διεύθυνση ενός σημείου στην επιφάνεια απεικόνισης είναι:

$$\mu = \sqrt{\frac{E'd\varphi^2 + 2F'd\varphi d\lambda + G'd\lambda^2}{Ed\varphi^2 + 2Fd\varphi d\lambda + Gd\lambda^2}} \quad (7)$$

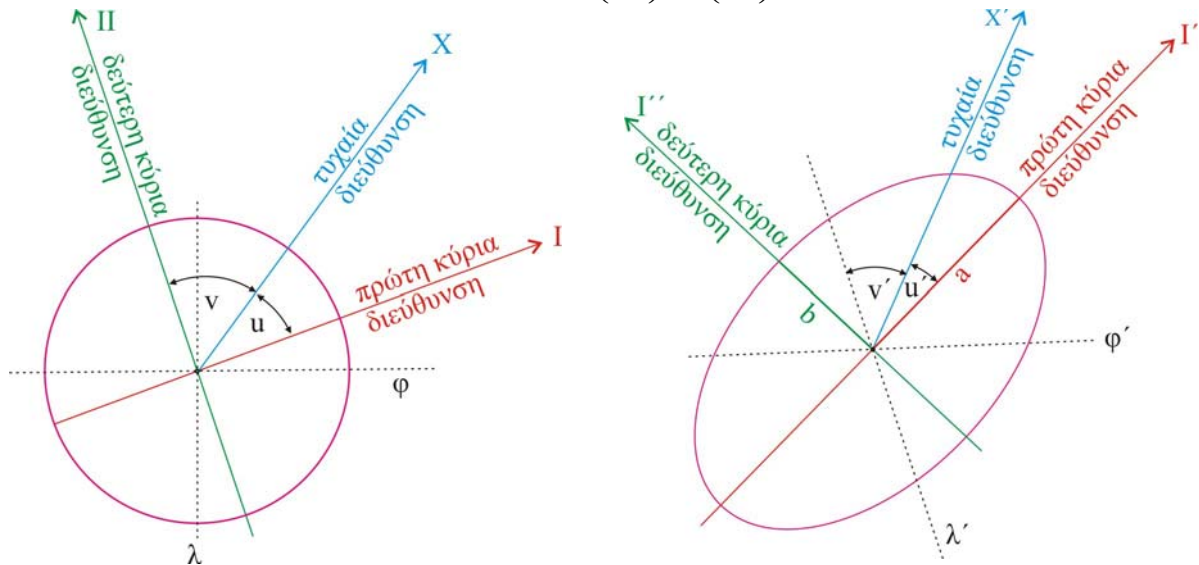
Όπου:

- οι παράμετροι E' , F' , G' είναι τα βασικά θεμελιώδη μεγέθη πρώτης τάξης του Gauss για κάθε σημείο της επιφάνειας απεικόνισης που δίνονται από τις σχέσεις (8) έως (10) [Πολυράκης 2008].
- οι παράμετροι E , F , G είναι τα αντίστοιχα βασικά θεμελιώδη μεγέθη πρώτης τάξης για την επιφάνεια αναφοράς (datum surface).

$$E' = \left(\frac{\partial x}{\partial \varphi}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \varphi}\right)^2 \quad (8)$$

$$F' = \left(\frac{\partial x}{\partial \varphi}\right)\left(\frac{\partial y}{\partial \lambda}\right) + \left(\frac{\partial y}{\partial \varphi}\right)\left(\frac{\partial x}{\partial \lambda}\right) \quad (9)$$

$$G' = \left(\frac{\partial x}{\partial \lambda}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \lambda}\right)^2 \quad (10)$$



Ένας στοιχειώδης κύκλος στην επιφάνεια αναφοράς, θεωρείται ότι είναι επίπεδο σχήμα
 α. Επιφάνεια αναφοράς (σφαίρα ή ΕΕΠ)

Η απεικόνιση του στοιχειώδους κύκλου στην επιφάνεια απεικόνισης είναι έλλειψη
 β. Επιφάνεια απεικόνισης (Σφαίρα, ή επίπεδο χαρτογραφικής απεικόνισης)

Σχήμα 3: Έλλειψη παραμόρφωσης

Στην κλασσική περίπτωση χρησιμοποίησης των χαρτογραφικών απεικονίσεων για την απευθείας απεικόνιση της επιφάνειας του ΕΕΠ σε επίπεδο (Σχ. 1), η επιφάνεια αναφοράς είναι η επιφάνεια του ΕΕΠ, η επιφάνεια απεικόνισης είναι το επίπεδο. Κατά το μετασχηματισμό της επιφάνειας του ΕΕΠ σε σφαιρική επιφάνεια (Σχ. 2), η επιφάνεια αναφοράς είναι η επιφάνεια του ΕΕΠ και η επιφάνεια απεικόνισης είναι η επιφάνεια της χρησιμοποιούμενης βοηθητικής σφαίρας.

Για την επιφάνεια του ΕΕΠ οι τιμές των μεγεθών E, F, G δίνονται από τις (11), (12) και (13).

$$E = R_M^2 = \frac{a^2(1-e^2)^2}{(1-e^2 \sin^2 \varphi)^3} \quad (11)$$

$$F = 0 \quad (12)$$

$$G = R_N^2 \cos^2 \varphi = \frac{a^2}{1-e^2 \sin^2 \varphi} \cos^2 \varphi \quad (13)$$

Όπου:

R_M και R_N είναι οι ακτίνες καμπυλότητας ενός σημείου στη επιφάνεια του ΕΕΠ στις διευθύνσεις του μεσημβρινού και της πρώτης καθέτου αντιστοίχως.

Από τη γενική σχέση (7) με αντικατάσταση των τιμών των μεγεθών E, F και G σύμφωνα με τις (11), (12) και (13), προκύπτει η (14) για τον υπολογισμό της τοπικής γραμμικής παραμόρφωσης μ σε ένα σημείο του επιπέδου απεικόνισης οποιασδήποτε χαρτογραφικής απεικόνισης σε μία τυχαία διεύθυνση α .

$$\mu^2 = \frac{E'd\varphi^2 + 2F'd\varphi d\lambda + G'd\lambda^2}{R_M^2 d\varphi^2 + R_P^2 d\lambda^2} = \frac{E'}{R_M^2} \cos^2 \alpha + \frac{F'}{R_M R_P} \sin 2\alpha + \frac{G'}{R_P^2} \sin^2 \alpha \quad (14)$$

Από τη (14) που δίνει την τιμή της γραμμικής παραμόρφωσης μ σε μία διεύθυνση α , προκύπτουν οι (15) και (16) για τον υπολογισμό της γραμμικής παραμόρφωσης h στη διεύθυνση του μεσημβρινού ($\alpha = 0^\circ$) και για τον υπολογισμό της τοπικής γραμμικής παραμόρφωσης k στη διεύθυνση του παραλλήλου ($\alpha = 90^\circ$).

$$h = \frac{\sqrt{E'}}{R_M} \quad (15)$$

$$k = \frac{\sqrt{G'}}{R_P} \quad (16)$$

Για τον υπολογισμό της μέγιστης τοπικής κλίμακας γραμμικής παραμόρφωσης a και της ελάχιστης τοπικής κλίμακας γραμμικής παραμόρφωσης b , χρησιμοποιούνται οι (17) και (18).

$$a = \frac{1}{2} (\sqrt{h^2 + 2hk \cos \varepsilon + k^2} + \sqrt{h^2 - 2hk \cos \varepsilon + k^2}) \quad (17)$$

$$b = \frac{1}{2} (\sqrt{h^2 + 2hk \cos \varepsilon + k^2} - \sqrt{h^2 - 2hk \cos \varepsilon + k^2}) \quad (18)$$

Όπου:

ε : είναι η συμπληρωματική γωνία της γωνίας τομής του μεσημβρινού και παραλλήλου i ($\varepsilon = 90^\circ - i$), που δίνεται από τη (19).

$$\varepsilon = \arctan\left(-\frac{F'}{H'}\right) \quad (19)$$

Όπου:

H είναι η διακρίνουσα της επιφάνειας αναφοράς σε ένα σημείο του επιπέδου απεικόνισης που δίνεται από την (20).

$$H = \sqrt{E'G' - F'^2} \quad (20)$$

Ο υπολογισμός της τοπικής κλίμακας επιφανειακής παραμόρφωσης p , πραγματοποιείται με τη (21).

$$p = hk \cos \varepsilon = ab \quad (21)$$

Η μέγιστη γωνιακή παραμόρφωση ω σε κάθε σημείο του επιπέδου απεικόνισης δίνεται από την (22).

$$\omega = \frac{|h - k|}{h + k} \quad (22)$$

Από την ανωτέρω συνοπτική παρουσίαση προκύπτει ότι για τον υπολογισμό των γραμμικών, των επιφανειακών και των γωνιακών παραμορφώσεων με τις (14) έως (22) απαιτείται ο προσδιορισμός των μεγεθών:

- E, F, G και H για την επιφάνεια αναφοράς.
- E', F', G' και H' σε ένα σημείο της επιφάνειας απεικόνισης.

Για τον προσδιορισμό των μεγεθών E, F, H και G στα σημεία της επιφάνειας της σφαίρας χρησιμοποιούνται οι (11) έως (13) με τιμή της πρώτης εκκεντρότητας e ίση με μηδέν (e=0) και αντικατάσταση της παραμέτρου a με την τιμή της ακτίνας R της σφαίρας (συνήθως χρησιμοποιείται σφαίρα μοναδιαίας ακτίνας, R=1). Στη συνέχεια προσδιορίζονται τα μεγέθη E', F', H' και G' με τις (8) έως (10) από τα οποία προκύπτουν τύποι προσδιορισμού των γραμμικών, επιφανειακών και γωνιακών παραμορφώσεων.

ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΟΥ ΕΛΛΙΨΟΕΙΔΟΥΣ ΣΕ ΣΥΜΜΟΡΦΗ ΣΦΑΙΡΑ

Οι συναρτήσεις του μετασχηματισμού της επιφάνειας του ΕΕΠ σε σύμμορφη σφαίρα, προκύπτουν από την εφαρμογή της συνθήκης συμμορφίας (h = k) με την οποία εξασφαλίζεται ότι κατά τον μετασχηματισμό δεν δημιουργούνται γωνιακές παραμορφώσεις (Bugayevskiy and Snyder 1995). Ανάλογα με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά της χρησιμοποιούμενης σύμμορφης σφαίρας, οι (4) και (6) λαμβάνουν διαφορετικές τιμές. Οι κυριότερες μέθοδοι μετασχηματισμού της επιφάνειας του ΕΕΠ σε σφαίρα συμμορφίας είναι:

- Ο μετασχηματισμός με μηδενισμό των γραμμικών παραμορφώσεων στον ισημερινό που προτάθηκε αρχικά από τον Mollweide το έτος 1807,
- ο μετασχηματισμός με μηδενισμό των γραμμικών παραμορφώσεων στο βασικό παράλληλο που προτάθηκε αρχικά από τον Gauss το έτος 1822 και
- ο μετασχηματισμός με μηδενισμό των γραμμικών παραμορφώσεων στον κεντρικό μεσημβρινό που προτάθηκε αρχικά από τον Gauss το έτος 1844.

Στο μετασχηματισμό της επιφάνειας του ΕΕΠ σε σύμμορφη σφαίρα με μηδενισμό των γραμμικών παραμορφώσεων στον ισημερινό, η ακτίνα R_c της σύμμορφης σφαίρας έχει σταθερή τιμή ίση με την τιμή του μεγάλου ημιάξονα του ΕΕΠ ($R_c=a$).

Στο μετασχηματισμό της επιφάνειας του ΕΕΠ σε σύμμορφη σφαίρα με μηδενισμό των γραμμικών παραμορφώσεων στον κεντρικό μεσημβρινό η ακτίνα R_c της σύμμορφης σφαίρας δεν είναι σταθερή αλλά εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος και το γεωγραφικό μήκος του κεντρικού σημείου.

Στο μετασχηματισμό που εξασφαλίζει μηδενισμό των γραμμικών παραμορφώσεων στο βασικό παράλληλο η ακτίνα R_c της σύμμορφης σφαίρας δεν είναι σταθερή αλλά εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος του βασικού παραλλήλου.

Για το σκοπό της εκτελεσθείσας έρευνας επιλέχτηκε για αξιολόγηση ο μετασχηματισμός που εξασφαλίζει μηδενισμό των γραμμικών παραμορφώσεων στον ισημερινό επειδή: i) στο μετασχηματισμό αυτό χρησιμοποιείται σύμμορφη σφαίρα σταθερής ακτίνας, ii) οι δημιουργούμενες γραμμικές παραμορφώσεις κατά μήκος των μεσημβρινών είναι πρακτικά αμελητέες για τις εφαρμογές χαρτογραφικής απεικόνισης σε περιβάλλον ΣΓΠ (GIS) [Παλληκάρης 2010].

Με την εφαρμογή της συνθήκης συμμορφίας (h=k), στο μετασχηματισμό της επιφάνειας του ΕΕΠ σε σύμμορφη σφαίρα με μηδενική γραμμική παραμόρφωση στον ισημερινό, προκύπτουν οι (23) έως (30), οι οποίες δίνουν τους συντελεστές $A_2, A_4, A_6, A_8, B_2, B_4, B_6$ και B_8 των συναρτήσεων μετασχηματισμού (4) και (6) [Yang, Snyder and Tobler 2000].

$$A_2 = \frac{1}{2}e^2 + \frac{5}{24}e^4 + \frac{3}{32}e^6 + \frac{1399}{53760}e^8 \quad (23)$$

$$A_4 = -\left(\frac{5}{48}e^4 + \frac{7}{80}e^6 + \frac{689}{17920}e^8\right) \quad (24)$$

$$A_6 = \frac{13}{480}e^6 + \frac{1363}{17920}e^8 \quad (25)$$

$$A_8 = -\left(\frac{677}{107520}e^8\right) \quad (26)$$

$$B_2 = A_2 - A_2 A_4 - A_4 A_6 - \frac{1}{2}A_2^3 - A_2 A_4^2 + \frac{1}{2}A_2^2 A_6 - 18,3A_2^3 A_4 \quad (27)$$

$$B_4 = A_4 + A_2^2 - 2A_2 A_6 - 4A_2^2 A_4 - 1,3A_2^4 \quad (28)$$

$$B_6 = A_6 + 3A_2 A_4 - 3A_2 A_8 + \frac{3}{2}A_2^3 - \frac{9}{2}A_2 A_4^2 - 9A_2^2 A_6 - 12,5A_2^3 A_4 \quad (29)$$

$$B_8 = A_8 + 2A_4^2 + 4A_2 A_6 + 8A_2^2 A_4 + 2,7A_2^4 \quad (30)$$

Με την εφαρμογή των (15), (16) και (21), προκύπτουν (31) και (32), οι οποίες δίνουν τις τιμές της γραμμικής και της επιφανειακής παραμόρφωσης.

$$h = k = \frac{R}{a} \left(1 + \frac{1}{2}e^2 \sin^2 \varphi\right) \quad (31)$$

$$p = h^2 = \frac{R^2}{a^2} \left(1 + \frac{1}{2}e^2 \sin^2 \varphi\right)^2 \quad (32)$$

όπου: $R = a = 6378137\text{m}$ (για το ΕΕΠ WGS-84).

ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΟΥ ΕΛΛΙΠΣΟΕΙΔΟΥΣ ΣΕ ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΣΦΑΙΡΑ

Οι συναρτήσεις του μετασχηματισμού της επιφάνειας του ΕΕΠ σε σύμμορφη σφαίρα, προκύπτουν από την εφαρμογή της συνθήκης συμμορφίας ($m=1$) με την οποία εξασφαλίζεται ότι κατά τον μετασχηματισμό δεν δημιουργούνται επιφανειακές (εμβαδικές) παραμορφώσεις, δηλαδή το εμβαδόν της επιφάνειας της ισοδύναμης σφαίρας είναι ίσο με το εμβαδόν της επιφάνειας του ελλειψοειδούς. Από την ανάλυση και επεξεργασία της συνθήκης αυτής), προσδιορίζεται, τόσο η ακτίνα R_a της ισοδύναμης σφαίρας, όσο και οι συντελεστές $A_2, A_4, A_6, A_8, B_2, B_4, B_6$ και B_8 των συναρτήσεων μετασχηματισμού (4) και (6) [Pearson 1990].

Η ακτίνα R_a της ισοδύναμης σφαίρας δίνεται από την (33). Οι συντελεστές A_2, A_4, A_6, A_8 , της συνάρτησης μετασχηματισμού (4), δίνονται από τις (34) έως (37). Οι συντελεστές B_2, B_4, B_6 και B_8 δίνονται από τις (27) έως (30) στις οποίες, όμως χρησιμοποιούνται οι τιμές των συντελεστών A_2, A_4, A_6 και A_8 των (34) έως (37).

$$R^2 = a^2(1 - e^2) \left(1 + \frac{2}{3}e^2 + \frac{3}{5}e^4 + \frac{4}{7}e^6 + \frac{5}{9}e^8\right) \quad (33)$$

Κατά το μετασχηματισμό της επιφάνειας του ΕΕΠ σε ισοδύναμη σφαίρα στις συναρτήσεις των (4) και (6) οι συντελεστές $A_2, A_4, A_6, A_8, B_2, B_4, B_6$ και B_8 είναι ίσοι με :

$$A_2 = \frac{1}{3}e^2 + \frac{31}{180}e^4 + \frac{59}{560}e^6 + \frac{126853}{518400}e^8 \quad (34)$$

$$A_4 = -\left(\frac{17}{360}e^4 + \frac{61}{1260}e^6 + \frac{3622447}{94089600}e^8\right) \quad (35)$$

$$A_6 = \frac{383}{45360}e^6 + \frac{6688039}{658627200}e^8 \quad (36)$$

$$A_8 = -\frac{27787}{23522400}e^8 \quad (37)$$

Με την εφαρμογή των (15), (16) και (22), προκύπτουν (38), (39) και (40), οι οποίες δίνουν τις τιμές της γραμμικής και της γωνιακής παραμόρφωσης.

$$h = 1 + \frac{e^2}{6}\cos^2\varphi \quad (38)$$

$$k = 1 - \frac{e^2}{6}\cos^2\varphi \quad (39)$$

$$\sin\frac{\omega}{2} = \frac{e^2}{6}\cos^2\varphi \quad (40)$$

ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΟΥ ΕΛΛΙΠΣΟΕΙΔΟΥΣ ΣΕ ΙΣΑΠΕΧΟΥΣΑ ΣΤΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΤΩΝ ΜΕΣΗΜΒΡΙΝΩΝ ΣΦΑΙΡΑ

Οι συναρτήσεις του μετασχηματισμού της επιφάνειας του ΕΕΠ σε ισαπέχουσα στη διεύθυνση των μεσημβρινών σφαίρα, προκύπτουν από την εφαρμογή της συνθήκης μηδενισμού των γραμμικών παραμορφώσεων στη διεύθυνση του μεσημβρινού ($m=1$). Από την ανάλυση και επεξεργασία της συνθήκης αυτής προσδιορίζεται, τόσο η ακτίνα R_d της βοηθητικής σφαίρας, όσο και οι συντελεστές $A_2, A_4, A_6, A_8, B_2, B_4, B_6$ και B_8 των συναρτήσεων μετασχηματισμού (4) και (6) [Yang, Snyder and Tobler 2000].

Η ακτίνα R_a της ισαπέχουσας στη διεύθυνση των μεσημβρινών σφαίρας δίνεται από την (41). Οι συντελεστές A_2, A_4, A_6, A_8 , της συνάρτησης μετασχηματισμού (4), δίνονται από τις (42) έως (51). Οι συντελεστές B_2, B_4, B_6 και B_8 δίνονται από τις (27) έως (30) στις οποίες, όμως χρησιμοποιούνται οι τιμές των συντελεστών A_2, A_4, A_6 και A_8 των (42) έως (45).

$$R_d = a^2(1-e^2)\left(1 + \frac{3}{4}e^2 + \frac{45}{64}e^4 + \frac{175}{256}e^6 + \frac{11025}{16384}e^8\right) \quad (41)$$

$$A_2 = \frac{B'}{2A'} \quad (42)$$

$$A_4 = -\frac{C'}{4A'} \quad (43)$$

$$A_6 = \frac{D'}{6A'} \quad (44)$$

$$A_8 = -\frac{E'}{8A'} \quad (45)$$

$$A' = 1 + \frac{3}{4}e^2 + \frac{45}{64}e^4 + \frac{175}{256}e^6 + \frac{11\,025}{16\,384}e^8 \quad (46)$$

$$B' = \frac{3}{4}e^2 + \frac{15}{16}e^4 + \frac{525}{512}e^6 + \frac{2205}{2048}e^8 \quad (47)$$

$$C' = \frac{15}{16}e^4 + \frac{105}{256}e^6 + \frac{2205}{4096}e^8 \quad (48)$$

$$C' = \frac{15}{16}e^4 + \frac{105}{256}e^6 + \frac{2205}{4096}e^8 \quad (49)$$

$$D' = \frac{35}{512}e^6 + \frac{315}{2048}e^8 \quad (50)$$

$$E' = \frac{315}{16384}e^8 \quad (51)$$

Με την εφαρμογή των (15), (16) και (22), προκύπτουν οι (52) και (53), οι οποίες δίνουν τις τιμές της γραμμικής παραμόρφωσης στη διεύθυνση των παραλλήλων, της επιφανειακής παραμόρφωσης και της γωνιακής παραμόρφωσης.

$$k = p = 1 - \frac{e^4}{4} \cos 2\varphi \quad (52)$$

$$\omega' = 8482 e^2 \cos 2\varphi \quad (53)$$

ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΟΥ ΕΛΛΙΠΣΟΕΙΔΟΥΣ ΣΕ ΣΦΑΙΡΑ ΙΣΑΠΕΧΟΥΣΑ ΣΤΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΕΝΟΣ ΠΑΡΑΛΛΗΛΟΥ

Οι συναρτήσεις του μετασχηματισμού της επιφάνειας του ΕΕΠ σε ισαπέχουσα στη διεύθυνση των παραλλήλων σφαίρα, προκύπτουν από την εφαρμογή της συνθήκης μηδενισμού των γραμμικών παραμορφώσεων στη διεύθυνση των παραλλήλων ($k=1$). Από την ανάλυση και επεξεργασία της συνθήκης αυτής προσδιορίζεται, τόσο η ακτίνα R_p της βοηθητικής σφαίρας, όσο και οι συντελεστές $A_2, A_4, A_6, A_8, B_2, B_4, B_6$ και B_8 των συναρτήσεων μετασχηματισμού (4) και (6) [Yang, Snyder and Tobler 2000]. Εν τούτοις η υλοποίηση της συνθήκης αυτής είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί με διάφορους τρόπους, από τους οποίους είναι δυνατό να προκύψουν διάφορες ισαπέχουσες στη διεύθυνση των παραλλήλων σφαίρες με διαφορετικά χαρακτηριστικά εκάστη. Για παράδειγμα, τα απεικονιζόμενα στη βοηθητική σφαίρα σημεία του ΕΕΠ είναι δυνατό να έχουν το ίδιο γεωγραφικό μήκος και διαφορετικό γεωγραφικό πλάτος με τα αντίστοιχα σημεία του ΕΕΠ, ή να έχουν το ίδιο πλάτος και διαφορετικό μήκος. Ο συνηθέστερος τρόπος μετασχηματισμού της επιφάνειας του ΕΕΠ σε ισαπέχουσα στη διεύθυνση των παραλλήλων σφαίρα ικανοποιεί τις επόμενες συνθήκες:

- Το γεωδαιτικό πλάτος φ και το σφαιρικό γεωγραφικό πλάτος φ' έχουν τις ίδιες τιμές στον ισημερινό [$\varphi_0 = \varphi'_0 = 0$] και στους πόλους [$\varphi_{90} = \varphi'_{90} = 90$].
- Το γεωδαιτικό μήκος λ είναι ίσο με το σφαιρικό γεωγραφικό μήκος [$\lambda = \lambda'$].

Η τιμή της ακτίνας R_p της ισαπέχουσας στη διεύθυνση των παραλλήλων σφαίρας δίνεται από την (54). Οι συντελεστές A_2, A_4, A_6, A_8 , της συνάρτησης μετασχηματισμού (4), δίνονται από τις (55) έως (59). Οι συντελεστές B_2, B_4, B_6 και B_8 δίνονται από τις (27) έως (30) στις οποίες, όμως χρησιμοποιούνται οι τιμές των συντελεστών A_2, A_4, A_6 και A_8 των (55) έως (58).

Το σφαιρικό πλάτος φ' στην ισαπέχουσα στη διεύθυνση ενός παραλλήλου βοηθητική σφαίρα, είναι ίσο με το χρησιμοποιούμενο στη γεωμετρική γεωδαισία ανηγμένο πλάτος u (60) [Bugayevskiy and Snyder 1995].

$$R_p = a \quad (54)$$

$$A_2 = n_0 \quad (55)$$

$$A_4 = \frac{n_0^2}{2} \quad (56)$$

$$A_6 = \frac{n_0^3}{3} \quad (57)$$

$$A_8 = \frac{n_0^4}{4} \quad (58)$$

$$n_0 = \frac{1 - \sqrt{1 - e^2}}{1 + \sqrt{1 - e^2}} \quad (59)$$

Οι συντελεστές B_2, B_4, B_6 και B_8 δίνονται από τις (27) έως (30) στις οποίες, όμως χρησιμοποιούνται οι τιμές των συντελεστών A_2, A_4, A_6 και A_8 των σχέσεων (55) έως (58).

Με την εφαρμογή των (15), (16) και (22), προκύπτουν οι (60) και (61), οι οποίες δίνουν τις τιμές της γραμμικής παραμόρφωσης στη διεύθυνση των μεσημβρινών, της επιφανειακής παραμόρφωσης και της γωνιακής παραμόρφωσης.

$$h = p = 1 + \frac{e^2}{2} \cos^2 \varphi + \frac{e^4}{8} (3 - 2 \sin^2 \varphi - 4 \sin^4 \varphi) \quad (60)$$

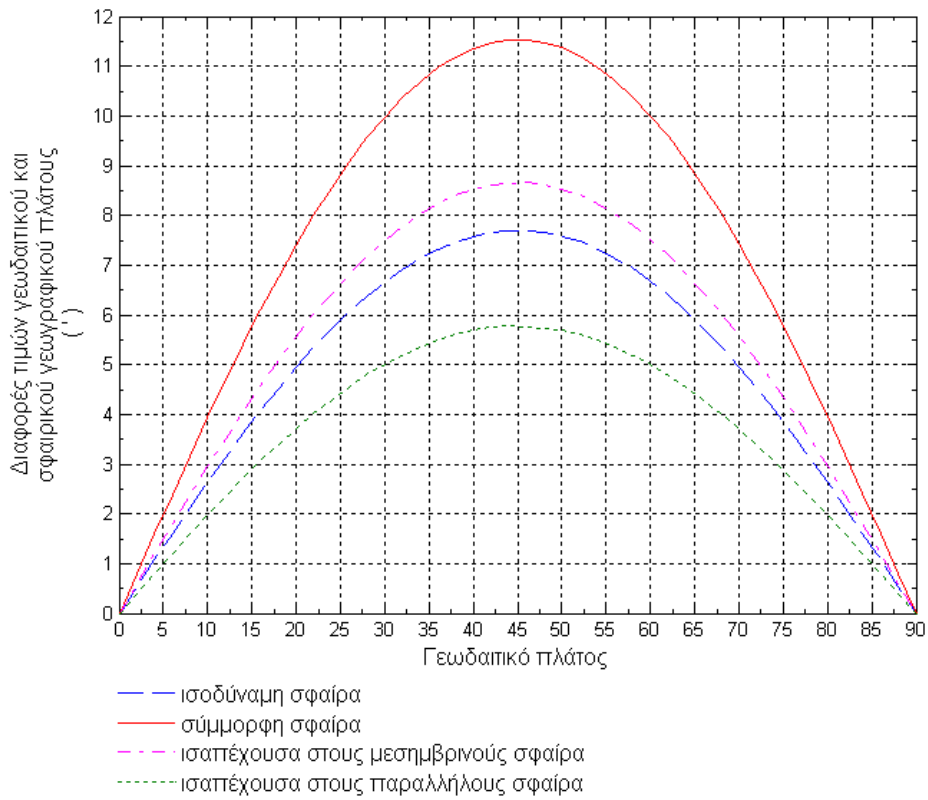
$$\omega' = 16965 e^2 \cos^2 \varphi \quad (61)$$

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΟΥ ΕΛΛΙΠΣΟΕΙΔΟΥΣ ΣΕ ΣΦΑΙΡΑ

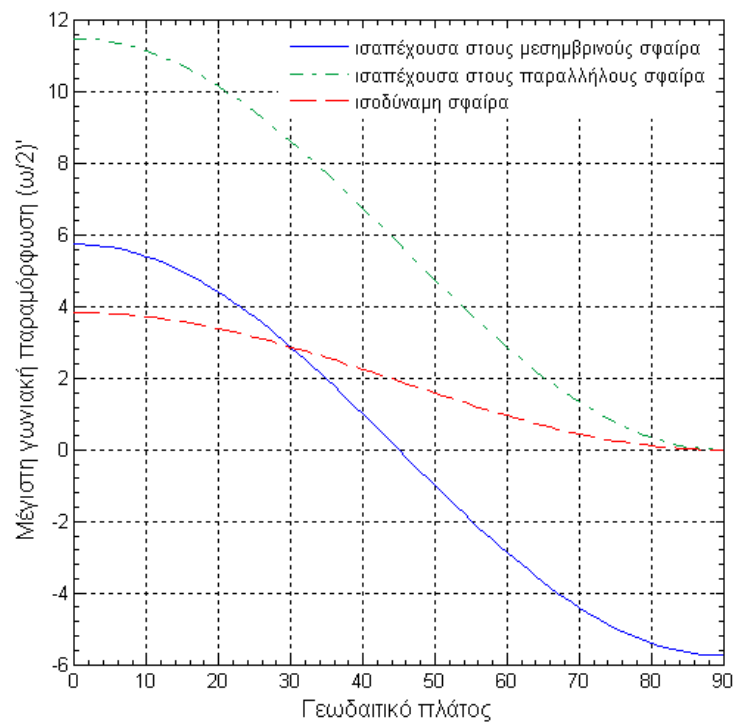
Η αξιολόγηση των μεθόδων μετασχηματισμού της επιφάνειας του ελλειψοειδούς εκ περιστροφής σφαίρα έγινε σε δύο στάδια. Κατά το πρώτο στάδιο έγινε αξιολόγηση των σχέσεων μετατροπής του γεωδαιτικού πλάτους σε σφαιρικό γεωγραφικό πλάτος, καθώς και της αντίστροφης μετατροπής του σφαιρικού γεωγραφικού πλάτους σε γεωδαιτικό πλάτος με τις (4) και (6) για τη σφαίρα συμμορφίας, την ισοδύναμη σφαίρα, την ισαπέχουσα στους μεσημβρινούς σφαίρα και την ισαπέχουσα στους παραλλήλους σφαίρα. Κατά το δεύτερο στάδιο έγινε υπολογισμός και ανάλυση των γραμμικών, των επιφανειακών και των γωνιακών παραμορφώσεων, οι οποίες δημιουργούνται κατά τους μετασχηματισμούς σε σύμμορφη σφαίρα, σε ισοδύναμη σφαίρα, σε ισαπέχουσα στους μεσημβρινούς σφαίρα και σε ισαπέχουσα στους παραλλήλους σφαίρα.

Αξιολόγηση των σχέσεων μετατροπής γεωδαιτικού πλάτους σε σφαιρικό

Τα βασικά αποτελέσματα της αξιολόγησης των τύπων των σχέσεων μετατροπής του γεωδαιτικού πλάτους σε σφαιρικό γεωγραφικό πλάτος παρουσιάζονται στο διάγραμμα του σχήματος 4. Από τη μελέτη και ανάλυση των αποτελεσμάτων αυτών προκύπτουν οι επόμενες διαπιστώσεις:

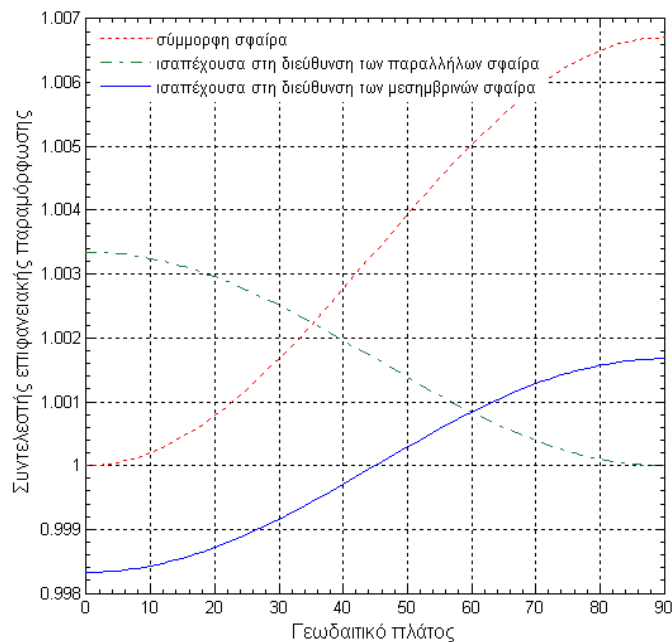


Σχήμα 4: Διαφορές γεωδαπικού πλάτους και σφαιρικού γεωγραφικού πλάτους για τέσσερις βοηθητικές σφαίρες



Σχήμα 5: Γωνιακές παραμορφώσεις μετασχηματισμού επιφάνειας ΕΕΠ σε σφαίρα

- Οι μέγιστες αποκλίσεις μεταξύ του γεωδαιτικού πλάτους και του σφαιρικού γεωγραφικού πλάτους δημιουργούνται σε πλάτος περίπου 45° και είναι περίπου $11',54$ για τη σφαίρα συμμορφίας, $7',7$ για την ισοδύναμη σφαίρα, $8',8$ για την ισαπέχουσα στους μεσημβρινούς σφαίρα και $5',77$ για την ισαπέχουσα στους παραλλήλους σφαίρα.
- Οι ελάχιστες αποκλίσεις του γεωδαιτικού πλάτους και του σφαιρικού γεωγραφικού πλάτους παρατηρούνται σε μικρά και σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη. Οι αποκλίσεις μηδενίζονται στον ισημερινό και στους πόλους.
- Ο μετασχηματισμός του γεωδαιτικού πλάτους φ σε σφαιρικό γεωγραφικό πλάτος φ_σ ($\varphi \rightarrow \varphi_\sigma$) καθώς και ο αντίστροφος μετασχηματισμός ($\varphi_\sigma \rightarrow \varphi$) με τις (4) και (6), προσαρμοσμένες για τις τέσσερις εξετασθείσες σφαίρες, παρέχει απόλυτη ταύτιση των αποτελεσμάτων για τον ευθύ και για τον αντίστροφο μετασχηματισμό. Οι τιμές του φ_σ που προσδιορίζονται με τους τύπους (4), όταν χρησιμοποιηθούν στη (5) δίνουν ακριβώς τις ίδιες τιμές του αρχικού γεωδαιτικού πλάτους που χρησιμοποιήθηκε στον ευθύ μετασχηματισμό.



Σχήμα 6: Επιφανειακές παραμορφώσεις μετασχηματισμού επιφάνειας ΕΕΠ σε σφαίρα

Υπολογισμός και ανάλυση παραμορφώσεων

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών αυτών παρουσιάζονται συνοπτικά στα διαγράμματα των σχημάτων 5 και 6. Από την ανάλυση των στοιχείων αυτών, προκύπτει:

- Κατά το μετασχηματισμό της επιφάνειας του ΕΕΠ σε οποιαδήποτε από τις ανωτέρω τέσσερις βοηθητικές σφαίρες (σφαίρα συμμορφίας, ισοδύναμη σφαίρα, ισαπέχουσα στους μεσημβρινούς σφαίρα και ισαπέχουσα στους παραλλήλους σφαίρα), οι δημιουργούμενες γραμμικές, γωνιακές και επιφανειακές παραμορφώσεις είναι πρακτικά αμελητέες για το σκοπό της εκτελεσθείσας έρευνας (χαρτογραφική απεικόνιση ολόκληρης, ή τμήματος της επιφάνειας της γης).
- Η μέγιστη γραμμική παραμόρφωση είναι περίπου 0.33%. Η παραμόρφωση αυτή παρατηρείται στους πόλους της σύμμορφης σφαίρας και της ισαπέχουσας στους παραλλήλους

- σφαίρας. Η ελάχιστη γραμμική παραμόρφωση (πλην της σύμμορφης σφαίρας) είναι περίπου 0.12%. Η παραμόρφωση αυτή παρατηρείται στον ισημερινό της ισοδύναμης σφαίρας.
- Η μέγιστη γωνιακή παραμόρφωση είναι περίπου 11'.5. Η παραμόρφωση αυτή παρατηρείται στον ισημερινό της ισαπέχουσας στους παραλλήλους σφαίρας. Η ελάχιστη γωνιακή παραμόρφωση (πλην της σύμμορφης σφαίρας) είναι περίπου 3'.8. Η παραμόρφωση αυτή παρατηρείται στον ισημερινό και τους πόλους της ισοδύναμης σφαίρας.
 - Η μέγιστη επιφανειακή παραμόρφωση είναι περίπου 0.69%. Η παραμόρφωση αυτή παρατηρείται στους πόλους της σύμμορφης σφαίρας. Η ελάχιστη επιφανειακή παραμόρφωση είναι περίπου 0.57%. Η παραμόρφωση αυτή παρατηρείται στον ισημερινό της ισαπέχουσας στους παραλλήλους σφαίρας.
 - Η ισαπέχουσα στους μεσημβρινούς σφαίρα δεν εμφανίζει μεγάλες τιμές γραμμικών ή γωνιακών παραμορφώσεων, όπως η σύμμορφη και η ισοδύναμη σφαίρα αντιστοίχως. Επίσης η ισαπέχουσα στους μεσημβρινούς σφαίρα εμφανίζει μικρότερες γωνιακές και επιφανειακές παραμορφώσεις από την ισαπέχουσα στους παραλλήλους σφαίρα.

ΣΥΝΟΨΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν άρθρο παρουσιάστηκαν και αξιολογήθηκαν τέσσερις μέθοδοι μετασχηματισμού της επιφάνειας του ελλειψοειδούς σε σφαιρική επιφάνεια με σκοπό τον περαιτέρω μετασχηματισμό της σφαιρικής αυτής επιφάνειας σε επίπεδο με τη χρήση χαρτογραφικών προβολών για τις οποίες δεν υπάρχουν εξισώσεις μετασχηματισμού του ελλειψοειδούς. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάστηκαν και αξιολογήθηκαν συναρτήσεις για τον ευθύ και για τον αντίστροφο μετασχηματισμό των γεωδαιτικών συντεταγμένων (φ , λ) των σημείων του ελλειψοειδούς (επιφάνειας αναφοράς) στις σφαιρικές συντεταγμένες (φ' , λ') των σημείων της σφαίρας (επιφάνειας απεικόνισης) για τις επόμενες περιπτώσεις:

- μετασχηματισμός της επιφάνειας του ελλειψοειδούς σε σφαίρα χωρίς γωνιακές παραμορφώσεις (σφαίρα σύμμορφης)
- μετασχηματισμός της επιφάνειας του ελλειψοειδούς σε σφαίρα χωρίς επιφανειακές (εμβαδικές) παραμορφώσεις (ισοδύναμη σφαίρα)
- μετασχηματισμός της επιφάνειας του ελλειψοειδούς σε σφαίρα χωρίς γραμμικές παραμορφώσεις στη διεύθυνση των μεσημβρινών (σφαίρα ισαπέχουσα στη διεύθυνση των μεσημβρινών)
- μετασχηματισμός της επιφάνειας του ελλειψοειδούς σε σφαίρα χωρίς γραμμικές παραμορφώσεις στη διεύθυνση ενός παραλλήλου πλάτους (σφαίρα ισαπέχουσα στη διεύθυνση ενός παραλλήλου πλάτους)

Για την αξιολόγηση των παραπάνω μεθόδων μετασχηματισμού της επιφάνειας του ελλειψοειδούς σε σφαιρική επιφάνεια έγινε υπολογισμός και ανάλυση της κατανομής των παραμορφώσεων (γραμμικών, επιφανειακών και γωνιακών) που δημιουργούνται κατά τους μετασχηματισμούς αυτούς. Τα αποτελέσματα αυτής της αξιολόγησης μπορούν να αξιοποιηθούν στην επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου μετασχηματισμού για την χαρτογραφική απεικόνιση ολόκληρης, ή τμήματος της επιφάνειας της γης με βάση τις κατά περίπτωση επιθυμητές ιδιότητες (π.χ. μηδενισμός των γωνιακών παραμορφώσεων, μηδενισμός των γραμμικών παραμορφώσεων σε μία καθορισμένη διεύθυνση κλπ.), ανάλογα με τον σκοπό για τον οποίο προορίζεται κάθε χαρτογραφική απεικόνιση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Bugayevskiy, L. M. and J. P Snyder. *Map Projections – A Reference Manual*, Taylor & Francis, London 1995.

2. Grafarend, E. W. and F. Krumm. 2006. *Map projections - Cartographic Information Systems*. Springer Verlag.
3. Maling, D. H. 1973. *Coordinate Systems and Map Projections*. George Philip and Son Ltd., 2nd ed., Pergamon Press, Oxford.
4. Νάκος Β. *Αναλυτική Χαρτογραφία*. ΕΜΠ. 2006
5. Παλληκάρης, Α. 2010. *Διερεύνηση και Επίλυση Προβλημάτων Ναυσιπλοΐας και Οπτικοποίηση Δρομολογίων Πλου Μεγάλων Αποστάσεων σε Συστήματα Ηλεκτρονικού Χάρτη*. Διδακτορική Διατριβή. ΕΜΠ.
6. Πολυράκης Ι. *Στοιχειώδης Διαφορική Γεωμετρία*. Αθήνα 2008. ISBN-9789609090315.
7. Pearson, F, II. 1990. *Map Projections: Theory and Applications*. CRC Press. ISBN 0-8493-6888-X.
8. Richardus, P. Adler, R. K. 1972. *Map projections for Goedesists, Cartographers and Geographers*. North-Holland Pub. Co. Amsterdam.
9. Snyder, J. P. *Map Projections: A Working Manual*. U. S. Geological Survey Professional Paper 1395, Washington, DC: U. S. Government Printing Office.
10. Yang, Q. Snyder, J. P. Tobler, W. R. 2000. *Map Projection Transformation, Principles and Applications*. Taylor & Francis, London.

Foundations of Newtonian Dynamics: An Axiomatic Approach for the Thinking Student

C. J. Papachristou³

Department of Physical Sciences, Naval Academy of Greece, Piraeus 18539, Greece

Abstract. Despite its apparent simplicity, Newtonian Mechanics contains conceptual subtleties that may cause some confusion to the deep-thinking student. These subtleties concern fundamental issues such as, e.g., the number of independent laws needed to formulate the theory, or, the distinction between genuine physical laws and derivative theorems. This article attempts to clarify these issues for the benefit of the student by revisiting the foundations of Newtonian Dynamics and by proposing a rigorous axiomatic approach to the subject. This theoretical scheme is built upon two fundamental postulates, namely, conservation of momentum and superposition property for interactions. Newton's Laws, as well as all familiar theorems of Mechanics, are shown to follow from these basic principles.

1. Introduction

Teaching introductory Mechanics can be a major challenge, especially in a class of students that are not willing to take anything for granted! The problem is that, even some of the most prestigious textbooks on the subject may leave the student with some degree of confusion, which manifests itself in questions like the following:

1. Is Newton's First Law a law of motion (of free bodies) or is it a statement of existence (of inertial reference frames)?
2. Are the first two Newton's Laws independent of each other? It seems that the First Law is but a special case of the Second!
3. Is the Second Law a true law or just a definition (of force)?
4. Is the Third Law more fundamental than conservation of momentum, or is it the other way around?
5. And, finally, how many *independent* laws are really needed in order to build a complete theoretical basis for Mechanics?

³ papachristou@snd.edu.gr

In this article we describe an axiomatic approach to introductory Mechanics that is both rigorous and pedagogical. It purports to clarify issues like the ones mentioned above, at an early stage of the learning process, thus aiding the student to acquire a deep understanding of the basic ideas of the theory. It is not the purpose of this article, of course, to present an outline of a complete course of Mechanics! Rather, we will focus on the most fundamental concepts and principles, those that are taught at the early chapters of Dynamics (we will not be concerned with Kinematics, since this subject confines itself to a description of motion rather than investigating the physical laws governing this motion).

The axiomatic basis of our approach consists of two fundamental postulates, presented in Section 2. The first postulate (*P1*) embodies both the existence of *inertial reference frames* and the *conservation of momentum*, while the second one (*P2*) expresses a *superposition principle for interactions*. The *Law of Inertia* is deduced from *P1*.

In Sec.3, the concept of *force* on a particle subject to interactions is defined (as in *Newton's Second Law*) and *P2* is used to show that a composite interaction of a particle with others is represented by a vector sum of forces. Then, *P1* and *P2* are used to derive the *Law of Action and Reaction*. Finally, a generalization to systems of particles subject to external interactions is made.

For completeness of presentation, certain derivative concepts such as *angular momentum* and *work* are discussed in Sec.4. To make the article self-contained, proofs of all theorems are included.

2. The Fundamental Postulates

We begin with some basic definitions.

Definition 1. A *frame of reference* (or *reference frame*) is a coordinate system (or set of axes) used by an observer to measure the position, orientation, etc., of objects in space. The position of the observer him/herself is assumed *fixed* relative to his/her own frame.

Definition 2. An *isolated system of particles* is a system of particles subject only to their mutual interactions, i.e., subject to no *external* interactions. Any system of particles subject to external interactions that somehow cancel one another in order to make the system's motion identical to that of an isolated system will also be considered an "isolated" system. An isolated system consisting of a single particle is called a *free particle*.

Our first fundamental postulate of Mechanics is stated as follows:

Postulate 1. A class of frames of reference (*inertial frames*) exists such that, for any *isolated* system of particles, a vector equation of the following form is valid:

$$\sum_i m_i \vec{v}_i = \text{constant in time} \quad (1)$$

where \vec{v}_i is the velocity of the particle indexed by i ($i=1,2,\dots$) and m_i is a constant quantity associated with this particle, which quantity is independent of the number or nature of interactions the particle is subject to.

We call m_i the *mass* and $\vec{p}_i = m_i \vec{v}_i$ the *momentum* of this particle. Also, we call

$$\vec{P} = \sum_i m_i \vec{v}_i = \sum_i \vec{p}_i \quad (2)$$

the *total momentum* of the system, relative to the considered reference frame. Postulate 1, then, expresses the *principle of conservation of momentum*: the total momentum of an isolated system of particles, relative to an inertial reference frame, is constant in time. (The same is true, in particular, for a free particle.)

Corollary 1. A free particle moves with constant velocity (i.e., with no acceleration) relative to any *inertial* reference frame.

Corollary 2. Any two free particles move with constant velocities relative to each other.

Corollary 3. The position of a free particle may define the origin of an inertial frame of reference.

We note that Corollaries 1 and 2 constitute alternate expressions of the *Law of Inertia* (*Newton's First Law*).

Consider now an isolated system of two particles of masses m_1 and m_2 . Assume that the particles are allowed to interact for some time interval Δt . By conservation of momentum,

$$\Delta(\vec{p}_1 + \vec{p}_2) = 0 \Rightarrow \Delta\vec{p}_1 = -\Delta\vec{p}_2 \Rightarrow m_1 \Delta\vec{v}_1 = -m_2 \Delta\vec{v}_2 .$$

We note that the changes in the velocities of the two particles within the (arbitrary) time interval Δt must be in opposite directions, a fact that is verified experimentally. Moreover,

$$\frac{|\Delta\vec{v}_1|}{|\Delta\vec{v}_2|} = \frac{m_2}{m_1} = \text{constant} \quad (3)$$

regardless of the kind of interaction or the time Δt (which also is an experimentally verified fact). These demonstrate, in practice, the validity of the first postulate. Moreover, Eq.(3) allows us to specify the mass of a particle numerically, relative to the mass of any other particle, by letting the two particles interact for some time.

So far we have examined the case of isolated systems and, in particular, free particles. Consider now a particle subject to interactions with the rest of the world. Then, in general (unless these interactions somehow cancel one another), the particle's momentum will not remain constant relative to an *inertial* reference frame, i.e., will be a function of time. Our second postulate, which expresses the *superposition principle for interactions*, asserts that external interactions act on a particle independently of one another and their effects are superimposed:

Postulate 2. If a particle of mass m is subject to interactions with particles m_1, m_2, \dots , then, at each instant t , the rate of change of its momentum is equal to

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \sum_i \left(\frac{d\vec{p}}{dt} \right)_i \quad (4)$$

where $(d\vec{p}/dt)_i$ is the rate of change of the particle's momentum due solely to its interaction with particle m_i (i.e., the rate of change of \vec{p} if the particle m interacted only with m_i).

3. The Concept of Force

We now *define* the concept of force, in a manner similar to *Newton's Second Law*:

Definition 3. Consider a particle of mass m that is subject to interactions. Let $\vec{p}(t)$ be the particle's momentum as a function of time, as measured relative to an *inertial* reference frame. The vector quantity

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} \quad (5)$$

is called the *total force* acting on the particle at time t .

Taking into account that, for a single particle, $\vec{p} = m\vec{v}$ with fixed m , we may rewrite Eq.(5) in the equivalent form,

$$\vec{F} = m\vec{a} = m \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (6)$$

where \vec{a} is the particle's acceleration at time t .

Corollary 4. Consider a particle of mass m subject to interactions with particles m_1, m_2, \dots . Let \vec{F} be the total force on m at time t , and let \vec{F}_i be the force on m due solely to its interaction with m_i . Then, by the superposition principle for interactions (Postulate 2) as expressed by Eq.(4), we have:

$$\vec{F} = \sum_i \vec{F}_i \quad (7)$$

Theorem 1. Consider two particles 1 and 2. Let \vec{F}_{12} be the force on particle 1 due to its interaction with particle 2 at time t , and let \vec{F}_{21} be the force on particle 2 due to its interaction with particle 1 at the same instant. Then,

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21} \quad (8)$$

Proof. By the superposition principle, the forces \vec{F}_{12} and \vec{F}_{21} are independent of the presence or not of other particles in interaction with particles 1 and 2. Thus, without loss of generality, we may assume that the system of the two particles is isolated. Then, by conservation of momentum and by using Eq. (5),

$$\frac{d}{dt}(\vec{p}_1 + \vec{p}_2) = 0 \Rightarrow \frac{d\vec{p}_1}{dt} = -\frac{d\vec{p}_2}{dt} \Rightarrow \vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21} .$$

Equation (8) expresses the *Law of Action and Reaction (Newton's Third Law)*.

Theorem 2. The rate of change of the total momentum $\vec{P}(t)$ of a system of particles, relative to an inertial frame of reference, equals the total *external* force acting on the system at time t .

Proof. Consider a system of particles of masses m_i ($i=1,2,\dots$). Let \vec{F}_i be the total *external* force on m_i (due to its interactions with particles *not belonging* to the system), and let \vec{F}_{ij} be the *internal* force on m_i due to its interaction with m_j (by convention, $\vec{F}_{ij} = 0$ when $i=j$). Then, by Eq.(5) and by taking into account Eq. (7),

$$\frac{d\vec{p}_i}{dt} = \vec{F}_i + \sum_j \vec{F}_{ij} .$$

By using Eq.(2) for the total momentum, we have:

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \sum_i \frac{d\vec{p}_i}{dt} = \sum_i \vec{F}_i + \sum_{ij} \vec{F}_{ij} .$$

But,

$$\sum_{ij} \vec{F}_{ij} = \sum_{ji} \vec{F}_{ji} = \frac{1}{2} \sum_{ij} (\vec{F}_{ij} + \vec{F}_{ji}) = 0 ,$$

where the action-reaction law (8) has been taken into account. So, finally,

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \sum_i \vec{F}_i = \vec{F}_{ext} \quad (9)$$

where \vec{F}_{ext} represents the *total external force* on the system.

4. Derivative Concepts and Theorems

Having presented the most fundamental concepts of Mechanics, we now turn to some useful derivative concepts and related theorems, such as those of angular momentum and its relation to torque, work and its relation to kinetic energy, and conservative force fields and their association with mechanical-energy conservation.

Definition 4. Let O be the origin of an *inertial* reference frame, and let \vec{r} be the position vector of a particle of mass m , relative to O . The vector quantity

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p} = m(\vec{r} \times \vec{v}) \quad (10)$$

(where $\vec{p} = m\vec{v}$ is the particle's momentum in the considered frame) is called the *angular momentum* of the particle relative to O .

Theorem 3. The rate of change of the angular momentum of a particle, relative to O , is given by

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{r} \times \vec{F} \equiv \vec{T} \quad (11)$$

where \vec{F} is the *total* force on the particle at time t , and \vec{T} is the *torque* of this force relative to O , at this instant.

Proof. Equation (11) is easily proven by differentiating Eq.(10) with respect to time, and by using Eq.(5).

Corollary 5. If the torque of the total force on a particle, relative to some point O , vanishes, then the angular momentum of the particle relative to O is constant in time (*principle of conservation of angular momentum*).

Under appropriate conditions, the above conservation principle can be extended to the more general case of a system of particles (see, e.g., [1-5]).

Definition 5. Consider a particle of mass m in a *force field* $\vec{F}(\vec{r})$, where \vec{r} is the particle's position vector relative to the origin O of an inertial reference frame. Let C be a curve representing the trajectory of the particle from point A to point B in this field. Then, the line integral

$$W_{AB} = \int_A^B \vec{F}(\vec{r}) \cdot d\vec{r} \quad (12)$$

represents the *work* done by the force field on m along the path C . (*Note:* This definition is valid independently of whether or not additional forces, not related to the field, are acting on the particle; i.e., regardless of whether or not $\vec{F}(\vec{r})$ represents the total force on m .)

Theorem 4. Let $\vec{F}(\vec{r})$ represent the *total* force on a particle of mass m in a force field. Then, the work done on the particle along a path C from A to B is equal to

$$W_{AB} = \int_A^B \vec{F}(\vec{r}) \cdot d\vec{r} = E_{k,B} - E_{k,A} = \Delta E_k \quad (13)$$

where

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{p^2}{2m} \quad (14)$$

is the *kinetic energy* of the particle.

Proof. By using Eq.(6), we have:

$$\vec{F} \cdot d\vec{r} = m \frac{d\vec{v}}{dt} \cdot d\vec{r} = m\vec{v} \cdot d\vec{v} = \frac{1}{2}m d(\vec{v} \cdot \vec{v}) = \frac{1}{2}m d(v^2) = mvdv,$$

from which Eq.(13) follows immediately.

Definition 6. A force field $\vec{F}(\vec{r})$ is said to be *conservative* if a scalar function $E_p(\vec{r})$ (*potential energy*) exists, such that the work on a particle along *any* path from A to B can be written as

$$W_{AB} = \int_A^B \vec{F}(\vec{r}) \cdot d\vec{r} = E_{p,A} - E_{p,B} = -\Delta E_p \quad (15)$$

Theorem 5. If the total force $\vec{F}(\vec{r})$ acting on a particle m is conservative, with an associated potential energy $E_p(\vec{r})$, then the quantity

$$E = E_k + E_p = \frac{1}{2}mv^2 + E_p(\vec{r}) \quad (16)$$

(*total mechanical energy* of the particle) remains constant along any path traced by the particle (*conservation of mechanical energy*).

Proof. By combining Eq.(13) (which is generally valid for *any* kind of force) with Eq.(15) (which is valid for *conservative* force fields) we find:

$$\Delta E_k = -\Delta E_p \Rightarrow \Delta(E_k + E_p) = 0 \Rightarrow E_k + E_p = \text{const.}$$

Theorems 4 and 5 are readily extended to the case of a system of particles [1-5].

5. Summary and Concluding Remarks

Newtonian Mechanics is the first subject in Physics an undergraduate student is exposed to. It continues to be important even at the intermediate and advanced levels, despite the predominant role played there by the more general formulations of Lagrangian and Hamiltonian dynamics.

It is this author's experience as a teacher that, despite its apparent simplicity, Newtonian Mechanics contains certain conceptual subtleties that may leave the deep-thinking student with some degree of confusion. The average student, of course, is happy with the idea that the whole theory is built upon three rather simple laws attributed to Newton's genius. In the mind of the more demanding student, however, puzzling questions often arise, such as, e.g., how many *independent* laws we really need to fully formulate the theory, or, which ones should be regarded as truly fundamental laws of Nature, as opposed to others that can be *derived* as theorems.

This article suggested an axiomatic approach to introductory Mechanics based on two fundamental, empirically verifiable laws, namely, the *principle of conservation of momentum* and

the *principle of superposition for interactions*. We showed that all standard ideas of Mechanics (including, of course, Newton's Laws) naturally follow from these basic principles. To make our formulation as economical as possible, we expressed the first principle in terms of a system of particles and treated the single-particle situation as a special case. To make the article self-contained for the benefit of the student, explicit proofs of all theorems were given.

By no means do we assert, of course, that this particular approach is unique or pedagogically superior to other established methods that adopt different viewpoints regarding the axiomatic basis of Classical Mechanics (see, e.g., a historical overview of these viewpoints in the first chapter of [6]). Moreover, this approach suffers from the usual theoretical problems inherent in Newtonian Mechanics (see, e.g., [7,8]), most serious of which is the following: To test whether a given reference frame is inertial or not, one needs to check the constancy or not of the velocity of a free particle, relative to this frame. However, an absolutely "free" particle is only a theoretical conception, for the following reasons: (1) Every particle is subject to the long-range gravitational interaction with the rest of the world. (2) To observe a particle, one necessarily has to somehow interact with it. Thus, no matter how weak this interaction may be, the particle can no longer be considered free during the observation process.

In any case, it looks like Classical Mechanics remains a subject open to discussion and re-interpretation, and more can always be said about things that are usually taken for granted by most students (this is not exclusively their fault, of course!). Happily, some of my own students do not fall into this category. I honestly appreciate the hard time they enjoy giving me in class!

References

1. M. Alonso, E. J. Finn, *Fundamental University Physics*, Volume I: *Mechanics* (Addison-Wesley, 1967).
2. K. R. Symon, *Mechanics*, 3rd Edition (Addison-Wesley, 1971).
3. J. B. Marion, S. T. Thornton, *Classical Dynamics of Particles and Systems*, 4th Edition (Saunders College, 1995).
4. H. Goldstein, *Classical Mechanics*, 2nd Edition (Addison-Wesley, 1980).
5. C. J. Papachristou, *Introduction to Mechanics of Particles and Systems* (in Greek) (Naval Academy of Greece Publications, 2010) <http://openeclass.snd.edu.gr/openeclass-2.6.1/modules/document/file.php/TOM6103/Mechanics%20Volume%20PDF.pdf>
6. N. C. Rana, P. S. Joag, *Classical Mechanics* (Tata McGraw-Hill, 1991).
7. C.-E. Khiari, *Newton's Laws of Motion Revisited: Some Epistemological and Didactic Problems*, *Lat. Am. J. Phys. Educ.* **5** (2011) 10-15.
8. A. E. Chubykalo, A. Espinoza, B. P. Kosyakov, *The Inertial Property of Approximately Inertial Frames of Reference*, *Eur. J. Phys.* **32** (2011) 1347-1356.

A Study On Radioactive Source Imaging By Using A Pixelated CdTe Radiation Detector

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

a. Technological Educational Institute of Piraeus, Department of Physics, Chemistry & Material Technology, P. Ralli & Thivon 250, 12244, Greece

b. Hellenic Army Academy, 16673 Vari, Greece

c. Greek Atomic Energy Commission, Patriarxou Grigoriou & Neapoleos, 15310 Athens, Greece

d. National Centre for Scientific Research "Demokritos", Institute of Nuclear Physics, 15310 Athens, Greece

e. Technological Educational Institute of Chalkida, Psachna Evias 34400, Greece

Abstract. We present simulation studies on the ability of a proposed portable radiation detecting instrument to reconstruct images of radioactive sources. The instrument is a stack of ten CdTe layers placed 2 cm apart, consisting of 10000 pixels in a two-dimensional arrangement, occupying an area of 4cmx4cm. The image reconstruction is performed using LM-MELM, an imaging algorithm based on the Compton imaging technique. Point-like radioactive sources emitting gamma-rays in a broad energy range, located at various distances and orientations with respect to the detector's symmetry axis have been simulated in order to estimate the ability of the instrument to reconstruct the source images. Results on the reconstructed image resolution are presented.

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

Radiation detectors that use gamma-ray imaging technologies in order to identify radioactive sources are of great scientific interest because of their wide range of applications, including nuclear medicine, astrophysics, waste monitoring and counter terrorism. One of the best known such imaging technologies is the Compton imaging [1], based on the interactions of the emitted gamma-rays with the detector's sensitive elements via the Compton scattering process. Although research in the Compton imaging technique's applications have begun in the 1990s, the growing global interest for accurate detection of radioactive sources combined with the rapid advances in detector technologies (both in terms of material fabrication and electronics), have nowadays given great impetus to the research and development of Compton imaging detectors with enhanced detection capability.

In this framework, the main objective of the current research paper is to evaluate the imaging performance of a Compton imaging instrument under development (COCAE) [2].

COCAE consists of ten parallel planar layers made of pixelated Cadmium Telluride (CdTe) crystals occupying an area of 4cmx4cm, placed 2cm apart from each other. Each detector's layer has 10,000 pixels arranged in two dimensions (100x100) bump-bonded on a two-dimensional array of silicon readout CMOS circuits. Both pixels and readout arrays are on top of an Al₂O₃ supporting printed circuit board layer.

The most important parameters in the design of a Compton imaging detector such as COCAE are the efficiency in detecting gamma-rays and the energy resolution, which affects the evaluation of the Compton scattering angle. COCAE is made of CdTe semiconductor crystals, thus it is expected to achieve an enhanced detection efficiency compared to Germanium (Ge) and Sodium Iodide (NaI) detectors, due to the higher atomic number of Cd and Te, resulting into a higher absorption of gamma-rays via the photoelectric effect. In order to achieve even better efficiency, a thick CdTe detector of several mm would be needed but such an increase of the crystal's thickness would deteriorate the detector energy resolution (due to the effect of incomplete charge collection of CdTe semiconductors). To bypass this restriction, COCAE instrument has been designed as a system of many thin stacked CdTe crystals instead of one thick mono-crystal. As to the energy resolution parameter, the challenge for COCAE is to achieve a high energy resolution without the need of cryogenics (CdTe semiconductors can be operated at room temperature due to their high energy bandwidth), which is important when considering a portable instrument.

In order to study its performance, the COCAE instrument is modelled (Figure 1) by an open-source object-oriented software library (MEGALib [3] which provides an interface to Geant4 [4], a toolkit that simulates the passage of particles through matter. The radioactive sources are modelled as point-like mono-energetic gamma sources located at various distances and orientations with respect to the detector, emitting gamma-rays having energies in the range from 100keV to 2000keV. The simulated energy depositions 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. At least one billion of gamma rays are emitted from the radioactive sources for each simulation condition.

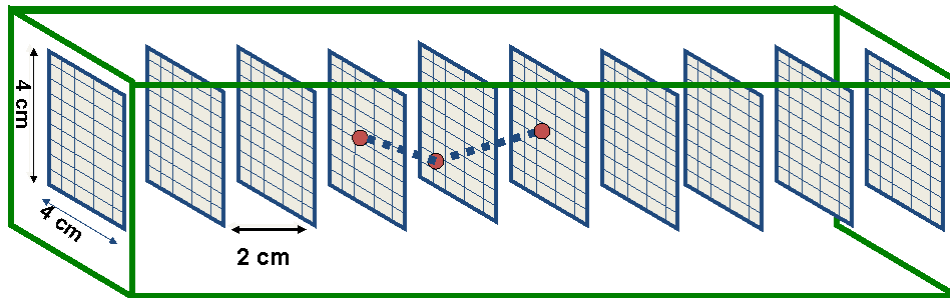


FIGURE 1. A simulated gamma-ray interacts with the COCAE detector. Three energy depositions are recorded.

Important performance parameters of the COCAE instrument such as its detecting efficiency and angular resolution have been studied by Monte Carlo in our previous work [5] as well as various techniques for the determination of the correct sequence of multiple Compton scattering interactions of the gamma rays with the detector's sensitive materials, in a wide range of incident gamma-ray energies [6], [7], [8].

The current research work aims to study the ability of the COCAE instrument to reconstruct the image of point-like radioactive sources located at different orientations and source-to-detector distances, emitting gamma-rays in a wide range of energies. Described in the following

sections is the image reconstruction algorithm used as well as the resolution of the reconstructed images.

SOURCE IMAGE RECONSTRUCTION

The process of Compton imaging refers to the generation of the image of a radioactive source by using the recorded information of the energy depositions and the positions of the interactions of many incident gamma rays with the sensitive materials of the detector. There are several algorithms that yield Compton images. For the current research work the selected imaging algorithm is the List Mode Maximum Likelihood Expectation Maximization (LM-MLEM). This technique has been originally developed for medical imaging [9] and has been wide-spread in the field of Compton imaging [6].

LM-MLEM is an iterative algorithm that converges to the source image with the highest likelihood of having produced the recorded data. It is a list mode based algorithm (LM); the data fed to the algorithm is a mere list of events (energy depositions and positions of interactions of the incident gamma rays via the Compton scattering). The list mode methods are appealing in image reconstruction because the total number of data in the list is significantly smaller than the number of possible combination of position and energy measurements.

The imaging algorithm starts the reconstruction of the image for each event at a time by using the back projection method illustrated in Figure 2, which is an algorithm that projects the Compton cone of each event onto an imaging plane. The Compton cone refers to the well known Compton scattering process: When an emitted gamma-ray interacts with the detecting materials via the Compton scattering effect, a recoil electron and a scattered photon are created in a such way so both the energy and the momentum of the scattering is conserved. The energy (E_e) and the position (\vec{r}_1) of the recoil electron can be quickly measured while the scattered photon ideally deposits all its energy (E_g) in the detecting materials in a series of one or more interactions before it is finally absorbed via a photoelectric interaction. (The position of an interaction is assumed to be the center of a CdTe pixel). The scattering angle (θ) is related to the energy depositions both of the recoil electron and of the scattered photon via the well known Compton formula:

$$\cos \theta = 1 - m_0 c^2 \left(\frac{1}{E_g} - \frac{1}{E_g + E_e} \right) \quad (56)$$

where $m_0 c^2$ is the rest energy of the electron.

Moreover, the scattering angle is geometrically related to the direction (\hat{r}_0) of the incident gamma-ray via the formula:

$$\cos \theta = \hat{r}_0 \cdot \hat{u} \quad (57)$$

where $\hat{u} = \frac{\vec{r}_2 - \vec{r}_1}{|\vec{r}_2 - \vec{r}_1|}$

Thus, by recording the positions of the interactions (\vec{r}_1, \vec{r}_2) and the energy depositions (E_e, E_g), the incident direction (r_0) of the primary gamma-ray is constrained to lie on a cone (Compton cone). The Compton cone's central axis is defined by the vector u given by equation (2) connecting the two interactions whereas the cone's opening angle is equal to the Compton scattering angle defined by equation (1). The apex of the Compton cone is located at the CdTe crystal pixel in which the gamma-ray have scattered.

Since the incident gamma ray could have originated from any point on the surface of the Compton cone, during the image reconstruction, the back projection algorithm samples randomly the azimuthal angle (ϕ) over the full range $[0, 2\pi]$. Then, each of the vectors

corresponding to a specific value of φ directed towards to the apex of the cone is projected onto multiple planes at different source-to-detector distances (z). For any given projection imaging plane, the pixels intersected by the cone form a circle scribed onto the projection plane.

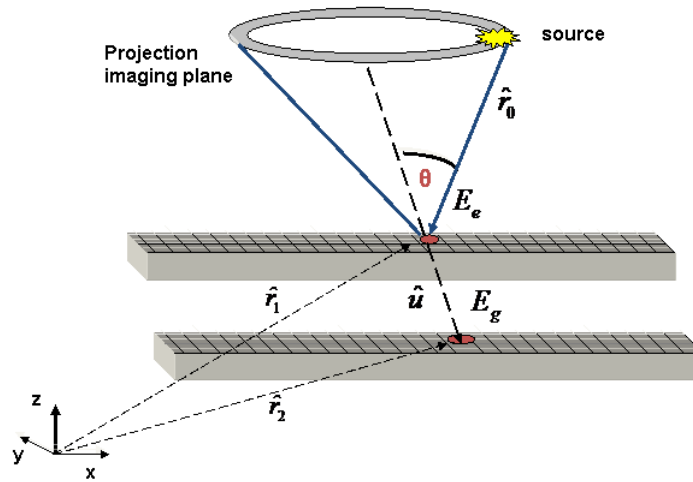


FIGURE 2. The Back projection imaging algorithm

All back projected Compton circles (each one corresponding to a different incident gamma-ray emitted by the radioactive source) intersect at a common point that determines the source location. In principle three Compton cones should be enough to reconstruct the image of a point-like radioactive source but in practice (due to measurement errors and to incomplete absorption of the scattered photon) a large number of reconstructed Compton cones are needed to derive the source location accurately (Figure 3).

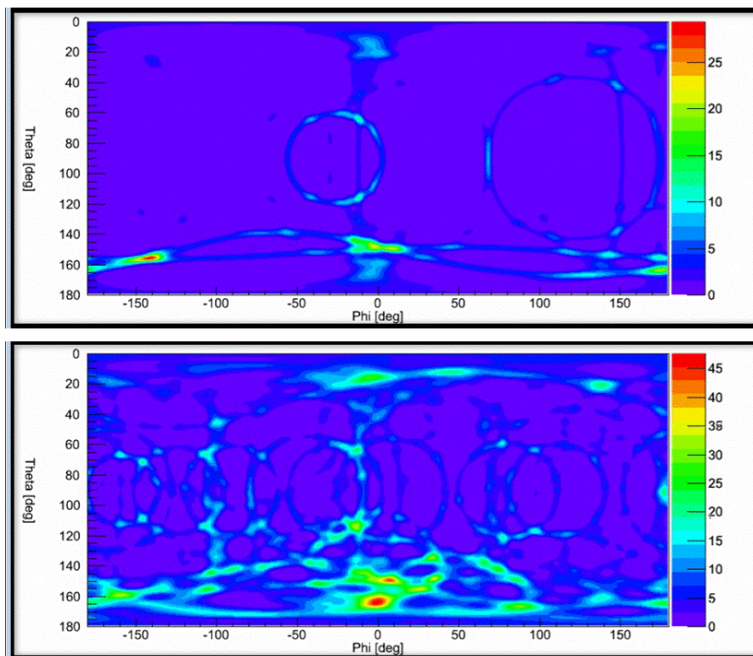


FIGURE 3. The back projected image process: as the number of events and the number of iterations increase (from top to bottom), the source image converges.

The back projected image serves as the initial estimation of the image to start the iteration procedure of the LM-MLEM algorithm. For each pixel in the image all the events having a Compton cone that touched that pixel are recorded and the pixel's sensitivity is calculated, representing the probability that a gamma ray originated by the pixel is detected anywhere in the detector. This information is fed to the LM-MLEM algorithm that uses an iterative reconstruction equation for calculating the amplitude of each pixel of the image in order to find the reconstructed image distribution with the highest likelihood of having produced the recorded data.

Figure 4 depicts the reconstructed image for the case of an 800keV point-like radioactive source using 50 iterations of the LM-MLEM imaging algorithm. The simulated source is located 50 cm from the detector's center at inclination angle $\theta=26.56^\circ$ and azimuth angle $\varphi=0^\circ$ (where $\theta=0^\circ$ corresponds to the detector's symmetry axis), in spherical coordinates.

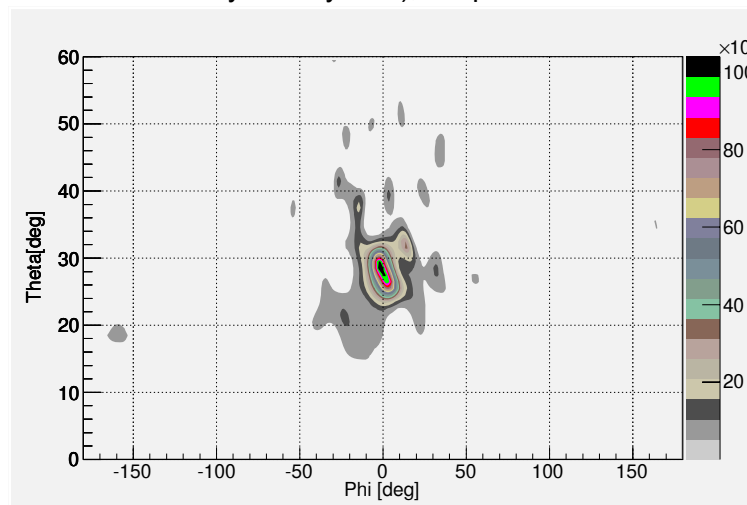


FIGURE 4. Reconstructed image using 50 iterations of LM-MLEM imaging algorithm, for the case of z simulated point-like radioactive source (800 keV) located at $(\theta=26.56^\circ, \varphi=0^\circ)$.

RECONSTRUCTED IMAGE RESOLUTION

The ability of the COCAE instrument to estimate the orientation of radioactive sources depends largely on its resolution of reconstructing radioactive sources' images. The reconstructed image resolution is defined as the combined FWHM of the azimuth (φ) and inclination (θ) profiles of the source's reconstructed image measured in steradian (sr).

We have studied the reconstructed image resolution of the COCAE instrument by considering two case conditions: point-like radioactive sources located a) on the detector's symmetry axis (z) and b) off the detector's symmetry axis.

For the evaluation of the reconstructed image resolution for various gamma-ray energies, source-to-detector distances and orientations, the same number of interactions of incident gamma rays with the detector has been assumed. This assumption can be achieved experimentally by increasing the acquisition time as a function of the source-to-detector distance.

Shown in Figure 5a and 5b are the azimuth and inclination distributions respectively (measured in degrees), for the case of an 800keV point-like radioactive source located 50 cm from the detector's center at azimuth angle $\theta=26.56^\circ$ and inclination angle $\varphi=0^\circ$.

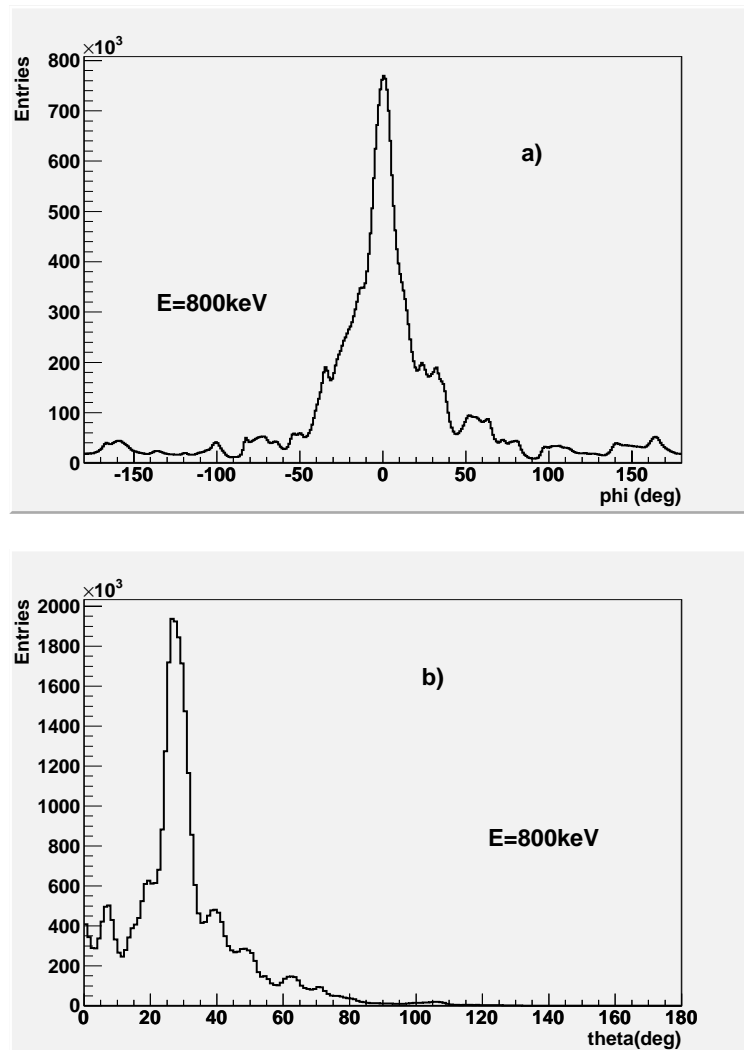


FIGURE 5. a) azimuth and b) inclination profiles of the reconstructed image of an 800keV point-like source located at $(\theta=26.56^\circ, \phi=0^\circ)$, in spherical coordinates.

Radioactive sources located on the detector's symmetry axis

For the case of on-axis radioactive sources, our studies have been performed by simulating radioactive sources emitting gamma rays in an energy range from 100keV to 2MeV located at distances up to 2m from the detector's centre.

Presented in Figure 6 is the reconstructed image resolution (measured in steradian (sr)) as a function of the source-to-detector distance for three cases of point-like radioactive sources emitting 400keV, 1000keV and 2000keV gamma rays. It can be noticed that the reconstructed image resolution increases as the source-to-detector distance is reduced; it varies from less than 2.5×10^{-3} sr (for source-to-detector distances ~ 50 cm) down to about 0.5×10^{-3} sr (for point-like sources located at distances greater than ~ 1 m).

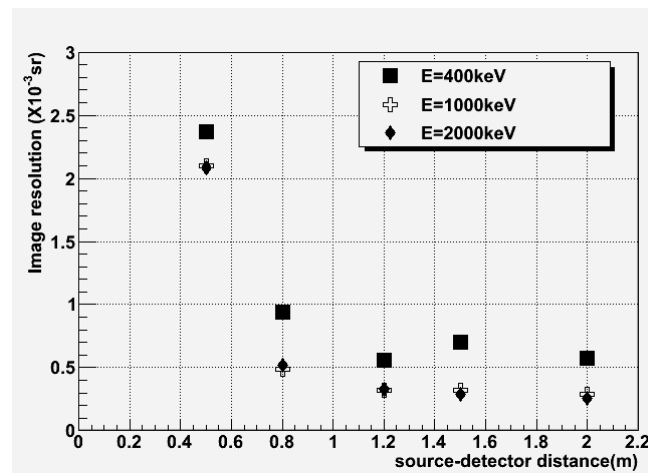


FIGURE 6. Reconstructed image resolution for point-like 400 keV, 1000 keV and 2000 keV radioactive sources located on the detector's symmetry axis, as a function of source-to-detector distance.

Furthermore, it can be seen from Figure 7 that for an arbitrary source-to-detector distance ($z=80\text{cm}$) and for point-like radioactive sources emitting gamma rays with energies in the range from 400keV to 2000keV, the reconstructed image resolution is less than $1 \times 10^{-3}\text{sr}$.

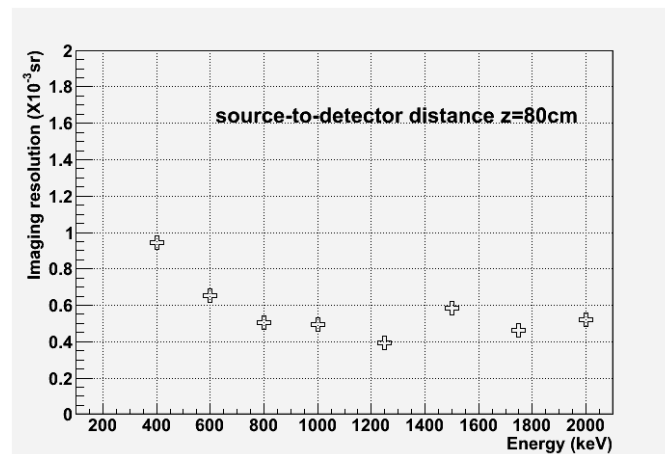


FIGURE 7. Reconstructed image resolution for point like radioactive sources located on the detector's symmetry axis as a function of the incident gamma ray energy, for an arbitrary source-to-detector distance ($z=80\text{cm}$).

Moreover, we have studied the dependence of the COCAE's image resolution on the number of the reconstructed events. (It has to be noticed that for the reconstruction of the source's image only a fraction of the reconstructed events is used, corresponding only to those events that interact with the COCAE's detecting elements via the Compton scattering process). Figure 8a and 8b show the azimuth (φ) and the inclination (θ) coordinate respectively of the reconstructed image, as a function of the number of reconstructed events. The simulated point-like radioactive sources emit gamma rays in the energy range from 400keV to 1250keV and they are located at an arbitrary source-to-detector distance ($z=120\text{cm}$), on the detector's symmetry axis ($\varphi=180^\circ$, $\theta=90^\circ$). The solid line in Figure 8a and 8b represents the real azimuth and inclination coordinate of the simulated sources respectively, whereas the error bars correspond to the estimated FWHM of the image distributions, measured in degrees (deg). It

can be seen that a minimum number of about 5×10^3 reconstructed events is required for a successful image reconstruction.

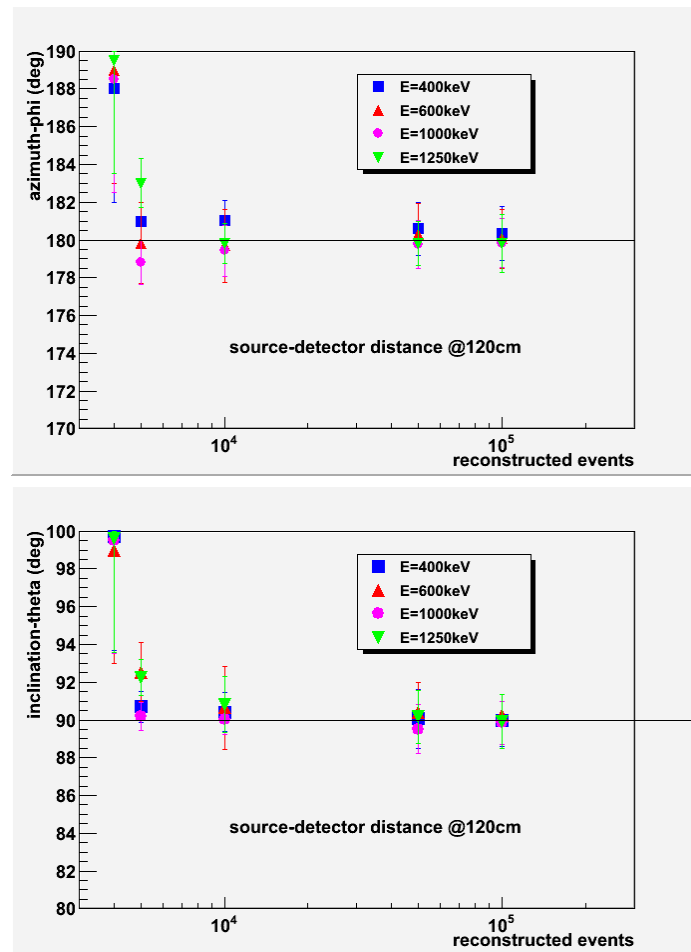


FIGURE 8: The azimuth (top) and inclination (bottom) image coordinate of point-like radioactive sources located on the detector’s symmetry axis (solid line), as a function of the number of reconstructed events.

Radioactive sources located off the detector’s symmetry axis

For the case of point-like radioactive sources located off the detector’s symmetry axis (defined at $\varphi=0^\circ, \theta=0^\circ$) we have performed Monte Carlo studies, by simulating radioactive sources emitting gamma rays in the energy range from 100keV to 2MeV. The sources are located at 50 cm from the detector’s center at azimuth angle $\varphi=0^\circ$ and inclination angles up to 90° .

Figure 9 illustrates the evaluated reconstructed image resolution as a function of the incident gamma ray energy, for the case of point-like radioactive sources located at various inclination angles whereas Figure 10 shows the reconstructed imaging resolution versus the inclination angle, for 600keV, 1000keV and 2000keV radioactive sources.

It can be noticed that the reconstructed image resolution is worse compared to the case of on-axis sources being less than $\sim 4 \times 10^{-3}$ sr, for point-like radioactive sources emitting gamma rays with energies from 600keV to 2000keV.

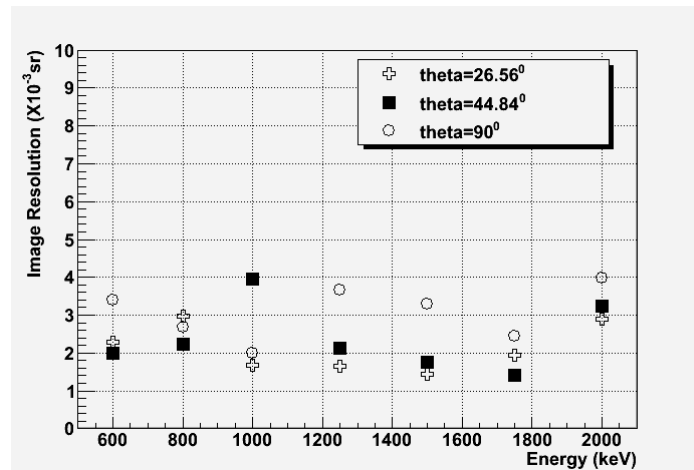


FIGURE 9. Reconstructed image resolution for point-like radioactive sources located off the detector's symmetry axis ($\varphi=0^\circ$, $\theta=0^\circ$), as a function of the incident gamma-ray energy.

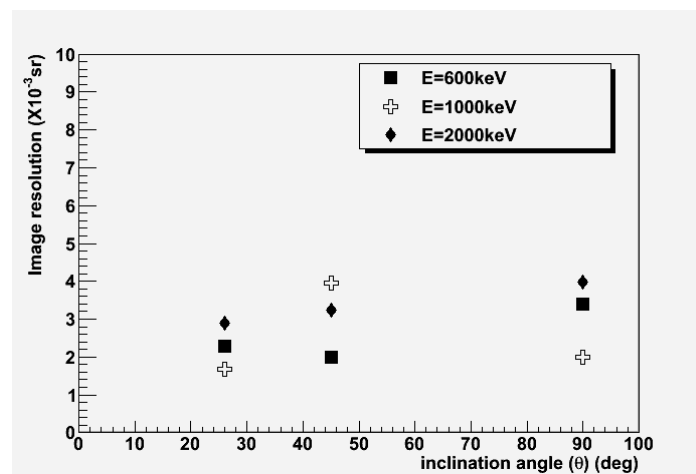


FIGURE 10. Reconstructed image resolution for point-like radioactive sources located off the detector's symmetry axis ($\varphi=0^\circ$, $\theta=0^\circ$), as a function of the inclination angle (θ).

CONCLUDING REMARKS

The reconstructed image resolution of a portable pixelated CdTe detector (COCAE) has been studied by applying the LM-MLEM imaging algorithm on a large number of simulated gamma rays. The radioactive sources are modelled as point-like mono-energetic gamma sources located at various distances and orientations with respect to the detector's symmetry axis, emitting gamma-rays having energies in a broad energy range from 100keV to 2000keV.

Our studies have shown that for radioactive sources placed on the detector's symmetry axis at least five thousand reconstructed events are needed for a successful reconstruction of the source's image. Using fifty iterations of the LM-MLEM imaging algorithm, the reconstructed image resolution has been estimated to be less than $\sim 2.5 \times 10^{-3}$ sr (for source-to-detector distances ~ 50 cm) down to $\sim 0.5 \times 10^{-3}$ sr (for point-like sources located at distances greater than ~ 1 m).

Moreover, simulation studies performed for radioactive sources placed off the detector's symmetry axis have showed that the ability of the instrument to reconstruct the image is worse than in the case of on-axis sources, being less than about 4×10^{-3} sr.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the European Community's Seventh Framework Program FP7-SEC-2007-01.

REFERENCES

1. T. Kamae, R. Enomoto and N. Hanada, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* **260**, 254-257 (1987).
2. C. Lambropoulos et al., "The COCAE Detector: An instrument for localization - identification of radioactive sources" in IEEE NSS-MIC, 17th Temperature Semiconductor Detector (RTSD) Workshop, 30 October-6 November 2010, Knoxville, Tennessee, USA.
3. Zoglauer, R. Andritschke and F. Schopper, *New Astronomy Reviews* **50**(7-8), 629-632 (2006).
4. "GEANT4. A toolkit for the simulation of the passage of particles through matter," <http://geant4.web.cern.ch/geant4/>.
5. K. Karafasoulis et al., "Simulated performance of a position sensitive radiation detecting system (COCAE)" in eRA-5-The SynEnergy Forum, 2010, e-Print: arXiv:1101.3881.
6. Andreas Christian Zoglauer, "First Light for the Next Generation of Compton and Pair Telescopes," Ph.D. Thesis, Max-Planck-Institute, 2005.
7. K. Karafasoulis et al., "Evaluation of Compton scattering sequence reconstruction algorithms for a portable position sensitive radioactivity detector based on pixelated Cd(Zn)Te crystals" in *Nausivios Chora* 2010, paper NCH-2010-D3, Copyright 2006-2010: Hellenic Naval Academy.
8. K. Karafasoulis et al., "Simulated performance of a position sensitive radiation detecting system (COCAE)" in IEEE 2010 Nuclear Science Symposium October 30-November 6, Knoxville Tennessee, preprint: arXiv:1101.3881.
9. S. Wilderman et al., "List-mode Maximum Likelihood Reconstruction of Compton Scatter Camera Images in Nuclear Medicine", *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **45**, 957 (1988).

A Gamma Spectroscopic Radiation Detector for Security Purposes

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

a. Hellenic Army Academy, 16673 Vari, Greece

b. Greek Atomic Energy Commission, Patriarxou Grigoriou & Neapoleos, 15310 Athens, Greece

c. Technological Educational Institute of Piraeus, Department of Physics, Chemistry & Material Technology, P. Ralli & Thivon 250, 12244, Greece

d. National Centre for Scientific Research "Demokritos", Institute of Nuclear Physics, 15310 Athens, Greece

e. Technological Educational Institute of Chalkida, Psachna Evias 34400, Greece

Abstract. We present the development of a stacked gamma radiation detecting system, consisting of three layers of pixelated Cadmium Telluride detectors (PID350). A high speed (120 frames/s) data acquisition system has been developed in order the system being able to compete with high flux of gamma rays. The PID350 detector's photo-peak energy resolution ranges from 1.73 keV to 2.15 keV (FWHM) at 59.5 KeV. Spectroscopic measurements performed have shown that the stacked detecting system is able to accurately evaluate the position of a 140.5 keV radioactive source located at distances in the range from 30 cm to 1 m.

Keywords: Semiconductor detectors, Gamma-ray spectroscopy, CdTe diode detector

PACS: 29.40.Wk, 29.30.Kv

INTRODUCTION

The last decades, the world's growing interest in homeland security has given new impetus to the efforts of the scientific community to improve gamma radiation detection technologies. Within this research field, the current work aims to explore the ability of a radiation detecting system under development to identify both the energy and the source-to-detector distance of gamma radioactive sources. The system consists of three planar pixelated Cadmium Telluride (CdTe) semiconductor detectors (PID350) stacked together.

Pixelated detectors have the advantage of providing accurate information on both the energy deposition and the position of each interaction of gamma radiation with the detecting materials. Moreover, by choosing the geometry of a stacked detector (in which thin layers are stacked together), the efficiency of detecting the gamma rays is increased and more information about the original gamma radiation can be extracted (since successive interactions with the detecting layers are recorded).

Described in the following sections is the general structure of a PID350 radiation detector, its calibration procedure as well as the high speed readout system developed so that the detector

being able to compete with high flux of gamma rays. A prototype stacked system consisting of three PID350 detectors is presented as well as results on its ability of estimating the position of point-like gamma sources.

THE PID350 DETECTOR

For the development of the gamma radiation stacked system, PID350 detectors provided by AJAT [1] have been used. PID350 is a pixelated detector based on CdTe-CMOS technology, suitable for gamma and X-ray detection (Figure 1). Its active area is 4.5 cm x 4.5 cm and consists of eight CdTe-CMOS hybrid elements. Each hybrid element has 2048 radiation sensing pixels of 350 μ m size, thus a PID350 detector consists of 16384 pixels. Each pixel is capable of recording the energy deposited of every detected interaction. The maximum energy deposited in each detector pixel during two successive readout cycles is stored into a specific address in a local memory.

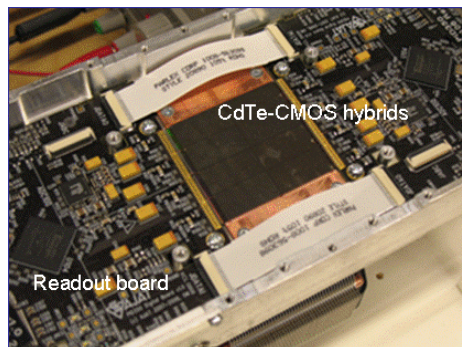


FIGURE 7. The PID350 pixelated detector.

The eight CdTe-CMOS hybrid elements of a PID350 detector are grouped into two modules each one connected to a digital control board having individual power supply and data readout (Figure 2). During one readout cycle, the contents of all the 8192 pixels of one PID350 module are read and stored in the computer forming a frame. The data are transferred from the control board of each module directly to a PC station through a Serial Peripheral Interface (SPI) bus.

In the present work three PID350 detectors have been used for spectroscopic measurements and their performance has been evaluated in order to be used in a stacked prototype system under development. The detectors are labeled as PID350#1, PID350#2 and PID350#3. The two modules of each detector are labeled with a subscript (e.g. the PID350#1 detector consists of the PID350#1_1 and PID350#1_2 modules).

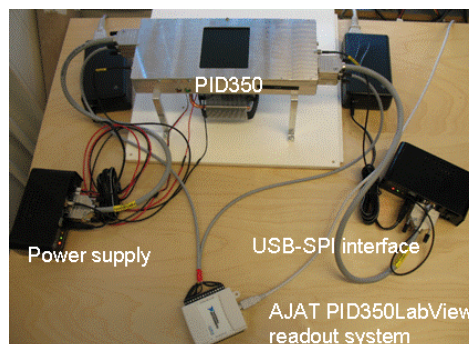


FIGURE 2. The PID350 system.

CALIBRATION

The hardware calibration procedure of a PID350 detector concerns the adjustment of both the offset and the gain parameters of each pixel. The calibration has been performed by using the PID350 standard data acquisition system provided by AJAT, having a maximum data rate transfer of 2 frames/s and a graphical user interface based on LabView.

For the offset adjustment, noise data have been collected in order to locate the noise peak of each pixel. Several iterations are needed in order to reduce the width of the noise peak to no more than two channels.

For the gain adjustment, data have been collected for each PID350 detector using a ^{241}Am radioactive source. The gain adjustment procedure searches for the gamma peak location and corrects the gain parameters in order to align the gamma peaks of all pixels. Several iterations have been performed in order to squeeze the distribution width of the gamma peak positions (centroids) of each pixel to no more than two channels.

Since the offset and gain adjustments are not completely independent, they have been repeated iteratively several times, in order to reduce the FWHM of the cumulative gamma ray spectrum.

The cumulative spectrum of ^{241}Am radioactive source calibration is shown in Figure 3 before and after the hardware calibration, for the case of the detector PID350#3. Similar spectra have been obtained for PID350#1 and PID350#2 detectors.

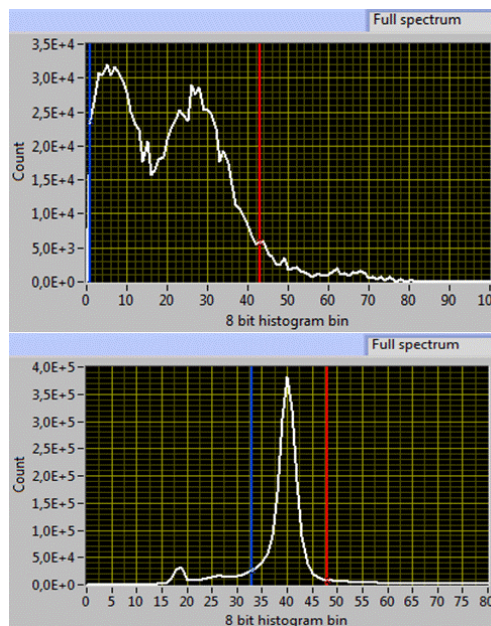


FIGURE 3. Cumulative spectrum of a ^{241}Am radioactive source recorded by the PID350#3 detector, before (up) and after (down) the adjustment of the offset and gain parameters of all its pixels.

A HIGH SPEED READOUT SYSTEM

The read out of the PID350 detector, provided by AJAT is slow compared to the internal memory writing speed resulting to data loss during the collection of data. In order to reduce the data loss we have developed a new high speed readout system (Figure 4) consisting of an

FPGA SPI, a High Speed USB and a user interface software written in VHDL and C languages. This system manages to increase the data transfer speed to the PC from 2 frames/s, which was the data transfer speed of the standard PID350 readout system to 120 frames/s.

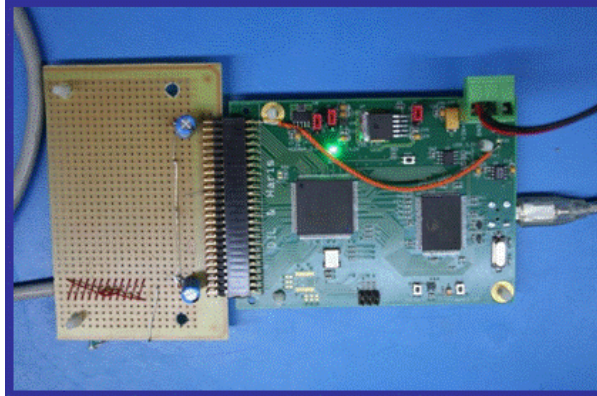


Figure 4. The high speed PID350 readout system.

The user interface software of the high speed readout system checks the PID350 status, uploads the offset and gain parameters derived by the hardware calibration procedure described in the previous section and starts the data gathering.

The raw data recorded are stored in binary data files in a stream of bytes which are grouped in 8-byte packets. Each packet stores the content of a single pixel from every PID350 module. This leads to a high data rate of 112.5 Mbytes/min. In order to manipulate the raw data with greater flexibility a software package has been developed under the ROOT framework [2]. The software transforms the raw data packets into usable frames and stores them in ROOT format. A frame holds an identification number for the frame (ID), the signal amplitude collected by each pixel, the spatial coordinates of each pixel and a sequence number which carries an estimation of the time when the interaction occurs. Furthermore, the software checks the energy resolution, the number of bad pixels and the upper channel limit of the noise peak.

ENERGY RESOLUTION

Although the width of the distribution of the photo-peak centroids has been adjusted to be no more than two bins during the hardware calibration of the PID350 by using a ^{241}Am source (as described previously), it becomes much wider when the detector is irradiated by a different mono-energetic gamma source. This is evident in Figures 5a and 5b illustrating the photo-peak centroid distributions of all pixels of the PID350#3 detector, when irradiated by an ^{241}Am and ^{109}Cd radioactive source respectively (the bad pixels are excluded). The broad distribution of the photo-peak centroids results to a broad energy peak in the energy spectrum, since the energy peak is the convolution of the width of each pixel's photo-peak with the distribution of the photo-peak centroids.

In order to improve the energy resolution of the cumulative spectra, the PID350 detectors have been irradiated by two known energy sources and a software energy calibration procedure has been developed. According to this procedure, a total of 8192 histograms (one per each pixel) are created dynamically and are filled with the content of the corresponding pixel, creating in this way the spectrum of each pixel. Then, the peaks of every single pixel spectrum above the dc level are searched and two calibration constants are determined for each pixel based on the position of the two peaks.

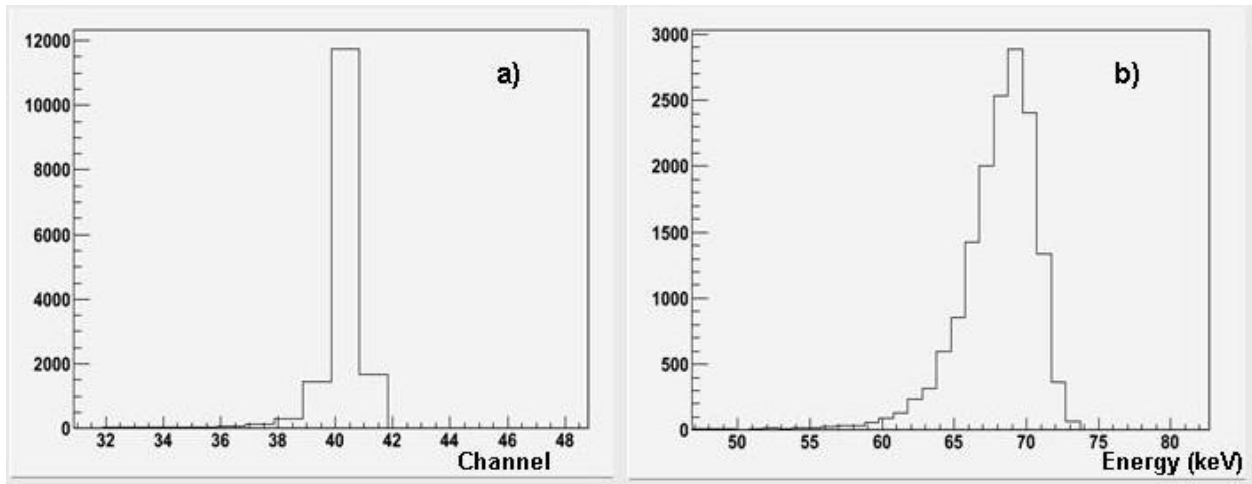


FIGURE 5. The PID350#3 centroid channel distribution for (a) ^{241}Am and (b) ^{109}Cd sources.

To improve further the energy resolution, the software does not use in the energy calculation process the “bad” pixels. The bad pixels are defined as those pixels for which the energy calibration procedure either fails (the calibration algorithm can’t find two peaks in order to calibrate the pixel), or the pixel is noisy (it has noisy channels above the upper edge of the dc level).

The energy calibration has been performed for each PID350 detector, using two low energy gamma ray standard isotopes: ^{241}Am (59.5keV) and ^{109}Cd (88keV). Figure 6 illustrates the spectrum of the PID350#3 detector before and after the software energy calibration.

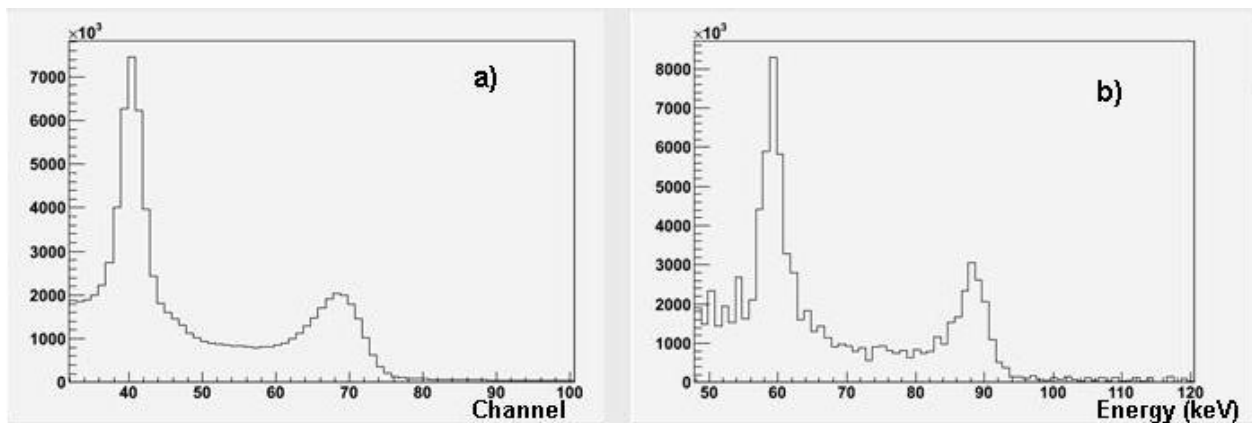


FIGURE 6. a) The un-calibrated spectrum of the PID350#3 detector (b) The calibrated spectrum after a pixel by pixel adjustment.

Moreover, the calibrated ^{241}Am photo-peak of each PID350 detector after the software calibration is shown in Figure 7. The archived energy resolution at 59.5 KeV ranges 1.73 keV to 2.15 keV (FWHM)

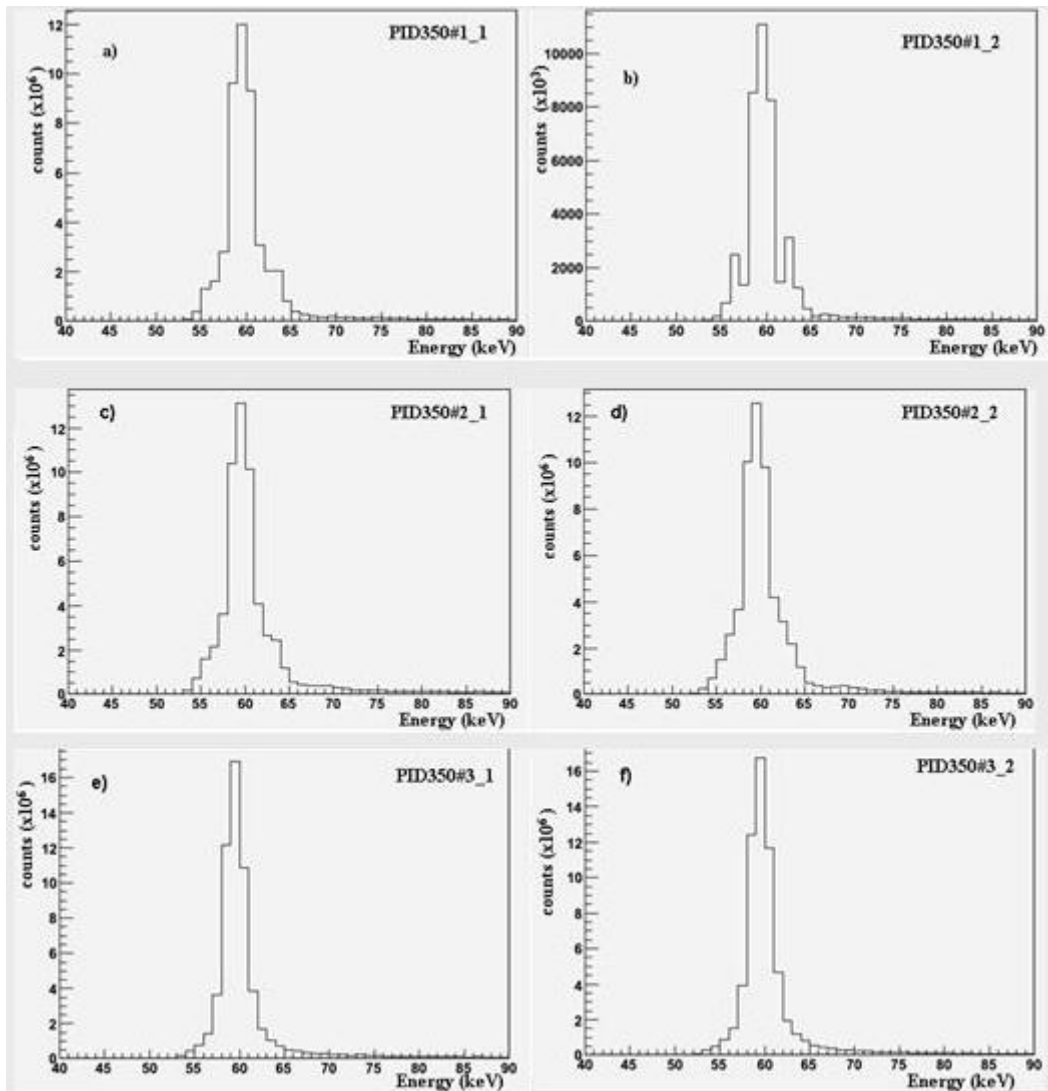


FIGURE 7. Calibrated photo-peaks of ^{241}Am radioactive source acquired with a) PID350#1_1, b) PID350#1_2, c) PID350#2_1, d) PID350#2_2, e) PID350#3_1 and f) PID350#3_2 detector modules.

THE STACKED PROTOTYPE SYSTEM

The Structure of the System

We have assembled a prototype system as a stack of three PID350 detectors. The ordering of the PID350 layers in the stacked system reflects the performance of each layer, i.e. the PID350s are stacked from the top to bottom with decreasing quality. The quality is defined by three parameters: the energy resolution, the number of bad pixels and the upper channel limit of the noise peak. The experimental setup used to test the performance of the prototype system is shown in Figure 8. For the data acquisition the system described in the previous section has been used.

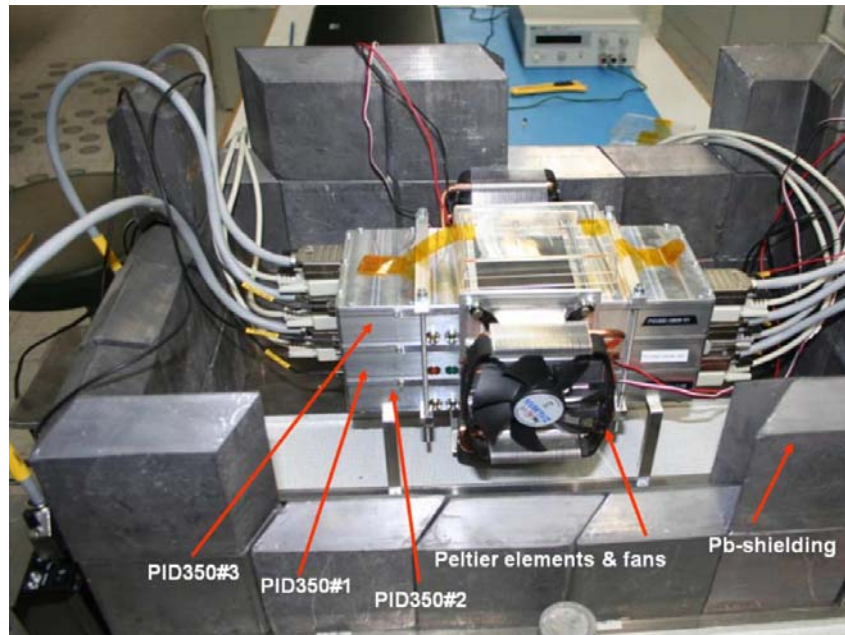


FIGURE 8. Experimental setup with the PID350 stacked prototype.

Simulation Studies

The response of both the PID350 detector and of the stacked system has been modeled using an open-source object oriented software library (MEGALib [3]) providing interface to the GEant4 [4] toolkit that simulates the passage of particles through matter.

A large number of gamma rays ($\sim 10^9$) emitted from point-like isotropic sources placed on the detector's axis of symmetry and at different distances interact with the PID350 detector model and the deposited energy is smeared using a Gaussian distribution of 7keV FWHM [1]. Shown in Figure 9 is the case of a simulated event of a 10keV gamma ray that interacts with the model of the stacked system creating two energy depositions (hits).

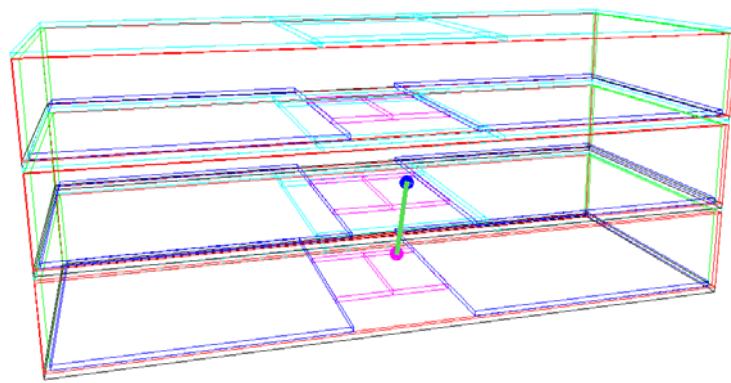


FIGURE 9. An 140 keV gamma ray interacts with the stacked system creating two hits (energy depositions).

Shown in Figure 10 is the simulated energy deposition of all hits for the case of 60 keV incident gamma rays. The peak (59.5 keV) due to interactions of the gamma rays with the detecting materials via the photoelectric effect process, the Ka x-ray from Cadmium (23 keV)

and the escape peak (26.5 keV), broadened due to the smearing, are visible.

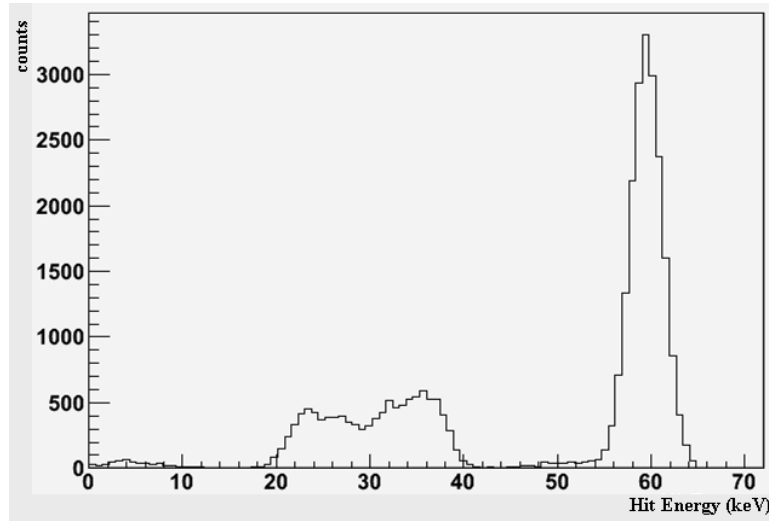


FIGURE 10. Simulated spectrum of the energy deposited in each PID350 detector pixel, for 60 keV incident gamma rays

Source-to-detector distance Estimation

The ability of the stacked detector to estimate the distance of a radioactive source has been tested by using a ^{99m}Tc (140.5 keV) source placed at various distances from the system's upper detecting layer. The estimation of the source-to-detector distance is based on the distribution of the fully absorbed photons (via a photoelectric effect) in each detecting layer [5].

The distance (d) of a radioactive source from the first detecting layer of the stacked system is evaluated by fitting the following function on the distribution of the photo-peak counts (N_i) of each PID350 detector layer (i):

$$N_i \propto \exp\left(- (i-1) \left(\sum_j \mu_j t_j \right) + a\right) \cdot \frac{\sin^{-1}\left(\frac{k^2}{[d + (i-1)g]^2 + k^2}\right)}{\sin^{-1}\left(\frac{k^2}{d^2 + k^2}\right)} \quad (58)$$

where t_j is the thickness of a material of each detecting PID350 layer with corresponding total absorption coefficient μ_j , g is the distance between the layers, k is half the length of the rectangular layer side and a is a parameter evaluated experimentally. The sum runs over all materials of the i^{th} layer.

The first term of the above equation reflects the absorption by the front layers of the detector. The second term is the ratio of the solid angle subtended by the i^{th} rectangular detecting layer over the solid angle subtended by the first one. Experimental results for the determination of the distance (d) by using a ^{99m}Tc radioactive source are presented in Figure 11. It can be noticed that the 3-layer PID350 stacked prototype system is capable of evaluating the distance of a gamma ray source with good accuracy in the distance range from 30 cm up to 100 cm.

Additionally, the complete geometry of the stacked PID350 detecting system has been simulated using the GEANT4 package and the estimated distance using the simulated data is

depicted in Figure 11 for the case of a 140.4KeV radioactive point-like source (^{99m}Tc). The solid line represents the case of the ideal source-to-detector distance estimation.

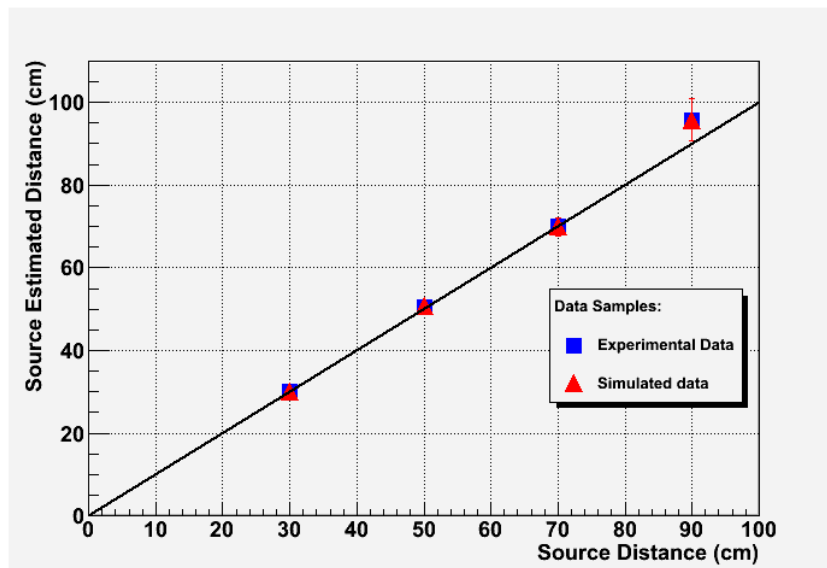


Figure 11. Estimated distance vs. real distance of a ^{99m}Tc radioactive source using both real and simulated data.

SUMMARY

We have developed a prototype stacked system consisting of three PID350 pixelated detectors.

In order to reduce the data loss in case of a high flux of photons, we have developed a data acquisition system with data transfer speed of 120 frames/s.

Furthermore, we have developed a data analysis framework that transforms the raw data collected by the PID350 detectors into useable frames and performs a software energy calibration for each pixel of the detector independently. The achieved energy resolution ranges from 1.73 keV to 2.15 keV (FWHM) at 59.5keV.

Spectroscopic measurements show that the stacked system is able to accurately evaluate the distance of a ^{99m}Tc radioactive source from its first detecting layer, in a broad range of source-to-detector distances from 30cm to 1m.

REFERENCES

- [1] AJAT, http://www.ajat.fi/index.php?option=com_content&view=article&id=37
- [2] ROOT Data Analysis Framework, <http://root.cern.ch>
- [3] 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
- [4] GEANT4-A toolkit for the simulation of the passage of particles through matter, <http://geant4.web.cern.ch/geant4/>
- [5] Shin Watanabe et al. "Stacked CdTe gamma-ray detector and its application to a range finder". *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A* 505(2003)118-121

Carbon Nanotubes: Fabrication, properties and applications

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

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

^b*Division of Physics, Hellenic Naval Academy, 185 39 Hadjikyriakou, Piraeus, Greece*

Abstract. Carbon nanotubes are in the forefront of nanomaterials research since their discovery last decade. These carbon molecules are tiny tubes with diameters down to 0.4 nm, while their lengths can grow up to a million times their diameter. In this paper the most common fabrication methods for Carbon Nanotubes are explained and their remarkable properties are portrayed, namely mechanical, electrical and electronic properties. Finally, some applications of Carbon Nanotubes based on the aforementioned properties are discussed.

Keywords: Nanotubes, Electric arc discharge, Laser ablation, Chemical vapour deposition, phonons.

PACS: 78.67.Ch, 61.46.-w, 65.80.-g, 72.10.Di, 74.25.Kc.

1. INTRODUCTION

In the past few years nanostructured materials, with dimensions of grain size, layer thickness or shapes, below 100 nm, are of special interest. This wide group of materials enables access to new ranges of electronic, magnetic, mechanical or optical properties. Polycrystalline materials with grain sizes less than a few nanometres possess properties different from classic materials, because they are relatively highly affected by the grain boundaries. For example they appear to be very strong and highly wear resistant coatings are being developed out of these materials. Furthermore, researchers at IBM used magnetic nanoparticles within several ultra-thin layers to develop advanced data storage devices. Sensors for disk-drives have been developed with many times the sensitivity of previous devices, allowing more bits to be packed on the surface of each disk. Nanoscale structures can potentially store trillions of bits of data per square inch, giving them a capacity 10 to 100 times greater than that of present memory devices.

Nanotubes belong to the promising group of nanostructured materials. Although nanotubes based on boron nitride and molybdenum are reported, Carbon Nanotubes (CNTs) are by far the most important group. These tubes contain one or several concentric graphite layers with diameters in the range of 0.4 nm up to tens of nanometres.

The discovery of the “buckyball”, i.e. a football shaped C₆₀ molecule, reported by Kroto et al. in 1985 [1], had a strong impact and marked the beginning of a new era in carbon material science. In 1991, Iijima discovered the carbon nanotube [2]. In the soot at the negative electrode of an arc discharge little tubes mixed with a large amount of other forms of carbon were found. Such multi-walled carbon nanotube (MWNT) contained 2 to 50 concentric cylindrical graphite sheets with a diameter of 3-10 nm and a length of up to 1 μm. This initial work led many groups throughout the world to produce and purify nanotubes. Soon it became clear that nanotubes have unique electronic and mechanical properties that are expected to lead to breaking industrial applications. Later on, single-walled carbon nanotubes (SWNT) were developed. Because of adhesive forces nanotubes often bunch to form ropes. The tubes can either be open-ended or have caps formed from half a C₆₀ molecule at either end, see Fig. 1.

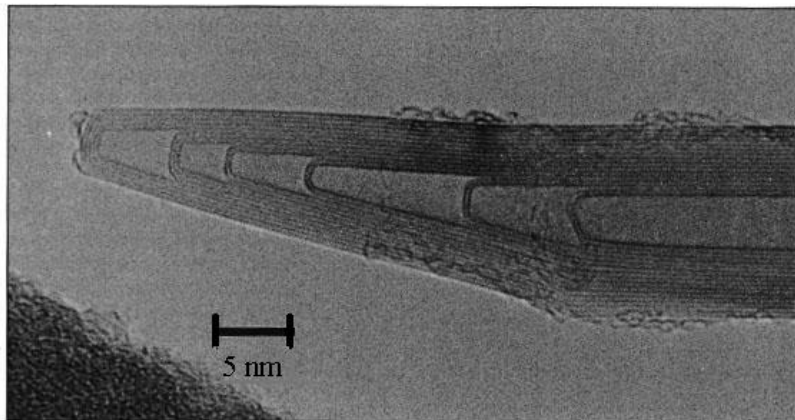


FIGURE 1. High resolution TEM image of the end of a typical nanotube showing several concentric layers with caps at the end.

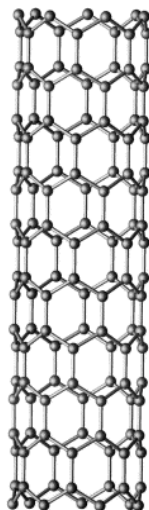


FIGURE 2. Ball-stick model of a nanotube; the balls represent the carbon atoms and the sticks their bonds [3].

To explain the carbon structure in nanotubes, the difference between diamond structure and that of graphite may be considered, see Figs. 2 and 3. In diamond, each carbon atom is attached with four others in a three dimensional lattice, which gives diamond its strength. On the other hand, in graphite, each carbon atom is attached to three others in a plane and form a hexagonal lattice, whilst the remaining bond is used to hold the planes above and below. The bonds in the plane are stronger than in diamond, but the interplanar bonds are relatively weak, and provide to the planes the possibility to slide. Therefore, whereas diamond is isotropic, graphite is anisotropic.

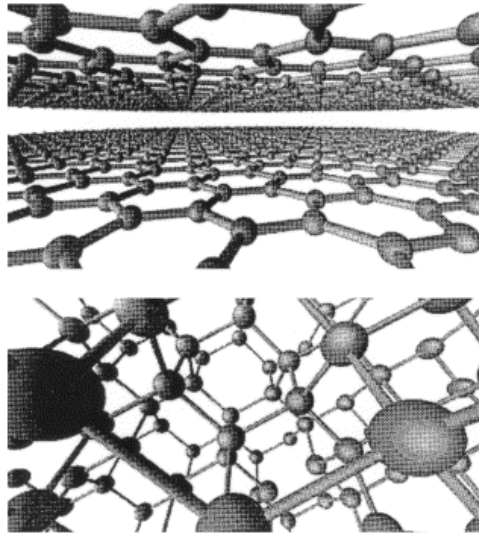


FIGURE 3. Differences between graphite (top) and diamond lattice (bottom) [3].

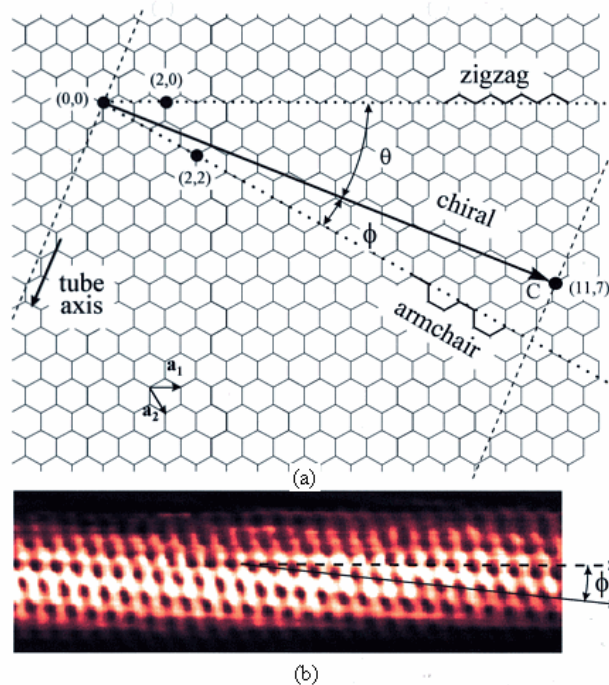


FIGURE 4. (a) The carbon lattice and the ways it can be rolled up to form a zigzag, an armchair or a chiral tube, depicted with its chiral angle; the atom at position (11,7) is projected on (0,0) like all the other atoms on the dotted line to form a tube. (b) STM image of the (11,7) chiral tube [5].

The structure of a nanotube is similar to that of graphite, with the difference that the sheets are closed to form a tube. In the ideal case, a CNT consists of either one cylindrical graphite sheet (single-walled nanotube) or several nested cylinders (multi-walled nanotube) with an interlayer spacing of 0.34-0.36 nm that is close to the typical spacing of graphite. The C-C bonds have a length of 0.14 nm, which is indeed shorter than the bonds in diamond, indicating that the material is even stronger than diamond [4]. Assuming that the a CNT is produced by the rolling of the hexagonal lattice, a few options exist. The sheet can be rolled-up along one of the symmetry axis, subsequently, either a zigzag tube or an armchair tube can be fabricated, see Fig. 4. It is also possible to roll-up the sheet in a direction that differs from a symmetry axis, therefore a chiral nanotube can be obtained. Besides the chiral angle, the circumference of the cylinder can also vary. By considering the rolling-up of the sheet as the “placement” of the atom at (0,0) on the atom at (n,m), tubes can be classified using this pair of integers, see Fig. 4; the roll-up vector (n,m) specifies the oriented width, recording the number of steps along the a and b directions.

2. CNTS FABRICATION

When heated, carbon atoms recombine in soot, some in amorphous blobs, but others in football-shaped spheres or in long cylindrical capsules. A notable progress has been made in the synthesis of these carbon nanotubes. In general, there are three ways to make soot that contains a reasonably high yield of nanotubes: electric arc discharge (EAD), laser ablation (LA) and chemical vapour deposition (CVD).

2.1 Electric arc discharge

The first identified nanotubes were fabricated by a direct current electric arc discharge (EAD) between carbon electrodes within a noble gas, like argon or helium [1, 6]. In this process, the carbon electrodes are placed a few millimetres apart and the current of approximately 100 A vaporises the carbon into hot plasma, some of which recondenses in the form of CNTs. Note that, the nanotubes form only where the current flows, i.e. on the larger negative electrode. The voltage of about 20 V, maintains a high temperature of 2000-3000 °C [7].

The typical yield of nanotubes is up to 30% by weight. The tubes have diameters between 2 and 20 nm and tend to be short, i.e. 50 µm or less, deposited in random sizes and directions; the typical rate of deposit is about 1 mm/min. It is to be noted that, an addition of a small amount of transition-metal powder, like cobalt, nickel or iron to the rods, favours the growth of single-walled nanotubes. The metal serves as a catalyst, preventing the growing tubular structures from wrapping around and closing into a smaller fullerene cage. The presence of a catalyst also allows for reducing the temperature. Without such cooling, the arc is too hot, and the nanotubes coalesce and merge rapidly into disorder; to minimise this effect a water-cooled cathode may be used [8].

2.2 Laser ablation

Single walled nanotubes (SWNT) can be efficiently produced by laser ablation (LA) of a graphite rod. These highly uniform tubes have a greater tendency to form aligned bundles than those prepared using arc-evaporation. With this method, SWNTs were generated consisting of CNTs, mostly of the armchair type, over 70% of the volume of material, bundled together into crystalline ropes of metallic character [9]. These ordered nanotubes are prepared by the laser

vaporisation of a carbon target in a furnace at 1100-1200 °C, a much lower temperature than was previously necessary for fabricating CNTs. A cobalt-nickel catalyst assists the growth of the CNTs, presumably because it prevents the ends from being “capped” during synthesis. By using two laser pulses, growth conditions can be maintained over a larger volume and for a longer time. This scheme provides more uniform vaporisation and better control of the growth conditions. The diameter range of the tubes can be controlled by varying the reaction temperature. Flowing argon or nitrogen gas sweeps the nanotubes from the furnace to a water-cooled copper collector placed just outside of the furnace. A disadvantage of this method is that it requires expensive lasers.

2.3 Chemical vapour deposition

Despite the described progress of synthetic techniques for nanotubes, there still remained two major problems in their synthesis, i.e. large scale and ordered synthesis. But, in 1996 a chemical vapour deposition (CVD) method emerged as a new candidate for nanotube synthesis [10]. The method was used to produce a 50 µm thick film of CNTs that were highly aligned perpendicular to the surface. This method is capable of controlling growth direction on a substrate and synthesising a large quantity of nanotubes. In this process a mixture of hydrocarbon gas, acetylene, methane or ethylene and nitrogen is introduced into the reaction chamber. During the reaction, nanotubes are formed on the substrate by the decomposition of hydrocarbon at temperatures 700-900°C at atmospheric pressure [11]. The process has two main advantages: the nanotubes are obtained at much lower temperature, although this is at the cost of lower quality, and the catalyst can be grown on a substrate, which allows for the formation of novel structures.

2.4 Purification of CNTs

The three different methods of the production of nanotubes suffer some serious limitations; all produce mixtures of nanotubes and nanoparticles sticking together in larger lumps. The tubes have a wide range of lengths, many defects and a variety of twists to them. Therefore, the main concern is how to separate them of the worthless soot and how to purify the tubes. Various post-growth treatments have been developed to purify the tubes and also to eliminate the defects in the tubes. The material can be treated in an ultrasonic bath to free many tubes from the particles that are originally stuck together [6]. The larger contaminants can be easily removed due to their relatively high weight, for example by dispersing the powder in a solvent and subsequent centrifugation. The smaller particles are more difficult to eliminate. One possibility for MWNTs is to perform an oxidative treatment, either by heating the powder in air at 650 °C or by a liquid phase treatment in acidic environment. For SWNTs, standard methods to eliminate catalyst particles and amorphous carbon involve re-fluxing the raw material in acid followed by centrifugation or cross-flow filtration.

Another possibility for purification is to employ physical methods that do not damage the tubes, but separate the objects as a function of their size. For MWNTs, a purification method that uses the properties of colloidal suspensions has been developed. Smaller objects remain dispersed while larger particles form aggregates that are deposited as sediment after a few hours. A related method, the size-exclusion chromatography, was successfully used for the purification and size selection for MWNTs. Purification procedures for SWNTs without any acidic treatment have also been reported and involve microfiltration or size-exclusion chromatography [4].

A method to eliminate the defects in CNTs is by annealing at high temperatures, up to 3000 K; during this process, impurities and defects in the tubes are eliminated.

3. CNTS PROPERTIES

CNTs exhibit properties that can find several uses and applications. Their mechanical, electrical and electronic properties will be hereafter discussed.

3.1 Mechanical properties

The mechanical properties of CNTs are difficult to be measured due to their small dimensions. However, different methods have been used. The Young's modulus of elasticity was estimated after measuring the thermal vibrations of nanotubes; a very high average value of 1.8 TPa was found [12]. Wong et al. [13] used a scanning force microscope to bend nanotubes that were mechanically fixed at one end. By measuring vibrations of nanotubes in an electrical field, Poncharal et al. [14] found a value below 1 TPa. This is true both for multi-walled and single-wall nanotubes because the modulus is mainly determined by the carbon-carbon bonds within the individual layers.

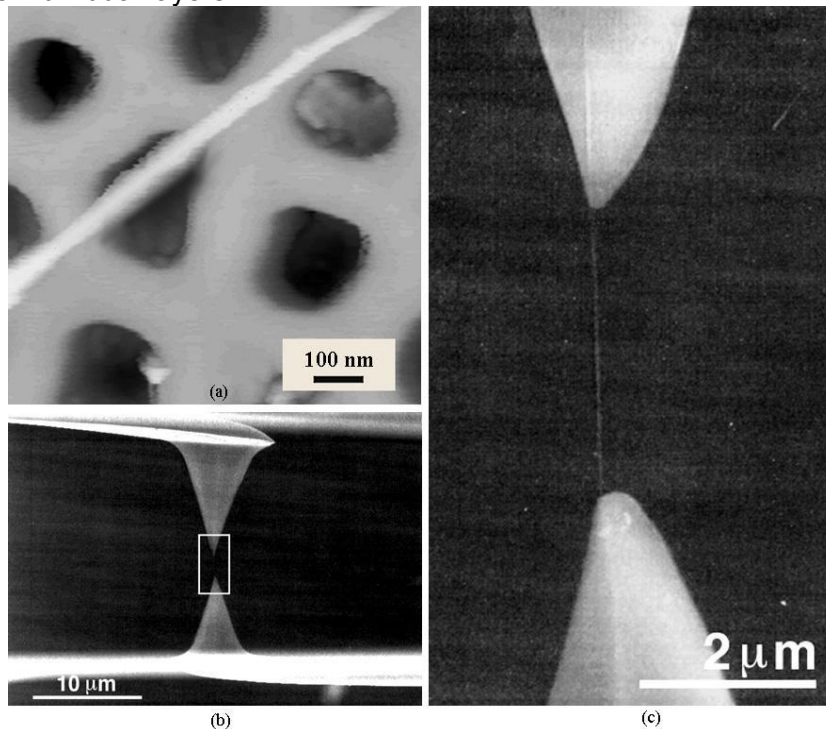


FIGURE 5. (a) An AFM microscope of a multi-walled nanotube across a pore to measure its Young's modulus by bending it with an AFM tip (b) and (c) SEM images of a multi-walled nanotube held between two AFM tips to measure its tensile strength.

Salvetat et al. [15] found that multi-walled nanotubes grown by arc discharge had a modulus of about 1 TPa, whereas those grown by the catalytic decomposition of hydrocarbons had a modulus that was smaller by one to two orders of magnitude. The nanotubes were placed across "nanopores" and an atomic force microscope was used to bend them in the middle. These results demonstrate that only highly ordered and well-graphitised nanotubes have a stiffness comparable to graphite, whereas those grown by catalytic decomposition are weaker because of their defects, see Fig. 5 (a) [15]. Further insights into the mechanical properties of multi-walled nanotubes are reported in Ref. [16]. The ends of a multi-walled nanotube were attached to a pair of AFM tips and stretched it until it broke, see Fig. 5 (b) and (c). The tips of the tubes were attached on the AFM tips by electron beam deposition of carbonaceous material. A

tensile strength of the nanotubes, ranged from 11 to 63 GPa was obtained; for comparison, high strength steel alloys break at about 2 GPa. The Young's modulus ranged from 270 to 950 GPa [16]. In this process, the AFM tips only make contact with the outside of the CNTs, so the outermost layer carries most of the load. The outermost tube ruptures at the tensile limit and slides over the inner tubes in the so-called "sword-in-sheath" failure. There are relatively weak Van der Waals interactions between the layers whilst the shear strength between the layers is small. This property is very interesting for applications like nano-bearings.

When nanotubes are compressed, they show remarkable properties. They bend over to surprisingly large angles, before they start to ripple and buckle, and then, finally kinks are developed. Note that all these deformations of the carbon nanotubes are elastic, all disappearing completely when the load is removed [16]. Note that the density of bundled CNTs is 1.33 to 1.40 gr/cm³; a very low value as compared to aluminium, possessing a density of 2.7 g/cm³ [8].

3.2 Electrical properties

Graphite is one of the rare materials known as a semimetal and CNTs emerge as interesting conductors. Because electron waves can reinforce or cancel one another, an electron spreading around the circumference of a nanotube can completely cancel itself out; therefore, only electrons with the right wavelength remain. From all the possible electron wavelengths, or quantum states, available in a flat graphite sheet, only a tiny subset is allowed when that sheet is rolled into a nanotube. That subset depends on the circumference of the nanotube, as well as on the chirality (twist) of the nanotube.

In a graphite sheet, one particular electron state, designated as the Fermi point, provides to the graphite almost its whole conductivity; none of the electrons in other states are free to move about. All armchair tubes and one out of three zigzag and chiral tubes combine the right diameter and degree of twist to include this special Fermi point in their subset of allowed states. These nanotubes are truly conducting metallic nanowires. The remaining two thirds of nanotubes are semiconductors. For example, if $n-m$ the roll-up factor, see Fig. 4, is three times an integer, the carbon nanotube has an extremely small gap, and at room temperature, it shows a metallic behaviour. For $n=m$, the tubes are metallic whilst for other values of $n-m$, the tubes behave as semiconductors with a band gap [5], indicating that, like silicon, they do not pass current easily without an additional amount of energy.

CNTs do not possess the same band gap, because for every circumference there is a unique set of allowed valences and conducting states; band gaps of 0.4-1 eV can be expected for SWNTs, corresponding to diameters between 0.6 and 1.6 nm [4]. As nanotube diameters increase, more and more states are allowed and the spacing between them reduces. In this way, different-size nanotubes can have band gaps as low as zero (like metal), as high as the band gap of silicon, and almost anywhere in between. No other known material can be so easily tuned. Note, however that, the growth of nanotubes currently provides a wide range of different geometries, and researchers are seeking improvements so that the specific types of nanotubes can be guaranteed.

Thick multi-walled nanotubes may display complex behaviour, because each layer of the tube has a slightly different geometry. By tailoring their composition individually, multi-walled tubes that are self-insulating or carry multiple signals at once, like nanoscopic coaxial cables, may be fabricated. However, the understanding and control of nanotube growth still falls short of these goals.

The fact that metallic nanowires are really good conductors is underlined by comparing them with copper. A bundle of nanotubes, could conduct about one billion A/cm² whilst copper wires about one million A/cm² [8].

3.3 Electronic properties

The electronic properties of single-walled carbon nanotubes are shown to be extremely sensitive to the chemical environment [17]. Exposure to air or oxygen dramatically affects the nanotubes resistance and other electronic properties. These parameters can be reversibly “tuned” by surprisingly small concentrations of adsorbed gases, and an apparently semiconducting CNT can be converted into an apparent metal through such exposure. Hence, the electronic properties of a given nanotube are not specified only by the diameter and chirality of the nanotube, but also depend critically on the gas exposure history.

Another very interesting electronic property of CNTs, is their field emission; they emit electrons from their tips, when they are placed in an electrical field, see Fig. 6 [18]. Because they are sharp, the nanotubes emit electrons at lower voltages than electrodes made from most other materials, and their strong carbon bonds allow nanotubes to operate for longer periods without damage.

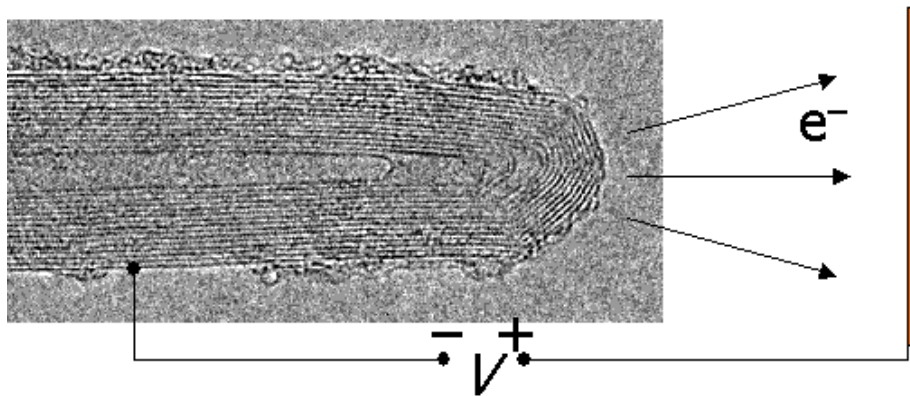


FIGURE 6. A schematic diagram of field emission of a nanotube.

3.4 Phonons and carriers in carbon nanotubes

The decoherence effects in low dimensional structures (e.g. CNTS) can be studied using the decoherence channels due to the Coulomb interaction to the background charge fluctuation and due to electron-phonon interaction [19]. The description of phonon modes are of special importance for estimating the *relaxation* and *dephasing* rates. Several models have been employed to calculate the phonon modes within CNTS like simple tight-binding model and the density-functional-based non-orthogonal tight-binding model among others [20]. On the other hand, the calculation of the carrier wavefunctions and the energy levels is subject of the numerical solution of Dirac equation.

Here, we briefly describe a semiclassical model of the dephasing mechanism. Neglecting the inhomogeneous broadening [21], the dephasing time (T_2) in terms of the excited-state lifetime T_1 and the pure-dephasing time T_2^* can be given by

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2^*}$$

The time T_2^* is related to the fluctuations in the carrier energy levels due to the interactions between the carriers and the phonons among others [19]. The corresponding dephasing and pure-dephasing time are a few tens of *fs*, while the relaxation time is a few tens of *ps* [21].

These kinds of calculations are very important for the quantum computer architecture and quantum optics research.

4 CNTS APPLICATIONS

The fact that nanotubes are very good conductors and that they also can appear as semiconductors or even insulators, makes them very useful for minuscule electronic devices like logic circuits built up out of several transistors. The making of tiny circuits might be promising for the semiconductor industry. This industry is focussed to make computer chips smaller every year, but also has to make them as cheap as possible.

Essential devices like field-effect transistors (FET) have been developed. They use a single semiconducting nanotube between two metal electrodes as the channel through which electrons flow. The current in this channel can be switched on or off by applying voltages to a nearby third “gate” electrode. It is found that this electrode can change the conductivity of the nanotube channel by a factor of one million or more, compared to silicon FETs. Because of its tiny size, however, the CNT-FET should switch reliably using much less power than a silicon-based device. It is predicted that, such a nanoscale device could run at clock speeds of one THz or more.

The fabrication of a CNT-FET starts with placing a tube on the insulating SiO₂ layer, by spincoating of a suspension, with pre-arranged conducting pads. These pads are connected with the tube by metal leads, lithographically deposited across the tube. This technique is designated as the four-probe technique [22]. The silicon layer below the silicon dioxide is used as the back gate. The first nanotube-based devices operated at very low temperatures, but in 1998 the first transistor was reported that worked at room temperature, with electrical characteristics remarkably similar to silicon devices, see Fig. 7 [23].

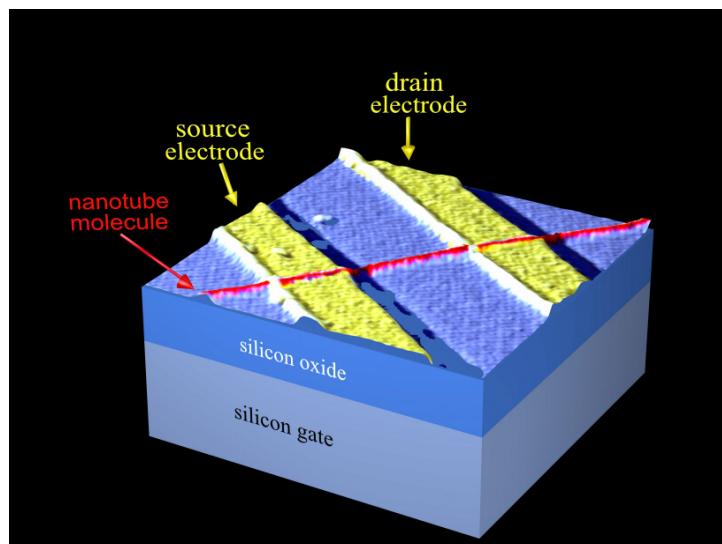


FIGURE 7. A single-molecule transistor that operates at room temperature, consisting of an individual semiconducting nanotube on two metal nanoelectrodes with the substrate as a gate electrode.

Metal-metal junctions lead to an improved version of a single electron transistor (SET). It has been proposed even as the future alternative to conventional silicon electronic components, but their practical use has been limited by the fact that they only operate at very low temperatures. However, recently the first single electron transistor operating at room temperature was reported

[24]. The device is similar to the FET described above, but with a short nanotube section of about 20 nm, that was manipulated by an atomic force microscope to create a Coulomb island. SETs consist of such a conducting island connected by tunnel barriers to two metallic leads. Strong bends (“buckles”) within the metallic carbon nanotubes are constructed using an AFM tip, and act as nanometre sized tunnel barriers for electron transport. The created resistance is in the order of 0.5 M Ω . For temperatures and bias voltages, that are low, relative to a characteristic energy required to add an electron to the island, electric transport through the device is blocked. Conduction or “Coulomb charging” is observed at room temperature, with an additional energy of 120 meV, by tuning a voltage on a close-by gate.

The next step in assessing the suitability of these devices for computer electronics involves the integration of individual CNT-FETs to form logic gates. To build such logic circuits, nanotube devices, that use electrons (n-type FET) and holes (p-type) as the carriers of electricity, are needed. The problem was that all CNT-FETs showed p-type characteristics, meaning that they were ON for negative gate bias [23]. Therefore, the first n-type CNT-FET had a great impact; it was made by direct doping of the tube with an electropositive element such as potassium. Potassium atoms (K atoms evaporated from an alkaline metal dispenser) are adsorbed onto the surface of the nanotube, donating electrons to convert the nanotube from p- to n-type. By covering half of the nanotube with PMMA, p-n junctions were produced [25]. Note, however, that, not only by doping, but also by annealing in a vacuum, their electrical character can be changed from p-type into n-type. Using vacuum annealing or doping to make n-type CNT-FETs, p- and n-CNT-FETs on the same substrate can be fabricated. These complementary CNT-FETs are assembled to form the first intermolecular logic gates. At first, a “NOT” gate or voltage inverter was demonstrated, see Fig. 8.

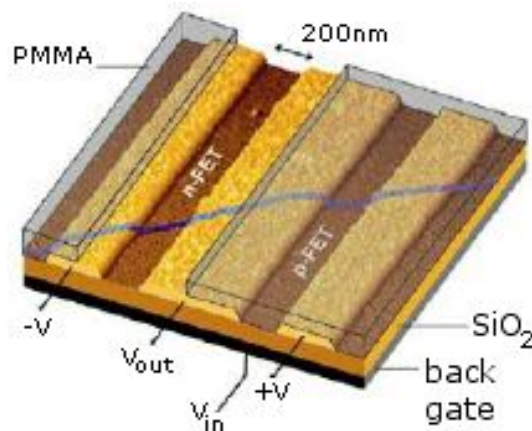


FIGURE 8. An AFM showing the design of an intramolecular logic gate consisting of a single nanotube bundle, positioned over the gold electrodes to produce two p-type CNT-FETs in series. The device is covered by PMMA, a window is opened by electron-beam lithography to expose part of the nanotube, and subsequently, potassium is evaporated through this window to produce an n-CNT-FET, while the other CNT-FET remains p-type [26].

Carbon fibre is already used to strengthen a wide range of materials, and the special properties of CNTs mean that they could be the ultimate high-strength fibre, which has a tensile strength 20 times, and a strength-to-weight ratio of 100 times that of steel. Nanotubes have already been used for reinforcement of nanostructural composite materials, polymers and concrete.

Incorporation of conducting carbon nanotubes in construction materials, such as concrete or structural plastics, provides opportunities for real time monitoring of material integrity and quality.

Open-ended nanostraws could penetrate into a cellular structure for chemical probing or could be used as ultras-small pipettes to inject molecules into living cells. With the aid of computer simulations it was shown that water molecules will quickly enter and flow through a CNT of 8 nm in diameter. A separate set of simulations shows that certain organic molecules also will course through such nanotubes. The nanotubes conduct water at a rate similar to that of certain channels in the kidneys. These unusual transport properties of CNTs might be used in biomedical applications, such as highly targeted drug delivery.

The small size and sensitivity of nanotubes make the assembly of extremely powerful sensors possible. Semiconducting nanotubes change their electrical resistance dramatically when exposed to alkalis, halogens and other gasses at room temperature. For example, semiconducting CNTs have been used to detect gas molecules [27], whilst semiconductor nanowires have been used as detectors for a wide range of biological compounds. Also, nanowired field-effect transistors have been converted into sensors by modifying their surfaces with molecular receptors.

Kim and Lieber fabricated nanotube nanotweezers, by depositing free-standing electrically independent electrodes onto tapered glass micropipettes, which can be routinely made with end diameters of 100 nm [28]. The arms of the tweezers were about 4 μm long. The size of the nanotweezers was limited only by the optical microscope resolution used to monitor the attachment process.

5 CONCLUSIONS

In order to synthesise nanotubes there are three different methods, namely arc discharge, laser ablation, and CVD. For large-scale synthesis, the CVD method is most promising. The substrates can be recycled and the process works at lower temperatures (500–1000° C), which makes the process suitable for direct growth on several devices. Nanoparticles of a metal catalyst are applied to create nanotubes of better quality. Also the structure of the substrate is very important. It is shown that aligned pores in silicon and alumina are most suitable to create neatly aligned nanotubes. The deposition of the metal catalyst on the substrate deserves special attention, because it enables manipulated growth.

The strength (around 40 GPa) and stiffness (elastic modulus around 1 TPa) of nanotubes makes them suitable for reinforcing materials and ropes, which can bear high deformations, and extremely high tensile forces. The theoretical understanding of the electronic structure and related properties of nanotubes and their outstanding field emission properties have made them preferable for use in electronics.

Several applications of nanotubes have been proposed such as scanning probe tips, nanotweezers and even nanobearings and nanosprings. Nanotubes are commonly found in laboratories today, and research is stimulated by large amounts of money invested in it. Some companies are already specializing in the production of carbon nanotubes, and give research a boost.

REFERENCES

1. Kroto HW, Heath JR, O'Brien SC, Curl RL and Smalley RE, *Nature*, 1985; 318; 162.
2. Iijima S, Helical microtubules of graphitic carbon, *Nature*, 1991; 354; 56-58.
3. Cohen ML, *Nanotubes, Nanoscience, and Nanotechnology*, Materials Science and Engineering: C, 2001; 15, Issues 1-2; 1-11.

4. Bonard JM, Kind H, Stöckli T and Nilsson LO, Field emission from carbon nanotubes: the first five years, *Solid-State Electronics*, 2001; 45 (6); 893-914.
5. Wildöer JWG, Venema LC, Rinzler AG, Smalley RE and Dekker C, *Nature*, 1998; 391; 59.
6. Ebbesen TW and Ajayan PM, Large scale synthesis of carbon nanotubes, *Nature*, 1992; 358; 220-222.
7. Yakobson BI and Smalley RE, Fullerene nanotubes: C1.000.000 and beyond, *American Scientist*, 1997; 85; 324-337.
8. Collins PG and Avouris P, Nanotubes for electronics, *Scientific American*, December 2000; 38-45.
9. Thess A, Lee R, Nikolaev P, Dai H, Petit P, Robert J, Xu C, Lee YH, Kim SG, Rinzler AG, Colbert DT, Scuseria GE, Tománek D, Fischer JE and Smalley RE, Crystalline Ropes of Metallic Carbon Nanotubes, *Science*, 1996; 273; 483-487.
10. Li WZ, Xie SS, Qian LX, Chang BH, Zou BS, Zhou WY, Zhao RA and G. Wang, Large-Scale Synthesis of Aligned Carbon Nanotubes, *Science*, 1996; 274; 1701-1703.
11. Xie S, Li W, Pan Z, Chang B and Sun L, Carbon nanotube arrays, *Materials Science and Engineering A*, 2000; 286 (1); 11-15.
12. Treacy MMJ, Ebbesen TW and Gibson JM, Exceptionally high Young's modulus observed for individual carbon nanotubes, *Nature*, 1996; 381; 678-680.
13. Wong EW, Sheehan PE, Lieber CM, Nanobeam mechanics: Elasticity, strength, and toughness of nanorods and nanotubes, *Science*, 1997; 277; 1971-1974.
14. Poncharal P, Wang ZL, Ugarte D, De Heer WA, Electrostatic deflections and electromechanical resonances of carbon nanotubes, *Science*, 1999; 283; 1513-1516.
15. Salvétat JP, Andrew G, Briggs D, Bonard JM, Basca RR and Kulik AJ, Elastic and shear moduli of single-walled carbon nanotube ropes, *Phys Rev Lett*, 1999; 82; 944.
16. Yu MF, Lourie O, Dyer MJ, Moloni K, Kelly TF and Ruoff RS, Strength and breaking mechanism of multiwalled carbon nanotubes under Tensile Load, *Science*, 2000; 287; 637-640.
17. Collins PG, Bradley K, Ishigami M and Zettl A, Extreme Oxygen Sensitivity of Electronic Properties of Carbon Nanotubes, *Science*, 2000; 287; 1801-1804.
18. Rinzler AG, Hafner JH, Nicolaev P, Lou L, Kim SG, Tomanek D, Nordlander P, Colbert DT, Smalley RE, Unraveling nanotubes: field emission from an atomic wire, *Science*, 1995; 269 ; 1550-1553.
19. V.N. Stavrou and G.P. Veropoulos (2011), *Advances in Mechanical Engineering Research*, Vol. 1, edited by E. Malach.
20. V.N. Popov and P. Lambin, *Nano Res.* 2010, 3(11):822-829.
21. Mukamel, S. (1995). *Principles of Nonlinear Optical Spectroscopy* (Oxford University Press, New York); S. V. Kilina and B.F. Habenicht, (2009). *Excitonic and Vibrational Dynamics in Nanotechnology, Quantum Dots Vs. Nanotubes*. (Pan Stanford Publishing)
22. Ebbesen TW, Lezec HJ, Hiura H, Bennett JW, Ghaemi HF and Thio T, Electrical conductivity of individual carbon nanotubes, *Nature*, 1996; 382; 54-56.
23. Tans SJ, Verschueren ARM, Dekker C, Room-temperature transistor based on a single carbon nanotube, *Nature*, 1998; 393; 49-52.
24. Postma HWC, Teepen T, Yao Z, Grifoni M and Dekker C, Carbon Nanotube Single-Electron Transistors at Room Temperature, *Science*, 2001; 293; 76-79.
25. Zhou C, Kong J, Yenilmez E, Dai H, Modulated chemical doping of individual carbon nanotubes, *Science*, 2000; 290; 1552-1555.
26. Derycke V, Martel R, Appenzeller J and Avouris P, Carbon nanotube inter- and intramolecular logic gates, *Nano Letters* 1, 2001; 453
27. Dai H, Hafner JH, Rinzler AG, Colbert DT and Smalley RE (1996), Nanotube as nanoprobe in scanning probe microscopy, *Nature*, 1996; 384; 147-150.
28. Kim P and Lieber CM, Nanotube Nanotweezers, *Science*, 1999; 286; 2148-2150.

Deviations from Exponential Decay Law in the Time Evolution of Quantum Resonant States Described by Lorentzian Line Shape Spectral Distributions

Theodosios G. Douvropoulos

*Hellenic Naval Academy, Physics Department, Hatzikyriakou Ave. Piraeus,
Greece 18539,
email: douvrotheo@snd.edu.gr douvrotheo@yahoo.com*

Abstract. This paper investigates the deviations from exponential decay law for quantum resonant states which can be approximately described by Lorentzian line shape spectral distributions. We point the significance of the Lorentzian distribution in both classical and quantum theory of resonances and its close relevance to the exponential decay law. Using quite general physical arguments, such as the finite expectation value of the energy and the kinematical dependence of the distribution, we investigate the appearance of these deviations for short and long times respectively. We construct an analogous to the continuity equation describing the correlation between exponential and non exponential decay. When a measuring perturbation cancelling the terms in the second part of the equation is possible, interesting questions arise as is for example whether the quantum Zeno effect, in the limit of very short times, does really appear. It is found that besides the homogeneity of the proposed continuity equation, other factors, such as the energy dependence of the resonance's complex energy shift, play an important role in the observability of the non exponential decay.

Keywords: resonance, decay width, energy shift, survival amplitude, non exponential decay, spectral distribution, continuity equation, exponential source term, Langevin equation, observability, quantum measurement, quantum Zeno effect.

PACS : 03.65.-w, 47.10.ab, 05.40.Jc, 03.65.Xp

1. INTRODUCTION

Resonances in quantum mechanics correspond to the unstable quantum states, and acquire a complex energy spectrum. The latter seems to contradict with the structure of quantum mechanics which is built in terms of eigenvectors in Hilbert space supporting a real energy spectrum. However the unstable quantum state is an important example of irreversible phenomena in nature and has a distinct role in quantum mechanics, ranging from excited atomic states to short-lived elementary particles.

The resonant states interact and finally decay into continuum spectra. Their spectrum turns to be complex since the imaginary part of each pole, equal to $\Gamma/2$, is directly related to the mean lifetime of the corresponding state via the $\tau = \hbar / \Gamma$, and expresses half the energy width of the resonance. The real part is constituted by both the energy value of the unperturbed state and the energy shift due to the interaction with the continuum, giving the energy position of the

resonance E_r , (or resonance mass in the relativistic case). The study of the decay of an unstable quantum state began with Gamow's theory [1] of alpha decay of atomic nuclei and Dirac's theory [2] of spontaneous emission of radiation by excited atoms, while a general treatment of decaying systems was given by Weisskopf and Wigner [3] and by Breit and Wigner [4]. Siegert [5] was the first to associate the complex poles in the S-matrix of Wheeler [6] to quantum resonances.

The signature of a resonant state is its spectral distribution. During the ages many models have been proposed for the choice of the spectral distribution, see for example [7-12] and references therein. Real and complex spectral distributions construct propagator functions with substantially different properties and consequences on the system's time evolution. One of them seems to be the different type of non exponential decay for both regions of short and long times. The term non exponential decay is used for the description of the deviation from the exponential decay law, related to the evolution of the survival probability during an irreversible process. Although the exponential decay law is the universal hallmark of unstable states, deviations from it often prove to be more consistent with quantum mechanics. The dimensionless ratio

$$2E_r/\Gamma \equiv \beta \quad (1)$$

which is defined as twice the ratio of the energy position to the energy width of the resonance, is proved to be a very crucial and important quantity related to the appearance of such deviations, [13]. Deviations from the exponential law are present at times very close to the initial preparation time $t = 0$ and at very late times, while at "intermediate" times the exponential law represents a very good approximation. The intermediate – time region alone satisfies the simple composition law of probabilities $P(t_1)P(t_2) = P(t_1 + t_2)$. In this domain, therefore, a classical probability law operates, and the results for the two – step measurement are the same as for the one step measurement. At late times the decay law follows a power-law, which is however very difficult to observe experimentally because it occurs at times for which the survival probability is already vanishingly small. On the other hand, the deviations at small times occur within a very short time scale, for instance 10^{-15} s for the electromagnetic decays of an excited hydrogen atom [14] and even shorter for hadronic decays [15]. Beyond the theoretical prediction of such deviations there is much clear evidence for their experimental observation as well. The above may take place in many different branches of natural sciences, such as Nuclear Physics and Radioactivity, [16,17], Quantum field theory, [18], Atomic and Molecular Physics, [19,20], Charge transport, [21], Fluid dynamics, [22], Magnetism and spin dynamics, [16,23,24], Optics, [25], Chemical reactivity, [26], Biology, [27], Acoustics, [28], Geophysics, [24], Stochastic differential equations, [29], and may correspond to the presence of an unusual property in the system's dynamics, [30,31]. The above appear to be only a part of the extensive literature related to this subject.

This work studies the deviations from exponential decay law, in the framework of Lorentzian line shape spectral distributions. For this we first show the way the Lorentzian distribution appears in both quantum and classical mechanics. In quantum theory it is the work of Breit and Wigner [4], who studied the behavior of unstable particles, that revealed the Lorentzian distribution as the expression of the averaged phase shift of a wave in a scattering process. In classical mechanics the Lorentzian distribution describes the mean amount of energy absorbed per unit time, which is twice the mean value of the dissipative function, of a harmonically driven, harmonic oscillator with friction. It corresponds to a kind of dependence which is called dispersion-type frequency dependence of the absorption, [32]. We distinguish two types of spectral distributions, the Lorentzian with a semibounded spectrum, which we call truncated

Lorentzian distribution, and the generated complex Lorentzian distribution which occurs when keeping only the physical appropriate energy pole.

Next, we explore the appearance of the deviations from exponential decay in the limit of both short and long times. We use general arguments to show, that at short times the non decay probability falls off less rapidly than would be expected on the basis of the exponential decay law. The central point is that the time derivative of the survival amplitude at $t=0$ is both finite and purely imaginary. In the limit of long times we use kinematical arguments to show that the decay has a time power law.

In the last part of the paper, we study the observability of the non exponential decay in the limit of very short times. For this we develop a model for the study of the correlation between exponential and non exponential decay, by constructing an analogous to the continuity equation. The homogeneity of this equation is achieved through the process of a measuring perturbation and is related to the observability of the non exponential decay. We discuss the possibility of the appearance of the quantum Zeno effect, in terms of a measuring process. Since the energy dependence of the resonance complex energy shift turns to be quite important, we explore these topics for various strengths of the above mentioned dependence.

2. LORENTZ LINE SHAPE DISTRIBUTION IN CLASSICAL AND QUANTUM MECHANICS

The fingerprints of a resonance reflect on its spectral distribution. The latter depends on the background and kinematical factors, and so we can only recover the centre of the resonance peak, which is the energy position of the resonance, and its width, defined as the energy distance between the points of half maximum of the distribution. However it is desirable to extract naturally the above mentioned quantities, as some kind of spectral information. This is done in absolute degree by the Lorentzian distribution, based on the Breit Wigner approximation,[4]. Breit and Wigner put the origins of the theory of quantum resonances by studying the behavior of unstable particles. They postulated that if an unstable particle at energy E_0 decays according to the exponential decay law then the energy density should be approximately distributed according to the Breit-Wigner distribution which is Lorentzian line shape. This was done in the mathematical content of a scattering experiment which is captured by the scattering matrix and expressions derived from it. One of them, the scattering phase, measures the averaged phase shift which a wave experiences while passing through the scatterer, and according to the Breit-Wigner theory, should have an expression similar to the Lorentzian distribution. The Lorentzian spectral distribution is mathematically given by the following expression

$$f(E) = \frac{1}{\pi} \frac{\Gamma/2}{(E - E_r)^2 + \Gamma^2/4} \quad (2)$$

where $E_r = E_0 + \Delta$ is the energy position of the resonance and Γ is the width. In this formalism E_0 corresponds to the energy of the unperturbed state in which the system is initially prepared at $t=0$ and Δ is the energy shift due to interaction with the continuum. It is easy to see that the Lorentzian distribution is the Fourier transform of the exponential factor of the form $e^{-iE_r t - \Gamma|t|/2}$, where we have used the atomic system of units $\hbar = 1$, with contributions from both the negative and positive time. Indeed we obtain for $-\infty < E < \infty$

$$f(E) \equiv \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} dt e^{-iE_r t - \Gamma|t|/2} e^{iEt} = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\Gamma/2 + i(E - E_r)} + \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\Gamma/2 - i(E - E_r)}$$

$$= \frac{1}{\pi} \frac{\Gamma/2}{(E - E_r)^2 + \Gamma^2/4}$$

(3)

We recognize two isolated poles at $E = E_r \pm i\Gamma/2$, that dominate the two pieces of the analytic Fourier transform. The one piece varies as $e^{-\Gamma t/2}$ for positive time and zero for negative time, while the other piece varies as $e^{\Gamma t/2}$ for negative time and zero for positive time. However neither piece corresponds to a compact autonomous state, since the state appears to be either created at $t=0$, or destroyed at $t=0$.

In classical mechanics the Lorentz line shape arises in the problem of a harmonically driven, harmonic oscillator with friction. The differential equation describing its motion is the following

$$\ddot{x} + \gamma \dot{x} + \omega_o^2 x = \frac{f}{m} e^{-i\omega t} \quad (4)$$

where γ stands for the damping constant, ω_o is the frequency of the unperturbed problem, f is the amplitude of the force, m is the mass of the system, and ω is the driving frequency. It is to be understood that we take in account only the real part of the right-hand side. It is easy to see that a particular solution of the above equation has the form

$$x(t) = \frac{f/m}{\omega_o^2 - \omega^2 - i\omega\gamma} e^{-i\omega t} \quad (5)$$

It is then interesting to calculate the two point correlation function coming as

$$\langle x^*(0)x(t) \rangle \equiv \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} d\omega \frac{f^*/m}{\omega_o^2 - \omega^2 + i\omega\gamma} \cdot \frac{f/m}{\omega_o^2 - \omega^2 - i\omega\gamma} e^{-i\omega t} \quad (6)$$

The correlation function may be evaluated by complex contour integration yielding for positive and negative times,

$$\langle x^*(0)x(t) \rangle = \left\{ \begin{array}{l} \left[\frac{f}{m} \right]^2 \left\{ \frac{e^{-\gamma t/2} e^{-i\Omega t}}{2\Omega\gamma(2\Omega - i\gamma)} + \frac{e^{-\gamma t/2} e^{i\Omega t}}{2\Omega\gamma(2\Omega + i\gamma)} \right\} \text{ for } t > 0 \\ \left[\frac{f}{m} \right]^2 \left\{ \frac{e^{\gamma t/2} e^{-i\Omega t}}{2\Omega\gamma(2\Omega + i\gamma)} + \frac{e^{\gamma t/2} e^{i\Omega t}}{2\Omega\gamma(2\Omega - i\gamma)} \right\} \text{ for } t < 0 \end{array} \right\} \quad (7)$$

$$\text{or } \langle x^*(0)x(t) \rangle = \left\{ \begin{array}{l} \left[\frac{f}{m} \right]^2 \left\{ \frac{2e^{-\gamma t/2}}{\gamma(4\Omega^2 + \gamma^2)} \cos \Omega t + \frac{e^{-\gamma t/2}}{\Omega(4\Omega^2 + \gamma^2)} \sin \Omega t \right\} \text{ for } t > 0 \\ \left[\frac{f}{m} \right]^2 \left\{ \frac{2e^{\gamma t/2}}{\gamma(4\Omega^2 + \gamma^2)} \cos \Omega t + \frac{e^{\gamma t/2}}{\Omega(4\Omega^2 + \gamma^2)} \sin \Omega t \right\} \text{ for } t < 0 \end{array} \right\} \quad (8)$$

where we have defined the frequency $\Omega = \sqrt{\omega_o^2 - \gamma^2 / 4}$. If the approximation

$\omega_o \gg \gamma$ is used then the above formulae take the much simpler form

$$\langle x^*(0)x(t) \rangle \cong \left| \frac{f}{m} \right|^2 \frac{e^{-\gamma|t|/2}}{2\gamma\omega_o^2} \cos \omega_o t \quad (9)$$

We see that the temporal behavior of the correlation function is exponentially damped for both positive and negative time and thus directly related to the Lorentzian spectral distribution as we have seen earlier.

We can attack to the problem in a different way. Let us write $\frac{f/m}{\omega_o^2 - \omega^2 - i\omega\gamma} = \rho e^{i\vartheta}$ and find

$$\rho(\omega, \gamma) = \frac{f}{m} \frac{1}{\sqrt{(\omega_o^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma^2}} \quad \text{and} \quad \tan \vartheta = \frac{\omega\gamma}{\omega_o^2 - \omega^2}. \quad \text{In this way a particular integral of}$$

equation (4) is given by $x(t) = \rho e^{i(\vartheta - \omega t)}$. The general solution of (4) with zero on the right –hand side is given by

$$x(t) = ce^{-\gamma t/2} e^{i\Omega t} + de^{-\gamma t/2} e^{-i\Omega t} = ae^{-\gamma t/2} \cos(\Omega t + \varphi) \quad (10)$$

In this way the solution of (4) is the sum

$$x(t) = ae^{-\gamma t/2} \cos(\Omega t + \varphi) + \rho(\omega, \gamma) \cos(\omega t - \vartheta) \quad (11)$$

Since the first term decreases exponentially with time, after a sufficient time only the second term survives. In fact the first term describes the transient behavior of the system. In contrast with a resonance without damping, the amplitude of oscillation, quantity $\rho(\omega, \gamma)$, depends on the frequency of the driving force, and acquires its maximum value when $\omega = \sqrt{\omega_o^2 - \gamma^2 / 2}$. However this maximum is not infinite as for the case of the resonance without friction. If the damping constant is small enough then the range of resonance is very close to ω_o . Let us again assume that $\omega_o \gg \gamma$, and write $\omega = \omega_o + \delta\omega$, with $\delta\omega$ very small. We will then find that

$$\rho(\omega, \gamma) = \frac{f}{m} \frac{1}{2\omega_o \sqrt{\delta\omega^2 + \gamma^2 / 4}} \quad (12)$$

During the oscillation the system continuously absorbs energy from the source of the external force, which in turn dissipates to the environment. The mean amount of energy absorbed per unit time is given as twice the mean value of the dissipative function, [33]. The latter is in generally a quadratic function of the \dot{x}_i for a system with many degrees of freedom, and in our

case is given by $F = \frac{1}{2} \gamma m \dot{x}^2$. It is easy to see that

$$F = \frac{1}{2} \gamma m \rho^2(\omega, \gamma) \sin^2(\omega t - \vartheta) \omega^2 \Rightarrow \bar{F} = \frac{1}{4} \gamma m \omega^2 \left(\frac{f}{m} \right)^2 \frac{1}{4 \omega_o^2 (\delta \omega^2 + \gamma^2 / 4)} \Rightarrow$$

$$\bar{F} \cong \frac{f^2}{4m} \frac{\gamma / 4}{(\delta \omega^2 + \gamma^2 / 4)} \quad (13)$$

Clearly we have reached to the Lorentzian line shape for the energy absorption, and this kind of dependence is called dispersion-type frequency dependence of the absorption, [32]. Thus, classical and quantum physics include phenomena that they are supported by the Lorentzian line shape distribution.

3. DEVIATIONS FROM EXPONENTIAL DECAY LAW IN THE LIMIT OF SHORT AND LONG TIMES.

In the previous section we used the correlation function discussing resonances in classical mechanics. The quantum analogous of the two point correlation function is the survival amplitude, defined as

$$a(t) \equiv \langle \Phi_o | e^{-iHt} | \Phi_o \rangle = \langle \Phi_o | \Phi(t) \rangle \quad (14)$$

Here $|\Phi_o\rangle$ represents the initial state of the system, meaning the state in which it has been prepared at $t = 0$ and H is the system's Hamiltonian. The latter is assumed to be exactly known and usually corresponding to the unperturbed problem where no interaction to the continuum is possible. It can be described by a localized wave packet whose energy E_o is inside the continuous spectrum. In this way $|\Phi(t)\rangle$ represents the time evolution of the initial state at arbitrary times. We can now insert the unit operator \hat{I} constructed by the complete set of states of the Hamiltonian

$$\hat{I} = \int dE |E\rangle \langle E| \quad (15)$$

which obviously satisfy the Schrödinger equation $\hat{H}|E\rangle = E|E\rangle$, and get

$$a(t) = \langle \Phi_o | e^{-iHt} | \Phi_o \rangle \Rightarrow a(t) = \langle \Phi_o | \int dE |E\rangle \langle E| e^{-iHt} | \Phi_o \rangle \Rightarrow$$

$$a(t) = \langle \Phi_o | \int dE |E\rangle \langle E| e^{-iEt} | \Phi_o \rangle = \int dE e^{-iEt} |\langle \Phi_o | E \rangle|^2 \quad (16)$$

where again we use the atomic system of units where $\hbar = 1$. The last term of the above equation defines the spectral distribution in terms of the Hamiltonian states and the initial state as well, through the $\rho(E) = |\langle \Phi_o | E \rangle|^2$. It demonstrates the physical meaning of the spectral distribution as the weight function for contribution of each of the energy states of the Hamiltonian to the construction of the survival amplitude. In other words the following quantity

$$\int_E^{E+dE} \rho(\varepsilon) d\varepsilon \quad (17)$$

is the probability that the energy of the state lies in the interval $[E, E+dE]$. It is clear from (16) that the Fourier transform of the spectral distribution is equal to the survival amplitude. The survival probability is given by

$$P(t) = |\langle \Psi_o | \Phi(t) \rangle|^2 = |a(t)|^2 \quad (18)$$

and must satisfy the following two conditions: $P(0) = 1$, and $P(\infty) = 0$, due to preparation and non stationarity respectively. In order to compute the survival amplitude $a(t)$, we must know $|\Phi(t)\rangle$, which is the solution of the time dependent Schrödinger equation. This is not trivial at all since it demands the knowledge of all of the interactions in a generally complicated problem. Alternatively we can assume a specific form for the spectral distribution of the system, based on certain properties and conditions that have to be fulfilled, and then calculate the survival amplitude through Fourier or Laplace transforms, [7-10,13], (and references therein). Among the various types of spectral distributions the Lorentzian, although still an approximation is rather the most popular since not only occurs in many branches of physics and different phenomena: deexcitation of atomic levels, alpha decay, resonant scattering, but also because it constitutes the generator of many other types of distributions or extensions thereof, [13,35-43]. More than this it has been seen that the Lorentzian spectral distribution can be directly related to Gamow vectors and exponential time evolution without violating causality, [35]. However an issue to be discussed has to do with the violation of its spectrum boundedness. In other words the Lorentzian spectral distribution violates the spectral condition to obtain a strict exponential decay. This happens because we admit states with arbitrarily large negative energies. This violation would also violate the second law of thermodynamics, [34] and the uncertainty principle as well. For the first case we can imagine suitable interactions to take arbitrarily large amounts of energy from the system. The first law of thermodynamics can be satisfied and yet the available energy from the system is arbitrarily large. This must not be possible and so the unbounded spectrum by itself should not occur. For the second case we have to think that the infinite negative potential energy, would confine a particle in a very small area, for example an electron near the nucleus. In this way both δx and δp tend to zero which is a contradiction to the uncertainty principle. So, since the distribution should actually be truncated to positive E , corresponding to the threshold of the continuum spectrum, we equivalently set $\rho(E) = 0$ for $E \leq 0$. The $\rho(E)$ is called *Truncated Lorentzian Distribution TLD*, and its general form is the:

$$\begin{aligned} \rho^{TLD}(E) &= N \frac{\Gamma(E)/2}{(E - E_o - \Delta(E))^2 + \Gamma(E)^2/4} \quad \text{for } E > 0 \\ &= 0 \quad \text{for } E < 0 \end{aligned} \quad (19)$$

where $\Delta(E)$ is the energy shift, $\Gamma(E)$ is the energy width of the resonance and N is a normalization factor different from $1/\pi$ since the distribution is now semibounded. For the same reason both the energy shift and the energy width are now energy dependent. The distribution $\rho^{TLD}(E)$ is a real function of energy and must satisfy the following condition of normalization, since probability is conserved:

$$\int_0^{\infty} \rho^{TLD}(E) dE = 1 \quad (20)$$

which is equivalent to write $a(0) = a^*(0) = 1$. This equation determines the value of quantity N and gives:

$$N(\beta(E), \delta(E)) = \left\{ \left[\delta(E) + \tan^{-1} \beta(E) \right] \right\}^{-1} \quad (21)$$

where quantity $\delta(E)$ represents an angle close but not equal to $\pi/2$ as a consequence of the energy dependence of both quantities $\Delta(E)$ and $\Gamma(E)$, analytically shown in [13]. In fact the energy dependence of the angle δ makes the Lorentzian a better approximation. It is quite obvious from eq. (19) that the truncated Lorentzian distribution reveals two complex energy poles that come as the complex conjugates of each other:

$$z = E_r(E) + i\Gamma(E)/2, \quad z^* = E_r(E) - i\Gamma(E)/2 \quad (22)$$

However since the propagator function must properly describe the irreversible time evolution of the system, only the z^* pole should be chosen in order to give the correct exponential decay law of the form $P(t) \propto e^{-\Gamma t/\hbar}$. Having this in mind some-one can propose instead a complex function of energy that intrinsically carries irreversibility and causality, and arises from $\rho^{TLD}(E)$ by keeping only the z^* pole, meaning the Complex Lorentzian Distribution CLD:

$$\rho^{CLD}(E) = \frac{\tilde{N}(\beta(E))}{2} \frac{i}{E - E_r(E) + i\Gamma(E)/2} \quad (23)$$

leading to a time evolution of the form $|\Phi(t)\rangle = \theta(t)e^{-iE_r t - (1/2)\Gamma t} |\Phi_0\rangle$.

The Paley-Wiener theorem [44] states that if the spectrum is bounded from below, then the survival amplitude and hence the survival probability decreases to zero as time passes less rapidly than any exponential function, and thus deviates from exponential decay. In fact we can show that deviations from exponential decay in the limit of long times, arise from clearly kinematical arguments. As we have already pointed, the spectral distribution depends on the background and kinematical factors. For example we can separate the phase space factor $\sigma(E)$ in the spectral distribution and write the latter as

$$\rho(\varepsilon) = f(\varepsilon) \cdot \sigma(\varepsilon) \quad (24)$$

where the form factor $f(\varepsilon)$ expresses the energy distribution of the decay products, to whom the unstable state is finally distributed. As time grows the wave packet of the initial state spreads so that the decay products separate sufficiently far to be outside each other's influence, and the distribution becomes clearly kinematic. This means that the form factor is smoothly varying after some large but finite time, since the corresponding interactions between the decay products become negligible. The remaining phase space factor has the form

$$\sigma(E) = \frac{d}{dE} \left(\frac{4}{3} \pi k^3 \right) = 4\pi k^2 \frac{dk}{dE} \quad (25)$$

where k is the wave number associated to the remaining kinetic energy via the $E = \frac{k^2}{2m}$. In this way we have

$$\sigma(E) = 8m\pi E \cdot \sqrt{\frac{m}{2E}} = 4\sqrt{2}\pi m^{3/2} \sqrt{E} \quad (26)$$

Thus, the survival amplitude for large times behaves as

$$\begin{aligned} a(t) &= \int_0^{\infty} dE e^{-iEt} \rho(E) \cong \int_0^{\infty} dE e^{-iEt} \sigma(E) = 4\sqrt{2}\pi m^{3/2} \int_0^{\infty} dE e^{-iEt} \sqrt{E} \\ &= \frac{1}{t} \frac{1}{\sqrt{t}} 4\sqrt{2}\pi m^{3/2} \int_0^{\infty} dz e^{-iz} \sqrt{z} : t^{-3/2} \end{aligned} \quad (27)$$

where we have reached the same result as in [13] but in a different way.

We may now examine the behavior of the survival amplitude, in the limit of very short times. The spectrum of the Hamiltonian is semibounded and in addition we assume that the expectation value of the energy at $t=0$ is finite. The expectation value of the energy may be taken as $\langle \Phi_o | \hat{H} | \Phi_o \rangle$ or alternatively via the use of the spectral distribution,

$$\langle E \rangle = \int_0^{\infty} \varepsilon \rho(\varepsilon) d\varepsilon \quad (28)$$

It is interesting to notice that the time derivative of the survival amplitude at $t=0$ is connected to the expectation value of the energy since it is true that

$$\alpha(t) = \int_0^{\infty} dE (-iE) e^{-iEt} \rho(E) \Rightarrow |\alpha(0)| = \int_0^{\infty} E \rho(E) dE = \langle E \rangle \quad (29)$$

Writing down the survival probability we can actually write

$$P(t) = \alpha(t) \cdot \alpha^*(t) \Rightarrow \frac{dP(t)}{dt} = \alpha(t) \cdot \alpha^*(t) + \alpha(t) \cdot \alpha^*(t) \quad (30)$$

The time derivative of the survival amplitude is continuous since we have

$$|\alpha(t)| = \left| \int_0^{\infty} dE (-iE) e^{-iEt} \rho(E) \right| \leq \int_0^{\infty} |E| |\rho(E)| dE < \infty \text{ and } \langle E \rangle \text{ is finite. It is easy to see that quantity } \alpha(0) \text{ is a purely imaginary quantity equal to}$$

$$\alpha(0) = -i \langle E \rangle \quad (31)$$

If this is the case then the time derivative of the survival probability at $t=0$, is equal to

$$\left. \frac{dP(t)}{dt} \right|_{t=0} = \alpha(0) \cdot \alpha^*(0) + \alpha(0) \cdot \alpha^*(0) = \alpha(0) \cdot 1 + 1 \cdot (-\alpha(0)) = 0 \quad (32)$$

The last result shows that the decay can not be exponential at very short times since then we should actually have, $\left. \frac{dP(t)}{dt} \right|_{t=0} = -\Gamma$. So at sufficient small time, the non decay probability falls off less rapidly than would be expected on the basis of the exponential decay law.

For each case of distribution, *TLD* or *CLD*, it was shown in [13] that the time evolution of an unstable system is constituted by two parts: the exponential decay part and the non exponential decay part. The exponential decay parts were exactly the same for the two distributions, while the non exponential decay parts had substantial in between differences. These differences had

mainly to do with the form of the non exponential survival amplitude. The real spectral distribution gave the following amplitude:

$$I^{TLD}(\beta, \alpha) = N(\beta, \delta) \int_{\delta}^{\tan^{-1} \beta} \exp[i\alpha(\beta - \tan \theta)] d\theta \quad (33)$$

while the complex distribution gave:

$$I^{CLD}(\beta, \alpha) = \frac{N(\beta, \delta)}{2} \int_{\delta}^{\tan^{-1} \beta} d\theta \exp\{i[\alpha(\tan \theta - \beta) - \theta]\} / \cos \theta \quad (34)$$

In the above relations we have used the following dimensionless quantities, $\alpha \equiv t / 2\tau_d$ where τ_d is the mean lifetime of the resonant state and $\beta \equiv 2E_r / \Gamma$ as twice the ratio of the energy position to the decay width of the resonant state. In addition the non exponential amplitudes satisfy a different differential equation. Both of them come as a classical Langevin type of equation, [45], with quantity $\omega(\beta, \delta) \equiv (\beta - \tan \delta)$ (35)

corresponding to the frequency of the rapidly oscillating stochastic terms, and carrying information from the limits of the spectrum, [13,46].

4. CORRELATION BETWEEN EXPONENTIAL AND NON EXPONENTIAL AMPLITUDE.

The exponential part of the decay is totally determined by the width function $\Gamma(E)$ since the latter describes the rate of exponential decay of the system's survival probability. This quantity is produced through the interaction of the system with the continuum, and there exist many different methods for its calculation. For example it can be constructed through Fermi's golden rule, [47], where it is produced from the contribution of the matrix elements of the interaction potential, or alternatively through path integral methods, [48], and contributions of the classical action inside the potential barrier. The energy shift $\Delta(E)$ is also produced by the interaction terms and according to [48] is given as a function of the derivative of the classical action inside the potential barrier with respect to energy. It is clear from the above that both quantities $\Gamma(E)$ and $E_r(E)$ are similarly constructed and depend on the type and strength of the interaction with the continuum, and so does their ratio β .

Following Dirac's formalism we can define a vector whose energy wave function is a Lorentzian distribution, meaning the

$$|\phi\rangle = \int dE |E\rangle \langle E|\phi\rangle = \int dE |E\rangle \left(i \sqrt{\frac{\Gamma}{2\pi}} \frac{1}{E - (E_r - i\Gamma/2)} \right) \quad (36)$$

If we choose the boundaries of integration to be $-\infty \leq E < \infty$, the length of this vector is given by

$$\langle \phi|\phi\rangle = \int_{-\infty}^{\infty} dE \langle \Psi^G | E \rangle \langle E | \Psi^G \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} dE \frac{\Gamma}{2\pi} \frac{1}{(E - E_r)^2 + \Gamma^2/4} = 1 \quad (37)$$

However if we choose the boundaries according to the rules of standard quantum mechanics, $0 \leq E < \infty$, we get

$$\begin{aligned} \langle \phi | \phi \rangle &= \int_0^\infty dE \langle \Psi^G | E \rangle \langle E | \Psi^G \rangle = \int_0^\infty dE \frac{\Gamma}{2\pi} \frac{1}{(E - E_r)^2 + \Gamma^2/4} = \\ &= \frac{1}{\pi} \int_{-\beta}^\infty dz \frac{1}{z^2 + 1} = 1 - \frac{1}{\pi} \left\{ \beta^{-1} - \frac{\beta^{-3}}{3} + \dots \right\} \end{aligned} \quad (38)$$

The first length equals 1, and corresponds to the pure exponential decay law as we have already seen in eq. (3). The second length is less than 1, and corresponds to the mixed propagation, exponential and non exponential, given as a function of the ratio β . It was shown in [13] and can be established once more from the above relations, that in the limit where β tends to infinity the exponential decay becomes the only contribution in the system's time evolution, (the results of equations 37 and 38 coincide). On the contrary when β takes values close to 1 the exponential decay part becomes much less significant. For intermediate values of the ratio β we get an interplay between exponential and non exponential decay and this is reflected on the values of the length of eq. (38). It is easily seen that equation (38) describes an increasing function of β . So there is an one by one correspondence between the strength of the exponential decay and the values of the ratio β . In this way the correlation between the exponential and the non exponential decay generates translations in the β parameter and we may think of it as the generator of the one dimensional space introduced by β . Inside this generalized space, the non exponential part of the decay will classically flow, while the space points may act as secondary either destructive or constructive sources. The study of this kind of behaviour is expected to extract information about the correlation between the two types of evolution.

The continuity equation expresses the fact that inside a finite volume "mass" or "charge" is conserved in the absence of external sources and this makes the equation homogeneous. As a first step in the mathematical analysis that follows a generalized density and current must be properly introduced. Classical intuition is related to probabilities which are the directly observed quantities. But probabilities do not propagate. Propagation is for the amplitude. Thinking so, the generalized density is defined by the non exponential amplitude itself, meaning $A = I^{TLD}(\beta, \alpha)$ or $I^{CLD}(\beta, \alpha)$ and depends on both space, (meaning $\beta \equiv 2E_r/\Gamma$) and time, (meaning $\alpha \equiv t/2\tau_d$). The corresponding current comes then naturally as

$$J \equiv \beta \frac{\partial A(\beta, \alpha)}{\partial \alpha} \quad (39)$$

The continuity equation comes as [49],

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div } \vec{J} = 0 \quad (40)$$

and takes the following form for the case of the non exponential amplitudes:

$$\frac{\partial A(\beta, \alpha)}{\partial \alpha} + \frac{\partial}{\partial \beta} \left(\beta \frac{\partial A(\beta, \alpha)}{\partial \alpha} \right) = 0 \quad (41)$$

In the following paragraphs the specific form of eq. (41) is investigated for the cases of real and complex spectral distributions that were previously mentioned. It is easy to see after a little piece of algebra, that the conservation law takes the following form:

$$\frac{\partial I^{TLD \text{ or } CLD}(\beta, \alpha)}{\partial \alpha} + \frac{\partial}{\partial \beta} \left(\beta \frac{\partial I^{TLD}(\beta, \alpha)}{\partial \alpha} \right) = \left[\frac{\operatorname{sech}(\ln \beta)}{4N(\beta, \delta)} - 1 \right] \times \frac{iN(\beta, \delta)}{\tau_d} \int_{\delta}^{\tan^{-1} \beta} [(\beta \text{ or } 0.5) - (1 \text{ or } 0.5i) \tan \theta] \exp[i\alpha(\tan \theta - \beta)] d\theta$$

(42)

It is obvious that the continuity equation is inhomogeneous since an additional term in the right hand of the equation appears and which we define as the exponential source term, (*est*). However the lack of homogeneity has important consequences in terms of physics. Due to the first term of the left hand side of eq. (42), the *est* corresponds to a first time derivative of an amplitude and can be cancelled if a suitable measuring perturbation is applied. In the limit of short times this cancellation would make the non exponential decay uncorrelated to the exponential one, and consequently observable. So the question is whether these terms can be cancelled at this regime of time. This can be achieved only if the *est* takes finite values which in turn ensures that we can actually follow the system through its evolution. We are interested in the limit of short times not only because it is the regime of time where the non exponential decay becomes important but also because we may want to discuss some interesting and peculiar phenomena such as the quantum Zeno effect.

The *est* term comes as a function of quantities α and β , and of the resonance's lifetime τ_d and corresponds to the correlation between exponential and non-exponential decay during the system's time evolution. The first thing to notice is the fact that the continuity equation becomes homogeneous when the following condition is satisfied:

$$4N(\beta_0, \pi/2) = \operatorname{sech}(\ln \beta_0) \tag{43}$$

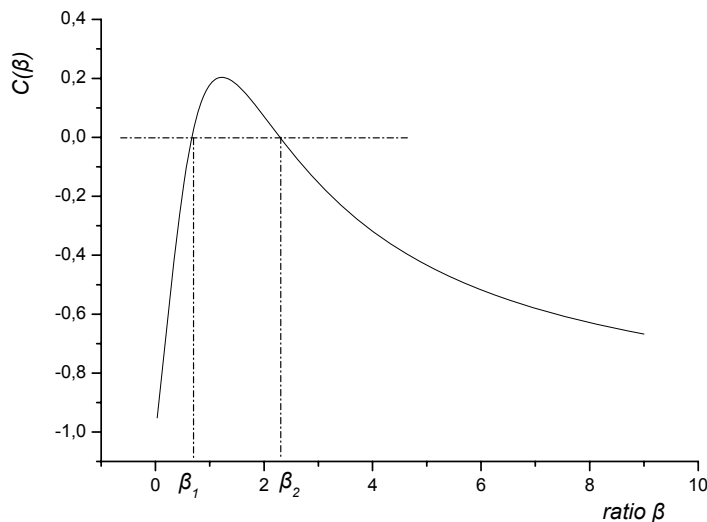


FIGURE 1. The variation of quantity $C(\beta)$ with β . Its Lorentzian shape shows a maximum at $\beta=1.25$, and approaches -1 for both $\beta \rightarrow 0, \infty$.

For a given system, the different possible values of quantity β correspond to different kind and strength of interactions with the continuum. By solving numerically the

transcendental equation (43) we find two solutions namely $\beta_1 \cong 0.67$ and $\beta_2 \cong 2.29$. These answer directly to the question of how close to unit must ratio β be in order for the non-exponential decay to dominate the evolution. On the other hand and since β also appears in the limit of integration in the right term of (42), as $\beta \rightarrow \infty$ the flow disappears and the same of course happens with the correlation between the two kinds of evolution. In fact we can draw in Figure 1 that follows quantity $C(\beta)$ as a function of β defined by

$$C(\beta) = \left[\frac{\text{sech}(\ln\beta)}{4N(\beta, \pi/2)} - 1 \right] \quad (44)$$

For both regions of $\beta \rightarrow 0$ and $\beta \rightarrow \infty$, $C(\beta)$ approaches -1. It is interesting to notice that $C(\beta)$ has itself a Lorentzian-like shape. When condition (43) is satisfied, the non exponential part of the decay is conserved and the interaction between the two different types of propagation is negligible.

However we are interested for other values of the ratio β as well. For this we examine in more details the behavior of the est term, in the lines that follow. Concerning the real spectral distribution, we first treat the case where the interaction with the continuum, through a potential barrier for example, changes both $\delta(E)$ and $\beta(E)$ in a way that the following relation holds

$$\beta(E) \cong \tan \delta(E) \quad (45)$$

This would correspond to the situation where the complex energy shift is strongly energy dependent. This makes $\delta(E)$ also strongly energy dependent and reflects on the magnitude of its derivative. We can then approximate est^R and after a little piece of algebra find that

$$est^R \Big|_{\frac{d\delta}{dE} \gg} \cong i \frac{N(\beta, \delta)}{1 + \beta^2} \left[\frac{\text{sech}(\ln\beta)}{4N(\beta, \delta)} - 1 \right] (\tan \delta - \beta)^2 \quad (46)$$

It is interesting to notice that there is no time dependence of the est^R , to be discussed in the next section. For all the other types of smooth dependent complex energy shifts we can approximate est^R as follows

$$est^R \Big|_{t \gg} \cong \frac{i}{2\tau_d} \left[N(\beta, \delta) - \frac{\text{sech}(\ln\beta)}{4} \right] \times \left\{ \begin{aligned} & -i\omega(\beta, \delta) \exp(i\omega(\beta, \delta)t) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{n!}{(t/\tau_d)^{n+1}} \left(\frac{1}{(i \tan \delta + 1)^{n+1}} - \frac{1}{(i \tan \delta - 1)^{n+1}} \right) + \\ & \exp(i\omega(\beta, \delta)t) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(n+1)!}{(t/\tau_d)^{n+2}} \left(\frac{1}{(i \tan \delta - 1)^{n+1}} - \frac{1}{(i \tan \delta + 1)^{n+1}} \right) + \\ & \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(n+1)!}{(t/\tau_d)^{n+2}} \left(\frac{1}{(i\beta + 1)^{n+1}} - \frac{1}{(i\beta - 1)^{n+1}} \right) \end{aligned} \right\} \quad (47)$$

where the above formula stands for times beyond the short time regime. In the region of very short times it is easy to approximate est^R according to the following formula

$$\begin{aligned}
 est^R_{t \ll} \cong & \frac{1}{\tau_d} \left[\frac{\text{sech}(\ln \beta)}{4} - N(\beta, \delta) \right] \times \\
 & \left\{ i \left[\beta (\tan^{-1} \beta - \delta) + \ln \frac{\cos \tan^{-1} \beta}{\cos \delta} \right] - \right. \\
 & \left. \left[\frac{t}{2\tau_d} \left[(\tan^{-1} \beta - \delta)(1 - \beta^2) - 2\beta \ln \frac{\cos \tan^{-1} \beta}{\cos \delta} + \tan \delta - \beta \right] \right] \right\}
 \end{aligned} \quad (48)$$

In the case of the complex spectral distribution a different type of est^C is revealed, where c stands for the complex distribution. It is not difficult to find the following operator that connects the est for the two different types of spectral distribution

$$est^C \equiv \hat{C} \rightarrow R est^R = \frac{1}{2} \left(1 - i\beta - \frac{\partial}{\partial \alpha} \right) est^R \quad (49)$$

We may now focus on the short time regime and discuss the observability of the non exponential part of the decay. The case of long times can easily be handled, at least in a theoretical base, since the polynomial form of the non exponential propagation always dominates the exponential part after a certain number of lifetimes [13]. In the latter case the only problem to be solved experimentally has mostly to do with the very small magnitude of the propagation at these limits of time, while in the former case there exist other difficulties as well, related to the quantum nature of the resonant states, and the tunneling process, [13,46,48]. The angle δ that enters the calculations as the second limit of integration in the propagator integral equations, carries information from the limits of the energy spectrum at very short times and contributes significantly to the non exponential propagation. An earlier study of these contributions, [46], concerned the question of observability “of early time departures from Fermi’s golden rule” where the issue of the non exponential propagation at $t = 0$ was discussed at length.

As we have already said est terms correspond to the first time derivative of a quantity with the same dimensions as those of the amplitude meaning a matrix element of the form $\langle \Phi_o | \hat{\mu}(t) | \Phi_o \rangle$, where $\hat{\mu}(t)$ stands for the perturbation effected by a measurement, and Φ_o stands for the initial state of the system at $t=0$ with energy E_o as has been already mentioned. The evolution of the system is described by

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\Phi(t)\rangle = \hat{H} |\Phi(t)\rangle \quad (50)$$

where \hat{H} is the Hamiltonian operator and $|\Phi(0)\rangle = \Phi_o$. We assume that the measurement process at the limit of very short times permits interaction with the continuum. For example we may have a time dependent potential barrier that alters both the classical allowed and classical forbidden region of motion, and eventually quantities δ and β . This also changes the state of the system from Φ_o to $|\Phi(t)\rangle$, and makes quantity $\langle \Phi_o | \Phi(t)\rangle = \langle \Phi_o | \hat{\mu}(t) | \Phi_o \rangle \equiv a(t)$ the survival amplitude. It follows directly from (50) that $i\hbar \dot{a}(t) = \langle \Phi_o | \hat{H} | \Phi(t)\rangle$ and for $t=0$ we have

$$i\hbar \dot{a}(0) = \langle \Phi_o | \hat{H} | \Phi_o \rangle = E_o \quad (51)$$

The above relation expresses the fact that in the limit of very short times quantity $\dot{a}(0)$ must be purely imaginary. This is true for the real Lorentzian distribution, as can be easily proved from (48) where we get

$$\dot{a}(0) \cong i \frac{1}{\tau_d} \left[\frac{\text{sech}(\ln \beta)}{4} - N(\beta) \right] \left[\beta \left(\tan^{-1} \beta - \delta \right) + \ln \frac{\cos \tan^{-1} \beta}{\cos \delta} \right] \quad (52)$$

This is not true however for the complex distribution due to relation (49) which makes $\dot{a}(0)$ a complex and not purely imaginary quantity. This means that the complex spectral distribution does not provide a complete theory for the observability of the non exponential decay in the limit of very short times. Let us focus on the purely imaginary character of quantity $\dot{a}(0)$. Following the steps that lead to exponential decay, we assume that the system is prepared in state $|\Phi_o\rangle$ at a time t and that the probability of decay in a time interval is Γdt . Thus if the probability that the system was in state $|\Phi_o\rangle$ is $P(t)$ then the probability that the system will be in state $|\Phi_o\rangle$ at a time $t+dt$ will be $P(t+dt) = P(t)(1 - \Gamma dt)$ and this of course leads to exponential decay. If we now work with the survival amplitude we will take

$$P(t+dt) = |a(t+dt)|^2 = |a(t) + \dot{a}(t)dt|^2 = |a(t)|^2 \left| 1 + \frac{\dot{a}(t)}{a(t)} dt \right|^2 = P(t) \left| 1 + \frac{\dot{a}(t)}{a(t)} dt \right|^2 \quad (53)$$

Since $a(0) = 1$ and $\dot{a}(0) = i\gamma$ we have for $t=0$, $P(dt) = 1 + \gamma^2 dt^2$. The latter is greater than unit however this inconsistency is removed if we take in account all the remaining derivatives of the amplitude in the expansion of $a(t+dt)$. The case of exponential decay gives $P(dt) = 1 - \Gamma dt$. If we look at $P(dt)$ as a polynomial of dt we note the absence of dt in the amplitude method. This is due to our mistake assumption in constructing the exponential dependence, that the survival probability changes entirely due to transitions out of the initial state where we have not taken in account transitions back to the initial state. The latter would cancel the $-\Gamma dt$ term.

On the other hand eq. (52) together with (31) serve as a tool for the calculation of the angle $\delta(E)$ that enters the Lorentzian distribution and takes in account the energy dependence of the complex energy shift. Indeed we get the transcendental equation

$$\frac{\langle E \rangle \tau_d}{C(\beta)} + \beta \tan^{-1} \beta + \ln(\cos \tan^{-1} \beta) \cong \beta \delta + \ln \cos \delta \quad (54)$$

We can now discuss the finiteness of the time derivative of the survival amplitude. In fact we can divide the physical systems in two categories: these where the expectation value of the energy is finite and these where it tends to infinite. Concerning the first case, we have already shown that when the expectation value of the energy is finite then the decay rate approaches zero as $t \rightarrow 0$. The time derivative of the amplitude expresses the rate with which the measuring perturbation should change in time in order for the non exponential decay to be observed. Combining the above we are left with the conclusion that in this case we can follow the system at sufficiently small time and observe deviations from exponential propagation. But deviations from exponential decay are equivalent to say that at $t=0$ the decay rate tends to zero and not equal to $-\Gamma$. Thus, if the unstable system is monitored for its existence at sufficiently small intervals of time, it would appear to be longer lived than if it were monitored at intermediate intervals, where the decay law is exponential. These are the conditions for the quantum Zeno's

paradox to appear, which states that in the limit of continuous monitoring the system does not decay at all. The quantum Zeno effect was first understood by von Neumann, [50]. While analyzing the thermodynamic features of quantum ensembles von Neumann proved that any given state Φ_0 of a quantum mechanical system can be “steered” into other state Ψ of the same Hilbert space, by performing a series of very frequent measurements. If Φ_0 and Ψ coincide, the evolution is frozen, meaning that a quantum Zeno effect takes place. The classical allusion to the sophist philosopher Zeno of Elea is due to Misra and Sudarshan [30], who were also the first to provide a consistent and rigorous mathematical framework. We can easily see that if the system is initially prepared in the unstable state $|\Phi_0\rangle$ and is monitored on its survival at the instants $0, t/n, 2t/n, \dots, (n-1)t/n, t$ the probability for its survival is given by $P(t/n)^n$. In addition since the survival amplitude is differentiable and $\dot{P}(0) = 0$, we can actually write for $n \rightarrow \infty$.

$$\{P(t/n)\}^n \cong \{P(0) + \dot{P}(0)(t/n)\}^n = 1 \quad (55)$$

independent of t . It is thus evident that the survival probability under discrete but frequent monitoring will be close to 1 provided that t/n is sufficiently small to observe departures from exponential decay law. The quantum Zeno effect is a direct consequence of general features of the Schrödinger equation that yield quadratic behavior of the survival probability at short times. Let H be the total Hamiltonian of a quantum system and Φ_0 its initial state. The short time expansion of the survival probability yields a quadratic behavior of the form

$$P(t) : 1 - t^2 / \tau_z^2 \quad \text{where} \quad 1 / \tau_z^2 \equiv \langle \Phi_0 | H^2 | \Phi_0 \rangle - \langle \Phi_0 | H | \Phi_0 \rangle^2 \quad (56)$$

and τ_z is the Zeno time, [51]. It is easy to see that $\{P(t/n)\}^n \cong \exp(-t^2 / n\tau_z^2) \rightarrow 1$ (as $n \rightarrow \infty$). If the Hamiltonian is divided into the unperturbed H_0 and the interaction part H_{int} , the Zeno time reads

$$1 / \tau_z^2 \equiv \langle \Phi_0 | H_{int}^2 | \Phi_0 \rangle = \mathcal{E}_{\tau_z}^2(0) \quad (57)$$

which in accordance to eq. (48) gives

$$1 / \tau_z^2 \cong \frac{1}{2\tau_d^2} \left[\frac{\text{sech}(\ln\beta)}{4} - N(\beta, \delta) \right] \times \left[(\tan^{-1} \beta - \delta)(1 - \beta^2) - 2\beta \ln \frac{\cos \tan^{-1} \beta}{\cos \delta} + \tan \delta - \beta \right] \quad (58)$$

In this way we can estimate the Zeno time as

$$\tau_z \cong \frac{2\sqrt{2}\tau_d}{\sqrt{\text{sech}(\ln\beta) - 4N(\beta, \delta)}} \left[(\tan^{-1} \beta - \delta)(1 - \beta^2) - 2\beta \ln \frac{\cos \tan^{-1} \beta}{\cos \delta} + \tan \delta - \beta \right]^{-1/2} \quad (59)$$

Since the finiteness of the time derivative of the survival amplitude at $t=0$ turns to be very important for the process of measurement, we may want to investigate its limits of accuracy as these are determined from eq. (52). Due to the structure of the $C(\beta)$ coefficient $\dot{a}(0)$ is expected to have at least two roots, meaning the values of β_1 and β_2 that were previously revealed. This is important because these roots correspond to regions of quantity β where $\dot{a}(0)$ remains finite. We remind ourselves that these regions include resonant states where the non exponential

decay dominates over the exponential, and according to the above quantum Zeno's paradox may appear. On the other hand eq. (52) describes the rate with which the measurement matrix element should change in the limit of very short times in order for the non exponential decay to be observed, as a function of the angle $\delta(E)$. When the latter is close to $\pi/2$ then the complex energy shift does not significantly depend on the energy and the spectral distribution is almost Lorentzian line shape. For this reason we examine $\dot{a}(0)$ for different values of $\delta(E)$ close and distant from $\pi/2$, from $\pi/1.985$ to $\pi/1.500$. The figures that follow describe $\dot{a}(0)$ with β , for the previously mentioned values of the angle δ , covering each time two different regions of values of β .

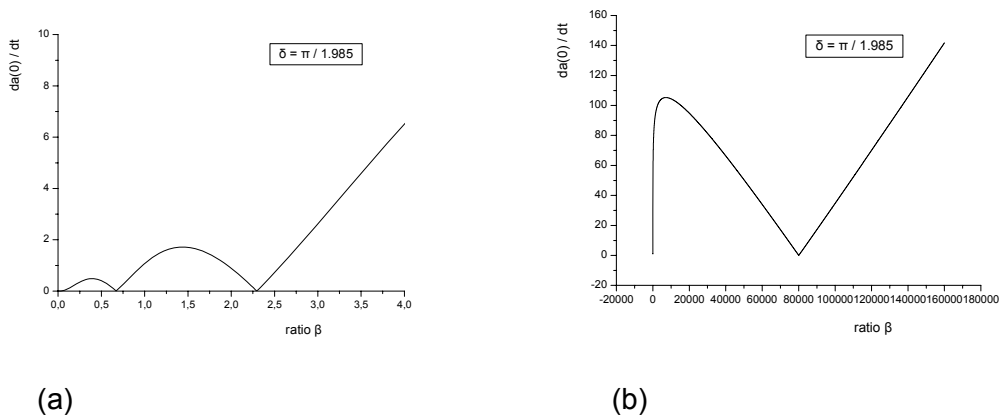


FIGURE 2. The variation of $\dot{a}(0)$ with β for an angle $\delta = \pi/1.985$. a) For small values of β we have the two minima generated by $C(\beta)$, b) a third minimum appears for a value of β equal to 80×10^3 . For greater values of β , $\dot{a}(0)$ approaches ∞ .

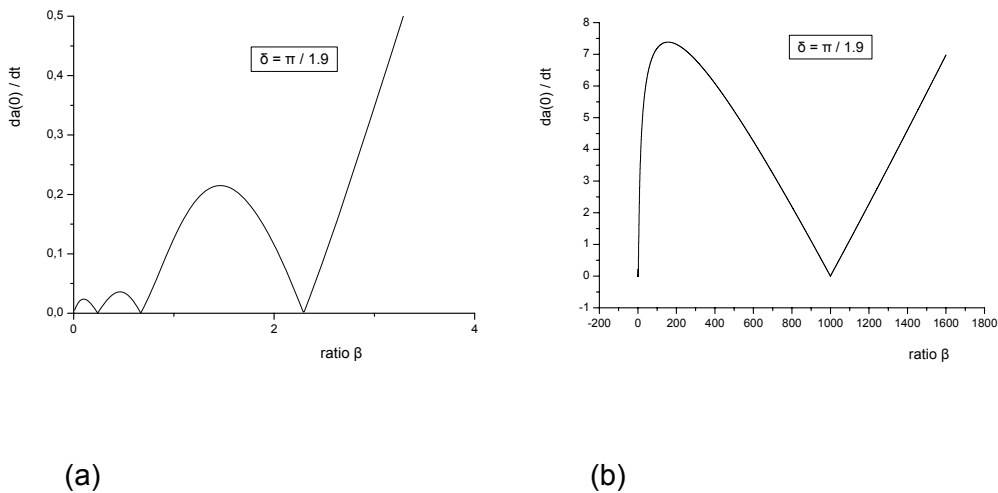


FIGURE 3. The variation of $\dot{a}(0)$ with β for an angle $\delta = \pi/1.9$. a) For small values of β we have three minima, b) a fourth minimum appears for a value of β equal to 10^3 . For greater values of β , $\dot{a}(0)$ approaches ∞ .

The existence of minima in the above figures, ensures the finiteness of the time derivative of the survival amplitude, and enables the observation of the non exponential decay and generally the delay of propagation out of the initial state. We can see that when the angle δ is close to $\pi/2$ minima appear not only due to the structure of $C(\beta)$ for small values of β , but for other values of β as well. This corresponds to the case where the Lorentzian line shape distribution provides a good approximation for the description of the unstable state. When δ further changes, there is no more space for other minima and $\dot{a}(0)$ approaches infinite as β grows. Thus the rate with which the measuring process varies tends to infinite even if the matrix element of the process is itself finite. In this way the variation of the measuring perturbation is discontinuous and we can not follow the system in this limit although the measurement might be in principle realizable.

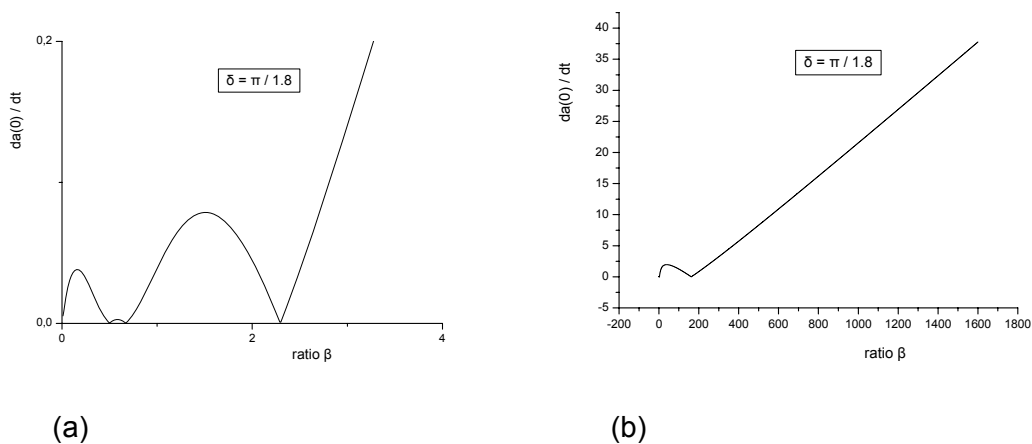


FIGURE 4. The variation of $\dot{a}(0)$ with β for an angle $\delta = \pi/1.8$. a) For small values of β we have the minima, since the third is getting absorbed b) a third minimum appears for a value of β equal to 180. For greater values of β , $\dot{a}(0)$ approaches ∞ .

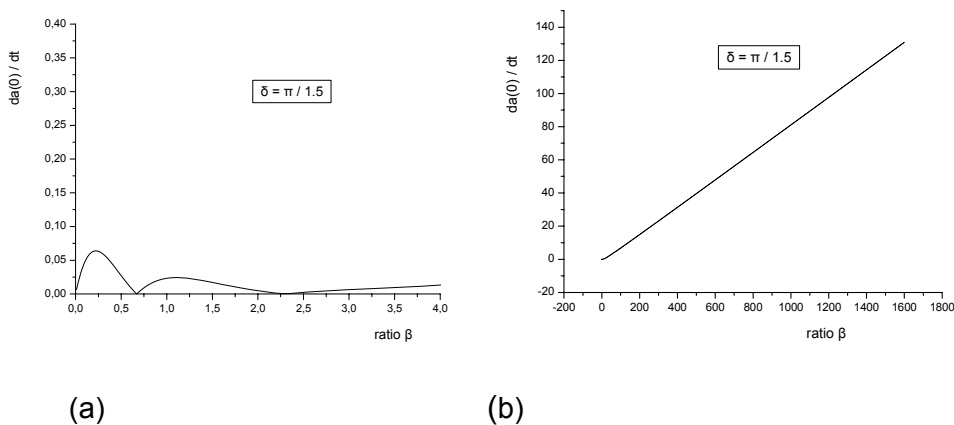


FIGURE 5. The variation of $\dot{a}(0)$ with β for an angle $\delta = \pi/1.5$. a) For small values of β we have again the two minima generated by $C(\beta)$, b) no other minimum appears for greater values of β since the previous corresponding minimum is absorbed, and $\dot{a}(0)$ linearly approaches ∞ .

When we treat the case of a strongly energy dependent energy shift, we can see from (46) that the rate with which the measuring perturbation changes, remains very small in magnitude for all the moments in time and also purely imaginary. The small magnitude has to do with the

fact that in this case the non exponential decay dominates the propagation in the limits of very short times, due to the strong contribution of the angle $\delta(E)$, [13,46], and so it is possible for the detector to follow the system and observe it. We have already seen that the *est* acquires a purely imaginary structure for two reasons: $\hat{H}(t)$ is the part of the Hamiltonian that causes the measuring perturbation of the system at $t=0$ and in addition we can assume that the system can indeed be prepared in the state $|\Phi_0\rangle$ at that instant. Since the *est* = $\dot{a}(t)$ conserves this imaginary structure at later times also, it is clear that this is equivalent to say that we can repeatedly reset the system to its initial state. In this way we can in principle observe the non exponential decay and at the same time prevent decay by resetting the system back to Φ_0 through repetitive observations, with a rate of change of the measuring process given by (46). Thinking so, (46) could serve as a definition for the frequency of observation needed, where for a wide class of systems, tests of non-decay repeated at arbitrarily small times would prevent the decay of an unstable state. Again this is not true for the complex spectral distribution for the same reasons explained in the previous paragraph.

Finally we may discuss the limit of very long times. As we have already mentioned the Paley-Wiener theorem [44], states that if the spectrum of the Hamiltonian is bounded below, so that $\rho(E) = 0$ for $E < 0$, then the survival amplitude decreases to 0 as $t \rightarrow \infty$ less rapidly than any exponential function. This is essentially Khalfin's argument [8] proving the necessity of deviation from the exponential decay law at large time. Looking at eq. (47) it is easy to understand that all stochastic terms containing $\exp(i\omega(\beta, \delta)t)$ produce cancellations and so the dominant term for $n=0$ takes the following form for the two distributions

$$EST^{R,C} \underset{t \gg \tau_d}{\cong} \frac{iN(\beta)C(\beta)\tau_d}{(1+i\beta)[(i\beta,2)-1]} \cdot \frac{1}{t^2} \tag{56}$$

Both terms rapidly go to zero as time grows, which makes it quite easy for the non exponential decay to be observed in this region of time. However and as we have already mentioned at the beginning of this section, a serious problem to be solved experimentally has mostly to do with the very small magnitude of the propagation at this region of time.

5. CONCLUDING REMARKS

In this work we discussed the origin and some of the properties of the deviations from exponential decay law, related to quantum resonances that can be described by Lorentzian line shape distributions. For this reason we first demonstrated the appearance of the Lorentzian distribution in both classical and quantum theory of resonances, as the mean amount of energy absorbed per unit time and the scattering phase respectively. In our study we distinguished two types of distributions both generated by the Lorentzian, namely the real truncated Lorentzian which is the semibounded Lorentzian, and the complex Lorentzian distribution which emerges when keeping only the appropriate $t>0$ energy pole of the Lorentzian.

Following very general principles arising from kinematical effects, we showed that for large times and due to the fact that the decay products to whom the initial unstable state is finally distributed become uncorrelated, the kinematical factors dominate the distribution, giving a non exponential time dependence of the form $t^{3/2}$. In the limit of very short times it is important to notice that the magnitude of the survival amplitude approaches the energy expectation value and the amplitude itself is purely imaginary. Then both the semiboundedness of the spectrum and the finiteness of the expectation value of the energy, ensure that the time derivative of the

survival probability approaches zero. Thus, at sufficient small time, the non decay probability falls off less rapidly than would be expected on the basis of the exponential decay law.

We constructed an analogous to the continuity equation in order to investigate the correlation between exponential and non exponential decay. We defined a spatial variable β , as twice the ratio of the energy position to the width function of the resonance and showed that there is an one by one correspondence between the strength of the exponential decay and this ratio. We can achieve the homogeneity of this equation by applying a suitable measuring perturbation cancelling its second part, where the latter is defined as the exponential source term, *est*. The *est* expresses the correlation between exponential and non exponential decay and comes as the first time derivative of the previously mentioned measuring perturbation. For both types of distributions we found the same values of β close to 1 that zero the *est*, corresponding to the situation where the non exponential decay dominates the evolution. In the limit of short times we proved that the complex spectral distribution does not provide a complete theory for the observability of the non exponential decay, since it does not construct a purely imaginary survival amplitude as it should. Concerning the real distribution in the above limit, we produced the transcendental eq. (54) for the angle δ that describes the energy dependence of the complex energy shift as a function of the expectation value of the energy of the initial state. We also produced eq. (59) that gives the Zeno time as a function of the ratio β . We explored the finiteness of the *est* term for other values of β as well, beyond those close to 1, since this permits someone to follow the system and observe the non exponential propagation, at least in principle. We showed that the finiteness is achieved only for specific values of the angle δ close to $\pi/2$. For the case of a strongly energy dependent energy shift we found that the rate with which the measuring perturbation should change, is very small in magnitude for all the moments in time and also purely imaginary, concerning the real spectral distribution. The first characteristic was connected to the strong contribution of the non exponential decay while the second was connected to the potentiality to repeatedly reset the system to its initial state. In this way equation (46) provides information for the frequency needed for the repetition of the observations. However this is not true for the complex spectral distribution, for the same reasons appeared in the short time regime.

In the limit of very long times both distributions produce *ests* whose dominant terms, meaning those beyond the stochastic terms that cancel each other, rapidly go to zero with time as $1/t^2$. This fact makes it quite easy for the non exponential decay to be observed. However the difficulty in this case has mostly to do with the very small magnitude of the propagation at this region of time.

REFERENCES

1. G. Gamow, *Z. Phys.* **51**, 204-212 (1928).
2. P.A.M. Dirac, *Proc. Roy. Soc. London* **114**, 243-265 (1927).
3. V.F. Weisskopf and E.P. Wigner, *Z. Phys.* **63**, 54-73 (1930).
4. G. Breit and E.P. Wigner, *Phys. Rev.* **49**, 519-531 (1936).
5. A.J.F. Siegert, *Phys. Rev.* **56**, 750-752 (1939).
6. J. Wheeler, *Phys. Rev.* **52**, 1107-1122 (1937).
7. M. L. Goldberger and K. M. Watson, *Collision Theory*, New York: Wiley, 1964, pp. 424-509.
8. L. A. Khalifin, *J Exp. Theor. Phys.* **6**, 1053-1063 (1958).
9. L. Fonda, G.C. Chirardi and A. Rimini, *Rep. Prog. Phys.* **41**, 587-631 (1978).
10. C. C. Tannoudji, J. D. Roc and G. Grynberg, *Atom-Photon Interactions*, New York: Wiley, 1992, pp. 189-195
11. T. Petrosky and I. Prigogine, *Comp. Math. Appl.*, **34**, 1-44 (1997).
12. V. Wong and M. Gruebele, *Phys. Rev. A* **63**, 022502 1-9 (2001).
13. T. G. Douvropoulos and C. A. Nicolaidis, *Phys. Rev. A* **64**, 032105 1-10 (2004).

14. P. Facchi and S. Pascazio, S., *Phys. Lett. A*, **241**, 139-144 (1998).
15. F. Giacosa and G. Pagliara, *Mod. Phys. Lett. A* **26** 2247-2259 (2011).
16. F.H.L. Coppens, et al., *Phys. Rev. Lett.*, **99**, 106803 1-4 (2007).
17. P.J. Aston, *Eur. Phys. Lett.*, **97**, 5201-6 (2012)
18. F. Giacosa, *Found. Phys.*, **42**, 1262-1299 (2012).
19. J.G. Muga, F. Delgado, A del Campo, et al., *Phys. Rev. A*, **73**, 052112 1-5 (2006).
20. J. Martorell ,J.G. Muga and D.W.L. Sprung, *Rev. A*, **77**, 042719 1-9 (2008).
21. Y. J. Wang, S. J. Xu, D. J. Zhao, et al, , *Opt. Express*, **14**, 13151-13157 (2006).
22. J. P. Boon and S. Yip, *Molecular Hydrodynamics*, New York: Dover, 1991, pp. 120-129.
23. K. Zhang, *J.Appl.Phys.*, **105**, 07D307 1-3, (2009).
24. E. Grunewald, R. Knight, *Geophysics*, **77**, EN1-EN9 (2011).
25. P. Ginzburg, A. Zayats, *Opt. Express.*, **20**, 6720-6727 (2012).
26. V. Uc. Hugo, J. P. Alvarez-Idaboy, A. Galano and A. Vivier-Bunge, *J. Phys. Chem. A*, **112**, 7608-7615 (2008).
27. G. Kalosakas, K. O. Rasmussen and A. R. Bishop, *Chem. Phys. Lett.*, **432**, 291-295 (2007).
28. B. Yegnanarayana, B. S. Ramakrishna, *J. Acoust. Soc. Am.*, **58**, 853-857 (1975).
29. J. A. D. Appleby, A. Rodkina and H. Schurz, *Discrete Cont. Dyn.-B*, **6**, 667-696 (2006).
30. B. Misra and E. C. G. Sudarshan, *J. Math. Phys.*, **18**, 756-763 (1977).
31. C. B. Chiu, E. C. G. Sudarshan and B. Misra, *Phys. Rev. D*, **16**, 520-529 (1977).
32. L.D. Landau, E.M. Lifshitz and L.P. Pitaevskii, *Electrodynamics of Continuous Media*, 2nd edition, Oxford: Butterworth Heinemann,, 1984, pp. 428-432.
33. M. Razavy, *Classical and Quantum Dissipative Systems*, 4th edition, New York: World Scientific, 2002, pp. 544-545.
34. J. Mehra and E.C.G. Sudarshan, *Nuovo Cimento*, **11B**, 215- 256 (1972).
35. A. Bohm, N. L. Harshman and H. Walther, *Phys. Rev. A*, **66**, 012107 1-11 (2002).
36. B. Erman, *Biophys. J.*, **91**, 3589-3599 (2006).
37. S. N. Shore, T. N. LaRosa, R. J. Chastain and L. Magnani, *Astron. Astrophys.*, **457**, 197-206 (2006).
38. N. Rubab and G. Murtaza, *Phys. Scripta*, **74**, 145-148 (2006).
39. K. K. Lehmann, *J. Chem..Phys.*, **126**, 024108 1-4 (2007).
40. J. Y. Jo et al., *Phys. Rev. Lett.*, **99**, 267602 1-4 (2007).
41. B. Basu, *Phys. Plasmas*, **15**, 042108 1-17 (2008).
42. H. Blom and G. Bjork, *Appl. Optics*, **48**, 6050-6058 (2009).
43. L. F. Lafuerza, P. Colet and R. Toral, *Phys. Rev. Lett.*, **105**, 084101 1-4 (2010).
44. R. Paley and N. Wiener, *Fourier transform in complex domain*, Rhode Island: American Mathematical Society, Providence, 1934, Theorem XII, pp. 18
45. F. Reif, *Fundamentals of Statistical and Thermal Physics*, London: McGraw-Hill, 1965, pp. 560-565
46. E. J. Robinson, *Phys. Rev. Lett.*, **52**, 2309-2312 (1984).
47. U. Fano, *Phys. Rev.*, **124**, 1866-1878 (1961).
48. T. G. Douvropoulos, *Int. J. Quantum Chem.*, **107**, 1673-1687 (2007).
49. L. D. Landau and E. M. Lifshitz, *Course of Theoretical Physics: Fluid Mechanics*, 2nd edition, Oxford: Butterworth Heinemann, 1998, pp. 1-2.
50. J.V. Neumann, *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, Princeton New Jersey: Princeton University Press, 1955 pp.366-367.
51. P. Facchi, V. Gorini, G. Marno, S. Pascazio and E.C.G. Sudarshan, *Phys. Lett. A*, **275**, 12-19 (2000)

PART D:
HUMANITIES & POLITICAL SCIENCES

Η Ναυτική Σημασία του Ελληνικού Γεωγραφικού Χώρου και Στόλου για την Ασφάλεια και τη Συνέχεια του Ελληνισμού, 1000 π.Χ.–2011 μ.Χ.

Ζήσης Φωτάκης

Σχολή Ναυτικών Δοκίμων, Τομέας Ανθρωπιστικών και Πολιτικών Επιστημών

Περίληψη. Το άρθρο αυτό πραγματεύεται την εξέλιξη της ναυτικής σημασίας του ελληνικού χώρου και στόλου ανά τους αιώνες και τις επιπτώσεις που αυτή είχε για την ασφάλεια και τη συνέχεια του ελληνισμού. Επισημαίνεται ότι το έντονο γεωγραφικό ανάγλυφο της ελληνικής χερσονήσου, το άγονο του εδάφους της και η πολυνησία που την περιβάλλει εξηγεί τόσο την πρόωμη στροφή του Ελληνισμού προς την θάλασσα όσο και τη δυσκολία αποτελεσματικής εχθρικής εισβολής και επί μακρόν κατοχής ελληνικών εδαφών χωρίς την επικουρία σημαντικών, ναυτικών δυνάμεων. Δίδονται επίσης παραδείγματα αποτελεσματικής ελληνικής ναυτικής ισχύος από την αρχαιότητα έως σήμερα (π.χ. Σαλαμίνα, Βυζάντιο, Επανάσταση 1821, Βαλκανικοί Πόλεμοι), ναυτικής ισχύος που συχνά βοήθησε τους Έλληνες να αποφύγουν την υποδούλωση και την εξαφάνιση. Γίνεται τέλος κατανοητό ότι όποτε οι δρόμοι του διεθνούς εμπορίου (κλασσική και ελληνιστική αρχαιότητα, Βυζάντιο, τέλη 18^{ου} αιώνα μέχρι και σήμερα) ή τα όρια αντίπαλων συνασπισμών περνούσαν από τις ελληνικές θάλασσες (π.χ. Παγκόσμιοι Πόλεμοι, Ψυχρός Πόλεμος) η γεωπολιτική σημασία της Ελληνικής χερσονήσου, κατά κύριο λόγο, αλλά και των πολεμικών της στόλων υπήρξε σημαντική. Το αντίθετο συνέβη όποτε το εμπόριο στράφηκε κυρίως σε χερσαίες οδούς (Ρωμαϊοκρατία) ή σε άλλες θάλασσες (από την εποχή των Ανακαλύψεων που ξεκινά το 1492 έως την κατάληψη της Ινδίας από τους Άγγλους στα τέλη του 18^{ου} αιώνα).

Abstract. This article focuses on the geographic importance of the country from the naval perspective, the capabilities of its navy and the implications they had for the security and continuity of Hellenism. It is shown that the difficult terrain of the Greek peninsula, its barren soil and the polynesia that surrounds it, account for the early orientation of Hellenism to the sea and the difficulty of effective hostile invasion and long occupation of Greek territories without the assistance of major, naval forces. Examples are also given of effective Greek sea power from ancient times to the present (e.g. Salamis, Byzantium, the Greek Revolution of 1821, the Balkan Wars), sea power that often helped the Greeks to avoid enslavement and extinction. It is finally shown that the geopolitical importance of the Greek peninsula and its war-fleets was significant, whenever the roads of international trade (classical and Hellenistic antiquity, Byzantium, late 18th century till today) or the spheres of influence of rival coalitions (e.g. World Wars, the Cold War) went through the Greek seas. The opposite was valid whenever trade routes centered on overland highways (Roman period) or the oceans (from the age of discovery that started in 1492 to the British conquest of India at the end of the 18th century).

Λέξεις κλειδιά. Ελλάδα, Ελληνική πολιτική ασφαλείας, Ελληνική ναυτική ισχύς, δομή δυνάμεως Ελληνικού Πολεμικού Ναυτικού

Δεδομένης της μακρόχρονης ναυτικής ιστορίας του ελληνισμού αλλά και του διαρκούς ενδιαφέροντος της κοινής γνώμης η παρούσα μελέτη καταγράφει συνοπτικά τις γεωπολιτικές πραγματικότητες που αντιμετώπισε ο Ελληνισμός από την αρχαιότητα έως και σήμερα με στόχο να καταδειχθεί η ναυτική σημασία του ελληνικού γεωγραφικού χώρου και στόλου αλλά και η συμβολή τους στην ασφάλεια και στη συνέχεια του Ελληνισμού. Ιδιαίτερη σημασία αποδίδεται στις εξελίξεις των δύο τελευταίων αιώνων, καθώς τόσο η Ελλάδα όσο και η ανθρωπότητα βρέθηκαν μπροστά σε πρωτόγνωρες προκλήσεις.

Η σχέση του Ελληνισμού με τη θάλασσα είναι σχεδόν σύγχρονη με την παρουσία του στη νότια απόληξη της Χερσονήσου του Αίμου. Κι αυτό γιατί η θέση και η μορφολογία του ελληνικού χώρου παρουσιάζουν χαρακτηριστικά που σε μεγάλο βαθμό εξηγούν το σημαντικό ρόλο που διαδραμάτισε και συνεχίζει να διαδραματίζει η θάλασσα στην ιστορία των Ελλήνων. Οι καθαροί ουρανοί της Μεσογείου, τα λίγα ισχυρά της ρεύματα και οι μέτριοι σχετικά άνεμοί της προσφέρονται για την ανάπτυξη της ναυτιλίας ακόμη και πρωτόγονων ιστιοφόρων ή κωπήλατων πλοιαρίων όπως αυτά της αρχαιότητας αλλά και των μεσαιωνικών χρόνων. Συνάμα το πολυσχιδές των ελληνικών παραλίων, ο μεγάλος αριθμός των φυσικών λιμένων και η πολυνησία του ελληνικού χώρου προς την κατεύθυνση της Ασίας, της Δυτικής Ευρώπης και της Αφρικής ανέδειξαν από νωρίς τον ελληνικό γεωγραφικό χώρο σε κόμβο θαλάσσιων επικοινωνιών. Το άγονο τέλος και το ορεινό του ελληνικού εδάφους αλλά και ο κατακερματισμός του σε μικρές κοιλάδες δύσκολα προσβάσιμες από ξηράς αλλά με μέτωπο στη θάλασσα ενθάρρυναν τις μεταναστευτικές τάσεις των ελλήνων και συνέτειναν στην ανάδειξη της Ελλάδας σε διεθνές ναυτιλιακό κέντρο.

Τα γεωγραφικά αυτά χαρακτηριστικά συνέβαλλαν επίσης στην ασφάλεια και στη συνέχεια του Ελληνισμού. Κι αυτό γιατί σε αντίθεση με την Ιβηρική και την Ιταλική χερσόνησο που χωρίζονται αποτελεσματικά από την υπόλοιπη Ευρώπη μέσω των Πυρηναίων και των Άλπεων, η Βαλκανική χερσόνησος είναι εύκολα προσβάσιμη από ξηράς μέσω του Δούναβη. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τη στρατηγική της θέση μεταξύ τριών ηπείρων ενθάρρυνε και διευκόλυνε πλήθος επιδρομών στη Βαλκανική με αποτέλεσμα η πλειοψηφία των αρχαίων λαών της να υποκύψουν και να αφανιστούν [1]. Το ότι η μοίρα των Ελλήνων υπήρξε διαφορετική οφείλεται μάλλον στο γεγονός ότι το έντονο γεωγραφικό ανάγλυφο αλλά και το άγονο έδαφος της Ελλάδας καθιστούσε μέχρι πρόσφατα προβληματική την αποτελεσματική εισβολή και επί μακρόν κατοχή του ελληνικού χώρου, αν οι εισβολείς του δε συνεπικουρούνταν από ναυτικές δυνάμεις. Με τη συχνή όμως ανάπτυξη από τους Έλληνες αποτελεσματικής ναυτικής ισχύος, δηλαδή ισχύος που στόχευε στην προσαρμογή των ελληνικών ναυτικών δυνάμεων στις ιδιαιτερότητες των εκάστοτε αναμετρήσεων και θεάτρων επιχειρήσεων και όχι στην άκριτη και υπέρμετρη ισχυροποίηση τους, κατορθώθηκε η αποσόβηση πολλών κινδύνων και επιτεύχθηκε η επιβίωση και η πρόοδος του ελληνικού έθνους.

Ιδιαίτερης σημασίας, κατά την αρχαιότητα, υπήρξε το οξυδερκές ναυτικό πρόγραμμα του Θεμιστοκλή, που προβλέποντας την περσική προσπάθεια για «εκδίκηση» της ήττας στο Μαραθώνα (490 π. Χ.) ετοίμασε τον απαραίτητο στόλο τριηρών που απείλησε να διακόψει τη θαλάσσια οδό των Περσών με τις πηγές ανεφοδιασμού τους στην Ασία και αποσόβησε έτσι την Περσική κατάκτηση της Ελλάδας. Και δεν ήταν μόνο η στρατηγική σκέψη του Θεμιστοκλή που πρέπει να επισημανθεί αλλά και η επιτυχημένη τακτική αξιοποίηση του ελληνικού στόλου στον ιδεώδη χώρο των στενών της Σαλαμίνας. Είναι ακόμα και η ικανοποιητική απόδοση των πληρωμάτων του Αθηναϊκού στόλου που απαρτιζόταν από ελεύθερους πολίτες, οι οποίοι ήταν καλά προετοιμασμένοι για την προάσπιση της ιδιαίτερης πατρίδας τους, της Αθήνας, αλλά και των άλλων, ελληνικών πόλεων. Χρήζει δε επισημάνσης ότι όταν οι Αθηναίοι ναυμαχούσαν στη Σαλαμίνα το 480 π.Χ. η Αθήνα είχε ήδη αλωθεί από τους Πέρσες. Κι όμως τα Αθηναϊκά πληρώματα συνέχισαν τον αγώνα, όπως οι απόγονοί τους στη Μέση Ανατολή κατά το Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο [2].

Η πολιτική ασφαλείας του Θεμιστοκλή συνεχίστηκε από τον Κίμωνα και τον Περικλή και έγκειτο στην περαιτέρω ανάπτυξη του Αθηναϊκού στόλου αλλά και στην ολοκλήρωση των

Μακρών Τειχών που κατέστησαν την Αθήνα απρόσβλητη από ξηράς, πραγματικό νησί με χερσαία σύνορα [3]. Αξιοποιώντας τη στρατηγική ιδιαιτερότητα της θέσης τους οι Αθηναίοι, τουλάχιστον για όσο διάστημα κυβερνούσαν από τον Κίμωνα, τον Περικλή και τους συνεχιστές της πολιτικής τους, δημιούργησαν μια εκτεταμένη θαλασσοκρατορία αποφεύγοντας τις κατά ξηρά αναμετρήσεις με εχθρούς αριθμητικά και τακτικά ισχυρότερους. Αντίθετα, παρενοχλούσαν το εμπόριο του αντιπάλου και με αμφίβιες επιχειρήσεις απείλησαν άμεσα τη συνοχή της Πελοποννησιακής συμμαχίας και την εδαφική ακεραιότητα αυτής της ίδιας της Σπάρτης κατά τη διάρκεια του Πελοποννησιακού Πολέμου [4]. Εφάρμοσαν δηλαδή οι Αθηναίοι της εποχής του Περικλή την ίδια περίπου στρατηγική με την οποία η Αγγλία θα καταστεί κυρίαρχος των θαλασσών και κοσμοκράτειρα για ένα μεγάλο και σημαντικό διάστημα της παγκόσμιας ιστορίας [5].

Κατά τους Ελληνιστικούς χρόνους η σημασία της ναυτικής ισχύος συνέχισε να εκτιμάται από τους Έλληνες και να αποδίδει. Ο πλους του Νεάρχου κατά τη διάρκεια της εκστρατείας του Μεγάλου Αλεξάνδρου στην Ασία και η προτεραιότητα που ο Αλέξανδρος απέδωσε στην καταστροφή των ναυτικών βάσεων του εχθρού είναι ενδεικτικές της προσέγγισης αυτής [6]. Συνάμα, η σημαντική συμβολή των στόλων της Μασσαλίας και των ελληνικών πόλεων της Κάτω Ιταλίας στην επικράτηση της Ρώμης έναντι της Καρχηδόνας κατέστησε σαφές το ιδιαίτερο βάρος της ελληνικής, ναυτικής ισχύος, καθώς έγινε αρωγός στη θεμελίωση της λαμπρότερης ίσως αυτοκρατορίας που γνώρισε ποτέ ο κόσμος, της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας [7].

Η Αυτοκρατορία πάντως αυτή έμελλε να οδηγήσει τον ελληνικό χώρο και την ελληνική ναυτιλία σε παρακμή, αφού η κατασκευή της Εγνατίας και άλλων αυτοκρατορικών οδών στην Εγγύς και στη Μέση Ανατολή παρέκαμψαν, εν πολλοίς, την Ελλάδα και οδήγησαν σταδιακά σε σημαντική μείωση της οικονομικής και της γεωπολιτικής της σημασίας [8]. Συνέβη δηλαδή, τηρουμένων των αναλογιών, ότι θα συμβεί μεταξύ της ανακάλυψης της Αμερικής (1492) και της Αγγλικής επέκτασης προς τις Ινδίες (1763), οπότε η ανακάλυψη νέων ηπείρων και η παράκαμψη της απειλητικής Οθωμανικής Ανατολής στην επικοινωνία της Ευρώπης με τις Ινδίες και την Άπω Ανατολή είχαν αρνητικό αντίκτυπο στη ναυτική σημασία του γεωγραφικού χώρου της Ελλάδας και του ναυτικού της κόσμου [9].

Η δυσμενής αυτή συγκυρία διήρκεσε καθ' όλη την ύστερη αρχαιότητα αλλά η μεταφορά της πρωτεύουσας του Ρωμαϊκού κράτους από τη Ρώμη στην Κωνσταντινούπολη και η σταδιακή μετατόπιση του κέντρου βάρους της Ανατολικής Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας στο χώρο του Αιγαίου και της Ανατολικής Μεσογείου, απόρροια της σταδιακής απώλειας αυτοκρατορικών εδαφών σε νέους εισβολείς, [10] επανέφεραν στο προσκήνιο τη σημασία, αλλά και την επικαιρότητα της ανάπτυξης αποτελεσματικής ναυτικής ισχύος από τους Βυζαντινούς. Τα πρώτα βήματα προς την κατεύθυνση αυτή έγιναν με την ίδρυση και ανάπτυξη ναυστάθμων και ναυτικών ορμητηρίων σε στρατηγικά σημεία των εκτεταμένων παραλίων της αυτοκρατορίας στις αρχές του όγδοου αιώνα μ.Χ. Ακολούθησε η συγκρότηση αξιόμαχου πολεμικού στόλου, η ανάπτυξη νέων όπλων ναυτικού πολέμου όπως ο δρόμωνας και το υγρόν πυρ και η εφαρμογή αυστηρής ναυτιλιακής νομοθεσίας που, μεταξύ άλλων, υποχρέωνε τους Σύρους και Αιγυπτίους να μεταφορτώνουν τα εμπορεύματά τους στην Κωνσταντινούπολη πριν συνεχίσουν για τους ευρωπαϊκούς λιμένες προορισμού τους. Κάνοντας χρήση αυτής της νομοθεσίας που αποτέλεσε πρόδρομο των αντίστοιχων Αγγλικών νομοθετημάτων του 17^{ου} αιώνα, αλλά και αξιοποιώντας τη σαφή υπεροχή της σε πρώτες ύλες υψίστης ναυτικής σημασίας όπως ο σίδηρος και η ξυλεία η Βυζαντινή αυτοκρατορία γνώρισε ένα όμορφο μεσουράνημα για δύο περίπου αιώνες. Η στρατηγικά όμως σκόπιμη ναυτιλιακή πολιτική του Βυζαντίου δεν είχε τη σταθερότητα της μεταγενέστερης Αγγλικής με αποτέλεσμα η ναυτοσύνη του σταδιακά να μειωθεί, το εμπόριό του να περιέλθει στα χέρια των Ιταλικών πόλεων και η συνακόλουθη στροφή των Βυζαντινών στην αγροτική οικονομία να συνοδευτεί με συγκέντρωση της γης στα χέρια των ολίγων, κοινωνική αναταραχή και κεκαλυμμένο εμφύλιο πόλεμο μεταξύ των δυνάμεων του κράτους και των Βυζαντινών γαιοκτημόνων. Οι εξελίξεις αυτές όπως ήταν φυσικό εξασθένησαν σημαντικά την αυτοκρατορία [11]. Η εμφάνιση τέλος και ανάπτυξη του βαρέος πυροβολικού στα τέλη περίπου

των μεσαιωνικών χρόνων έριξε, μεταξύ άλλων, και τις ισχυρότατες οχυρώσεις της Κωνσταντινούπολης (1453), [12] θέτοντας έτσι τον Ελληνισμό υπό την Οθωμανική κυριαρχία για τέσσερις περίπου αιώνες.

Το πρωινό της 25^{ης} Μαρτίου 1821 ξεκίνησε ο αγώνας της ανεξαρτησίας του νεότερου Ελληνισμού [13]. Ένας αγώνας που κάθε άλλο παρά εύκολος προοιωνιζόταν. Στα τετρακόσια περίπου χρόνια της Τουρκοκρατίας πολλά επαναστατικά κινήματα έλαβαν χώρα στον Ελληνικό κόσμο αρκετά δε από αυτά έτυχαν και περιορισμένης υποστήριξης από χριστιανικές δυνάμεις της Ευρώπης. Παρ' όλη όμως αυτή την υποστήριξη, αλλά και τη γενναιότητα που επέδειξαν αρκετοί από τους υπόδουλους Έλληνες τα αποτελέσματα υπήρξαν ατυχή [14]. Στα 1821 οι διεθνείς συνθήκες δεν ήταν ενθαρρυντικές για τις ελληνικές διεκδικήσεις. Το «Συνέδριο της Ευρώπης», το Διευθυντήριο αυτό των Δυνάμεων του status quo στο οποίο συμμετείχαν η Αγγλία, η Γαλλία, η Αυστρία, η Πρωσία και η Ρωσία, αντιστεκόταν σθεναρά σε κάθε απελευθερωτικό κίνημα. Παρ' όλα αυτά όμως, παρ' όλες τις έριδες και τους εμφυλίους που ανέκυψαν μεταξύ των επαναστατημένων Ελλήνων η Επανάσταση άντεξε, κράτησε έξι ολόκληρα χρόνια και στο τέλος ανάγκασε τις Μεγάλες Δυνάμεις να επέμβουν για να σταματήσουν τη μακρά αυτή αιματοχυσία, με την καταστροφή του Τουρκοαιγυπτιακού στόλου στη ναυμαχία του Ναυαρίνου στις 20 Οκτωβρίου του 1827 και, κυρίως, με την ήττα του Οθωμανικού στρατού κατά το Ρωσο-τουρκικό πόλεμο του 1828-1829.

Δεν ήταν μικρό αυτό το κατόρθωμα. Αντιθέτως, από το 1800 και μετά πολλά εθνικοαπελευθερωτικά κινήματα έλαβαν χώρα στη Ευρώπη κανένα όμως δεν κράτησε και δεν απασχόλησε τόσο τις Μεγάλες Δυνάμεις όσο η Ελληνική Επανάσταση του 1821 [15]. Η μεγάλη αυτή ελληνική επιτυχία οφείλεται σε σημαντικό βαθμό στη γενναιότητα και την αυτοθυσία των ελλήνων επαναστατών. Αλλά αν και η γενναιότητα συνήθως δεν έλειψε από τους Έλληνες, εν τούτοις, αυτή καθ' αυτή δεν μπόρεσε να επιτύχει την απελευθέρωση τους σε παλαιότερους αγώνες κατά τη διάρκεια της Τουρκοκρατίας. Αν απέκτησαν οι Έλληνες την Ανεξαρτησία τους οφείλονταν κατά κύριο λόγο στο γεγονός ότι διέθεταν, για πρώτη φορά στους Νεότερους Χρόνους, έναν ευάριθμο εμπορικό στόλο που μετατράπηκε σε πολεμικό για τις ανάγκες της Επανάστασης. Δεδομένου ότι η από θαλάσσης επικοινωνία ήταν η μόνη αποτελεσματική πηγή ανεφοδιασμού για εισβολείς στη Νότια Ελλάδα κατά τους προβιομηχανικούς χρόνους, το ελληνικό ναυτικό προσέφερε μεγάλες υπηρεσίες στον Αγώνα με το να παρενοχλεί συστηματικά και να διακόπτει αποτελεσματικά τις τουρκικές επικοινωνίες υπό την εμπνευσμένη ηγεσία του Ανδρέα Μιαούλη και την αναντικατάστατη συμβολή του Κανάρη, του Σαχτούρη και πλειάδας άλλων ναυμάχων. Όπως άλλωστε απέδειξε η αδυναμία του ελληνικού ναυτικού να αποσοβήσει και να εξαρθρώσει το προγεφύρωμα που εγκατέστησε ο Ιμπραήμ στην Πελοπόννησο στις αρχές του 1825, χωρίς τη δράση του ελληνικού ναυτικού η επαναστατημένη Ελλάδα θα είχε από νωρίς κατακλυσθεί από Τουρκο-αιγυπτιακά στρατεύματα και η Επανάσταση θα είχε μάλλον την τύχη των ελληνικών επαναστατικών κινήματων που προηγήθηκαν αυτής [16].

Το τέλος όμως της Επανάστασης δεν έφερε την εκπλήρωση των εθνικών στόχων. Μπορεί η Πελοπόννησος, η Στερεά Ελλάδα και οι Κυκλάδες να απελευθερώθηκαν τα δύο τρίτα όμως του Ελληνισμού παρέμεναν υπό Οθωμανική κυριαρχία. Φυσικό ήταν το νεοσύστατο Ελληνικό κράτος να ενδιαφερθεί από νωρίς για την τύχη αυτών των πληθυσμών. Τα πρώτα πενήντα χρόνια όμως μετά την απελευθέρωση η ελληνική, αλυτρωτική πολιτική συνάντησε μεγάλη αντίδραση από τη θαλασσοκράτειρα Αγγλία που υποστήριζε τη διατήρηση της εδαφικής ακεραιότητας της Τουρκίας. Κι αυτό γιατί οι Άγγλοι θεωρούσαν την Οθωμανική Αυτοκρατορία ως ασφαλιστική δικλείδα που θα συνέβαλλε στην αποτροπή της καθόδου της Ρωσίας στη Μεσόγειο. Μια κάθοδος, που αν τότε συνέβαινε, απειλούσε να διακόψει τη γραμμή επικοινωνιών της Αγγλίας με την αυτοκρατορία της στις Ινδίες [17].

Μετά τη δολοφονία του Καποδίστρια (1831) και την εκλογή του Όθωνα στον ελληνικό θρόνο (1832) ο νέος βασιλιάς, ωθούμενος και από τις κρίσεις του Ανατολικού Ζητήματος του 1833 και του 1839-1841, υιοθέτησε πολιτική ναυτικής μεγέθυνσης με την κατασκευή δώδεκα κανονιοφόρων και μιας κορβέτας στον Πόρο. Η δεκαετία του 1840 όμως σηματοδότησε την

αναστολή της ελληνικής, ναυτικής μεγέθυνσης μετά και την εμφαντική εμμονή της πλειοψηφίας των Μεγάλων Δυνάμεων στην ακεραιότητα της Οθωμανικής Αυτοκρατορίας κατά τις πρόσφατες κρίσεις του Ανατολικού Ζητήματος [18]. Την επαύριο του Κριμαϊκού Πολέμου και σε μια προσπάθεια να αναπληρωθούν οι απώλειες που προκάλεσε στο ελληνικό ναυτικό η ρωσόφιλη στάση της Ελληνικής κυβέρνησης κατά τη διάρκεια του πολέμου αυτού, αγοράστηκαν έξι ατμοημιολίες, που ήταν και τα πρώτα σιδερένια ελικοκίνητα πλοία που εντάχθηκαν στον ελληνικό στόλο [19]. Μετά την ανάρρηση του Γεωργίου Α στο θρόνο της Ελλάδας το 1862 και μέχρι και τον Ρωσο-Τουρκικό Πόλεμο του 1877-1878 το Ελληνικό Ναυτικό απέκτησε μερικά ακόμα πλοία με κυριότερα τα *Βασιλεύς Γεώργιος*, *Βασίλισσα Όλγα*, *Μπουμπουλίνα* και έξι τορπιλοβόλα [20]. Γεγονός πάντως είναι ότι η Ελληνική Πολιτεία δεν ανέπτυξε ισχυρό πολεμικό ναυτικό την πρώτη πενήνταετία του ανεξάρτητου βίου της, προσαρμόζοντας την πολιτική της στην αντίξοχη διεθνή συγκυρία.

Το δυσμενές διεθνές πλαίσιο της πρώτης πενήνταετίας της ελληνικής ανεξαρτησίας ανατράπηκε με το Ρωσο-Τουρκικό Πόλεμο του 1877-1878, την απομάκρυνση των Δυτικών Μεγάλων Δυνάμεων από το δόγμα του σεβασμού της εδαφικής ακεραιότητας της Οθωμανικής Αυτοκρατορίας και την παρεπόμενη ανεξαρτητοποίηση και άλλων, πέραν της Ελλάδας, Βαλκανικών κρατών. Έχοντας υπόψη το αξιόμαχο των στρατευμάτων των νεοσύστατων Βαλκανικών χωρών και τα ασθενή στρατηγικώς νέα σύνορα της Τουρκίας στα Βαλκάνια [21] οι κυβερνήσεις Τρικούπη συνέλαβαν ένα απλό όσο και εύστοχο σχέδιο που ενέπνευσε την ελληνική στρατηγική μέχρι τους Βαλκανικούς Πολέμους. Το σχέδιο αυτό, σε γενικές γραμμές, προέβλεπε την ανάπτυξη ικανού πολεμικού στόλου που θα διέκοπτε τις Τουρκικές, θαλάσσιες επικοινωνίες ενώ ταυτόχρονα θα κάλυπτε και θα επιτάχυνε την ολοκλήρωση της ελληνικής επιστράτευσης. Με την επίτευξη των δύο αυτών στόχων η κυβέρνηση Τρικούπη ανέμενε ότι σε ενδεχόμενο ελληνο-τουρκικό πόλεμο ο αρχικά υπέρτερος αριθμητικά ελληνικός στρατός θα προήλαυνε στην Ήπειρο και τη Μακεδονία κι ότι θα μπορούσε να αντισταθεί αποτελεσματικά στις τουρκικές αντεπιθέσεις για σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα. Αν αυτό συνέβαινε η πιθανότητα Σερβο-Βουλγαρικής επέμβασης θα καθίστατο πιθανότατα και η προοπτική ήττας της Τουρκίας βεβαία [22]. Για την εφαρμογή του ναυτικού σκέλους αυτής της στρατηγικής ο ελληνικός ναύσταθμος μεταφέρθηκε από τον Πόρο στη Σαλαμίνα το 1878 [23] και μετακλήθηκε στην Ελλάδα Γαλλική Ναυτική Αποστολή (1884-1890) το αναμορφωτικό έργο της οποίας υπήρξε γενικής αποδοχής. Επιπλέον, ο ελληνικός στόλος ενισχύθηκε με πληθώρα ελαφρών μονάδων αρχικά, καθώς ελήφθη υπόψη η αυξανόμενη αποτελεσματικότητα της τορπίλης, η στασιμότητα των πυροβολικών τεχνικών και η προτίμηση του Βασιλέως Γεωργίου προς τις ελαφρές μονάδες. Οι ελαφρές μονάδες που αγοράστηκαν τότε ήταν το τορπιλοβόλο *Κανάρης*, το περίφημο καταδρομικό *Μιαούλης*, οι ατμοβαρίδες *Αμβρακία* και *Ακτιον*, τρεις τορπιλοθετίδες, δεκαεπτά ακόμα τορπιλοβόλα, έξι κανονιοφόροι, τέσσερις ατμομυοδρόμονες, τρεις ατμοημιολίες και ένα υποβρύχιο. Από τα μέσα όμως της δεκαετίας του 1880 και μετά η ανάπτυξη ταχύτερων τεχνικών πυροβολικής, η εισαγωγή των ταχυβόλων μετρίου διαμετρήματος και των αντιτορπιλικών έδωσαν νέα ζωή στο θωρηκτό οπότε και προκρίθηκε η προμήθεια θωρηκτών μονάδων και συγκεκριμένα τριών θωρηκτών τρίτης τάξης, των *Ύδρα*, *Σπέτσες* και *Ψαρά* [24].

Ο ατυχής Ελληνο-τουρκικός Πόλεμος του 1897 και η μη αξιοποίηση, για πολιτικούς λόγους, της δυνατότητας του ελληνικού στόλου να παρενοχλήσει την επιστράτευση του τουρκικού στρατού κατά τον πόλεμο αυτό μείωσαν την αξία του πολεμικού ναυτικού στα μάτια πολλών Ελλήνων της εποχής. Τη δωδεκαετία που ακολούθησε εντάθηκε η πόλωση στον κόσμο και στην Εγγύς Ανατολή, το Τουρκικό Ναυτικό επεκτάθηκε σημαντικά, ενώ το Ελληνικό Ναυτικό αποτέλεσε για καιρό «σημείο αντιλεγόμενο» στον ελληνικό τύπο και στα ποικίλα fora της εποχής. Οι Έλληνες, λόγω της ασθενούς διπλωματικής και οικονομικής τους θέσης μετά την πτώχευση του 1893, προβληματίζονταν τόσο μεταξύ της προτεραιότητας ανάπτυξης του στρατού ή του στόλου όσο και μεταξύ της υιοθέτησης ναυτικού συγκροτημένου από ελαφρές μονάδες ή άλλου βασιζόμενου σε μοίρα θωρηκτών. Η Διεθνής εμπειρία (μυστικοί πρόοδοι των ύφαλων όπλων στην Αγγλία και στη Γαλλία), η γεωστρατηγική ιδιαιτερότητα της ελληνικής

περίπτωσης (βάση της ελληνικής επιστράτευσης ήταν η θαλάσσια οδός, η παραμυθία αλλά και η σωτηρία των υπόδουλων ομογενών ήταν εφικτή μόνο μέσω της ναυτικής ισχύος), το ιστορικό προηγούμενο της επιτυχούς χρήσης παρωχημένων ναυτικών όπλων (πυρπολικών) κατά τον Αγώνα της Ελληνικής Ανεξαρτησίας αλλά και οι μέτριες επιδόσεις των Τούρκων σε τορπιλικές επιχειρήσεις την προηγούμενη εικοσιπενταετία (1877-1910) συνέκλιναν στο συμπέρασμα ότι το θωρηκτό διατηρούσε την αξιοπιστία του στις ελληνικές θάλασσες παρά την αδιαμφισβήτητη τεχνική και τακτική πρόοδο που είχε συντελεσθεί στη χρήση της τορπίλης. Επιστέγασμα των διεργασιών αυτών υπήρξε η ίδρυση του Ταμείου Εθνικού Στόλου το 1900, του Λαχείου Εθνικού Στόλου το 1904, του Γ.Ε.Ν. το 1907 και η ενίσχυση του ελληνικού στόλου με οκτώ αντιτορπιλικά [25].

Το Κίνημα στο Γουδί τον Αύγουστο του 1909 σηματοδότησε την ολοκλήρωση της προετοιμασίας του ελληνικού, πολεμικού ναυτικού στις αρχές του 20^{ου} αιώνα και την τριετία που ακολούθησε αγοράστηκαν το θωρακισμένο καταδρομικό *Γεώργιος Αβέρωφ* και ικανός αριθμός ελαφρών μονάδων (έξι αντιτορπιλικά, δύο υποβρύχια και μερικά υδροπλάνα). Η δομή δυνάμεις του ελληνικού ναυτικού που διαμορφώθηκε αντανάκλασε την πείρα της προηγηθείσας δωδεκαετίας και την τάση του τότε πρωθυπουργού της χώρας Ελευθέριου Βενιζέλου και του Αρχηγού της προσκληθείσας Αγγλικής Ναυτικής Αποστολής στην Ελλάδα αντιναυάρχου Τώφνελ, για εξοικονόμηση πόρων και για ένταξη στον ελληνικό στόλο ελαφρών, κυρίως, μονάδων [26].

Η επιμήκυνση του Ιταλο-Τουρκικού Πολέμου του 1911 -λόγω της δράσης του ιταλικού ναυτικού και της σθεναρής αντίστασης των οθωμανικών δυνάμεων στο χερσαίο μέτωπο επιχειρήσεων στη Λιβύη- και ο εξ' αυτής, κυρίως, προκληθείς Πρώτος Βαλκανικός Πόλεμος του 1912-1913 επιβεβαίωσαν την ορθότητα του στρατηγικού σχεδίου της κυβέρνησης Τρικούπη. Κατέδειξαν, επίσης, με τον πλέον σαφή τρόπο τη σημασία της διακοπής των θαλασσιών επικοινωνιών των Τούρκων από τον Ιταλικό και κατόπιν τον Ελληνικό στόλο για την ευτυχή έκβαση των πολεμικών επιχειρήσεων για τα ελληνικά όπλα [27]. Με όση επιτυχία όμως και αν πολέμησε το ελληνικό ναυτικό υπό την εμπνευσμένη ηγεσία του Παύλου Κουντουριώτη κατά τους Βαλκανικούς Πολέμους, όση διπλωματική ευστροφία και αν επέδειξε ο τότε κυβερνήτης της χώρας Ελευθέριος Βενιζέλος τα εδαφικά κέρδη του πολέμου ίσως να μην κατακυρώνονταν στην Ελλάδα αν τόσο η Αγγλία όσο και η Γερμανία δεν επιθυμούσαν τη χρήση του γεωγραφικού χώρου της Ελλάδας για την εξασφάλιση της κυριαρχίας της κεντρικής και της ανατολικής Μεσογείου. Σε μια εποχή που ο ναυτικός ανταγωνισμός μεταξύ Αγγλίας και Γερμανίας είχε κορυφωθεί, σε μια περίοδο που η κυριαρχία της Μεσογείου από τον Αγγλο-γαλλικό στόλο απειλούνταν από τους συμμαχικούς στη Γερμανία στόλους της Ιταλίας και της Αυστρίας η χρήση των ελληνικών λιμένων σε καιρό πολέμου, ιδιαίτερα αυτών των Ιονίων Νήσων, ήταν εύλογα επιθυμητή και από τους δύο συνασπισμούς [28]. Ως αποτέλεσμα η πλειοψηφία των Μεγάλων Δυνάμεων τήρησε θετική στάση έναντι των περισσότερων ελληνικών διεκδικήσεων και έτσι η Ελλάδα διπλασιάστηκε στα 1913 και ένα σημαντικό βήμα προς την πραγμάτωση της Μεγάλης Ιδέας συντελέστηκε [29].

Την επαύριο των Βαλκανικών Πολέμων ο Τουρκικός αναθεωρητισμός επέβαλε στην Ελλάδα την αγορά δύο Αμερικάνικων προντρέντων, του *Κιλκίς* και της *Λήμνου*, ενός ευδρόμου καταδρομικού, της *Έλλης*, και την παραγγελία δύο ντρέντων και πολλών άλλων μονάδων που τελικά δεν παραδόθηκαν στον ελληνικό στόλο, λόγω της έκρηξης του Πρώτου Παγκοσμίου Πολέμου και της επιθυμίας των Ελλήνων ιθυνόντων να αξιοποιήσουν την εμπειρία του πολέμου πριν αγοράσουν νέο ναυτικό [30]. Παρά όμως τον Εθνικό Διχασμό που ακολούθησε και την κατάληψη του ελληνικού ναυστάθμου και στόλου από τους Γάλλους στα 1916-1917, ο στόχος της απελευθέρωσης του συνόλου των Ελλήνων πλησίασε στην επίτευξή του [31]. Η σημαντική ωφέλεια των Συμμάχων από τη χρήση των ελληνικών λιμένων κατά τον Πρώτο Παγκόσμιο Πόλεμο και η πανθομολογούμενη άριστη επίδοση του ελληνικού στόλου στη συνοδεία νηοπομπών, [32] προϊόν, ως ένα βαθμό, της οργανωτικής και εκπαιδευτικής δραστηριότητας διαδοχικών Αγγλικών ναυτικών αποστολών στο Ελληνικό Ναυτικό, συνέβαλε στην απόδοση της

Θράκης και της Ιωνίας στην Ελλάδα με τη Συνθήκη των Σεβρών. Κι αν εν τέλει λόγοι πολιτικοί και ισορροπίας δυνάμεων ακύρωσαν την εθνική αυτή επιτυχία [33] το Ελληνικό Πολεμικό Ναυτικό πολλά προσέφερε κατά τη διάρκεια της Μικρασιατικής εκστρατείας με το να ανεφοδιάζει τον ελληνικό στρατό και να αστυνομεύει τα τουρκικά παράλια. Ακόμα δε μεγαλύτερα κακά αποσόβησε την ώρα της Μικρασιατικής Καταστροφής [34].

Το πέρας της Μικρασιατικής Εκστρατείας βρήκε την Ελλάδα εξασθενημένη και αναγκασμένη να δώσει προτεραιότητα στην εσωτερική ανασύνταξη και στην αποκατάσταση των προσφύγων. Η όξυνση των ελληνοτουρκικών διαφορών, όμως, σχετικά με την εφαρμογή της Συνθήκης της Λωζάνης (1923) εμπόδιζε την εσωτερική ανασύνταξη και επέβαλε στην Ελλάδα αυξημένους ναυτικούς εξοπλισμούς. Δεδομένης της αδιαφορίας με την οποία αντιμετώπιζαν τα προβλήματα της χώρας μας η Αγγλία και η Γαλλία, λόγω της σχετικής ισχυροποίησής τους στη Μεσόγειο μετά τον Πρώτο Παγκόσμιο Πόλεμο, οι κυβερνήσεις Μιχαλακόπουλου και Βενιζέλου προσέγγισαν την Ιταλία του Μουσολίνι (1928-1932) που ενδιαφερόταν να αναβαθμίσει τη θέση της στην Ανατολική Μεσόγειο εκείνη την εποχή. Η προσέγγιση αυτή έβγαλε τη χώρα από τη διεθνή απομόνωση και τη μονομερή εξάρτησή της από τους Αγγλογάλλους, συνετέλεσε στην επίλυση πολλών προβλημάτων της με την Ιταλία, τη Γιουγκοσλαβία και την Τουρκία και απομάκρυνε τον κίνδυνο ελληνικής εμπλοκής σε πιθανή παγκόσμια σύρραξη.

Πριν όμως επέλθει η εξομάλυνση των ελληνοτουρκικών σχέσεων με την υπογραφή σχετικού διμερούς Ναυτικού Πρωτοκόλλου και Συμφώνου Φιλίας, Ουδετερότητας και Διαιτησίας το 1930 καταβλήθηκε φιλότιμη προσπάθεια για την ανάπτυξη του Ελληνικού Ναυτικού [35]. Η ναυτική εκπαίδευση βελτιώθηκε σημαντικά με την αναδιοργάνωση των τεσσάρων Σχολών ειδικοτήτων του Πολεμικού Ναυτικού, ενώ προσπάθεια έγινε και για τον εκσυγχρονισμό και την επέκταση αρκετών εγκαταστάσεών του. Στο ζήτημα της δομής δυνάμεως συνεχίστηκε η διαμάχη μεταξύ των οπαδών του θωρηκτού και των οπαδών των ελαφρών μονάδων. Τελικά επικράτησε η ναυτική πολιτική Βενιζέλου, που, ακολουθώντας σχετικές συμβουλές Άγγλων και Ελλήνων τεχνοκρατών, ήταν προσανατολισμένη στις ελαφρές μονάδες και τη ναυτική αεροπορία παρά την απειλή που αποτελούσε για την ελληνική κυριαρχία στο Αιγαίο το επιτυχώς μετασκευασμένο Τουρκικό θωρηκτό καταδρομικό *Γιαβούζ*, το πρώην Γερμανικό *Γκαίμπεν*. Στην επταετία που ακολούθησε την υπογραφή της Συνθήκης της Λωζάνης ο ελληνικός στόλος ενισχύθηκε με έξι υποβρύχια, δύο торπιλακάτους, δύο ναρκοθέτιδες, ένα εκπαιδευτικό πλοίο κι ένα πλοίο συνεργείο. Επιπλέον, τα αντιτορπιλικά *Αετός*, *Ιέραξ*, *Πάνθηρ* και *Λέων* στάλθηκαν στην Αγγλία για να εκσυγχρονιστούν ενώ τα *Αβέρωφ* και *Ελλη* στάλθηκαν για τον ίδιο λόγο στη Γαλλία [36].

Την τελευταία προπολεμική δεκαετία η πόλωση στην Ευρώπη και στον κόσμο κορυφώθηκε. Η Παγκόσμια Οικονομική Ύφεση του 1929 οδήγησε στην άνοδο ολοκληρωτικών καθεστώτων στη Γερμανία και αλλού. Τα καθεστώτα αυτά, παίρνοντας αφορμή από την οικονομική κρίση και τη θεαματική αύξηση του προστατευτισμού, επιχειρηματολόγησαν υπέρ της κατάκτησης «ζωτικών χώρων» για τους λαούς των οποίων ηγούνταν. Η κατάκτηση της Μαντσουρίας από την Ιαπωνία το 1931 ενθάρρυνε τον Χίτλερ να αποδεσμεύσει τη Γερμανία από τους περιορισμούς των Συνθηκών της Ειρήνης (1933-35), να ανακαταλάβει τη Ρηνανία (1936), να προσαρτήσει την Αυστρία (1938) και στη συνέχεια να προχωρήσει στην κατάληψη της Τσεχοσλοβακίας (1938), της Πολωνίας (1939), της Γαλλίας (1940) κ.λ.π. Αντίστοιχη πορεία διέγραψε και το καθεστώς Μουσολίνι με την κατάκτηση της Αιθιοπίας (1936) και της Αλβανίας (1939), πορεία που το έφερε σε συμμαχία με τη Γερμανία και την Ιαπωνία. Συνάμα, η εδαφική επέκταση της Βρετανικής αυτοκρατορίας στην Ανατολική Μεσόγειο, η σχετική της οικονομική και ναυτική παρακμή, αλλά και η Ιαπωνική απειλή κατά των Βρετανικών Ινδιών και των Αντιπόδων προσέδωσαν στα μάτια των Άγγλων ιθυόντων ιδιαίτερη βαρύτητα στον κίνδυνο που αντιπροσώπευαν για τα Βρετανικά συμφέροντα οι ισχυρές, Ιταλικές, αεροναυτικές δυνάμεις [37].

Μέσα στο αρνητικό αυτό πλαίσιο το Ελληνικό Πολεμικό Ναυτικό είχε να αντιμετωπίσει και την παγκόσμια οικονομική κρίση το χτύπημα της οποίας υπήρξε ιδιαίτερα βαρύ, καθώς το υπερχρεωμένο Ελληνικό Κράτος πτώχευσε το 1932 [38] και η εφαρμογή του ναυτικού προγράμματος του 1931, όπως αυτό τροποποιήθηκε το 1934, παρέμεινε, υποχρεωτικά,

ημιτελής. Μόνο έξι αντιτορπιλικά, τέσσερα ναρκαλιευτικά και ένα πετρελαιοφόρο αποκτήθηκαν από το Ελληνικό Ναυτικό την τελευταία προπολεμική δεκαετία, μια υστέρηση που επίσης οφείλονταν στην πολιτική αστάθεια, αλλά και την αναποφασιστικότητα της τότε ελληνικής, ναυτικής ηγεσίας σχετικά με την αναγκαιότητα ή μη της ενίσχυσης του στόλου με θωρηκτά [39]. Επιπλέον, σημαντικό αριθμητικά και ποιοτικά τμήμα των στελεχών του Πολεμικού Ναυτικού αποτάχθηκε λόγω της συμμετοχής του στο Βενιζελικό Κίνημα της 1^{ης} Μαρτίου 1935 δημιουργώντας μεγάλα κενά στη στελέχωση των ναυτικών μονάδων και υπηρεσιών. Η υπολειτουργία των Ναυτικών Σχολών, η απομάκρυνση των Βρετανικών Αποστολών και η σπάνις ναυτικών γυμνασίων επηρέασαν επίσης αρνητικά τη μαχητική ικανότητα του στόλου τα χρόνια εκείνα [40]. Πάντως, η σωστή προετοιμασία του ναυτικού σκέλους της ελληνικής επιστράτευσης και η επιτυχής εγκατάσταση συστημάτων παράκτιας άμυνας, ναυτικών παρατηρητηρίων και αντιαεροπορικής άμυνας είχαν αγαθά αποτελέσματα κατά τον Ελληνο-ιταλικό Πόλεμο [41]. Ταχύτατα και με τη μεγάλη συνδρομή του ναυτικού όλες σχεδόν οι μάχιμες μονάδες του ελληνικού στρατού βρέθηκαν στο μέτωπο, επίτευγμα μεγάλης σημασίας για την ελληνική νίκη στον πόλεμο αυτό [42]. Με την εξαίρεση μάλιστα της βύθισης του υποβρυχίου Πρωτέα δε χάθηκε ούτε ένα γραμμάριο υλικού ούτε μια ψυχή από την εκατοντάδα και πλέον χιλιάδων, που οι ελληνικές μονάδες επιφανείας συνόδευσαν τόσο κατά τη διάρκεια της ελληνικής επιστράτευσης όσο και καθ' όλη τη διάρκεια του Ελληνο-ιταλικού πολέμου. Κι αυτό έγινε εφικτό παρά το γεγονός ότι, όταν επρόκειτο περί αγγλικών συνοδευίων τα ιταλικά υποβρύχια επιτίθεντο εναντίον των μεταγωγικών της νηοπομπής, αντιθέτως στις ελληνικές νηοπομπές προσέβαλλαν πάντα τα συνοδά αντιτορπιλικά [43].

Η συμβολή του πολεμικού ναυτικού στη νίκη των ελληνικών όπλων κατά τον πόλεμο του 1940-1941 [44] δεν εξαντλείται στην εύτακτη επιστράτευση και τροφοδοσία των ελληνικών χερσαίων δυνάμεων που πολεμούσαν εναντίον πολλαπλάσιου αριθμού ιταλικών στρατευμάτων συγκριτικά μ' αυτόν που αντιμετώπιζαν οι Βρετανοί στην Αίγυπτο την ίδια εποχή [45]. Εκτός από συνοδείες νηοπομπών οι ελληνικές μονάδες επιφανείας πραγματοποίησαν και τρεις επικίνδυνες καταδρομικές επιχειρήσεις στα Στενά του Οτράντο τις οποίες αντιμετώπισαν, αρχικά, με επιφύλαξη οι Άγγλοι σύμμαχοι. Οι επιχειρήσεις αυτές δεν είχαν τελικά κάποιο απτό αποτέλεσμα λόγω της αναγκαστικά περιορισμένης χρονικής διάρκειας της ελληνικής, ναυτικής παρουσίας στα Στενά, της σχετικά αραιής ναυτικής συγκοινωνίας μεταξύ της Ιταλίας και της Αλβανίας στο συγκεκριμένο ύψος και της έλλειψης μελέτης από τους Έλληνες ανάλογων επιχειρήσεων του Αυστριακού στόλου στο ίδιο επιχειρησιακό θέατρο κατά τον Πρώτο Παγκόσμιο Πόλεμο. Παρ' όλα αυτά, ο ηθικός αντίκτυπος της πραγματοποίησής τους υπήρξε σημαντικός εξυψώνοντας το κύρος του Έλληνα ναύτη [46].

Ό,τι δεν κατάφεραν να επιτύχουν οι ελληνικές μονάδες επιφανείας στα στενά του Οτράντο το πέτυχαν τα ελληνικά υποβρύχια. Η βύθιση ενός έμφορτου ιταλικού πετρελαιοφόρου από τον *Κατσώνη*, πολύ δε περισσότερο η βύθιση ενός ιταλικού πετρελαιοκίνητου και ενός μεταγωγικού από τον *Παπανικολή* την παραμονή των Χριστουγέννων του 1940, αποτέλεσαν χαρακτηριστικά παραδείγματα της αναστάτωσης που επέφερε η δράση των υποβρυχίων μας στις ιταλικές θαλάσσιες συγκοινωνίες. Αντίστοιχα διακεκριμένη, αν και λιγότερο εμφανή απόδοση κατά τη διάρκεια του Ελληνο-ιταλικού πολέμου, είχε η υπηρεσία Ναρκαλιείας [47], και η υπηρεσία αεράμυνας, στην οποία πιστώνεται η κατάρριψη 60 περίπου εχθρικών αεροσκαφών [48].

Το ξεκίνημα του Απριλίου του 1941 έφερε μια νέα, από καιρό αναμενόμενη εξέλιξη για την Ελλάδα. Επιθυμώντας αρχικά οι Γερμανοί να εκδιώξουν τους Άγγλους από τη Μεσόγειο και αργότερα φοβούμενοι τη δημιουργία συμμαχικού μετώπου στη Μακεδονία την ώρα που ο κύριος όγκος των Γερμανικών στρατευμάτων θα μάχονταν στη Ρωσία, όπως ακριβώς είχε συμβεί και στον Πρώτο Παγκόσμιο Πόλεμο, εισέβαλλαν από τα βόρεια, ελληνικά σύνορα στις 6 Απριλίου 1941 [49]. Στα τέλη του ίδιου μήνα ολοκληρώθηκε η κατάληψη της ηπειρωτικής Ελλάδας και ένα μήνα αργότερα έπεσε το τελευταίο, ελεύθερο, ελληνικό έδαφος, η Κρήτη [50]. Πριν όμως συμβούν όλα αυτά η καθυστέρηση της αποδημίας του ελληνικού στόλου στην Αίγυπτο το Μάιο του 1941 και η εγκατάλειψη στην Ελλάδα πολλών δεκάδων εμπορικών πλοίων

αλλά και άλλου χρήσιμου υλικού έδωσαν τη δυνατότητα στον Άξονα να βυθίσει το μισό ελληνικό πολεμικό στόλο [51] και να αποκτήσει πολύτιμο πλωτό και πολεμικό υλικό για την υποστήριξη των διαπόντιων επιχειρήσεων του [52].

Οι πληγές που δημιούργησε η ναζιστική αεροπορία τόσο στο Ελληνικό όσο και στο Βρετανικό Ναυτικό ήταν μεγάλες [53] και οι αναγκαίες χρονοβόρες επισκευές των ελληνικών, πολεμικών πλοίων και υποβρυχίων έγιναν, ως ένα βαθμό, εκ των ενόντων λόγω της ναυπηγοεπισκευαστικής ανεπάρκειας της Αιγύπτου [54]. Ήδη όμως από το δεύτερο μισό του 1941 τα ελληνικά αντιτορπιλικά, συνεπικουρούμενα από τις λίγες αγγλικές κορβέτες που μπορούσε να διαθέσει ο αποδεκατισμένος Βρετανικός Στόλος της Μεσογείου, ανέλαβαν τη συνοδεία νηοπομπών στην Ανατολική Μεσόγειο, διατήρησαν δε το σημαίνοντα ρόλο τους στη συγκεκριμένη αποστολή μέχρι τέλους του πολέμου παρά τη μεταγενέστερη ανάκαμψη της Βρετανικής ναυτικής ισχύος [55]. Επιπλέον, οι ελληνικές, ελαφρές μονάδες επιφανείας συνόδευσαν νηοπομπές στην υπόλοιπη Μεσόγειο και στον Ατλαντικό από το 1943 και μετά, [56] ενώ τα ελληνικά υποβρύχια σημείωσαν σημαντικές επιτυχίες [57] αλλά και πλήρωσαν βαρύ φόρο αίματος [58] σε επιθετικές περιπολίες και ειδικές αποστολές που ανέλαβαν στο Αιγαίο και στην Ανατολική Μεσόγειο την περίοδο 1942-1944. Το Ελληνικό Ναυτικό είχε επίσης ενεργό συμμετοχή στις αποβατικές επιχειρήσεις, του Άντζιο, της Σικελίας και της Νότιας Ιταλίας [59], της Νορμανδίας και της Νότιας Γαλλίας, στην απόπειρα κατάληψης των Δωδεκανήσων κτλ. [60]. Το αποτέλεσμα της αξιολογής αυτής ελληνικής προσφοράς στο συμμαχικό ναυτικό αγώνα ήταν να ενισχυθεί σταδιακά το Ελληνικό Πολεμικό Ναυτικό με 40 νέες μονάδες από τους συμμάχους καταγράφοντας έτσι τη μεγαλύτερη μεγέθυνση από όλα τα απόδημα συμμαχικά ναυτικά κατά το Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο [61].

Μετά την απελευθέρωση των Αθηνών τη 18^η Οκτωβρίου 1944 και την επάνοδο του Ελληνικού Πολεμικού Ναυτικού στην πατρίδα οι μονάδες επιφανείας του διεσπάρησαν στα νησιά και τα λιμάνια του Αιγαίου, ώστε να εκδιώξουν και τους τελευταίους πυρήνες του εχθρού, να συνοδεύσουν νηοπομπές με τρόφιμα και εφόδια για τον άμαχο πληθυσμό και να ανασυστήσουν τις προπολεμικές Ναυτικές Διοικήσεις [62]. Το Πολεμικό Ναυτικό βρισκόταν σε καλύτερη κατάσταση από τον Ελληνικό Στρατό και την Αεροπορία την εποχή εκείνη, καθώς διέθετε ευρύ πυρήνα εμπειροπόλεμων αξιωματικών και ναυτών και μια βρετανική ναυτική αποστολή στην Αθήνα για την καλύτερη εκπαίδευσή του. Επιπλέον, διέθετε αρκετά πλοία και του δόθηκαν κι άλλα, κυρίως αμφίβιου τύπου, ως δάνειο στα πλαίσια του Αμερικανικού δόγματος Τρούμαν και της γενικότερης βοήθειας της Δύσης σε χώρες που απειλούνταν από την εξάπλωση του κομμουνισμού. Τα πλοία όμως αυτά δεν βρίσκονταν σε καλή κατάσταση και η συντήρησή τους απαιτούσε συνεχείς επισκευές, κάτι το δυσχερές, δεδομένου ότι οι Γερμανοί κατακτητές είχαν καταστρέψει το σύνολο σχεδόν των ναυπηγοεπισκευαστικών υποδομών της χώρας λίγο πριν την αποχώρησή τους από αυτήν.

Η σοβαρότερη πρόκληση που αντιμετώπισε ο ελληνικός στόλος την επαύριο της απελευθέρωσης ήταν ο Ελληνικός Εμφύλιος Πόλεμος (Δεκεμβριανά 1944 και 1946-1949). Η κυριαρχία της θάλασσας από τον ελληνικό στόλο αποτέλεσε ένα από τα ουσιαστικότερα πλεονεκτήματα των κυβερνητικών δυνάμεων στον πόλεμο αυτό, καθώς στήριξαν πάνω της τις μεταφορές τους. Αντίθετα ο Δημοκρατικός Στρατός ήταν υποχρεωμένος να χρησιμοποιεί μόνο το χερσαίο δίκτυο της χώρας, που είχε, όμως, εξαρθρωθεί λόγω της σημαντικής καταστροφής του οδικού και τροχαίου υλικού του κατά την Κατοχή. Το αποτέλεσμα ήταν να αναγκάζονται οι άνδρες του Δημοκρατικού Στρατού να οδοιπορούν επί εβδομάδες για να μεταβούν από τη μία περιοχή στην άλλη και να καταφθάνουν καταπονημένοι και αργοπορημένοι, συχνά, στα πεδία των μαχών [63]. Επιγραμματικά σημειώνεται ότι το Ελληνικό Πολεμικό Ναυτικό ανέλαβε τις ακόλουθες επιχειρησιακές δραστηριότητες κατά τη διάρκεια του Εμφυλίου Πολέμου: μεταφορές από θαλάσσης, παρεμπόδιση μετακινήσεων και ανεφοδιασμού από θαλάσσης του αντιπάλου, προστασία τομέων λιμένων και της παράκτιας ζώνης, ναυτικούς βομβαρδισμούς, συνδυασμένες επιχειρήσεις, καταδρομές και ειδικές αποστολές [64].

Στο ξεκίνημα του Ψυχρού Πολέμου η γεωστρατηγική σημασία του ελληνικού χώρου ήταν περιορισμένη στα μάτια των Δυτικών Συμμάχων της Ελλάδας. Η βόρεια μεθόριός της εκτείνεται σε 1200 χιλιόμετρα και στερούνταν αμυντικού βάθους σε πολλά της σημεία γι' αυτό και θεωρούνταν ως μη υπερασπίσιμη από Αμερικανούς επιτελείς. Το αποτέλεσμα ήταν να περικοπεί σημαντικά, το 1950, η Αμερικανική οπλική βοήθεια που παρέχονταν στην Ελλάδα κατά τη διάρκεια του Εμφυλίου Πολέμου [65]. Η εξέλιξη αυτή ήταν, άλλωστε, σύμφωνη με την πολιτική New Look και με το δόγμα των «Μαζικών Αντιποίνων» που έδινε προτεραιότητα στους πυρηνικούς εξοπλισμούς λόγω της συντριπτικής υπεροχής των συμβατικών δυνάμεων του Σοβιετικού Συνασπισμού στην Ευρώπη [66]. Ο πόλεμος όμως της Κορέας, η πιθανότητα επιθετικών κινήσεων του σοβιετικού συνασπισμού και σε άλλες «ευαίσθητες περιοχές», όπως τα Βαλκάνια, τα συχνά μεθοριακά επεισόδια και ο πόλεμος των λέξεων στον οποίο επιδίδονταν οι δορυφόροι της Σοβιετικής Ένωσης κατά της Ελλάδας οδήγησαν σε αναβάθμιση του ρόλου της στον Αμερικάνικο σχεδιασμό για την άμυνα της ευρύτερης περιοχής. Σύμφωνα δε με την έκθεση NSC 73/4 του Αμερικανικού Συμβουλίου Εθνικής Ασφαλείας η Ελλάδα, μαζί με την Τουρκία και το Ιράν μπορούσαν να εμποδίσουν ενδεχόμενη σοβιετική διείσδυση στη Μέση Ανατολή. Προς την κατεύθυνση αυτή η Ελλάδα και η Τουρκία εντάχθηκαν στο NATO το 1952 και ανατέθηκε στον Έκτο Αμερικανικό Στόλο η στήριξη της άμυνας της Νοτιανατολικής πτέρυγας του NATO έναντι της Σοβιετικής απειλής [67]. Η διατήρηση μάλιστα του πυρήνα του Έκτου Στόλου σε δύο, τουλάχιστον, αεροπλανοφόρα θεωρήθηκε ως μέτρο προσήλωσης των Η.Π.Α. στην προάσπιση της περιοχής έως τη δεκαετία του 1980, ως σαφή ένδειξη της δυνατότητάς του να πλήξει στόχους σε Σοβιετικό έδαφος και, από τα μέσα της δεκαετίας του 1960 κι ως το τέλος του Ψυχρού Πολέμου, ως απόδειξη της ικανότητάς του να καταναυμαχήσει τη Σοβιετική «Εσκάδρα» που ναυλοχούσε στη Μεσόγειο [68]. Επιπλέον, αποφασίστηκε η επανάληψη της χορήγησης σημαντικού ύψους Αμερικανικής αμυντικής βοήθεια προς την Ελλάδα, καθώς οι εθνικοί της πόροι μόλις αρκούσαν για τη συντήρηση του πολεμικού της υλικού της πρώτης δεκαετίας μετά το Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο. Η προοπτική μάλιστα της χορήγησης οπλικής βοήθειας από το NATO προς την Ελλάδα συνέβαλε στη στήριξη της ένταξης της χώρας μας στον αμυντικό αυτό οργανισμό από τον αστικό, πολιτικό της κόσμο [69].

Η αμυντική βοήθεια του NATO προς την Ελλάδα αυξήθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1950 όταν το δόγμα των «Μαζικών Αντιποίνων» άρχισε να εγκαταλείπεται δίνοντας τη θέση του, το 1961, στο δόγμα της διαβαθμισμένης ή εύκαμπτης ισόρροπης απάντησης που ευνοούσε την ενίσχυση των συμβατικών δυνάμεων των συμμάχων του NATO, καθώς η Σοβιετική Ένωση είχε πια αποκτήσει τη δυνατότητα πυρηνικού πλήγματος της Αμερικάνικης επικράτειας. Στην κλιμάκωση της Αμερικανικής αμυντικής βοήθειας στα τέλη της δεκαετίας του 1950 συντέλεσε και η αναβάθμιση της γεωστρατηγικής σημασίας της χώρας μας καθώς θεωρήθηκε τότε ότι η Ελλάδα μπορούσε να αποτελέσει βάση Νατοϊκού αντιπερισπασμού σε περίπτωση Σοβιετικής επίθεσης στην Κεντρική Ευρώπη στα πλαίσια ενός συμβατικού πολέμου. Αναγνωρίζονταν επίσης ότι η χώρα αποτελούσε ζωτικό κρίκο για το σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης της Συμμαχίας και συνέβαλε στην άμυνα των Στενών. Εκτιμάτο τέλος η σημασία της Κρήτης και των νησιών του Αιγαίου για την ασφάλεια των θαλάσσιων και εναέριων γραμμών επικοινωνιών προς τη Βόρεια Αφρική και την Ανατολική Μεσόγειο και για τη διενέργεια αμφίβιων επιχειρήσεων κατά της ενδοχώρας [70].

Στο πλαίσιο αυτό παραχωρήθηκαν από τις ΗΠΑ στην Ελλάδα κατά το πρώτο μισό της δεκαετίας του 1950 τα αντιτορπιλικά «ΔΟΞΑ» και «ΝΙΚΗ», οι ναρκοθέτιδες «ΑΚΤΙΟΝ» και «ΑΜΒΡΑΚΙΑ», το δεξαμενόπλοιο «ΝΑΥΚΡΑΤΟΥΣΑ» και τα υποβρύχια «ΠΟΣΕΙΔΩΝ» και «ΑΜΦΙΤΡΙΤΗ» ενώ ως μέρος των Ιταλικών επανορθώσεων, παραχωρήθηκε το καταδρομικό «ΕΛΛΗ» το 1950 [71]. Το 1956, όμως, το Ελληνικό Πολεμικό Ναυτικό συνέχιζε να είναι ασθενές, καθώς επέκειτο η επιστροφή στο Βρετανικό ναυτικό μεγάλου αριθμού σκαφών που του είχαν δοθεί ως δάνειο, ενώ ένα μόνο αντιτορπιλικό και ένα σκάφος παράκτιας συνοδείας θεωρούνταν ικανοποιητικά από επιχειρησιακή άποψη σε σύνολο 71 πλοίων του ελληνικού, πολεμικού στόλου. Το αποτέλεσμα ήταν ότι το Ελληνικό Πολεμικό Ναυτικό «δεν κρινόταν ικανό

να ανταποκριθεί στην αποστολή του, τον ανεφοδιασμό δηλαδή του στρατού και της αεροπορίας και την προστασία των ελληνικών ακτών και νήσων». Με αφετηρία τη διαπίστωση αυτή, αλλά και το γεγονός ότι μέχρι τότε είχε διατεθεί στο πολεμικό ναυτικό μόνο το 10% των πόρων του προγράμματος της Αμερικανικής οπλικής βοήθειας προς την Ελλάδα προτάθηκε να διατεθεί σ' αυτό το ήμισυ των κονδυλίων της αντίστοιχης βοήθειας για το οικονομικό έτος 1956-1957. Η εφαρμογή της πρότασης αυτής, αλλά και ο διπλασιασμός στο τέλος της δεκαετίας του 1950 της αμυντικής βοήθειας που λάμβανε η Ελλάδα από τις ΗΠΑ οδήγησε στην ενίσχυση του ελληνικού στόλου με σημαντικό αριθμό μεταχειρισμένων σκαφών η διάθεση των οποίων γινόταν με συμβολικούς, συνήθως, όρους από τις ΗΠΑ [72] που διατήρησαν σ' αυτό τον τομέα σταθερό προβάδισμα παγκοσμίως έναντι της Σοβιετικής Ένωσης και της Βρετανίας κατά τον Ψυχρό Πόλεμο [73]. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι κατά την περίοδο 1958-1960 παραχωρήθηκαν από τις ΗΠΑ έξι οχηματαγωγά, τέσσερα αντιτορπιλικά τύπου Fletcher, τα «ΑΣΠΙΣ», «ΒΕΛΟΣ», «ΛΟΓΧΗ» και «ΣΦΕΝΔΟΝΗ», δύο αποβατικής υποστηρίξεως, τα «ΒΛΑΧΑΒΑΣ» και «ΜΑΡΙΔΑΚΗΣ», και τρία αρματαγωγά, τα «ΙΚΑΡΙΑ», «ΛΕΣΒΟΣ» και «ΡΟΔΟΣ». Επίσης, το 1964 παρελήφθησαν το υποβρύχιο «ΤΡΙΑΙΝΑ», καθώς και έξι ναρκαλιευτικά («ΑΗΔΩΝ», «ΑΙΓΛΗ», «ΔΑΦΝΗ», «ΔΩΡΙΣ», «ΚΙΧΛΗ» και «ΚΙΣΣΑ») [74]. Μέχρι το 1964 το αμερικανικό πρόγραμμα βοήθειας είχε καλύψει το 80% των αναγκών του Ελληνικού Πολεμικού Ναυτικού σε πλοία επιφανείας και το 50% των αντίστοιχων αναγκών σε υποβρύχια ο δε λόγος μεταξύ του ελληνικού και του τουρκικού στόλου σε αντιτορπιλικά και περιπολικά σκάφη ήταν 12/18 και 5/20 υπέρ του τουρκικού, σε μια εποχή που το Κυπριακό Ζήτημα είχε λάβει σημαντικές διαστάσεις, ενώ αναδύονταν σταδιακά και διαφορές με τη γείτονα χώρα στο Αιγαίο και τη Δυτική Θράκη.

Το 1964 η Ελλάδα ζήτησε από τη Συμμαχία τη χορήγηση ενός νέου προγράμματος αμυντικής βοήθειας το οποίο όμως δεν εγκρίθηκε για πολιτικούς και οικονομικούς λόγους. Έκτοτε, οι δωρεές πολεμικού υλικού από τις ΗΠΑ και το NATO, που μέχρι τότε λάμβανε η Ελλάδα μετατράπηκαν, κατά κανόνα, σε πωλήσεις επί πιστώσει, ακόμα όμως κι αυτές δεν ήταν πάντα εφικτές [75]. Οι προσπάθειες της Κυβέρνησης της Ένωσης Κέντρου (1964-1965) να ενισχύσει με ελαφρές μονάδες τον ελληνικό στόλο δεν ευοδώθηκαν, καθώς τόσο οι ΗΠΑ όσο και η Βρετανία δεν ήθελαν τότε να ενισχυθεί περαιτέρω το ναυτικό δυναμικό της Ελλάδας και της Τουρκίας, μιας και υπήρχε φόβος ότι κάτι τέτοιο θα διευκόλυνε την προσφυγή των δύο χωρών στα όπλα λόγω του Κυπριακού [76].

Η δεκαετία 1965-1974 υπήρξε πλήρης σημαντικών διεθνών εξελίξεων που επηρέασαν, αναπόδραστα, τη ναυτική σημασία του ελληνικού, γεωγραφικού χώρου και στόλου. Οι ΗΠΑ εισήλθαν σε μια παρατεταμένη περίοδο πολιτικής αστάθειας και άγονης εμπλοκής στο Βιετνάμ, ενώ η Σοβιετική Ένωση, έχοντας διδαχθεί από την υποχώρησή της στις κρίσεις του Λιβάνου το 1958 και της Κούβας το 1962 -λόγω της έλλειψης, κυρίως, μονάδων επιφανείας- αποδύθηκε σε φρενήρεις ναυτικούς εξοπλισμούς από τον Ιούνιο του 1964 ως το τέλος σχεδόν του Ψυχρού Πολέμου. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με το μονομερή, ναυτικό «αφοπλισμό» των ΗΠΑ κατά τη δεκαετία του 1970 έδωσε στη Σοβιετική Ένωση την ονομαστική, τουλάχιστον, ναυτική υπεροχή έναντι των ΗΠΑ στις αρχές της δεκαετίας του 1980 [77]. Η συγκέντρωση επίσης στο χώρο της Μεσογείου σημειώνοντων Αμερικανικών οικονομικών συμφερόντων με τη μορφή, κυρίως, των Αμερικανικών πετρελαϊκών εταιρειών που εφοδίαζαν το Δυτικό Κόσμο με τους απαιτούμενους ενεργειακούς πόρους, καθώς και η διέλευση από τη θάλασσα αυτή του μισού, σχεδόν, σοβιετικού διεθνούς εμπορίου οδήγησαν τη Σοβιετική Ένωση στο να προωθήσει σημαντικές ναυτικές δυνάμεις στην περιοχή. Οι δυνάμεις αυτές ήταν, συνήθως, υποδεέστερες του Έκτου Στόλου. Μπορούσαν όμως να τον καθυστερήσουν, σε περίπτωση γενικής ανάφλεξης, από τη στήριξη της άμυνας της Νοτιοανατολικής πτέρυγας του NATO έναντι των υπέρτερων χερσαίων και αεροπορικών συμβατικών δυνάμεων του Συμφώνου της Βαρσοβίας στα θέατρα επιχειρήσεων της πτέρυγας αυτής. Η πιθανότητα δε αυτή ενισχύονταν από το γεγονός ότι κατά τη δεκαετία 1964-1974 ο Έκτος Στόλος στερήθηκε των αγκυροβολίων που μέχρι τότε διέθετε στη Βόρεια Αφρική, λόγω της συμπαράταξης των χωρών της περιοχής με την ΕΣΣΔ [78].

Η διαμφισβήτηση της κυριαρχίας της Μεσογείου από το Σοβιετικό Πολεμικό Ναυτικό είχε ως έμμεσο αποτέλεσμα την αναβάθμιση της ναυτικής σημασίας του ελληνικού, γεωγραφικού χώρου. Η μείωση της στρατηγικής σημασίας των Στενών λόγω της επαμφοτερίζουσας πολιτικής της Τουρκίας την εποχή εκείνη, αλλά και η μόνιμη αγκυροβόληση του σοβιετικού στόλου σε έξι σημεία των διεθνών υδάτων του Αιγαίου και της Κρήτης συνετέλεσαν στην αύξηση της στρατηγικής σημασίας των 3000 νησιών του. Τα νησιά αυτά δημιουργούν τρία φράγματα ελέγχοντας όλους τους διαύλους ναυσιπλοΐας κι επεκτείνοντας έτσι τον στρατηγικό κόμβο των τουρκικών στενών μερικές εκατοντάδες χιλιόμετρα νότια, στα νησιά της Κρήτης, των Κυθήρων, της Καρπάθου και της Ρόδου. Επιπλέον, λόγω της οπλικής, τεχνολογικής προόδου (π.χ. πύραυλοι εδάφους θαλάσσης, μικρά υποβρύχια, ευέλικτες και ταχείες πυραυλάκατοι, κτλ.) ήταν εφικτό το κλείσιμο του Αιγαίου στο Σοβιετικό Πολεμικό Ναυτικό για παρατεταμένες περιόδους [79]. Η στέρηση τέλος του Έκτου Στόλου από ναυτικές διευκολύνσεις στη Βορειοαφρικανική ακτογραμμή και η αντίστοιχη διεύρυνση αυτών στην Ελλάδα επέτειναν την αναβάθμιση της ναυτικής σημασίας του ελληνικού, γεωγραφικού χώρου [80]. Η αναβάθμιση όμως αυτή περιορίστηκε, ως ένα βαθμό, από την αποχώρηση της Γιουγκοσλαβίας και της Αλβανίας από το Σοβιετικό Συνασπισμό αλλά και την περιορισμένη αυτονομία της Ρουμανίας απ' αυτόν [81].

Η αύξηση της ναυτικής σημασίας του ελληνικού, γεωγραφικού χώρου τη δεκαετία 1964-1974, η κλιμάκωση της έντασης των ελληνο-τουρκικών σχέσεων λόγω του Κυπριακού Ζητήματος, το έλλειμα άμυνας που υφίστατο τότε στο Αιγαίο και η σημαντική, ονομαστικά τουλάχιστον, άνοδος της ελληνικής οικονομίας, συνοδεύτηκαν από την πρώτη μεταπολεμικά σοβαρή προσπάθεια ναυτικού εξοπλισμού της χώρας που βασίστηκε σε εθνικούς, κυρίως, πόρους. Η προσπάθεια αυτή υπήρξε επίσης αξιόλογη, γιατί μείωσε τη μονομερή εξάρτηση της χώρας μας από την Αμερικανική αμυντική βιομηχανία και μεθόδευσε την ένταξη στον ελληνικό στόλο νέων ναυτικών μονάδων, και όχι μεταχειρισμένων, όπως συνέβαινε, συνήθως, την προηγούμενη εικοσαετία. Αξίζει δε να σημειωθεί ότι η προτίμηση του Ελληνικού Πολεμικού Ναυτικού στην Ευρωπαϊκή, ναυπηγική, πολεμική βιομηχανία, μια προτίμηση που συνεχίζεται μέχρι τις μέρες μας, οφείλεται στο γεγονός ότι οι αντίστοιχες βιομηχανίες της Γαλλίας, της Γερμανίας, της Ιταλίας και της Ολλανδίας πρωτοπορούν στην καθέλκυση ναυτικών μονάδων των οποίων το μέγεθος και το σχήμα είναι ελκυστικό σε χώρες με περιορισμένα οικονομικά μέσα, όπως η Ελλάδα [82]. Η επιθυμία της μεγιστοποίησης της απόδοσης των περιορισμένων πόρων που μπορεί να διαθέσει το Ελληνικό Κράτος σε ναυτικές εξοπλιστικές δαπάνες εξηγεί, σε μεγάλο βαθμό, και την συχνή του τάση να πρωτοπορεί παγκοσμίως στην υιοθέτηση νέων ναυτικών όπλων όπως θα φανεί παρακάτω.

Το 1966 αγοράστηκαν έξι νορβηγικές τορπιλλάκατοι και ένα χρόνο αργότερα παραγγέλθηκαν στο Χερβούργο της Γαλλίας τέσσερις πυραυλάκατοι κλάσεως Combattante II με κύριο οπλισμό τα πρωτοεμφανιζόμενα βλήματα EXOCETT MM-38, θέτοντας το ναυτικό μας στην παγκόσμια πρωτοπορία υιοθέτησης νέων όπλων, όπως είχε ήδη συμβεί στην Επανάσταση του 21 με την κορβέτα *Καρτερία* -το δεύτερο ατμήλατο που πολέμησε στην παγκόσμια ναυτική ιστορία- και το 1913 με το μετασκευασμένο υδροπλάνο τύπου Maurice Farman που διεξήγαγε, την πρώτη, παγκοσμίως, επιχείρηση αεροναυτικής συνεργασίας και βομβαρδισμού εχθρικών θέσεων. Επίσης, το Ελληνικό Πολεμικό Ναυτικό, πρωτοπορώντας και πάλι, παρήγγειλε στη Γερμανία τέσσερα υποβρύχια τύπου 209 με νέο όπλο τις τορπίλλες SST-4. Μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1970 το Ελληνικό Πολεμικό Ναυτικό ενισχύθηκε επίσης με τέσσερα αεροσκάφη ναυτικής συνεργασίας τύπου ALBATROS που παραχωρήθηκαν από τη Νορβηγία, με αντιτορπιλικά FRAM, με τέσσερις ακόμα πυραυλάκατους κλάσεως Combattante III και με ελικόπτερα ALOUTTE III [83].

Η Τουρκική εισβολή στην Κύπρο το καλοκαίρι του 1974 και η σύγχρονη σχεδόν έγερση από την Τουρκία ζητημάτων υφαλοκρηπίδας και επιχειρησιακού ελέγχου του Αιγαίου, καθώς και ελληνικού, εναέριου χώρου και χωρικών υδάτων οδήγησαν σε σημαντική μεταβολή της ελληνικής, πολιτικής ασφαλείας. Η πολιτική αυτή πρόταξε τον εξ ανατολών κίνδυνο έναντι αυτού του εκ βορρά και επεδίωξε, μέσα από την πρόσκαιρη έξοδο της χώρας μας από το στρατιωτικό

σκέλος του NATO, την ευαισθητοποίηση των συμμάχων μας σχετικά με τον κίνδυνο που αντιμετώπιζε η χώρα από τον Τουρκικό επεκτατισμό. Η έξοδος όμως αυτή ελάχιστα απέδωσε, καθώς η ύφεση στις σχέσεις των δύο συνασπισμών το δεύτερο μισό της δεκαετίας του 1970 μείωσε σημαντικά την ελληνική διαπραγματευτική ισχύ [84]. Το Αμερικανικό εμπάργκο παροχής όπλων προς την Τουρκία εκείνα τα χρόνια υπήρξε η μόνη, θετική εξέλιξη για την Ελλάδα, καθώς αποδυνάμωσε οπλικά τις Τουρκικές ένοπλες δυνάμεις σε ένα κρίσιμο χρονικά σημείο, καθώς συνέπεσε με φάση οικονομικής στενότητας στη γείτονα χώρα [85].

Η ουσιαστική, αν όχι και τυπική, πρόταξη του εξ ανατολών κινδύνου σήμανε επίσης, μεταξύ άλλων, και τον τερματισμό της τριακονταετούς μεταπολεμικής περιόδου κατά την οποία οι ανάγκες του Ελληνικού Πολεμικού Ναυτικού, έμπαιναν, κατά κανόνα, σε δεύτερη μοίρα σε σχέση με τις αντίστοιχες του στρατού ξηράς και της αεροπορίας. Μεταξύ του 1976 και του 1981 οι παραγγελίες νέων, ναυτικών μονάδων διαδέχονταν η μία την άλλη με σκοπό ως το τέλος του 1982 ο ελληνικός στόλος να διαθέτει μια ισχυρή δύναμη κρούσης που θα λειτουργούσε αποτρεπτικά. Βασική τομή του ναυτικού προγράμματος του 1976 σε σχέση με όλα σχεδόν τα προηγούμενα ήταν η επιμονή της Ελληνικής Κυβέρνησης να εκτελεσθεί όσο το δυνατό μεγαλύτερο τμήμα του εντός της χώρας, ώστε να γίνει ένα ακόμα βήμα απεξάρτησης της ελληνικής, ναυτικής άμυνας από την κυρίαρχη πηγή των ναυτικών της προμηθειών που ήταν ακόμα οι ΗΠΑ. Για το σκοπό αυτό ενεργοποιήθηκαν τα ναυπηγεία Σκαραμαγκά που ανέλαβαν την κατασκευή πυραυλακάτων Combattante III. Μέχρι το τέλος της δεκαετίας του 1970 εντάχθηκαν στο Ελληνικό Πολεμικό Ναυτικό 33 νέα πλοία (αντιτορπιλικά στόλου και συνοδείας, γρήγορα αρματαγωγά, υποβρύχια, торπιλάκατοι τύπου Jaguar, παράκτια περιπολικά, πετρελαιοφόρα, πλοία μεταφοράς πυρομαχικών, ρυμουλκά, υδροφόρες), 8 νέα ανθυποβρυχιακά ελικόπτερα Augusta Bell 212 και εκσυγχρονίστηκαν αρκετά πλοία. Το ναυτικό πρόγραμμα του 1976 ολοκληρώθηκε το 1982, με την έλευση στη χώρα μας της φρεγάτας *Λήμνος*, ένα χρόνο μετά, την ένταξη της φρεγάτας *Έλλη* στον ελληνικό στόλο [86].

Την ύφεση στις σχέσεις των δύο συνασπισμών του τέλους της δεκαετίας του 1970 διαδέχτηκε το πρώτο μισό της δεκαετίας του 1980 κλιμακούμενη πόλωση για μια σειρά από λόγους με κυριότερο την εντύπωση που είχε δημιουργηθεί στις ΗΠΑ, ότι η ύφεση εξυπηρετούσε την ΕΣΣΔ. Η πολιτική αυτή μεταφράστηκε, στο χώρο της Μεσογείου, σε προωθημένη ναυτική παρουσία του Έκτου Στόλου. Η προσέγγιση της Ελλάδας στις σχέσεις των δύο συνασπισμών παρέμεινε, όμως, υφιστάμενη με αποτέλεσμα οι δεσμοί της με τη Δυτική υπερδύναμη να χαλαρώσουν. Οι δύο χώρες ήρθαν μεν σε συμφωνία το 1983 για την παραμονή των Αμερικανικών βάσεων στην Ελλάδα, μια συμφωνία που υπόσχονταν σημαντική Αμερικανική αμυντική βοήθεια στη χώρα μας. Η άρνηση όμως της Ελληνικής Κυβέρνησης να δεχθεί Αμερικανικές προσφορές για την κατασκευή πλοίων του Πολεμικού Ναυτικού και η αδρανοποίηση της ελληνικής συμμετοχής στο στρατιωτικό σκέλος του NATO, λόγω του αποκλεισμού της νήσου Λήμνου από το Νατοϊκό σχεδιασμό, καθώς επίσης και η ανανέωση της παροχής ναυπηγικών διευκολύνσεων σε Σοβιετικά πλοία, συντέλεσαν στη μείωση την συμμαχικής αξίας του ελληνικού παράγοντα στα μάτια της Δυτικής υπερδύναμης [87]. Την ίδια περίπου εποχή αυξήθηκε σημαντικά η αντίστοιχη αξία της Τουρκίας λόγω της απώλειας του Ιράν για τη Δύση μετά την Ισλαμική Επανάσταση του 1979, της Σοβιετικής εισβολής στο Αφγανιστάν και του ξεσπάσματος του πολέμου Ιράν-Ιράκ. Αυτό μεταφράστηκε, μεταξύ άλλων, στον διπλασιασμό (1983) της Αμερικανικής αμυντικής βοήθειας προς την Τουρκία και την προαγωγή της τη χρονιά εκείνη στην τρίτη θέση παγκοσμίως ανάμεσα στις χώρες που δέχονταν αμερικανική αμυντική βοήθεια (μετά το Ισραήλ και την Αίγυπτο) [88]. Η παρεπόμενη αύξηση της τουρκικής επιθετικότητας, όπως αυτή εκφράσθηκε, μεταξύ άλλων, με την ανακήρυξη του ψευδοκράτους της Τουρκικής Βόρειας Κύπρου το 1983, ώθησαν την Ελλάδα στο να τροποποιήσει επίσημα τον αμυντικό της σχεδιασμό που συνέχιζε να διέπεται από τη Νατοϊκή λογική του από Βορρά κινδύνου μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1980. Το νέο ελληνικό, αμυντικό δόγμα περιλάμβανε τη μετακίνηση στρατιωτικών δυνάμεων στα χερσαία σύνορα με την Τουρκία και στα νησιά του Αιγαίου, μια μετακίνηση που δεν υπήρξε άσκοπη κατά την

Ελληνο-Τουρκική κρίση του Μαρτίου του 1987 [89]. Στο πλαίσιο της αποτροπής του Τουρκικού κινδύνου το ναυτικό εξοπλιστικό πρόγραμμα του 1983 εστίασε στην απόκτηση νέων αρματαγωγών, περιπολικών και βοηθητικών σκαφών από τα ελληνικά ναυπηγεία καθώς και στον εκσυγχρονισμό πολλών ναυτικών μονάδων. Ενδεικτικά αναφέρεται η εγκατάσταση κατευθυνόμενων βλημάτων HARPOON σε τέσσερα αντιτορπιλικά τύπου FRAM, και οι μετασκευές που έγιναν σε δύο αντιτορπιλικά για την υποδοχή ελικοπτέρων, για την εγκατάσταση πυροβόλου ΟΤΟ-MELARA και για τη βελτίωση του ηλεκτρονικού τους εξοπλισμού. Παραγγέλθηκαν επίσης τέσσερα αντιπυραυλικά συστήματα (CIWS) PHALANX για να τοποθετηθούν στις φρεγάτες Έλλη και Λήμνος [90].

Οι τελευταίες δύο δεκαετίες σημαδεύτηκαν από την κατάρρευση του Συμφώνου της Βαρσοβίας και το τέλος του Ψυχρού Πολέμου που αναπόφευκτα μείωσαν τη ναυτική σημασία του γεωγραφικού χώρου της Ελλάδας. Η αναγκαιότητα της συμμαχικής ενότητας μεταξύ Ελλάδας και Τουρκίας που υφίστατο κατά τον Ψυχρό Πόλεμο μειώθηκε και η αναβάθμιση του τουρκικού γεωπολιτικού δυναμικού, λόγω της αστάθειας που χαρακτηρίζει τη Μέση Ανατολή και την Κεντρική Ασία, αλλά και της δημογραφικής και οικονομικής ανάπτυξης της Τουρκίας αύξησε την τουρκική επιθετικότητα που κλιμακώθηκε με την Κρίση των Ιμίων τον Ιανουάριο του 1996 [91]. Έγκαιρα προνοώντας η Ελληνική Πολιτεία ενίσχυσε το πολεμικό ναυτικό με φρεγάτες τύπου MEKO-200 HN MOD 3 και Standard, πυραυλακάτους, χόβερκραφτ, αεροπλάνα ναυτικής συνεργασίας και ανθυποβρυχιακά ελικόπτερα. Το 1991-1992 η Ελλάδα έλαβε από τις ΗΠΑ και τέσσερα αντιτορπιλικά τύπου ADAMS τα οποία όμως παροπλίσθησαν μέσα σε μια περίπου δεκαετία, καθώς ο ηλεκτρονικός εξοπλισμός και το πυροβολικό τους ήταν απηρχαιωμένα, ενώ απαιτούσαν και μεγάλα πληρώματα [92]. Με την αλλαγή του ελληνικού, αμυντικού δόγματος και τον ενιαίο αμυντικό χώρο Ελλάδας και Κύπρου που θεσπίστηκε το 1997, ο ελληνικός στόλος απέκτησε ενισχυμένο αποτρεπτικό ρόλο. Προβλέφτηκε, επίσης, και πραγματοποιείται η συμμετοχή του σε ειρηνευτικές και άλλες, συναφούς χαρακτήρα αποστολές υπό την αιγίδα του ΟΗΕ ή στα πλαίσια της Ευρωπαϊκής Ένωσης και της νέας δομής του NATO [93].

Τα όσα ανωτέρω ανεπτύχθησαν πρέπει να κατέστησαν σαφές ότι η γεωμορφολογία της ελληνικής χερσονήσου και η κατά καιρούς επικαιρότητα των ελληνικών θαλασσών σε σχέση με τις εκάστοτε λεωφόρους του διεθνούς εμπορίου ή τις αντίπαλες συμμαχίες συνέβαλαν στην επιβίωση και στην ανάδειξη του Ελληνισμού. Στην ίδια κατεύθυνση κινήθηκε και η συχνή ανάπτυξη αποτελεσματικής ναυτικής ισχύος από τους Έλληνες, ναυτικής ισχύος που τους ανέδειξε επίφοβους αντιπάλους και αξιόπιστους συμμάχους κατά θάλασσα στο μεγαλύτερο κομμάτι της ιστορίας τους. Ας μείνει, λοιπόν, αυτή η διαπίστωση ως εισαγωγικό έναυσμα για την εντρύφηση της ελληνικής, ναυτικής ιστορίας από την αρχαιότητα έως και σήμερα. Μιας ιστορίας που ακόμα και οι λεπτομέρειες της διδάσκουν και που με τον τρόπο τους αναφέρονται στα μεγάλα και εν πολλοίς ανοιχτά ζητήματα που αφορούν την επιβίωση και την προκοπή του σύγχρονου Ελληνισμού.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. L.S. Stavrianos, *The Balkans since 1453*, London, Hurst, 2001, σελ. 1-3, 15-16.
2. Σίμψας, Μ., *Το Ναυτικό στην Ιστορία των Ελλήνων*, τόμος 1, Αθήνα, Υπηρεσία Ιστορίας Ναυτικού, 1982, σελ. 187-200.
3. D. Kagan, "Athenian Strategy in the Peloponnesian War", στο M. Williamson, K. McGregor, & A. Bernstein (eds.), *The making of Modern Strategy: Rulers, States and War*, New York, Cambridge University Press, 1995, σελ. 54.
4. Σίμψας, τόμος 1, σελ. 217-232.
5. Η αγγλική ναυτική στρατηγική στη διαχρονία της περιγράφεται κατά τον καλύτερο τρόπο στο P.M. Kennedy, *The Rise and Fall of British Naval Mastery*, London, Allen Lane, 1976.
6. Σίμψας, τόμος 1, σελ. 295-314.
7. Bernstein, A., "The Strategy of a warrior-state: Rome and the Wars against Carthage, 264-201 B.C.", στο Williamson, *The making of Modern Strategy*, σελ. 71, 80.

8. Stavrianos, *The Balkans*, σελ. 20-21.
9. Η μείωση της ναυτικής σημασίας της Μεσογείου και κατ' επέκταση των ελληνικών θαλασσών την περίοδο εκείνη παρουσιάζεται ανάγλυφα, μεταξύ άλλων, στο Kennedy, *The Rise and Fall of British Naval Mastery*.
10. Ευσύννοπτο υλικό σχετικά με τις βαρβαρικές επιδρομές και τις συνέπειές των στο Βυζάντιο βρίσκεται κανείς στην Εκδοτική Αθηνών, *Ιστορία του Ελληνικού Έθνους*, τόμος 7, Αθήνα, 1978, σελ. 70, 74-80, 101-104, 114-119, 127-137, 159, 162-164, 183-185, 190-193, 207-212.
11. Kennedy, *The Rise and Fall*, σελ. 37-67. R.A. Preston, S.F. Wise, & H.O. Werner, *Men in Arms: the history of warfare and its interrelationships with western society*, London, Atlantic Press, 1956, σελ. 54, 59. Σίμψας, Μ., *Το Ναυτικό στην Ιστορία των Ελλήνων*, τόμος 2, Αθήνα, Υπηρεσία Ιστορίας Ναυτικού, 1982. Εκδοτική Αθηνών, *Ιστορία του Ελληνικού Έθνους*, τόμος 9, Αθήνα, 1908, σελ. 50-55, 61-73, 152-160, 214-243
12. M. Howard, *War in European History*, Oxford, Oxford University Press, 1977, σελ. 14.
13. Το τμήμα «Το πρωινό της 25^{ης} Μαρτίου 1821.....ελεύθερο ελληνικό έδαφος, η Κρήτη» του παρόντος άρθρου έχει δημοσιευθεί με μικρές διαφορές στο Ζ. Φωτάκης, «Η ναυτική σημασία του ελληνικού γεωγραφικού χώρου και στόλου για την ασφάλεια της Ελλάδος 1830-1941», *Περίπλους Ναυτικής Ιστορίας*, τεύχος 77, σελ. 22-26 (Οκτώβριος-Νοέμβριος-Δεκέμβριος 2011).
14. Για τα προεπαναστατικά κινήματα δες Εκδοτική Αθηνών, *Ιστορία του Ελληνικού Έθνους*, τόμος 10, Αθήνα, 1974, σελ. 311-312, 322-333 και Εκδοτική Αθηνών, *Ιστορία του Ελληνικού Έθνους*, τόμος 11, Αθήνα, 1975, σελ. 64-97.
15. Μια ευσύννοπη παρουσίαση της ιστορίας της Ελληνικής Επανάστασης του 1821 βρίσκεται στην Εκδοτική Αθηνών, *Ιστορία του Ελληνικού Έθνους*, τόμος 12, Αθήνα, 1975 και στον M.S. Anderson, *The Eastern Question, 1774-1923*, New York, Macmillan St Martins Press, 1966, σελ. 53-76.
16. Σχετικά με τις ναυτικές επιχειρήσεις κατά την Επανάσταση το 1821 βλ. Σίμψας, *Το Ναυτικό στην Ιστορία των Ελλήνων*, τόμος 3, σελ. 203-248, & τόμος 4, σελ. 9-101.
17. C. V. Reed, *The British Naval Missions at Constantinople, 1908-1914*, D.Phil. Oxford, 1995, σελ. 4-7. E. Driault, M. Lhéritier, *Histoire diplomatique de la Grèce de 1821 à nos jours*, τόμος, 2, Paris, Les Presses Universitaires de France, 1926, σελ. 309-316, 328-360, 388-417. Εκδοτική Αθηνών, *Ιστορία του Ελληνικού Έθνους*, τόμος 13, Αθήνα, 1977, σελ. 137-141, 165, 217. P.R.O., ADM. 116/3098, Admiralty War Staff Memorandum, 28 Οκτωβρίου 1912.
18. Z. Fotakis, *Greek Naval Strategy and Policy, 1910-1919*, London & New York, Routledge, 2005, σελ. 4. Κ. Σουρβίνος, «Το Πρόγραμμα Εξοπλισμού του Πολεμικού Ναυτικού, 1824-1989», *Ναυτική Επιθεώρηση*, τεύχος 459, σελ. 206 (Σεπτέμβριος-Οκτώβριος 1989). Δ. Φωκάς, *Χρονικά του Ελληνικού Ναυτικού, 1833-1873*, Αθήνα, Έκδοσις Γενικού Επιτελείου Βασιλικού Ναυτικού, 1923, σελ. 19-20, 30-37.
19. Σουρβίνος, «Το Πρόγραμμα Εξοπλισμού του Πολεμικού Ναυτικού», σελ. 206. Φωκάς, *Χρονικά του Ελληνικού Ναυτικού*, σελ. 130-144.
20. Σουρβίνος, «Το Πρόγραμμα Εξοπλισμού του Πολεμικού Ναυτικού», σελ. 206-207. Φωκάς, *Χρονικά του Ελληνικού Ναυτικού*, σελ. 249-255, 270-284.
21. F.A.K. Yasamee, "Abdülhamid II and the Ottoman Defence Problem", *Diplomacy and Statecraft*, τόμος 4, τεύχος 1 σελ. 23 (Μάρτιος 1993).
22. Γεννάδιος, Αρχείο Δραγούμη, Φάκελος 7/1, Further Correspondence respecting the Affairs of Greece, London, June 1886, Telegram no. 21, Rumbold προς Salisbury, Αθήνα, 9 Ιανουαρίου 1886. P.R.O, F.O. 32/599, Haggard προς Rosebery, Αθήνα, 18 Φεβρουαρίου 1888. P.R.O, F.O. 32/607, Monson προς Salisbury, Αθήνα, 6 Ιουνίου 1889. Ν. Λεβίδης, *Ιστορία του Ελληνοτουρκικού Πολέμου* Αθήνα, Ανέστης Κωνσταντινίδης, 1899, σελ. 42, 67, 72. Π. Αργυρόπουλος, *Το Ναυτικό Πρόγραμμα της Ελλάδος*, Αθήνα, Εστία, 1907, σελ. 181-190. Δ. Πουρνάρας, *Χαρίλαος Τρικούπης: η ζωή και το έργο του*, τόμος, 2, Αθήνα, Ελεύθερος, c. 1976, σελ. 141-142, 158-61. Αναφορικά με την προσδοκία της επιμηκύνσεως του Πολέμου βλ. Γεννάδιος, Αρχείο Δραγούμη, Φάκελος 152, Brialmont-Memoire sur la défense de la Grèce, 25 Μαρτίου 1883 & Δ.Ι.Σ, Φάκελος 1705, Έκθεσις υπό Χατζηανέστη, Επιτελείο Στρατιάς Θεσσαλίας, 17 Φεβρουαρίου 1897.
23. Ν. Τσαπράζης, *Ο Πολεμικός Ναύσταθμος Σαλαμίνας*, Αθήνα, Υπηρεσία Ιστορίας Ναυτικού, 1991, σελ. 57-96.
24. Fotakis, *Greek Naval Strategy and Policy*, σελ. 8-9. Σουρβίνος, «Το Πρόγραμμα Εξοπλισμού του Πολεμικού Ναυτικού», σελ. 207-208.

25. Fotakis, *Greek Naval Strategy and Policy*, σελ. 14-18. Σουρβίνος, «Το Πρόγραμμα Εξοπλισμού του Πολεμικού Ναυτικού», σελ. 209-210.
26. Fotakis, *Greek Naval Strategy and Policy*, σελ. 35-41. Σουρβίνος, «Το Πρόγραμμα Εξοπλισμού του Πολεμικού Ναυτικού», σελ. 211-213.
27. H. Rohde, *Die Ereignisse zur See und das Zusammenwirken von Heer und Flotte im Balkankrieg 1912-1913*, Berlin, Eisenschmidt, 1914, σελ. 151-152. A. Demetrakopoulos, "The Contribution of the Hellenic Navy to the Allied Effort during the First Balkan War (1912-13)", *Acta, International Symposium of Military History 'Mudros 92' 'Paulos Melas 92'*, Athens, International Commission of Military History : Hellenic Committee of Military History, 1992, σελ. 58-59.
28. Z. Fotakis, *Greece, its Navy and the Foreign Factor, Nov. 1910-March 1919*, D.Phil. Oxford, 2003, σελ. 100-122.
29. Ενδεικτικά αναφέρουμε τα εξής έργα: R. Lagoe, *Greece and the Great Powers: the Question of the Aegean Islands, 1912-1914*, Ph.D. Ohio University, 1976. W.P. Kaldis, "Background for Conflict: Greece, Turkey, and the Aegean Islands, 1912-1914", *The Journal of Modern History*, τόμος 51, τεύχος 2, σελ. D1119-D1146 (Ιούνιος 1979). H. Gardikas-Katsiadakis, *Greece and the Balkan Imbroglia*, Athens, Syllogos pros Diadosin Ophelimon Vivlion, 1996, σελ. 151-157, 166-167, 214-18, 247-268. E.K. Helmreich, *The Diplomacy of the Balkan Wars* Cambridge MA, Harvard University Press, 1938, σελ. 331-340, 418-442; K. Λούλος, *Η Γερμανική Πολιτική στην Ελλάδα, 1897-1914*, Αθήνα, Μορφωτικό Ινστιτούτο ΑΤΕ, 1990, σελ. 147-153, 167-171, 184-199, 213-227. R.J. Crampton, *The Hollow Détente; Anglo-German Relations in the Balkans 1911-1914*, London, George Prior, 1980, σελ. 75-166.
30. Fotakis, *Greek Naval Strategy and Policy*, σελ. 83-97. Σουρβίνος, «Το Πρόγραμμα Εξοπλισμού του Πολεμικού Ναυτικού», σελ. 213.
31. Fotakis, *Greek Naval Strategy and Policy*, σελ. 119-134.
32. Fotakis, *Greece, its Navy*, σελ. 270. Mediterranean Staff Papers relating to Naval Operations from August 1917 to December 1918 (1923), σελ. 21 στο P. Halpern, *The Naval War in the Mediterranean, 1914-1918*, London, Allen and Unwin, 1987, σελ. 369.
33. Η Μικρασιατική καταστροφή και οι λόγοι που οδήγησαν σ' αυτή αποτελούν αντικείμενο πολλών έργων. Ενδεικτικά αναφέρουμε τα εξής: M.L. Smith, *Ionian Vision; Greece in Asia Minor, 1919-1922*, London, Allen Lane, 1973. Γενικόν Επιτελείον Στρατού, *Επίτομος Ιστορία Εκστρατείας Μικράς Ασίας, 1919-1922*, Αθήναι, Διεύθυνση Ιστορίας Στρατού, 1972. Th. Καρουνarakis, *Anglo-Greek Relations 1919-1922*, Ph.D. Cambridge, 1992. *Εκδοτική Αθηνών, Ιστορία του Ελληνικού Έθνους*, τόμος 15, Αθήνα, 1978, σελ. 103-199, 260-270. K. Σβολόπουλος, *Η απόφαση για την επέκταση της ελληνικής κυριαρχίας στη Μικρά Ασία: κριτική επαναψηλάφηση*, Ίκαρος, Αθήνα, 2009. Z. Φωτάκης, «Διπλωματικές και Στρατιωτικές Παράμετροι της Ελληνικής Εμπλοκής στη Μικρά Ασία, 1919-1922», *Ναυτική Επιθεώρηση*, τεύχος 582, σελ. 30-39 (Σεπτέμβριος-Οκτώβριος-Νοέμβριος 2012).
34. N. Πετρόπουλος, *Αναμνήσεις και Σκέψεις ενός Παλιού Ναυτικού, 1923-1940*, Αθήνα, 1962, σελ. 34-35. Στ. Χαρατσής, *1023 Αξιωματικοί και 22 Κινήματα*, τόμος Α., Αθήνα, Βιβλιοπωλείο Libro, 1985, σελ. 77.
35. K. Σβολόπουλος, *Η Ελληνική Εξωτερική Πολιτική, 1900-1945*, Εστία, Αθήνα, 1993, σελ. 184-225.
36. Fotakis, Z., "Greek Naval Policy and Strategy, 1923-1932", *Nausivios Chora*, τεύχος 3, σελ. 1-37 (2010). Σουρβίνος, «Το Πρόγραμμα Εξοπλισμού του Πολεμικού Ναυτικού», σελ. 213-214.
37. L.S. Stavrianos, *The World since 1500. A Global History*, Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall Inc., 1966, σελ. 526-550. P. Kennedy, *The Rise and Fall of the Great Powers. Economic Change and Military Conflict from 1500 to 2000*, New York, Random House, 1987, σελ. 292-293, 298-303, 310-312, 316. Kennedy, *The Rise and Fall of British Naval Mastery*, σελ. 267-298. L.R. Pratt, *East of Malta, West Of Suez. Britain's Mediterranean Crisis 1936-1939*, Cambridge, Cambridge University Press: 1975, σελ. 86, 167-168.
38. Σχετικά με την πορεία προς την πτώχευση και τα άμεσα επακόλουθά της βλ. Εκδοτική Αθηνών, *Ιστορία του Ελληνικού Έθνους*, τόμος 15, Αθήνα, 1978, σελ. 328-331 και N. Παντελάκης, *Δημόσια Δάνεια*, Αθήνα, Μ.Ι.Ε.Τ., 1995, σελ. 71-80.
39. Γ. Μεζεβίρης, *Τέσσαρες Δεκαετηρίδες εις την Υπηρεσίαν του Β. Ναυτικού*, Αθήνα, 1971, σελ. 128-131, 157-160. Πετρόπουλος, *Αναμνήσεις και Σκέψεις ενός Παλιού Ναυτικού*, τόμος Α, σελ. 22-29. Γ.Α.Κ. Αρχείο Μεταξά, Φάκελος 121, Συνοπτικόν Υπόμνημα Επί του Ναυτικού Προγράμματος, Πρακτικόν Ανωτάτου Ναυτικού Συμβουλίου και Εισηγητική Έκθεσις, Ιανουάριος 1935 και συνημμένος νόμος

- 6269 της 31^{ης} Αυγούστου 1934 «Περί εκτελέσεως Ναυτικού Προγράμματος». Σουρβίνος, «Το Πρόγραμμα Εξοπλισμού του Πολεμικού Ναυτικού», σελ. 214-215.
40. Πετρόπουλος, *Αναμνήσεις και Σκέψεις ενός Παλαιού Ναυτικού*, τόμος Α, σελ. 70, 76-77. Ζ. Fotakis, "Greek Naval Policy and the Great Powers, 1931 to 1940", *Journal for Maritime Research*, τόμος 13, τεύχος 1 (Μάιος 2011).
41. Δ.Γ. Φωκάς, *Έκθεσις επί της Δράσεως του Β. Ναυτικού κατά τον Πόλεμον 1940-1944* Αθήνα, Ιστορική Υπηρεσία Βασιλικού Ναυτικού, 1953, τόμος Α., σελ. 30-33. Δεσποτόπουλος, Α., *Η Πολεμική Προπαρασκευή της Ελλάδος 1923-1940*, Αθήνα, Ακαδημία Αθηνών, 1998, σελ. 186-189.
42. Πετρόπουλος, *Αναμνήσεις ενός Παλιού Ναυτικού*, τόμος Α, σελ. 107.
43. Φωκάς, *Έκθεσις επί της Δράσεως του Β. Ναυτικού*, τόμος Α., σελ. 111-113, 165, 203-206, 269-271, 306-307.
44. Ευσύννοπη θεώρηση του Ελληνο-ιταλικού πολέμου περιέχεται στο Εκδοτική Αθηνών, *Ιστορία του Ελληνικού Έθνους*, τόμος 15, Αθήνα, 1978, σελ. 411-443. Ενδεικτικά αναφέρονται επίσης τα ακόλουθα έργα : Α. Παπάγος, *Ο πόλεμος της Ελλάδος, 1940-1941*, Αθήνα, Οι φίλοι του Βιβλίου: 1970. Θ. Παπακωνσταντίνου, *Η μάχη της Ελλάδος 1940-1941*, Αθήνα, Kabanias-Hellas, 1971. Α. Σακελλαρίου, *Η θέσις της Ελλάδος κατά το Δεύτερον Παγκόσμιον Πόλεμον*, Νέα Υόρκη, Cosmos, 1944. Γενικών Επιτελείων Στρατού *Ο ελληνικός στρατός εις τον Β Παγκόσμιον Πόλεμον: Αίτια και Αφορμαί του Ελληνο-ιταλικού πολέμου 1940-1941*, Αθήνα, Διεύθυνση Ιστορίας Στρατού, 1959. Γενικών Επιτελείων Στρατού, *Η ιταλική εισβολή, 28 Οκτωβρίου - 13 Νοεμβρίου 1940* Αθήνα, Διεύθυνση Ιστορίας Στρατού, 1960. Γενικών Επιτελείων Στρατού, *Η ελληνική αντεπίθεσις, 14 Νοεμβρίου 1940 - 6 Ιανουαρίου 1941*, Αθήνα, Διεύθυνση Ιστορίας Στρατού, 1966. Γενικών Επιτελείων Στρατού, *Χειμερινά Επιχειρήσεις, 7 Ιανουαρίου-26 Μαρτίου 1941*, Αθήνα, Διεύθυνση Ιστορίας Στρατού, 1966. Δ. Κόκκινου, *Οι δύο πόλεμοι, 1940-1941*, Αθήνα Πλάτων, 1945-1946. Ε. Γκράτσι, *Η αρχή του τέλους, η επιχείρηση κατά της Ελλάδος*, Αθήνα, Εστία, 1980. Β. Πράσκα, *Εγώ εισέβαλα στην Ελλάδα*, Αθήνα, Γκοβόστης, 1999. Μ. Τσέρβι, *Ο Ελληνο-ιταλικός Πόλεμος*, Αθήνα, Alvin Redman Hellas, 1967. Η. Richter, *Η ιταλο-γερμανική επίθεση εναντίον της Ελλάδος* Αθήνα, Γκοβόστης, 1998.
45. Sadkovich, J.J., "The Italo-Greek War in Context: Italian Priorities and Axis Diplomacy", *Journal of Contemporary History*, τόμος 28, τεύχος 3, σελ. 440, 443 (Ιούλιος 1993).
46. Φωκάς, *Έκθεσις επί της Δράσεως του Β. Ναυτικού*, τόμος Α, σελ. 114-120-133, 180-182, 208-211. Ε. Καββαδίας, *Ο ναυτικός πόλεμος του 1940 όπως τον έζησα : Αναμνήσεις 2 Μαρτίου 1935-25 Μαρτίου 1943*, Αθήνα, Πυρσός, 1950, σελ. 174
47. Φωκάς, *Έκθεσις επί της Δράσεως του Β. Ναυτικού*, τόμος Α., σελ. 192-203, 577-578
48. Καββαδίας, *Ο Ναυτικός Πόλεμος του 1940*, σελ. 109
49. Όλο το M.L. Van Creveld, *Hitler's Strategy 1940-1941. The Balkan Clue*, Cambridge, Cambridge University Press, 1973 περιέχει σχετικό υλικό κυρίως όμως οι σελίδες 29-30, 84 και 166.
50. Εκδοτική Αθηνών, *Ιστορία του Ελληνικού Έθνους*, τόμος 15, Αθήνα, 1978, σελ. 444-454. Για εκτενέστερη θεώρηση βλέπε: Γενικών Επιτελείων Στρατού, *Αγώνες εις την Ανατολικήν Μακεδονίαν και Δυτικήν Θράκην, 1941*, Αθήνα, Διεύθυνσις Ιστορίας Στρατού, 1956. Γενικών Επιτελείων Στρατού, *Το τέλος μιας εποποιΐας, Απρίλιος 1941*, Αθήνα, Διεύθυνσις Ιστορίας Στρατού, 1959. Γενικών Επιτελείων Στρατού, *Η μάχη της Κρήτης*, Αθήνα, Διεύθυνσις Ιστορίας Στρατού, 1967.
51. Φωκάς, *Έκθεσις επί της Δράσεως του Β. Ναυτικού*, τόμος Α., σελ. 384-482.
52. Ό.π., σελ. 493-494. Καββαδίας, *Ο Ναυτικός Πόλεμος του 1940*, σελ. 241-242.
53. Φωκάς, *Έκθεσις επί της Δράσεως του Β. Ναυτικού*, τόμος Β, Αθήνα, Ιστορική Υπηρεσία Βασιλικού Ναυτικού, 1954, σελ. 78.
54. Καββαδίας, *Ο Ναυτικός Πόλεμος του 1940*, σελ. 358, 394. Κ. Αλεξανδρής, *Το Ναυτικόν μας κατά την Πολεμικήν Περίοδον, 1941-1945* Αθήνα, Αετός, 1952, σελ. 85-86.
55. Βλέπε ενδεικτικά Φωκάς, *Έκθεσις επί της Δράσεως του Β. Ναυτικού*, τόμος Β, σελ. 58-64, 334.
56. Ό.π., σελ. 508-511. Αλεξανδρής, *Το Ναυτικόν μας κατά την Πολεμικήν Περίοδον*, σελ. 126-127.
57. Καββαδίας, *Ο Ναυτικός Πόλεμος του 1940*, σελ. 433, 512-513, 521-522, 529. Φωκάς, *Έκθεσις επί της Δράσεως του Β. Ναυτικού*, τόμος Β, σελ. 499-503.
58. Καββαδίας, *Ο Ναυτικός Πόλεμος του 1940*, σελ. 162.
59. Αλεξανδρής, *Το Ναυτικόν μας κατά την Πολεμικήν Περίοδον*, σελ. 131. Φωκάς, *Έκθεσις επί της Δράσεως του Β. Ναυτικού*, τόμος Β, σελ. 255-268, 345-348.
60. Φωκάς, *Έκθεσις επί της Δράσεως του Β. Ναυτικού*, τόμος Β., σελ. 288-309, 485-493.
61. Αλεξανδρής, *Το Ναυτικό μας κατά την Πολεμικήν Περίοδον*, σελ. 84. Καββαδίας, *Ο Ναυτικός Πόλεμος του 1940*, σελ. 401.

62. <http://www.hellenicnavy.gr/history.asp>
63. J.C. Murray, «Ο Ρόλος του Βασιλικού Ναυτικού κατά τον Συμμοριτοπόλεμον», *Ναυτική Επιθεώρησης*, τεύχος 337 σελ. 304-305 (Μάιος-Ιούνιος 1969). Γενικότερα βλέπε για τον Εμφύλιο Πόλεμο, μεταξύ πλήθους σχετικών κειμένων, την ενδεικτική και ευσύνοπτη αναφορά στο Εκδοτική Αθηνών, *Ιστορία του Ελληνικού Έθνους*, τόμος 16, Αθήνα, 2000, σελ. 101-158.
64. Σ. Μανωλάς «Η Συμβολή του Πολεμικού Ναυτικού εις τον Συμμοριτοπόλεμον», *Ναυτική Επιθεώρησης*, τεύχος 268, σελ. 373-382 (1958), .
65. Ι. Στεφανίδης, *Ασύμμετροι Εταίροι. Οι Ηνωμένες Πολιτείες και η Ελλάδα στον Ψυχρό Πόλεμο, 1953-1961*, Αθήνα, Πατάκης, 2003, σελ. 86. Εκδοτική Αθηνών, *Ιστορία του Ελληνικού Έθνους*, τόμος 16, σελ. 239.
66. G. Hartcup, *The Silent Revolution. The Development of Conventional Weapons, 1945-1984*, London and New York, Brassey's UK, 1993, σελ. 110. E. Hatzivassileiou, *Frontline State. 1952-1967. Greece and the Cold War*, London and New York, Routledge, 2006, σελ. 29.
67. Εκδοτική Αθηνών, *Ιστορία του Ελληνικού Έθνους*, τόμος 16, σελ. 239-240. Στεφανίδης, Ι., *Ασύμμετροι Εταίροι*, σελ. 86
68. Jordan, R.S., *Alliance Strategy and Navies. The Evolution and Scope of NATO's Maritime Dimension* London, Pinter, 1990, σελ. 99-103. Grygiel, J., "The Dilemmas of US Maritime Supremacy in the Early Cold War", the *Journal of Strategic Studies*, τόμος 28, τεύχος 2, σελ. 203 (Απρίλιος 2005).
69. Στεφανίδης, *Ασύμμετροι Εταίροι*, σελ. 91. Εκδοτική Αθηνών, *Ιστορία του Ελληνικού Έθνους*, τόμος 16, σελ. 240.
70. Hartcup, *The Silent Revolution*, σελ. 110. Ι. Βαληνάκης, *Εξωτερική Πολιτική και Εθνική Άμυνα. Η Ελλάδα στο Σύστημα Ανατολής Δύσης* Θεσσαλονίκη, Παρατηρητής, 1987, σελ. 76-77. Εκδοτική Αθηνών, *Ιστορία του Ελληνικού Έθνους*, τόμος 16, σελ. 254. Στεφανίδης, *Ασύμμετροι Εταίροι*, σελ. 87-88. Hatzivassileiou, *Frontline State*, σελ. 71.
71. <http://www.hellenicnavy.gr/history.asp>
72. Στεφανίδης, *Ασύμμετροι Εταίροι*, σελ. 277, 280-281. Hatzivassileiou, *Frontline State*, σελ. 90.
73. Anthony, I., *The Naval Arms Trade*, Oxford, Oxford University Press, 1990, σελ. 28.
74. <http://www.hellenicnavy.gr/history.asp>
75. Εκδοτική Αθηνών, *Ιστορία του Ελληνικού Έθνους*, τόμος 16, σελ. 253. Hatzivassileiou, *Frontline State*, σελ. 72, 143, 149. Στεφανίδης, *Ασύμμετροι Εταίροι*, σελ. 91, 281. Ν. Κουρής, *Ελλάδα-Τουρκία: ο πεντηκονταετής «πόλεμος»*, Αθήνα, Εκδόσεις Λιβάνη, 1997, σελ. 28, 41, 77-78.
76. Hatzivassileiou, *Frontline State*, σελ. 147.
77. J.B. Hattendorf, *The Evolution of the U.S. Navy's Maritime Strategy, 1977-1986*, Newport Rhode Island, Naval War College, 2004, σελ. 3, 50. R. Kurth, "Gorshkov's Gambit", *The Journal of Strategic Studies*, τόμος 28, τεύχος. 2, σελ. 267, 276 (Απρίλιος 2005).
78. Βαληνάκης, *Εξωτερική Πολιτική και Εθνική Άμυνα*, σελ. 47, 74. J.W. Lewis, *The Strategic Balance in the Mediterranean*, Washington, D.C., American Enterprise Institute for Public Policy Research, 1976, σελ. 2-3.
79. Βαληνάκης, *Εξωτερική Πολιτική και Εθνική Άμυνα*, σελ. 75-77.
80. Εκδοτική Αθηνών, *Ιστορία του Ελληνικού Έθνους*, τόμος 16, σελ. 284-285. Ι. Βαληνάκης, *Εισαγωγή στην Ελληνική Εξωτερική Πολιτική, 1949-1988*, Θεσσαλονίκη, Παρατηρητής, 1989, σελ. 111-116, 170-178.
81. Βαληνάκης, *Εξωτερική Πολιτική και Εθνική Άμυνα*, σελ. 73.
82. Hatzivassileiou, *Frontline State*, σελ. 167. Εκδοτική Αθηνών, *Ιστορία του Ελληνικού Έθνους*, τόμος 16, σελ. 223-236, 287-290, 472-481. Anthony, *The Naval Arms Trade*, σελ. 23, 29.
83. Κ. Αλεξανδρής, *Αι Ναυτικά Επιχειρήσεις του υπέρ της Ανεξαρτησίας Αγώνος, 1821-1829*, Αθήνα, Ναυτική Επιθεώρησης, 1930, σελ. 102, 156-157. Εκδοτική Αθηνών, *Ιστορία του Ελληνικού Έθνους*, τόμος 14, Αθήνα, 1977, σελ. 326. Σουρβίνος, «Το Πρόγραμμα Εξοπλισμού του Πολεμικού Ναυτικού», σελ. 216-217.
84. Εκδοτική Αθηνών, *Ιστορία του Ελληνικού Έθνους*, τόμος 16, σελ. 324, 329, 345-349.
85. Βαληνάκης, *Εξωτερική Πολιτική και Εθνική Άμυνα*, σελ. 39.
86. Σουρβίνος, «Το Πρόγραμμα Εξοπλισμού του Πολεμικού Ναυτικού», σελ. 217. Anthony, *The Naval Arms Trade*, σελ. 15.
87. Hattendorf, *The Evolution of the U.S. Navy's Maritime Strategy, 1977-1986*, σελ. 59. Εκδοτική Αθηνών, *Ιστορία του Ελληνικού Έθνους*, τόμος 16, σελ. 374-376, 381-382. M. Vego, "Soviet and Russian Strategy in the Mediterranean since 1945" στο J. B. Hattendorf (ed.), *Naval Policy and*

Strategy in the Mediterranean. Past Present and Future, London, Portland Oregon, Frank Cass, 2000, σελ. 179.

88. Βαληνάκης, *Εξωτερική Πολιτική και Εθνική Άμυνα*, σελ. 276, 325.

89. Εκδοτική Αθηνών, *Ιστορία του Ελληνικού Έθνους*, τόμος 16, σελ. 382, 393.

90. Σουρβίνος, «Το Πρόγραμμα Εξοπλισμού του Πολεμικού Ναυτικού», σελ. 218-219.

91. Εκδοτική Αθηνών, *Ιστορία του Ελληνικού Έθνους*, τόμος 16, σελ. 409-412.

92. http://en.wikipedia.org/wiki/Hellenic_Navy

93. <http://www.hellenicnavy.gr/history.asp>

Η Ναυτική Ισχύς στη Στρατηγική του Βενιζέλου, 1910-1932

Ζήσης Φωτάκης

Σχολή Ναυτικών Δοκίμων, Τομέας Ανθρωπιστικών και Πολιτικών Επιστημών

Περίληψη. Η ναυτική ισχύς ως συνάρθρωση της ναυτικής σημασίας του ελληνικού, γεωγραφικού χώρου και στόλου στο πλαίσιο της διακυβέρνησης της Ελλάδας από τον Ελευθέριο Βενιζέλο αποτελεί το αντικείμενο του παρόντος άρθρου. Αρχικά μελετάται η ποικιλότροπη αξιοποίηση από τον Κρητικό πολιτικό των στρατηγικών πλεονεκτημάτων που επεφύλασσε η χρήση των ελληνικών θαλασσών και του ελληνικού, ελαφρού στόλου από τις Μεγάλες Δυνάμεις. Στη συνέχεια αποτιμάται η θεωρητική ορθότητα της δομής δυνάμεως του Ελληνικού Πολεμικού Ναυτικού επί Βενιζέλου και περιγράφεται η εφαρμογή της αλλά και οι διπλωματικοί και οικονομικοί περιορισμοί που μετρίασαν την ποιότητά της. Η υστέρηση αυτή, καταλήγει το άρθρο, αντισταθμίστηκε από τη σημαντική βελτίωση της ναυτικής οργάνωσης, παιδείας και της εκγύμνασης των στελεχών του Ελληνικού Πολεμικού Ναυτικού, που συντελέστηκε, σε σημαντικό βαθμό, μέσω της σχετικής δράσης των Αγγλικών Ναυτικών Αποστολών στην Ελλάδα μεταξύ του 1911 και του 1932.

Abstract. Sea power, defined as the articulation of the geographic importance of Greece from the naval perspective and the capabilities of her navy during the Venizelos Administrations between 1911 and 1932, constitutes the subject of this article. It starts with an examination of the way by which the Cretan statesman utilized for Greece the strategic advantages that the Greek seas and light fleet could confer to the Great Powers. The theoretical validity of the force structure of the Greek Navy during his Administrations is examined then and the financial and political constraints that compromised the material quality of the Greek war-fleet are also shown. It is finally pointed out that the considerable development of Greek naval organization, education and training made up for the contemporary, suboptimal force structure of the Greek Navy. This development was largely due to the work of the British naval missions to Greece between 1911 and 1932.

Λέξεις κλειδιά: Ελληνικό Πολεμικό Ναυτικό, Ελευθέριος Βενιζέλος, Βαλκανικοί Πόλεμοι, Α΄ Παγκόσμιος Πόλεμος, Μεσοπόλεμος, Μεγάλες Δυνάμεις, Αγγλία.

Η διακυβέρνηση του Ελευθερίου Βενιζέλου πιστώνεται με την προώθηση της εθνικής ολοκλήρωσης και του εκσυγχρονισμού του νεοελληνικού κράτους μεταξύ του 1910 και του 1932 [1]. Ένα σημαντικό εργαλείο της διακυβέρνησης αυτής αποτέλεσε και η ελληνική, ναυτική ισχύς που αξίζει να εξετασθεί ευσύννοπτα. Στόχος λοιπόν του παρόντος κειμένου είναι να διευκρινισθεί ο τρόπος αξιοποίησης από το Βενιζέλο της ναυτικής σημασίας του ελληνικού, γεωγραφικού χώρου και στόλου για την εξυπηρέτηση των εθνικών στόχων.

Η Κρητική καταγωγή του Ελευθερίου Βενιζέλου και ο σημαίνων ρόλος της Μεγάλης Βρετανίας στο Κρητικό Ζήτημα αλλά και στη Μεσόγειο γενικότερα επηρέασαν σημαντικά το σύνολο, σχεδόν, της κυβερνητικής διαδρομής του. Από τις πρώτες κιόλας μέρες της ανόδου του στον πρωθυπουργικό θώκο ο Ελευθέριος Βενιζέλος στράφηκε προς την κατεύθυνση της Μεγάλης Βρετανίας προσκαλώντας Αγγλική Ναυτική Αποστολή στην Ελλάδα παρά το γεγονός ότι κάτι τέτοιο συνεπάγονταν αυξημένο οικονομικό κόστος για το γαλλικά οργανωμένο Ελληνικό Πολεμικό Ναυτικό. Ένα κόστος, το οποίο θα μπορούσε να είχε αποφευχθεί δεδομένου ότι η Γαλλία είχε προσφερθεί να στείλει Γαλλική ναυτική αποστολή στην Ελλάδα τον Ιανουάριο του 1911 [2].

Η εξασφάλιση Αγγλικής ναυτικής αποστολής για την Ελλάδα από τον Βενιζέλο, τρία μόλις χρόνια μετά την αποτυχία αντίστοιχης προσπάθειας της κυβέρνησης Θεοτόκη [3], αποτέλεσε το εφαλτήριο της κλιμάκωσης της αγγλόφιλης πολιτικής του. Μια πολιτική που σαφώς ενθαρρύνθηκε από το γεγονός ότι η Αγγλική κυβέρνηση δεν πρόβαλε αντιρρήσεις όταν της γνωστοποιήθηκε παρασκησιακά στα τέλη Σεπτεμβρίου του 1912 η πρόθεση της Ελλάδας να καταλάβει το Μούδρο στο ξεκίνημα του Α΄ Βαλκανικού Πολέμου [4]. Η Βρετανική αυτή ευμένεια έναντι της Ελλάδας οφειλόταν στην ανάγκη χρήσης από το Βρετανικό στόλο, ναυτικών ορμητηρίων για ελαφρές μονάδες στη Δυτική Ελλάδα (αρχικά στην Κέρκυρα, αργότερα στην Κεφαλονιά και, τέλος, στον κόλπο του Αμβρακικού), ώστε να εξισοροτηθεί η πιθανή αριθμητική υπεροχή των Μεσογειακών στόλων των Κεντρικών Αυτοκρατοριών στο διάστημα 1912-1915 [5]. Η ανάγκη αυτή, που γνωστοποιήθηκε στην ελληνική πλευρά το φθινόπωρο του 1912, καταμεσίς του Πρώτου Βαλκανικού Πολέμου, βρήκε άμεση ανταπόκριση από το Βενιζέλο που διαβεβαίωσε τον Churchill ότι «μια μεγάλη Ελλάδα με ένα αποτελεσματικό ναυτικό θα μπορούσε να καταστεί ένας πολύ χρήσιμος φίλος για την Αγγλία στην Εγγύς Ανατολή» [6]. Σε συνέχεια της διαβεβαίωσης αυτής ο Έλληνας πρωθυπουργός ταξίδεψε στο Λονδίνο το χειμώνα του 1912-1913, όπου μετά από μια σειρά παρασκησιακών επαφών με κορυφαίους υπουργούς της κυβέρνησης Asquith και συγκεκριμένα τους Lloyd George, Winston Churchill και Edward Grey, συμφωνήθηκε η παραχώρηση ναυτικών διευκολύνσεων στο Βρετανικό στόλο στο νησί της Κεφαλονιάς, η πρόσκτηση από το Ελληνικό Πολεμικό Ναυτικό ελαφρών μονάδων που θα μπορούσαν να βοηθήσουν επιχειρησιακά το Βρετανικό στόλο της Μεσογείου και η παραχώρηση της Κύπρου στην Ελλάδα [7].

Η άτυπη αυτή συμφωνία δεν εφαρμόστηκε πλήρως, καθώς βελτιώθηκε η ναυτική θέση της Βρετανίας το τελευταίο έτος πριν από την έναρξη του Α΄ Παγκοσμίου Πολέμου λόγω, κυρίως, της σημαντικής επιβράδυνσης των Αυστρογερμανικών, ναυτικών εξοπλισμών. Παρά, όμως την παρεπόμενη μείωση της ναυτικής αξίας του ελληνικού, γεωγραφικού χώρου και στόλου στα μάτια των Άγγλων ιθυνόντων, η Βρετανία υποστήριξε τις ελληνικές διεκδικήσεις στο Αιγαίο [8] με αποτέλεσμα όταν ξέσπασε ο Α΄ Παγκόσμιος Πόλεμος η κυβέρνηση Βενιζέλου να επιτρέψει τη χρήση ελληνικών, ναυτικών ορμητηρίων από το Βρετανικό στόλο και να προσφέρει τη συμμαχία της στην Αντάντ τον Αύγουστο του 1914. Η προσφορά αυτή δεν έγινε τότε δεκτή για να μη προκληθεί δυσμενής Τουρκική αντίδραση [9]. Μια προσφορά που επαναλήφθηκε με την ευκαιρία της εκστρατείας των Δαρδανελίων το 1915 και που τελικά τελεσφόρησε το καλοκαίρι του 1917 με την επίσημη είσοδο της Ελλάδας στον Πρώτο Παγκόσμιο Πόλεμο στο πλευρό της Αντάντ [10].

Η Ελληνική, στρατιωτική συμμετοχή στον Πρώτο Παγκόσμιο Πόλεμο και η σημαντική προσφορά των λιμένων και του πολεμικού ναυτικού της Ελλάδας στο Συμμαχικό Αγώνα ενίσχυσαν τις ελληνικές διεκδικήσεις επί της Μικράς Ασίας [11], διεκδικήσεις που επενδύονταν από την επαναλαμβανόμενη διαβεβαίωση του Βενιζέλου ότι «κάθε ναυτική βάση ή λιμάνι που βρίσκεται εντός της ελληνικής επικράτειας ή που πρόκειται να περιέλθει σ' αυτή θα βρίσκεται πάντα στην απόλυτη διάθεση της Μεγάλης Βρετανίας» [12]. Όταν τελικά οι ελληνικές διεκδικήσεις ευοδώθηκαν μετά από Βρετανική, κυρίως, επίτευση με την απόβαση ελληνικού εκστρατευτικού σώματος στη Σμύρνη το Μάιο του 1919 και με την Συνθήκη των Σεβρών τον

Ιούλιο της επόμενης χρονιάς [13] πάλι ναυτική ήταν η βάση της αλυτρωτικής πολιτικής Βενιζέλου. Όπως χαρακτηριστικά σημείωσε ο Κρης πολιτικός

...οι πολλοί αγνοούν ότι η παραχωρηθείσα εις την Ελλάδα περιφέρεια της Σμύρνης κείται εγγύτερον προς το κέντρον της Ευρωπαϊκής Ελλάδος παρ' όσον κείται αι βόρειοι επαρχίαι της, ήτοι η Ήπειρος, η Μακεδονία, η Θράκη, και ότι επομένως η υπεράσπιση των ορίων της περιφερείας ταύτης είναι πολύ ευκολωτέρα, όταν ληφθή υπ' όψει αι ευκολίαι των μεταφορών τας οποίας της παρέχει ο σχετικάς μεγάλος εμπορικός στόλος της και το γεγονός ότι δια της συνθήκης του Neuilly και της Συνθήκης των Σεβρών και η Βουλγαρία και η Τουρκία εστερούντο του δικαιώματος να έχουν πολεμικόν στόλον... [14]

Συνέχισε δε ο Ελευθέριος Βενιζέλος διατρανώνοντας την πίστη του στο εφικτό της Μικρασιατικής πολιτικής του

...ότι εξ άλλου επί της Δυτικής Μικράς Ασίας επέκτασις του Ελληνικού κράτους δεν υπερέβαινε τας δυνάμεις αυτού απέδειξε το γεγονός ότι εφόσον δεν διελύετο η συμμαχία ημών προς τας δύο δυτικάς δυνάμεις ήτοι επί 18 μήνας ο Τουρκικός στρατός ήτο ανίκανος και να παρενοχλήσει καν σοβαρώς τον Ελληνικόν, και ότι μετά την διάλυσιν της συμμαχίας ταύτης, την υπό των τέως Συμμάχων κατάσχεσιν των εις την Εθνικήν Τράπεζαν της Ελλάδος ανηκόντων χρημάτων και την εντεύθεν λιμοκτόνησιν του Ελλ. στρατού, την υπό του Γαλλικού και Ιταλικού στόλου βιαίαν απελευθέρωσιν των πλοίων όσα ο ελληνικός στόλος συνελάμβανεν ως παραβιάζοντα τον αποκλεισμόν των Τουρκικών παραλίων υπό των τέως συμμάχων της Ελλάδος, την υπό των τέως συμμάχων της Ελλάδος εξασφάλισιν της Τουρκικής πρωτευούσης από Ελληνικής επιθέσεως, πάλιν ο Ελληνικός στρατός κατόρθωσε να διατηρηθή εις Μικράν Ασίαν επί 22 μήνας μέχρις ότου εκ των στερήσεων καταστή ανίκανος προς περαιτέρω δράσιν... [15]

Μετά τη διαπραγμάτευση της Συνθήκης της Λωζάννης στην οποία τερματίστηκε το όραμα της Μεγάλης Ιδέας (Ιούλιος 1923) ο Ελευθέριος Βενιζέλος ιδιώτευσε επί μια τετραετία μέχρι την επανεκλογή του στον πρωθυπουργικό θώκο το 1928. Στην κυβερνητική τετραετία που ακολούθησε κυρίαρχος στόχος της διακυβέρνησής του ήταν ο σεβασμός του status quo, η πίστη του στο ρυθμιστικό ρόλο της Κοινωνίας των Εθνών και η επίτευξη της ανασύνταξης της χώρας μέσω της τήρησης ίσων αποστάσεων έναντι των Μεγάλων Ευρωπαϊκών Δυνάμεων και μέσω της εξομάλυνσης των σχέσεων της Ελλάδας με τους γείτονές της [16]. Στο πλαίσιο αυτό, η ναυτική πολιτική του εστιάστηκε, κυρίως, στη βελτιστοποίηση της δομής δυνάμεως του Ελληνικού Πολεμικού Ναυτικού, τη σύνθεση δηλαδή του ελληνικού στόλου από συγκεκριμένους τύπους μονάδων, κατά τρόπο που να μην προκληθεί η ζηλοτυπία των Μεγάλων Δυνάμεων ή των γειτόνων της Ελλάδας [17]. Πριν όμως τη διαπραγμάτευση αυτής της παραμέτρου κρίνεται σκόπιμη μια, αδρή ανασκόπηση της εξελικτικής πορείας των ναυτικών αντιλήψεων του Βενιζέλου από την πρώτη πρωθυπουργία του.

Όταν ο Βενιζέλος ανέλαβε την πρωθυπουργία της χώρας τον Οκτώβριο του 1910 επιφορτίστηκε, μεταξύ άλλων, με το χαρτοφυλάκιο του Υπουργείου των Ναυτικών. Ως υπεύθυνος υπουργός πίστευε μέχρι και την δεύτερη αποπομπή του από το πρωθυπουργικό αξίωμα το φθινόπωρο του 1915 ότι το Ελληνικό Πολεμικό Ναυτικό ήταν σπάταλο συγκριτικά με το ελληνικό εμπορικό ναυτικό και φιλοδοξούσε να το αναμορφώσει με βάση τα οικονομικά μα λειτουργικά, σκανδιναβικά πρότυπα που ήταν βασισμένα σε ελαφρές, κυρίως, μονάδες και ναυτική αεροπορία. Η τάση αυτή του Βενιζέλου ενισχύθηκε κι από τις σχετικές Βρετανικές υποδείξεις που συνιστούσαν, άλλωστε, προαπαιτούμενο για την επιχειρησιακή συνεργασία των δύο στόλων, όπως ήδη αναφέρθηκε [18]. Ο προσανατολισμός του Βενιζέλου προς τις ελαφρές

μονάδες και τη ναυτική αεροπορία δεν άλλαξε στη διάρκεια της κυβερνητικής του τετραετίας 1928-1932, όπως επίσης δεν άλλαξε κι ο τρόπος αξιοποίησης των ναυτικών εξοπλιστικών προγραμμάτων για την εξασφάλιση πολιτικο-οικονομικών ανταλλαγμάτων [19]. Όπως δηλαδή το σύνολο, σχεδόν, των ναυτικών παραγγελιών της διετίας 1912-1914 δόθηκε στη Γερμανία και τη Γαλλία για τη διασφάλιση της διπλωματικής στήριξης της Γερμανίας και Γαλλικών πιστώσεων [20] το ίδιο συνέβη και με τις ναυτικές παραγγελίες της διετίας 1929-1930 που δόθηκαν, σχεδόν, αποκλειστικά στην Ιταλία. Η χώρα αυτή προσέφερε ναυτικές μονάδες σε συμφέρουσες τιμές και όρους αποπληρωμής. Προσέφερε επίσης τη δυνατότητα αποφασιστικής μεσολάβησης για την εξομάλυνση των ελληνο-τουρκικών σχέσεων που επισφραγίστηκε με τη συνομολόγηση Ελληνο-τουρκικού Συμφώνου Φιλίας και Πρωτοκόλλου ελέγχου των ναυτικών εξοπλισμών τον Οκτώβριο του 1930 [21].

Μπορεί η προτίμηση του Βενιζέλου για τις ελαφρές ναυτικές μονάδες και τη ναυτική αεροπορία, καθώς και ο τρόπος αξιοποίησης των ναυτικών εξοπλιστικών προγραμμάτων να παρέμειναν σταθεροί στην περίοδο 1910-1932 άλλαξαν όμως οι προσδοκίες του για την κυριαρχία στη θάλασσα, ακολουθώντας και την εξέλιξη της ναυτικής στρατηγικής. Πιο συγκεκριμένα, ο Βενιζέλος επεδίωξε τη συγκρότηση ενός ναυτικού που θα μπορούσε να κυριαρχήσει στη θάλασσα στους Βαλκανικούς Πολέμους, κλείνοντας τον αντίπαλο στα λιμάνια του και καταλαμβάνοντας τα τουρκοκρατούμενα νησιά και την Ευρωπαϊκή πλευρά του Αιγαίου. Για αυτό και συνηγόρησε στην αγορά θωρακισμένων καταδρομικών για τον ελληνικό στόλο, επιπλέον των ελαφρών μονάδων. Έφτασε μάλιστα να αποδεχθεί, έστω και απρόθυμα, την ανάγκη αγοράς dreadnought από την Ελλάδα για τη διασφάλιση σε διπλωματικό και, εν μέρει, και σε οπλικό επίπεδο της ελληνικής κυριαρχίας στο Αιγαίο αμέσως μετά τους δύο Βαλκανικούς Πολέμους [22]. Την τετραετία 1928-1932, όμως, όταν δεν ακολουθούσε πια ο Βενιζέλος αλυτρωτική πολιτική και ήταν επηρεασμένος από το Γάλλο θεωρητικό της ναυτικής στρατηγικής, ναύαρχο Castex, αρκούσαν στην επίτευξη μερικήτερης/τοπικής κυριαρχίας στη θάλασσα στο βαθμό που εξασφαλιζονταν ταχύτερη επιστράτευση του ελληνικού στρατού από αυτή του Τουρκικού, μέσω της παρενόχλησης των ναυτικών μεταφορών του αντιπάλου. Για το λόγο αυτό, τίποτα μεγαλύτερο του αντιτορπιλικού δεν ήταν αναγκαίο για το μεσοπολεμικό, Ελληνικό, Πολεμικό Ναυτικό κατά το Βενιζέλο [23].

Κι ενώ οι ναυτικές αντιλήψεις του Βενιζέλου κατά το διάστημα 1910-1932 εμφανίζονται ως ενδεδειγμένες, επί της αρχής, η εφαρμογή τους δεν υπήρξε πάντα επιτυχημένη. Μεταξύ του 1912 και του 1914 αφιερώθηκε το μεγάλο ποσό των 13 εκατομμυρίων λιρών Αγγλίας σε ναυτικούς εξοπλισμούς. Με το ποσό αυτό θα αποκτούσε η Ελλάδα ναυτικές μονάδες κατασκευασμένες σε πέντε χώρες που θα έφεραν ναυτικά πυροβόλα εικοσιοκτώ διαμετρημάτων που θα είχαν παραχθεί από οκτώ διαφορετικές εταιρείες. Παρήγγειλε επίσης υλικό ασυρμάτου από τρεις εταιρείες, μια καταπληκτική ποικιλία ηλεκτρολογικού υλικού και τορπίλες και από τις πέντε, σχετικές εταιρείες που υπήρχαν τότε στον κόσμο. Θα αποκτούσε δηλαδή η Ελλάδα -αν δεν είχε μεσολαβήσει ο Α Παγκόσμιος Πόλεμος και δεν είχε ματαιωθεί το σημαντικότερο τμήμα του ναυτικού προγράμματος Βενιζέλου- ένα μουσείο ναυτικής τεχνολογίας που θα ήταν δύσκολο τόσο να αξιοποιηθεί πλήρως όσο και να συντηρηθεί [24]. Ανάλογη ποιοτικά εμπειρία, αν και σε πολύ μικρότερο βαθμό, συνιστούσαν οι ελληνικές, ναυτικές παραγγελίες από την Ιταλία τη διετία 1929-1930 [25].

Το ανομοιογενές και κάποιες φορές υποδεέστερο ποιοτικά ναυτικό υλικό που παραγγέλθηκε επί των κυβερνήσεων Βενιζέλου αντισταθμίστηκε από τη σημαντική βελτίωση της ελληνικής ναυτικής παιδείας και οργάνωσης λόγω της σχετικά, νεοσύστατης Σχολής Ναυτικών Δοκίμων στον Πειραιά και του εκπαιδευτικού και οργανωτικού έργου των Αγγλικών Ναυτικών Αποστολών στην Ελλάδα [26]. Είναι πάντως αξιοσημείωτο ότι ο Βενιζέλος και φίλοι του αξιωματικοί, όπως ο ναύαρχος Κουντουριώτης, διαφώνησαν έντονα ορισμένες φορές, αν και συνήθως όχι χωρίς λόγο, με τα μέλη των αποστολών αυτών επιβραδύνοντας την προσφορά τους στο Ελληνικό Ναυτικό [27].

Συνοψίζοντας, η ναυτική ισχύς, ως σύζευξη της ναυτικής σημασίας του ελληνικού, γεωγραφικού χώρου και στόλου, υπήρξε ένα, κατά κανόνα, αποτελεσματικό εργαλείο στη διακυβέρνηση της Ελλάδας από τον Ελευθέριο Βενιζέλο. Η δομή δυνάμεως του Ελληνικού Πολεμικού Ναυτικού υπολειπόταν επί Βενιζέλου, παρά τη θεωρητική αρτιότητά της. Η βελτίωση της εκπαίδευσης και της οργάνωσης του Ελληνικού Πολεμικού Ναυτικού με τη βοήθεια Αγγλικών ναυτικών αποστολών αντιστάθμισε την υστέρηση αυτή.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Σχετικά με το μεταρρυθμιστικό έργο του Ελευθερίου Βενιζέλου βλέπε, μεταξύ άλλων, Α. Βερέμης (επιμ.), *Μελετήματα γύρω από το Βενιζέλο και την Εποχή του*, Φιλιππούτης, Αθήνα, 1980 και Α. Διαμαντόπουλος, *Ο Βενιζελισμός της ανόρθωσης*, Σάκκουλας, Αθήνα-Θεσσαλονίκη, 1985.
2. Z. Fotakis, *Greek Naval Strategy and Policy, 1910-1919*, London & New York Routledge, 2005, σελ. 24, 26.
3. Ό.π., σελ. 27.
4. Ό.π., σελ. 48.
5. Ό.π., σελ. 51-55.
6. Ό.π., σελ. 58.
7. Ό.π., σελ. 59-65.
8. Ό.π., σελ. 81-82.
9. Ό.π., σελ. 105-108.
10. Ό.π., σελ. 112, 135.
11. Ό.π., σελ. 137-142.
12. Z. Fotakis, "The Kelly Naval Mission to Greece, 1919-1921", *Byzantine and Modern Greek Studies*, τόμος 30, τεύχος 2, σελ. 185 (2006).
13. Εκδοτική Αθηνών, *Ιστορία του Ελληνικού Έθνους. Νεώτερος Ελληνισμός από το 1913 ως το 1941*, Αθήνα, 1978, σελ. 113-144.
14. Μπενάκειο, Αρχείο Βενιζέλου, Φάκελος 274, Έγγραφο 62^α, 1927, σελ. 4.
15. Ό.π., σελ. 6.
16. Z. Fotakis, "Greek Naval Policy and Strategy, 1923-1932", *Nausivios Chora*, σελ. 20-21 (2010).
17. Ό.π., σελ. 21-26.
18. Fotakis, *Greek Naval Strategy and Policy, 1910-1919*, σελ. 35, 61-65.
19. Fotakis, "Greek Naval Policy and Strategy, 1923-1932", σελ. 21-26.
20. Fotakis, *Greek Naval Strategy and Policy, 1910-1919*, σελ. 36-41, 87-97.
21. Fotakis, "Greek Naval Policy and Strategy, 1923-1932", σελ. 24-25.
22. Fotakis, *Greek Naval Strategy and Policy, 1910-1919*, σελ. 35-41, 80, 84-85, 87-97.
23. Fotakis, "Greek Naval Policy and Strategy, 1923-1932", σελ. 23, 26. Εφημερίς των Συζητήσεων της Βουλής, Δεύτερη Περίοδος, Δεύτερη Σύνοδος, 34^η Συνεδρίαση, Ομιλία Βενιζέλου σελ. 555-559.
24. Fotakis, *Greek Naval Strategy and Policy, 1910-1919*, σελ. 96-97.
25. Fotakis, "Greek Naval Policy and Strategy, 1923-1932", σελ. 25.
26. Ό.π., σελ. 6-9, 16-20. Z. Fotakis, "Greek naval policy and the Great Powers, 1931-1940", *Journal for Maritime Research*, τόμος 13, τεύχος 1, σελ. 62-63 (Μάιος 2011). Fotakis, *Greek Naval Strategy and Policy, 1910-1919*, σελ. 30-35, 73-79, 140-145.
27. Fotakis, *Greek Naval Strategy and Policy, 1910-1919*, σελ. 67-68, 84-85, 108, 112-113, 121-122, 145-147. Fotakis, "Greek Naval Policy and Strategy, 1923-1932", σελ. 26. Fotakis, "The Kelly Naval Mission to Greece, 1919-1921", σελ. 193-194.

Διοργάνωση Επιστημονικών Συνεδρίων στην Ελλάδα: Συμμετοχή Επιστημόνων από τη Γερμανική Λαοκρατική Δημοκρατία

Αιμιλία Ροφούζου

*Σχολή Ναυτικών Δοκίμων, Τομέας Ανθρωπιστικών και Πολιτικών Επιστημών
erofouzou@snd.edu.gr*

Περίληψη. Το άρθρο αυτό επικεντρώνεται στο θεσμό των Reisekader, των στελεχών δηλαδή της Γερμανικής Λαοκρατικής Δημοκρατίας που με την επιστημονική τους ιδιότητα είχαν το δικαίωμα να ταξιδεύουν σε καπιταλιστικά κράτη - κάτι που απαγορευόταν για τους άλλους πολίτες - προκειμένου να λαμβάνουν μέρος σε ευρωπαϊκά και διεθνή συνέδρια. Αναλύοντας το φαινόμενο, η μελέτη παρέχει πληροφορίες για τη δράση των στελεχών που επισκέπτονταν την Ελλάδα, στελεχών που όφειλαν να προβάλλουν τη χώρα τους και να προωθούν τα συμφέροντά της.

Το άρθρο παρουσιάζει σημαντικά στοιχεία που προκύπτουν από τις γραπτές αναφορές που όφειλαν να συντάσσουν και να αποστέλλουν τα εν λόγω στελέχη, αναφορές οι οποίες κοινοποιούνταν σε διάφορους φορείς της Ανατολικής Γερμανίας. Στα κείμενα αυτά αποτυπωνόταν κάθε λεπτομέρεια της παραμονής τους στην Ελλάδα, δίνονταν όλες οι απαραίτητες πληροφορίες και γίνονταν αξιολογήσεις τόσο για τη διοργάνωση στην οποία συμμετείχαν, όσο και για τα πιο σημαντικά κοινωνικά και πολιτικά ζητήματα της Ελλάδας. Η μελέτη ενός πολύ σημαντικού αριθμού αυτών των αναφορών (σχεδόν 1.000 σελίδων) - οι οποίες φυλάσσονται στην Berliner Brandenburgische Akademie der Wissenschaften - αποτελεί τη βάση δεδομένων του άρθρου, το οποίο θέτει στο επίκεντρο και αναλύει τις κρίσεις και αξιολογήσεις των στελεχών για το επιστημονικό κομμάτι των συναντήσεων.

Organization of Scientific Conferences Greece: Participation of Scientists from the German Democratic Republic

Abstract. This article focuses on the institution of Reisekader, namely the executives of the German Democratic Republic who because of their scientific status were allowed to travel to capitalist states -something that was forbidden for other citizens- just to take part in European and international conferences. Analyzing this issue, the study provides information about the action of these scientists who visited Greece, an action which had to promote their country and its interests.

The article presents significant information obtained from written reports, which the scientists were required to prepare and send and which were reported on various government agency in Eastern Germany. These documents contained every detail of their stay in Greece and all the necessary information about the organization and the most important social and political issues of Greece. The study of a very large number of such reports (nearly 1,000 pages) -which are being kept at the *Berliner Brandenburgische*

Akademie der Wissenschaften- is the database of this article, which focuses and analyze the evaluations of these visitors for the scientific part of the meetings.

Λέξεις-κλειδιά: Ελλάδα, ΓΛΔ, συνέδρια, επιστημονικές σχέσεις, εξωτερική πολιτιστική πολιτική

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Πρωταρχικός στόχος της εξωτερικής πολιτιστικής πολιτικής της Γερμανικής Λαοκρατικής Δημοκρατίας ήταν η διεθνής αναγνώριση (1) και μέσο για την επίτευξή του η απόρριψη του κοινού γερμανικού παρελθόντος (2). Σε όλη την περίοδο του Ψυχρού Πολέμου η ΓΛΔ επεδίωκε να αποσυνδεθεί από τη χιτλερική Γερμανία, διάδοχο της οποίας έχριζε το αντίπαλο γερμανικό κράτος (3).

Στα πλαίσια αυτής της πολιτικής και ελλείπει επίσημων πολιτικών σχέσεων οι Ανατολικογερμανοί επικέντρωναν την προσοχή τους στη συνεργασία τους με τις άλλες χώρες σε επιστημονικό και πολιτιστικό επίπεδο, προσπάθεια η οποία ωστόσο συναντούσε πολλά εμπόδια.

Στην Ελλάδα, η απήχηση της ΓΛΔ, πριν την ανάπτυξη διπλωματικών σχέσεων το 1973, ήταν περιορισμένη. Παρά τις όποιες δυσκολίες, η ΓΛΔ ωστόσο κινητοποιούσε όλους τους μηχανισμούς ώστε να έχει επιστημονική και πολιτιστική παρουσία στον ελληνικό χώρο, με αποτέλεσμα από τα πρώτα χρόνια να σημειωθούν σαφή βήματα συνεργασίας, η οποία όμως ουσιαστικά έπαψε να υφίσταται μετά την επιβολή της χούντας και συνεχίστηκε και πάλι με την αποκατάσταση της Δημοκρατίας και ιδιαιτέρως από το 1981 και έπειτα (4).

ΑΝΑΤΟΛΙΚΟΓΕΡΜΑΝΟΙ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΕΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Ο πιο αντιπροσωπευτικός τρόπος επιστημονικής συνεργασίας ανάμεσα στην Ελλάδα και τη ΓΛΔ ήταν οι αμοιβαίες επισκέψεις λόγω επιστημονικών συνεδρίων.

Στην παρούσα μελέτη θα εστιάσουμε στη συμμετοχή Ανατολικογερμανών επιστημόνων σε συνέδρια που διοργανώθηκαν εντός ελληνικού εδάφους (5). Οι πρώτες συμμετοχές παρατηρήθηκαν ήδη από τη δεκαετία του 1950. Μέχρι την επιβολή της χούντας σημειώθηκαν περίπου 10 συμμετοχές, οι οποίες μειώθηκαν στις 2 κατά τη διάρκεια της στρατιωτικής δικτατορίας -και μάλιστα κατά τα τελευταία έτη και για συνέδρια των ανώδυνων κλάδων της ιατρικής και γεωφυσικής- ενώ μετά την πτώση της χούντας ξεπέρασαν τις 80.

Το εν λόγω θέμα έχει μελετηθεί και στο παρελθόν, ωστόσο από άλλη οπτική γωνία (6). Το ενδιαφέρον είχε τότε εστιαστεί στις δυσκολίες που έπρεπε να υπερνικήσουν οι εν λόγω επιστήμονες προκειμένου να φέρουν εις πέρας την αποστολή τους και κυρίως στο πολιτικό «περιτύλιγμα» των συμμετοχών, ενώ εν προκειμένω θα ασχοληθούμε με το επιστημονικό σκέλος αυτής της συνεργασίας.

Στο σημείο αυτό οφείλουμε, ωστόσο, να αναφερθούμε εν συντομία στην ειδική αυτή κατηγορία των Ανατολικογερμανών επισκεπτών. Πρόκειται ουσιαστικά για μια επίζηλη μικρή κατηγορία στελεχών, τα οποία είχαν δικαίωμα να ταξιδεύουν και στα *καπιταλιστικά* κράτη και επομένως επιλέγονταν με αυστηρά κριτήρια και κυρίως με γνώμονα την ικανότητα και την προθυμία τους να προωθούν τα συμφέροντα της χώρας τους και να ενισχύουν την εικόνα της στο εξωτερικό, δημιουργώντας παράλληλα τις κατάλληλες προϋποθέσεις για την καλλιέργεια περαιτέρω συνεργασίας. Τα στελέχη αυτά ονομάζονταν *Reisekader*, όρος που στα ελληνικά μπορεί να αποδοθεί κατά λέξη, αλλά κάπως άκομψα, ως στελέχη *ταξιδιάρικα, ταξιδιωτικά,*

αποδημητικά ή διαβατάρικα - και λόγω του λεκτικού συνειρμού με την άδεια διάβασης των συνόρων της χώρας και την απόκτηση του πολύτιμου διαβατηρίου.

Καθήκον των στελεχών αυτών ήταν να διαφημίζουν τη ΓΛΔ και τα επιτεύγματά της, τόσο σε επιστημονικό, όσο και σε ευρύτερο πολιτικό-ιδεολογικό επίπεδο. Όφειλαν να συνάπτουν τις κατάλληλες επαφές, να αποφεύγουν να 'εκτίθενται' δημοσίως όσον αφορά κομματικές εκδηλώσεις, πορείες κλπ. (7), να μη συναναστρέφονται Δυτικογερμανούς (8), ενώ εντός 48ωρου μετά την επιστροφή τους στη ΓΛΔ όφειλαν να συντάξουν και να αποστείλουν 'Άμεση έκθεση' με τις απαραίτητες πληροφορίες για τα τεκταινόμενα και εν συνεχεία μια περιεκτικότερη αναφορά. Στις αναφορές αυτές, οι οποίες κοινοποιούνταν σε διάφορους φορείς, συμπεριλαμβανομένου εμμέσως μάλλον και του Υπουργείου για την Ασφάλεια του κράτους (Στάζι), γινόταν λόγος για κάθε είδους λεπτομέρεια της διοργάνωσης: χώρες και ιδρύματα που συμμετείχαν, αριθμός και ποιόν των συμμετεχόντων, επαφές με επιστήμονες και με άλλες προσωπικότητες της διοργανώτριας χώρας, ξενοδοχείο με αναλυτικές πληροφορίες, όπως κατηγορία, τοποθεσία, κόστος και συνήθως ακόμη και αριθμός δωματίου(!), απολογισμός εξόδων, και αξιολογήσεις των προετοιμασιών του ταξιδιού - με κεντρικό θέμα την απόκτηση βίζας (9) - καθώς επίσης και της ποιότητας της οργάνωσης και του επιστημονικού επιπέδου της συνάντησης, συνέθεταν το περιεχόμενο των εν λόγω αναφορών. Η προσοχή, ωστόσο, δεν εστιαζόταν μόνο εκεί. Ενδιέφερε επίσης το γενικότερο πλαίσιο, 'προοδευτικό' ή μη, καθώς και η πολιτική επικαιρότητα και η στάση των εκπροσώπων της ΟΔΓ (10).

Στην παρούσα μελέτη, όπως έχει ήδη αναφερθεί, θα εστιάσουμε στο επιστημονικό σκέλος των συναντήσεων, αντλώντας στοιχεία από τις σχετικές αναφορές.

Μελετώντας το αρχειακό υλικό προκύπτει ότι οι Ανατολικογερμανοί επιστήμονες όλων σχεδόν των κλάδων επισκέπτονταν την Ελλάδα, προκειμένου να συμμετέχουν ενεργά σε πανελλήνια, ευρωπαϊκά και διεθνή επιστημονικά συνέδρια που διοργανώνονταν στη χώρα μας. Η προτίμησή τους ήταν ωστόσο φανερή. Επεδίωκαν και κατόρθωναν να συμμετέχουν σε σημαντικό αριθμό διεθνών συνεδρίων, ενώ συχνά τοποθετούνταν θετικά για τον χαρακτηρισμό των συνεδρίων ως διεθνών, δικαιολογώντας και ανάγοντας την τοποθέτησή τους στην τήρηση των σχετικών προϋποθέσεων και κυρίως σε σχέση με τους προσκεκλημένους ομιλητές. Έτσι, σύνεδρος π.χ. εξέφρασε στην αναφορά του την άποψη ότι η ελληνική πλευρά πίστευε πραγματικά στη διοργάνωση ενός διεθνούς συνεδρίου, αφού είχε φροντίσει για τη συμμετοχή συνέδρων από ολόκληρο τον κόσμο, ενώ όχι μόνο δεν απουσίαζε η εκπροσώπηση των σοσιαλιστικών χωρών, αλλά δεν παρατηρήθηκε και κανενός είδους διάκριση απέναντί τους σε σχέση με το πρόγραμμα της επιστημονικής διοργάνωσης (11).

Όσον αφορά στη θεματική των συνεδρίων μπορεί κανείς να πει με βεβαιότητα ότι κάλυπταν πληθώρα επιστημονικών κατευθύνσεων: βιοτεχνολογία, φυσική, γεωλογία, γεωφυσική, βιολογία, νεοελληνική γλώσσα, λατινική γλώσσα, γλωσσολογία, ελληνική μυθολογία, λαογραφία, ιστορία, αρχαιολογία, κοινωνιολογία, ιατρική, περιβαλλοντική, οικολογία και αρχιτεκτονική ήταν ορισμένες μόνο από τις επιστημονικές κατευθύνσεις. Ωστόσο, την τιμητική τους είχαν τα συνέδρια του ευρύτερου ιατρικού κλάδου, στα οποία και σημειώθηκαν οι περισσότερες συμμετοχές, ενώ ιδιαίτερος δημοφιλή ήταν και τα συνέδρια των ανθρωπιστικών επιστημών - με αυτά γύρω από γλώσσες, πολιτισμούς και αρχαιολογία να κερδίζουν τη μερίδα του λέοντος. Ας δούμε στο σημείο αυτό ποια στοιχεία συνέθεταν την εικόνα των αναφορών των Ανατολικογερμανών απεσταλμένων σε σχέση με το επιστημονικό σκέλος των διοργανώσεων.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι εν λόγω επιστήμονες έδιναν στις γραπτές αναφορές τους πληθώρα λεπτομερειών για τις επιστημονικές συναντήσεις, στις οποίες είχαν λάβει μέρος. Σε κάθε αναφορά δεν παρέλειπαν να κάνουν λόγο για το συνολικό αριθμό συμμετεχόντων, καθώς και για τον αριθμό των αποστολών καθεμιάς από τις χώρες που έδινε το παρόν. Για συμμετοχές εκπροσώπων των σοσιαλιστικών χωρών γινόταν, ωστόσο, ειδική μνεία, ενώ για τις συμμετοχές της ίδιας τους της χώρας συχνά αναφέρονταν σε περισσότερες λεπτομέρειες. Έδιναν, για παράδειγμα, πληροφορίες για τους συνέδρους και συνεργάτες τους, καθώς και για τα θέματα των διαλέξεων - στις περιπτώσεις βέβαια που η ΓΛΔ συμμετείχε με περισσότερους από έναν

συνέδρους και με περισσότερες από μια διαλέξεις. Έτσι, ο γνωστός σύνεδρος Ίρμσερ με αφορμή τη συμμετοχή του στο πρώτο επιστημονικό συνέδριο για την περίοδο της Κατοχής (και τη Δικτατορία της 4ης Αυγούστου) σε ελληνικό έδαφος, που διοργανώθηκε το 1984 από τους Χάγκεν Φλάισερ και Νίκο Σβορώνο, δίνει στην αναφορά του λεπτομέρειες της ανακοίνωσής του, καθώς και της ομιλίας του συναδέλφου του Άιχολτς - επίσης από τη ΓΛΔ -, ο οποίος μάλιστα μεταξύ άλλων «εξήρε τη συμμετοχή γερμανών αντιφασιστών στον αγώνα του ΕΛΑΣ». Η φράση αυτή και πολύ περισσότερο η εν γένει συμμετοχή των επιστημόνων αυτών στο συγκεκριμένο συνέδριο, είχαν πολιτική σημασία για τη ΓΛΔ. Οι απεσταλμένοι της στη χώρα μας φρόντιζαν πάντοτε επιμελώς να δείχνουν ότι δεν είχαν λησμονήσει το κατοχικό παρελθόν στην Ελλάδα, το οποίο βεβαίως χρέωναν στο αντίπαλο γερμανικό κράτος (12).

Στις γενικότερες πληροφορίες που περιείχαν οι αναφορές συγκαταλέγονται επίσης οι κατευθύνσεις και οι θεματικές του εκάστοτε συνεδρίου, καθώς και οι εκθέσεις και άλλες δραστηριότητες που συνόδευαν την κάθε διοργάνωση (13).

Το πιο σημαντικό, ωστόσο, στοιχείο που προκύπτει από τη μελέτη των αναφορών είναι ότι τα εν λόγω στελέχη δέχονταν ντιρεκτίβες ακόμη και για το επιστημονικό σκέλος των διοργανώσεων. Όφειλαν να συλλέγουν πληροφορίες γύρω από τις εξελίξεις στον επιστημονικό τους κλάδο, ώστε να μπορέσουν μελλοντικά να τις χρησιμοποιήσουν για το καλό της χώρας τους. Έτσι, σύνεδρος για παράδειγμα, αναφέρει ότι σύμφωνα με τη ντιρεκτίβα που είχε λάβει, επεδίωξε την άντληση πληροφοριών για συγκεκριμένα θέματα της επιστήμης του (14), ενώ άλλος κάνει λόγο για την επιτυχή έκβαση της σύμφωνα με τη σχετική ντιρεκτίβα συμμετοχής του σε συνέδριο, δεδομένου ότι είχαν εξασφαλιστεί όλες οι απαραίτητες επιστημονικής υφής πληροφορίες (15). Για το λόγο αυτό εξάλλου, οι αναφορές των επιστημόνων της ΓΛΔ περιείχαν πάντοτε ένα επιστημονικό μέρος, στο οποίο γινόταν αναλυτική περιγραφή των όσων είχαν ακουστεί στις διαλέξεις και αποτυπώνονταν οι αμιγώς επιστημονικές τους εκτιμήσεις (16), ενώ σχεδόν πάντα και με «καθησυχαστικό» ύφος εκφραζόταν η πεποίθηση ότι σε εύλογο χρονικό διάστημα θα μπορούσαν να έχουν στη διάθεσή τους την έκδοση των πρακτικών των συνεδρίων (17). Σε σχέση με τα προαναφερθέντα, οι επιστημονικές εκτιμήσεις των Ανατολικογερμανών προνομιούχων στελεχών παρουσίαζαν περαιτέρω και τα επιστημονικού επιπέδου οφέλη που είχαν κατορθώσει να αποκομίσουν οι ίδιοι οι σύνεδροι από τη διοργάνωση στην οποία συμμετείχαν, καθώς επίσης και τα μελλοντικά οφέλη για την ανάπτυξη της εκάστοτε επιστήμης στην Ανατολική Γερμανία. Μνεία γινόταν και για τα μέτρα που έπρεπε να ληφθούν, όπως επίσης και για τις μεθόδους που όφειλαν να ακολουθηθούν σύμφωνα με τις νέες εξελίξεις και τα διεθνή πρότυπα στον επιστημονικό τομέα (18).

Σημαντικό συστατικό των αναφορών αποτελούσαν οι θετικές πάντα αξιολογήσεις των Ανατολικογερμανών συνέδρων τόσο για τις διαλέξεις εκπροσώπων των σοσιαλιστικών χωρών όσο και για τις δικές τους προσωπικές παρουσιάσεις. Σχεδόν πάντοτε γινόταν αναλυτική περιγραφή της ανακοίνωσής τους και τονιζόταν η αναγνώριση που εξέφραζαν στο πρόσωπό τους οι υπόλοιποι σύνεδροι - κάτι το οποίο όφειλαν να κερδίσουν σύμφωνα με τις ντιρεκτίβες - οι οποίοι έδειχναν συχνά «ζωηρό» ενδιαφέρον για τις ανακοινώσεις τους, προχωρούσαν σε διεξοδικές συζητήσεις και έθεταν πλήθος ερωτημάτων για τα όσα είχαν ακουστεί στις διαλέξεις. Παρόλα αυτά, ενίοτε εκφραζόταν και το χαμηλό επίπεδο της ΓΛΔ ως χώρας σε σχέση με τα διεθνή τεκταινόμενα σε κάποιους επιστημονικούς τομείς (19), κάτι που όχι μόνο προσπαθούσαν κατά την παραμονή τους σε κάποια χώρα επιμελώς να αποσιωπήσουν, αλλά κατέβαλλαν και κάθε δυνατή προσπάθεια να το αντιπαρέλθουν προβάλλοντας, ως όφειλαν, τα επιστημονικά επιτεύγματα της χώρας τους.

Περαιτέρω σημεία αξιολόγησης αποτελούσαν η σύναψη των κατάλληλων επαφών και το επίπεδο των επιστημονικών συναντήσεων. Από κάθε σύνεδρο γινόταν λόγος αφενός για τις επαφές που είχε κατορθώσει να συνάψει και οι οποίες ήταν πεπεισμένος ότι θα του εξασφάλιζαν μελλοντική επιστημονική συνεργασία και περαιτέρω προσκλήσεις σε επιστημονικές

διοργανώσεις (20) και αφετέρου για το επίπεδο της κάθε διοργάνωσης, το οποίο στις περισσότερες των περιπτώσεων χαρακτηριζόταν αρκετά υψηλό. Χαρακτηριστικά τα λόγια του συνέδρου Άιχολτς, ο οποίος είχε λάβει μέρος στο προαναφερθέν συνέδριο για την περίοδο 1936-1944 στην Ελλάδα το 1984, ότι «το συνέδριο συνέβαλε σε μια πολύτιμη διεύρυνση και διάδοση της τεκμηριωμένης επιστημονικής γνώσης». Ενδιέφεραν επίσης οι συζητήσεις και η ανάπτυξη ανοικτού διαλόγου ως φυσικό επακόλουθο των διαλέξεων (21). Κατά τις αξιολογήσεις των Ανατολικογερμανών συνέδρων, οι διάλογοι που αναπτύσσονταν τόσο αμέσως μετά το πέρας των διαλέξεων όσο και κατά τα διαλείμματα χαρακτηρίζονταν από επιστημονική ανταλλαγή ιδεών απαλλαγμένη από κάθε είδους προκατάληψη (22).

Τέλος, ενίοτε εκφράζονταν και κάποια παράπονα για τη διοργάνωση, αν και το κύριο μειονέκτημα εντοπιζόταν στον μη κατάλληλο προγραμματισμό του χρόνου ομιλίας των συνέδρων, γεγονός το οποίο μπορούσε να δημιουργήσει σοβαρές καθυστερήσεις (23).

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Ο ρόλος των Ανατολικογερμανών επιστημόνων για την προβολή της χώρας τους στο εξωτερικό ήταν αναμφισβήτητα πολύ σημαντικός. Αυτό φανερώνουν τόσο τα αυστηρά κριτήρια επιλογής τους, όσο και οι σχετικές ντιρεκτίβες, τις οποίες, ως όφειλαν, ακολουθούσαν κατά γράμμα.

Η μελέτη των αναφορών τους, μαρτυρά ότι και στην περίπτωση της Ελλάδας ακολουθήθηκε η ίδια στρατηγική. Το ενδιαφέρον της ΓΛΔ για τα επιστημονικά συνέδρια που διοργανώθηκαν σε ελληνικό έδαφος ήταν αυξημένο και οι απεσταλμένοι της επιστήμονες κατέβαλλαν κάθε δυνατή προσπάθεια ώστε να φέρουν εις πέρας την αποστολή τους. Ωστόσο, απορίας άξιο είναι αν αυτοί οι άνθρωποι πίστευαν σε βάθος στις ίδιες τις τοποθετήσεις τους υπέρ της ΓΛΔ ή αν όφειλαν έτσι να δικαιολογήσουν την παρουσία τους και να εξασφαλίσουν μελλοντικές συμμετοχές.

Τέλος, πρέπει να τονιστεί ότι υπήρξαν και περιπτώσεις που στελέχη εκμεταλλεύονταν την ευκαιρία τέτοιων ταξιδιών στο εξωτερικό και αυτομολούσαν. Από το 1975 ως το 1987 είχαν αυτομολήσει συνολικά 70 επιστήμονες. Για λόγους που είχαν να κάνουν με τη γλώσσα, πρώτη προτίμηση των επιστημόνων αυτών ήταν τα γερμανόφωνα κράτη. Παρουσιάστηκαν 13 περιπτώσεις αυτομόλησης στην Αυστρία και 10 στη Δυτική Γερμανία, ενώ στην Ελλάδα είχαμε μόνο ένα κρούσμα σε όλο αυτό το μακροχρόνιο διάστημα συνεργασίας. Τα στατιστικά στοιχεία σχετικά με τις εν λόγω αυτομολήσεις καταδεικνύουν μια μερίδα καταξιωμένων επιστημόνων, με επαγγελματική πορεία 20 έως 25 χρόνων στην Ανατολική Γερμανία, με το 54% να προέρχεται από τον περιζήτητο παγκοσμίως κλάδο της ιατρικής επιστήμης. Το γεγονός αυτό δεν είναι τυχαίο διότι για τους εν λόγω επιστήμονες, σε αντίθεση με τους πολύ πιο πολιτικοποιημένους των ανθρωπιστικών επιστημών, δεν παρουσιάζονταν εξαιρετικές δυσκολίες να ασκήσουν το επάγγελμά τους στη - για αυτούς στην κυριολεξία - 'χρυσή Δύση' (24).

Μετά τη διάλυση της ΓΛΔ και την ένωσή της με την ΟΔΓ ὁρομολογήθηκαν, ωστόσο, διαδικασίες άμεσης απόλυσης σημαντικού αριθμού επιστημόνων. Ο λόγος ήταν η σύνδεσή τους με το πολιτικό σύστημα της Ανατολικής Γερμανίας, η οποία καταγγέλθηκε από παλαιούς και όψιμους αντιπάλους ένθεν και ένθεν των πάλαι ποτέ γερμανογερμανικών συνόρων ως κατασκοπεία υπέρ της Στάζι. Για όλους αυτούς, τα εν λόγω στελέχη ασκούσαν καθήκοντα πρακτόρων (25).

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. BArch, DR 1 47, Σχέδιο για την πολιτιστική ανταλλαγή το 1958 με τις καπιταλιστικές χώρες, Βερολίνο 3.1.1958.

2. Βλ. Hans-Adolf Jacobsen, «Auswärtige Kulturpolitik», στο Hans-Adolf Jacobsen, Gert Leptin, Ulrich Scheuner, Eberhard Schulz (επιμ.), *Drei Jahrzehnte Außenpolitik der DDR*, εκδ. Oldenbourg, München/ Wien 1980, σελ. 235-260, εδώ σελ. 255.
3. Βλ. Friedhelm B. Meyer zu Natrup, «Die Beziehungen zwischen der DDR und Frankreich», στο Konrad-Adenauer-Stiftung (επιμ.), *Die Westpolitik der DDR, Beziehungen der DDR zu ausgewählten westlichen Industriestaaten in den 70er und 80er Jahren* (Forschungsbericht αρ. 66), εκδ. Ernst Knoth, Melle 1989, σελ. 13-67, εδώ σελ. 65.
4. Βλ. Αιμιλία Ροφούζου, *Οι πολιτιστικές και επιστημονικές σχέσεις ανάμεσα στην Ελλάδα και τη Γερμανική Λαοκρατική Δημοκρατία στην περίοδο 1949-1989*, εκδ. Πανεπ. Αθηνών, Σαριπτόλειο Ίδρυμα, Αθήνα 2010, *passim*.
5. Τα στοιχεία αυτού του άρθρου έχουν στηριχτεί στη μελέτη αναφορών –σχεδόν 1.000 σελίδων- που φυλάσσονται στο Archiv der BBAW και συγκεκριμένα: Archiv der BBAW, HAIB-RB Nr. 126 (Αναφορές, (Ελλάδα 1956-1958, 1960-1961, 1964, 1965), HAIB-RB Nr. 624 (Ελλάδα, Αποστολές 1973-1977), HAIB-RB Nr. 625 (Ελλάδα, Αποστολές 1978-1979), HAIB-RB Nr. 924 (Ελλάδα, Αποστολές 1980, 1981, 1982), HAIB-RB Nr. 380 (Ελλάδα, Αποστολές 1983, 1984), HAIB-RB Nr. 1239 (Ελλάδα, Αποστολές 1985), HAIB-RB Nr. 1241(Ελλάδα, Αποστολές 1986) και Archiv der BBAW, Bestand ZIAGA, Nr. A 702 (Αποστολές 1984, A-J), Nr. A 691(Αποστολές 1988, G-P).
6. Πρβλ. επίσης, Αιμιλία Ροφούζου, «Σοσιαλιστικές εκτιμήσεις για την καπιταλιστική Ελλάδα. Ο θεσμός των *Reisekader* της Γερμανικής Λαοκρατικής Δημοκρατίας», *Αρχειοτάξιο, Περιοδική έκδοση των Αρχείων Σύγχρονης Κοινωνικής Ιστορίας*, τχ. 8, εκδ. Θεμέλιο, Αθήνα 2006.
7. Βλ., π.χ., Archiv der BBAW, HAIB-RB, Nr. 380, Αναφορά Ίρμσερ, 3.5.1984.
8. Archiv der BBAW, HAIB-RB, Nr. 126, Schubring, 27.10.60.
9. Η ελληνική κυβέρνηση κατ' εξακολούθηση απέρριπτε σχετικές αιτήσεις. Έτσι, ακόμη και ο καθηγητής Ίρμσερ -ο οποίος κατείχε ακλόνητη θέση και είχε καταφέρει με τη δράση του να δικτυωθεί και στον ελληνικό χώρο- δεν κατόρθωσε το 1960 να επισκεφθεί την Ελλάδα, στα πλαίσια διαβουλεύσεων για την ίδρυση μιας διεθνούς Εταιρείας Νεοελληνικών Σπουδών. Βλ. σχετικά: PAAA, MfAA, A 12507, Αναφορά Ίρμσερ, 23.2.61.
10. Όταν η αντιπροσωπεία της ΓΛΔ αποτελείτο από περισσότερα άτομα, ήταν αρκετό ένας εξ' αυτών να συντάξει την 'άμεση' και οι υπόλοιποι να αναλάβουν την πληρέστερη έκθεση. Πρβλ. Archiv der BBAW, HAIB-RB, Nr. 380, Άμεση αναφορά Αιχολτς για ταξίδι στο συνέδριο 'Η Ελλάδα 1936-1944. Δικτατορία-Κατοχή-Αντίσταση', στην Αθήνα τον Απρίλιο του 1984 και Archiv der BBAW, HAIB-RB, Nr. 380, Αναφορά Ίρμσερ, 3.5.1984.
11. Archiv der BBAW, HAIB-RB, Nr. 625, αναφορά Müller, 11.10.1978.
12. Archiv der BBAW, HAIB-RB Nr. 380, Αναφορά Ίρμσερ, 3.5.84. Πρόεδρος της οργανωτικής επιτροπής ήταν ο Νίκος Σβορώνος και αντιπρόεδρος ο Χάγκεν Φλάισερ, ενώ η γραμματεία αποτελούνταν από τον Προκόπη Παπαστράτη και τον Γιάννη Ρουμπάτη. Βλ. και τον συλλογικό τόμο: Χάγκεν Φλάισερ / Νίκος Σβορώνος (επιμ.), *Η Ελλάδα 1936-44. Δικτατορία - Κατοχή - Αντίσταση. Πρακτικά Α' Διεθνούς Συνεδρίου Σύγχρονης Ιστορίας*, Α' έκδοση, Αθήνα: Μορφωτικό Ινστιτούτο ΑΤΕ, 1989. Επίσης, βλ. Αιμιλία Ροφούζου, *Οι πολιτιστικές και επιστημονικές σχέσεις ανάμεσα στην Ελλάδα και τη Γερμανική Λαοκρατική Δημοκρατία στην περίοδο 1949-1989*, ό.π. και ενδεικτικά Archiv der BBAW, HAIB-RB, Nr. 924, αναφορά Heine για συμμετοχή σε διεθνές συνέδριο από 7 ως 12.9.1980.
13. Βλ. ενδεικτικά Archiv der BBAW, HAIB-RB, Nr. 924, αναφορά Ullrich, 8.11.82.
14. Archiv der BBAW, HAIB-RB, Nr. 1239, αναφορά για συμμετοχή σε διεθνές συνέδριο από 21 ως 27.9.1985.
15. Archiv der BBAW, HAIB-RB, Nr. 625, αναφορά Montag, 3.7.1978.
16. Βλ. ενδεικτικά Archiv der BBAW, HAIB-RB, Nr. 1239, αναφορά για συμμετοχή σε διεθνές συνέδριο από 21 ως 27.9.1985. Επίσης, Archiv der BBAW, Bestand ZIAGA, Nr. A 691, αναφορά Böttger, 9.11.1988.
17. Βλ. ενδεικτικά Archiv der BBAW, HAIB-RB, Nr. 625, αναφορά Montag, 3.7.1978.
18. Βλ. ενδεικτικά Archiv der BBAW, HAIB-RB, Nr. 924, αναφορά Ullrich, 8.11.82, Archiv der BBAW, HAIB-RB, Nr. 625, αναφορά Müller, 11.10.1978, Archiv der BBAW, HAIB-RB, Nr. 1241, αναφορά Bienert, 25.9.1986 και Archiv der BBAW, HAIB-RB, Nr. 924, αναφορά Neumann, 27.10.1982.
19. Βλ. ενδεικτικά Archiv der BBAW, HAIB-RB, Nr. 625, αναφορά Müller, 11.10.1978, Archiv der BBAW, HAIB-RB, Nr. 1241, αναφορά Bienert, 25.9.1986 και Archiv der BBAW, HAIB-RB, Nr. 924, αναφορά Neumann, 27.10.1982.
20. Βλ. ενδεικτικά Archiv der BBAW, HAIB-RB, Nr. 625, αναφορά Müller, 11.10.1978.

21. Archiv der BBAW, HAIB-RB Nr. 380, Άμεση Αναφορά Άιχολτς για ταξίδι στην Αθήνα 24.-30.4.84. Βλ. επίσης ενδεικτικά Archiv der BBAW, HAIB-RB, Nr. 625, αναφορά Montag, 3.7.1978.
22. Βλ. ενδεικτικά Archiv der BBAW, HAIB-RB, Nr. 126, αναφορά για συμμετοχή σε συνέδριο Αναισθησιολόγων στην Αθήνα από 9 ως 13.9.1965.
23. Βλ. ενδεικτικά Archiv der BBAW, HAIB-RB, Nr. 924, αναφορά Herrmann, 16.9.1981.
24. BArch, DR 3 1253, Πληροφορίες για κατάχρηση υπηρεσιακών ταξιδιών, 3.11.1987.
- 25.Χ. Φλάισερ: Vae victis: Ιστορία και Ιστορικοί στην (πρώην) Ανατολική Γερμανία, Τα Ιστορικά, 12/13 (1990), σελ. 222-232. Βλ. επίσης ενδεικτικά τις επιθέσεις του προέδρου της Γερμανο-Ελληνικής Εταιρείας [άλλοτε Δυτικού] Βερολίνου, (και καθηγητή ιστορίας) εναντίον του καθηγητή Ίρμσερ, -ο οποίος αναφερόταν στο πρόσωπό του μόνο με το αρχικό 'I.'- ότι 'είχε εμποδίσει ή ακόμη και βλάψει συνεργάτες στη σταδιοδρομία τους'. Bernd Söseman, *Annäherungen an Hellas*, Berlin 1994, σελ. 362 κ.έξ. Η γράφουσα, κατά τη μελέτη της, δε βρήκε καμία ένδειξη, η οποία θα μπορούσε να στηρίξει αυτή τη βαριά κατηγορία.

Ανακήρυξη Κυπριακής Αποκλειστικής Οικονομικής Ζώνης (ΑΟΖ) και το Δίκαιο της Θάλασσας

Υπχος Γεώργιος Χρυσοχού Π.Ν. και Αντχος Δημήτριος Δαλακλής Π.Ν.

Σχολή Ναυτικών Δοκίμων, Τομέας Συστημάτων Μάχης, Ναυτικών Επιχειρήσεων, Θαλασσίων Επιστημών, Ναυτιλίας, Ηλεκτρονικών & Τηλεπικοινωνιών

Περίληψη. Ακολουθως, συνεκτιμώνται τα γεωπολιτικά δεδομένα στην ανατολική λεκάνη της Μεσογείου, όπως αυτά διαμορφώνονται από τις πρόσφατες ανακαλύψεις σημαντικών ενεργειακών αποθεμάτων στις θαλάσσιες περιοχές μεταξύ των Κύπρου, Αιγύπτου και Ισραήλ, καθώς και νοτίως των νήσων Κρήτης, Ρόδου και Κύπρου. Παράλληλα, συζητούνται οι προβλέψεις της Σύμβασης του Δικαίου της Θάλασσας (Σύμβαση ΔΘ) αναφορικά με την οριοθέτηση Αποκλειστικής Οικονομικής Ζώνης (ΑΟΖ) και ιδιαίτερα οι ανάλογες προσπάθειες της Κυβέρνησης της Κυπριακής Δημοκρατίας, που σαφέστατα επηρεάζουν και τις ελληνικές ενέργειες στο συγκεκριμένο θεματικό πεδίο. Τα συμπεράσματα αφορούν τη στρατηγική κρατικών δρώντων της περιοχής, όπως η Κύπρος, η Ελλάδα, η Τουρκία και το Ισραήλ, καθώς και τις μεταξύ τους ανταγωνιστικές ή / και συνεργατικές σχέσεις. Γίνεται, επίσης, προσπάθεια να διαμορφωθούν οι πρώτες εκτιμήσεις για τις ενδεχόμενες επιπτώσεις στον κάθε ένα από τους παραπάνω περιφερειακούς παράγοντες, σε συνάρτηση πάντα με την αλληλεπίδραση συμφερόντων των μεγάλων κρατικών δυνάμεων (Ρωσία– ΗΠΑ), αλλά και στρατιωτικών ή πολιτικο-οικονομικών συνασπισμών (NATO – ΕΕ).

Abstract. The 1982 United Nations' Convention of the Law of the Sea (UNCLOS) is the main document of international law, which regulates the various issues concerning the establishment of an Exclusive Economic Zone (EEZ). The recent developments in the energy resources' sector in the eastern part of the Mediterranean Sea are changing the geopolitical environment and creating a pressure need for high policy actions for both the Cypriot and the Greek government. The analysis that follows summarizes the decisions made from the Republic of Cyprus and their conformity with international law provisions. Now, it is the turn of the Greek government to take decisive action upon the question of the EEZ, since there are many interested parts meeting in the region, as well as other important protagonist of the international arena with NATO and EU standing out.

Keywords: ΑΟΖ, Φυσικό Αέριο, Κύπρος, Ελλάδα, Διεθνές Δίκαιο.

PACS: 89.30.an

ΑΝΑΤΟΛΙΚΗ ΜΕΣΟΓΕΙΟΣ: ΕΝΑ ΠΟΛΥΠΟΘΗΤΟ ΓΕΩΠΟΛΙΤΙΚΟ ΤΡΟΠΑΙΟ

Κατά τη διάρκεια του περιβόητου Ψυχρού Πολέμου, οι συγκρούσεις των δύο υπερδυνάμεων της εποχής (βλ. Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής (ΗΠΑ) και Ένωσης Σοβιετικών Σοσιαλιστικών Δημοκρατιών (ΕΣΣΔ)) πέραν της Ανατολικής Μεσογείου σχετίζονταν πρωτίστως με στρατηγικές σκοπιμότητες. Ειδικότερα, τη βασική στόχευση των διαφόρων προσπαθειών τους (βλ. π.χ. σύναψη συμμαχιών, ή/και τις συγκεκριμένες συγκρούσεις/πολεμικές συρράξεις μέσω

αντιπροσώπων (proxy wars)) πέριξ της συγκεκριμένης περιφέρειας αποτελούσε η περίφημη κομμουνιστική πρόσβαση σε θερμές θάλασσες, ή με ποιον τρόπο θα αποτρεπόταν το ενδεχόμενο αυτό αντίστοιχα από τον κύριο γεωπολιτικό ανταγωνιστή της ΕΣΣΔ. Με την κατάρρευση του σοσιαλιστικού μπλοκ, ο ρόλος της ευρύτερης λεκάνης της Ανατ. Μεσογείου στο γενικότερο πλαίσιο των διεθνών σχέσεων έγινε πιο πολυδιάστατος. Ειδικότερα, την τρέχουσα χρονική περίοδο, πέρα από ανάλογες γεωστρατηγικές σκοπιμότητες, που αποτυπώνονται πολύ έντονα σε γεγονότα όπως η αλλαγή καθεστώτος στη Λιβύη - που μάλιστα σηματοδοτήθηκε από την εκτέλεση χωρίς δίκη του πρώην ηγέτη της χώρας Καντάφι - και την Αίγυπτο, στα πλαίσια του κοινωνικού φαινομένου που είναι επίσης γνωστό και ως Αραβική Άνοιξη [1] ή τον συνεχιζόμενο μέχρι και σήμερα εμφύλιο πόλεμο στη Συρία, η διευρυμένη περιφέρεια⁴ της Ανατ. Μεσογείου και της Μέσης Ανατολής έχει αποκτήσει παράλληλα και μία αυξανόμενη βαρύτητα σε ζητήματα που άπτονται της γεωπολιτικής της ενέργειας⁵ [2]. Είναι ενδεικτικό ότι στη μεταψυχροπολεμική περίοδο και ειδικότερα στην Κεντρική Ασία, ο έλεγχος των πηγών ενεργειακών πόρων που αποδεσμεύτηκαν από την κυριαρχία της Μόσχας μετά την κατάρρευση της Σοβιετικής Ένωσης, πυροδότησε μια υποβόσκουσα, αλλά έντονη διαμάχη μεταξύ Ρωσίας και ΗΠΑ, που εκινείτο σε δύο επίπεδα: Το πρώτο επίπεδο αυτής της διαμάχης σχετιζόταν με τον έλεγχο των πηγών πετρελαίου και φυσικού αερίου που εντοπίζονται στην περιφέρεια αυτή. Το δεύτερο από αυτά αφορούσε τον τρόπο της διακίνησης των ενεργειακών πόρων - κυρίως της Κασπίας και του Καυκάσου - προς την ενεργειακά ελλειμματική Ευρώπη, καθώς τρεις από τις πλούσιες ενεργειακά χώρες της περιοχής (Αζερμπαϊτζάν, Καζακστάν, Τουρκμενιστάν) δεν έχουν διέξοδο στη θάλασσα και αναγκαστικά οι ενεργειακοί πόροι τους θα πρέπει να διασχίσουν άλλες χώρες πριν καταλήξουν στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ). Δεδομένου λοιπόν ότι οι χώρες που θα διασχίζονται από τους αγωγούς θα εξασφαλίσουν μια σίγουρη πρόσβαση σε ενεργειακούς πόρους, διάφορα οικονομικά οφέλη και αύξηση της πολιτικής επιρροής τους, ο καθορισμός των διαδρομών για τη μεταφορά πετρελαίου και φυσικού αερίου προς τη Δύση μετατράπηκε σε αντικείμενο σκληρού ανταγωνισμού, με αρκετά ενδιαφερόμενα μέρη και αλληλοσυγκρουόμενα συμφέροντα [3].

Αυτές οι γεωπολιτικές διεργασίες περιπλέκονται ακόμη περισσότερο λόγω των πρόσφατων εξελίξεων στη θαλάσσια λεκάνη της Ανατ. Μεσογείου, με τις ανακαλύψεις νέων ενεργειακών κοιτασμάτων υδρογονανθράκων στην ευρύτερη θαλάσσια περιοχή μεταξύ Κύπρου και Ισραήλ, αλλά και στην περιοχή του θαλασσίου τριγώνου Νοτίως Κρήτης – Καστελλόριζου – Κύπρου. Οι ανωτέρω ανακαλύψεις δημιουργούν νέες συνιστώσες στα δεδομένα της ευρύτερης περιοχής, καθώς και στα μόνιμα και φλέγοντα ζητήματα των ελληνοτουρκικών διαφορών, της αραβοϊσραηλινής διένεξης, του κυπριακού και του κουρδικού ζητήματος. Επισημαίνεται ότι μια επιστημονική ανακοίνωση, στα μέσα του 2010, του Κέντρου Γεωλογικών Μελετών των Ηνωμένων Πολιτειών (USGS) είχε ως αποτέλεσμα τη ριζική αλλαγή του ενεργειακού τοπίου της Νοτιοανατολικής (NA) Μεσογείου. Σύμφωνα με τα δεδομένα της μελέτης αυτής, στον βυθό της λεκάνης της Λεβαντίνης (που περιβάλλεται από την Κύπρο, το Ισραήλ, τη Γάζα, τον Λίβανο και τη Συρία) εντοπίζονται μεγάλα κοιτάσματα φυσικού αερίου και πετρελαίου, που εκτιμώνται στα επίπεδα των 1,7 δισ. βαρελιών πετρελαίου και 122 τρισ. κυβικών ποδιών αερίου. Η πιθανότητα ύπαρξης ενεργειακών πόρων εκτείνεται μάλιστα μέχρι το Δέλτα του Νείλου (Αίγυπτος) και τις ακτές της νοτιοανατολικής Τουρκίας. Ήδη, εταιρείες αμερικανοϊσραηλινών και νορβηγικών συμφερόντων έχουν πάρει άδειες έρευνας της θαλάσσιας περιοχής μεταξύ Κύπρου και Ισραήλ και ορισμένες από αυτές έχουν ανακοινώσει την εύρεση κοιτασμάτων αερίου. Τα μεγαλύτερα κοιτάσματα φαίνεται πως είναι στα σύνορα που συναντώνται οι Αποκλειστικές Οικονομικές

⁴ Με τον όρο αυτό στην παρούσα ανάλυση περιγράφεται το γεωγραφικό υποσύνολο της μεζονος Μέσης Ανατολής, που περιλαμβάνει εκτός από την Ανατ. Μεσόγειο καθ' αυτή, τις χώρες πέριξ του Περσικού Κόλπου, καθώς και αυτές πέριξ της Κασπίας Θάλασσας.

⁵ Η προαναφερθείσα γεωγραφική περιφέρεια διαθέτει τα πλουσιότερα κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου παγκοσμίως, ενώ παράλληλα το κόστος παραγωγής αυτών είναι το φθηνότερο στον κόσμο.

Ζώνες (ΑΟΖ) των δύο αυτών χωρών [4]. Όμως, ακόμη δεν έχουν οριοθετηθεί όλες οι ΑΟΖ των γειτονικών κρατών στην περιοχή (πλην Κύπρου - Ισραήλ, Κύπρου - Αιγύπτου και Κύπρου - Λιβάνου) και παρόλο που γι' αυτόν τον λόγο έχουν αρχίσει πυρετώδεις διαβουλεύσεις μεταξύ των εμπλεκόμενων πλευρών, μεταξύ των οποίων σημειωτέον υπάρχουν σημαντικές διενέξεις για το θέμα των ορίων των χωρικών υδάτων και ΑΟΖ (π.χ. Λίβανος - Ισραήλ και Ισραήλ - Παλαιστίνιοι στη Γάζα) αλλά και έτερα θέματα έντονης αντιπαράθεσης, όπως για παράδειγμα το παλαιστινιακό. Επιπροσθέτως, είναι πιθανή η ύπαρξη σημαντικών κοιτάσματος φυσικού αερίου, όχι μόνο μεταξύ Κύπρου - Ισραήλ και Κύπρου - Αιγύπτου, αλλά και δυτικά της Κύπρου, μεταξύ Κύπρου - Κρήτης. Είναι ενδεικτική η δημοσιοποίηση των μελετών του USGS αναφορικά με την ύπαρξη ανακτήσιμων αποθεμάτων φυσικού αερίου στον υποθαλάσσιο χώρο της Κύπρου (βλ. σχήμα 1). «Οι μελέτες οδήγησαν σε μία συνολική πιθανή ύπαρξη υποθαλάσσιων απολήψιμων αποθεμάτων φυσικού αερίου της τάξης των 345 τρισεκατομμυρίων κυβικών ποδών και 8 δις βαρελιών υγροποιημένου φυσικού αερίου και πετρελαίου», ανακοίνωσε σε συνέδριο στην Ελλάδα, ο Δρ. Ηλίας Κονοφάγος, ειδικός σε θέματα έρευνας υδρογονανθράκων και τέρως Γενικός Διευθυντής Έρευνας & Παραγωγής Υδρογονανθράκων της εταιρείας Ελληνικά Πετρέλαια, παραθέτοντας τα σχετικά επιστημονικά δεδομένα από τις έρευνες στην περιοχή. Έτσι, ανακύπτει εμπλοκή στις ελληνοτουρκικές σχέσεις, καθώς και στις σχέσεις Κύπρου - Τουρκίας - Ισραήλ, με τους ισραηλινούς να έχουν προτείνει επισήμως στην ελληνική και στην κυπριακή πλευρά να λειτουργήσουν ως κόμβος μεταφοράς προς την Ευρώπη του αερίου που θα βρεθεί στην ΑΟΖ τους, τόσο επειδή εκτιμούν ότι η κατασκευή των αντίστοιχων υποδομών θα μπορούσε να λάβει ευρωπαϊκή χρηματοδότηση [5], όσο κι επειδή η εναλλακτική οδός μέσω Τουρκίας φαίνεται ως κάτι ανέφικτο, με το Τελ-Αβίβ να εκτιμά (και ορθά σύμφωνα με όσα έχουν ήδη καταγραφεί) ότι η κρίση στις σχέσεις του με την Άγκυρα δεν είναι κάτι το συγκυριακό.

ΟΡΙΟΘΕΤΗΣΗ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΖΩΝΩΝ

Η ανάλυση που ακολουθεί θα αναδείξει το συνεχώς αυξανόμενο γεωοικονομικό ενδιαφέρον που αποκτά η περιοχή της Ανατ. Μεσογείου την τρέχουσα χρονική περίοδο, αναφορικά με τα ζητήματα κατοχής και εκμετάλλευσης ενεργειακών πόρων. Παράλληλα, θα εξετάσει τις πολυδιάστατες πτυχές του Διεθνούς Δικαίου υπό το γενικότερο πλαίσιο των γεωπολιτικών ανταγωνισμών στην εν λόγω περιοχή. Ειδικότερα, στην παρούσα παράγραφο συζητείται περιορισμένα η ιστορική εξέλιξη του Δικαίου της Θάλασσας, προσδιορίζοντας ως τον πλέον βασικό σταθμό της διαρκούς αυτής διαδικασίας το έτος 1982. Και τούτο διότι στο δεδομένο χρονικό σημείο υπήρξε καταληκτική συμφωνία, από έναν πολύ μεγάλο αριθμό χωρών, για την Σύμβαση του Μοντέγκο Μπέυ για το Δίκαιο της Θάλασσας (εφεξής Σύμβαση ΔΘ). Έμφαση θα δοθεί στον τρόπο οριοθέτησης θαλάσσιων ζωνών, στη βάση των προβλέψεων της Σύμβασης ΔΘ, καθώς η σύμβαση αυτή ουσιαστικά αποτελεί το κύριο εργαλείο για την επέκταση της κυριαρχίας ενός κράτους προς τη θάλασσα. Σε πλειάδα, όμως, περιπτώσεων στις διεθνείς σχέσεις δημιουργούνται εντάσεις και αντεκδικήσεις - κλιμακούμενης φυσικά έντασης - κατά την εφαρμογή αυτών των προβλέψεων της σύμβασης, όταν για παράδειγμα το εθνικό συμφέρον μίας δεδομένης χώρας τίθεται υπεράνω του διεθνούς δικαίου. Είναι χαρακτηριστικό ότι μετά το διαμελισμό της Πρώην Γιουγκοσλαβίας, η διαμάχη μεταξύ Σλοβενίας και Κροατίας δεν περιορίστηκε μόνο στα χερσαία σύνορα τους, αλλά επεκτάθηκε και στην τελική οριοθέτηση θαλάσσιων ζωνών. Ενώ, ένα ιδιαίτερα γνωστό παράδειγμα της κατηγορίας αυτής είναι και οι τουρκικές διεκδικήσεις στο χώρο του Αιγαίου Πελάγους, που περιλαμβάνουν την απειλή πολέμου σε περίπτωση που η Ελλάδα ασκήσει ένα καθόλα νόμιμο δικαίωμά της: την επέκταση των χωρικών υδάτων της από τα έξι (6) στα δώδεκα (12) ν.μ., όπως ρητά προβλέπει η Σύμβαση ΔΘ [7]. Στην ίδια κατηγορία εντάσσονται φυσικά και οι πρόσφατες χρονικά προσπάθειες της Άγκυρας να «εμποδίσει» την ανακήρυξη ΑΟΖ από την Κυπριακή Δημοκρατία και επομένως να

σταματήσει με τον τρόπο αυτό την εκμετάλλευση από την Κύπρο των υδρογονανθράκων που έχουν ήδη εντοπιστεί στο βυθό της Ανατ. Μεσογείου.

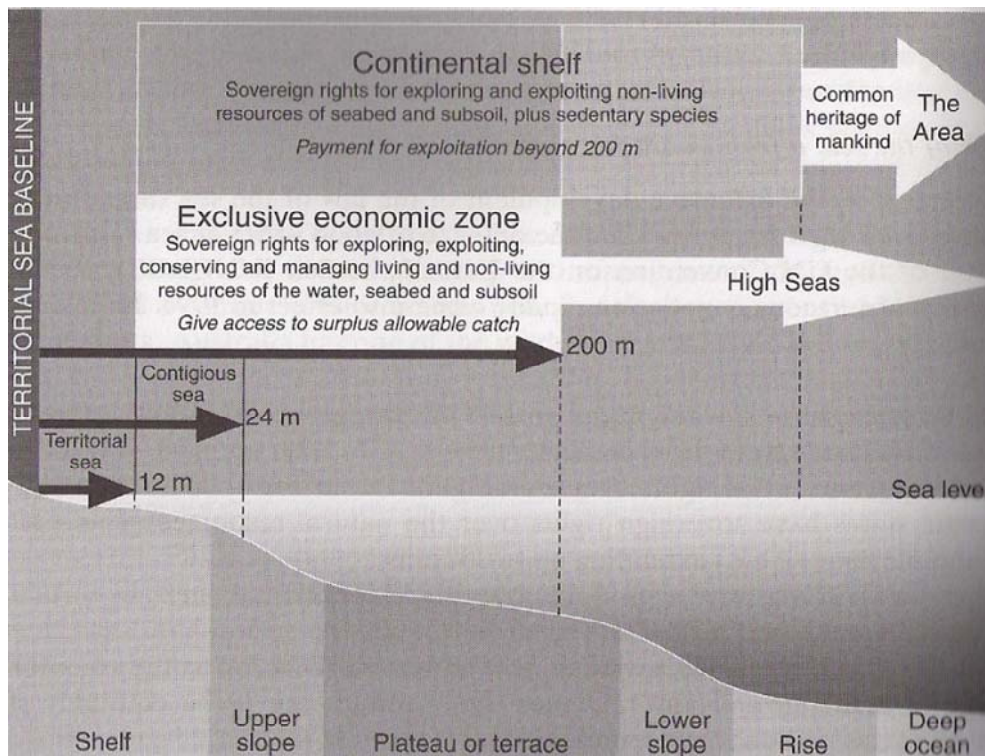


ΣΧΗΜΑ 1. Απεικόνιση των μελετών του Κέντρου Γεωλογικών Μελετών των ΗΠΑ (U.S.G.S.) για τα κοιτάσματα υδρογονανθράκων στην περιοχή της Λεβαντίνης και του Δέλτα του Νείλου [6].

Ανατρέχοντας στο παρελθόν, διακρίνονται δύο βασικοί τρόποι εξέλιξης για το Δίκαιο της Θάλασσας, από την αρχαιότητα μέχρι και σήμερα. Ο πρώτος από αυτούς, που μπορεί να θεωρηθεί ότι διήρκεσε από την απώτερη αρχαιότητα μέχρι τις αρχές του 20^{ου} αιώνα, βασίστηκε στο έθιμο. Υπάρχει γενική συμφωνία μεταξύ των ακαδημαϊκών ότι η πρώτη και σημαντικότερη αρχή όσον αφορά το χαρακτήρα του υγρού στοιχείου, είναι αυτή της ελευθερίας των θαλασσών. Δεύτερη, επίσης, σπουδαία αρχή αναφορικά με το Δίκαιο της Θάλασσας, είναι η αρχή της κρατικής κυριαρχίας στην αιγιαλίτιδα ζώνη (ή χωρικά ύδατα-ΧΘ) των παράκτιων κρατών [8]. Η αρχή αυτή, που καθιερώθηκε με σκοπό να ενισχύσει την άμυνα και ασφάλεια του παράκτιου κράτους, αποτελεί υπό μία έννοια το «αντίπαλο δέος» στην πρώτη υπό συζήτηση αρχή, αυτήν της ελευθερίας των θαλασσών [9]. Ο συμπληρωματικός χαρακτήρας των δύο αυτών αρχών, διακρίνεται πολύ εύκολα και στον ορισμό της ανοικτής θάλασσας: η ανοικτή θάλασσα αρχίζει εκεί που τελειώνει η αιγιαλίτιδα ζώνη. Δηλαδή, το πεδίο εφαρμογής της αρχής της ελευθερίας των θαλασσών αρχίζει στο σημείο αυτό ακριβώς που περατούται το πεδίο εφαρμογής της αρχής της κυριαρχίας. Το έθιμο παρέμεινε για το μεγαλύτερο μέρος της ανθρώπινης ιστορίας ο βασικός μηχανισμός δημιουργίας κανόνων δικαίου. Ενώ, σταδιακά έχουμε μετατόπιση προς τη δημιουργία κανόνων με τη μορφή επίσημων συμφωνιών και συνθηκών. Έτσι, το δεύτερο στάδιο εξέλιξης του δικαίου της θάλασσας, ταυτίζεται με την προσπάθεια της διεθνούς κοινότητας να κωδικοποιήσει όλους τους κανόνες και τις αρχές του διεθνούς δικαίου που ήταν μέχρι εκείνη τη χρονική στιγμή διασκορπισμένοι. Το αποτέλεσμα της συγκεκριμένης προσπάθειας, που πραγματοποιήθηκε αρχικά στο πλαίσιο της Κοινωνίας των Εθνών (ΚτΕ) το 1930, έληξε χωρίς θετικό αποτέλεσμα, λόγω της αδυναμίας των κρατών να συμφωνήσουν στο εύρος της αιγιαλίτιδας ζώνης. Είναι αυτός ακριβώς ο λόγος, που ως χρονική αφετηρία του δεύτερου σταδίου εξέλιξης του ΔΘ, συνήθως θεωρείται το έτος 1947.

Το έτος αυτό, τέθηκε σε εφαρμογή η ενεργοποίηση μίας κωδικοποιητικής διαδικασίας, που στέφθηκε, στη συνέχεια, με επιτυχία. Το έργο ανέλαβε η Επιτροπή Διεθνούς Δικαίου των Ηνωμένων Εθνών (ΗΕ), η οποία μετά από επταετή επεξεργασία (1951-1958), υπέβαλε το

κωδικοποιημένο κείμενο σε μορφή συμβατικού σχεδίου, στην Πρώτη Συνδιάσκεψη των ΗΕ για το Δίκαιο της Θάλασσας [10]. Η Συνδιάσκεψη αυτή, στην οποία έλαβαν μέρος 86 κράτη, υιοθέτησε στη Γενεύη, στις 29 Απριλίου 1958, τέσσερις συμβάσεις. Αυτές οι συμβάσεις, στις οποίες κωδικοποιήθηκε για πρώτη φορά το Δίκαιο της Θάλασσας, είναι οι εξής: α) Η Σύμβαση για την Χωρική Θάλασσα και τη Συνορεύουσα Ζώνη (Territorial Sea and Contiguous Zone). Η σύμβαση αυτή, όπως εξάλλου και η Δεύτερη Συνδιάσκεψη των ΗΕ για το Δίκαιο της Θάλασσας (1960), απέτυχε όμως να καθορίσει το εύρος των χωρικών υδάτων. επικυρώθηκε, ωστόσο, από 46 κράτη. β) Η Σύμβαση για την Ανοικτή Θάλασσα (High Sea), επικυρωμένη από 57 κράτη. γ) Η Σύμβαση για την Υφαλοκρηπίδα (Continental Shelf). Η εν λόγω σύμβαση με την οποία καθιερώθηκε πρώτη φορά ο θεσμός της υφαλοκρηπίδας, επικυρώθηκε από 54 κράτη. δ) Η Σύμβαση για την Αλιεία και την Προστασία των Ζωντανών Πηγών στην Ανοικτή Θάλασσα (Fishing and Conservation of the Living Resources of the High Seas), που επικυρώθηκε από 34 κράτη. Τέλος, ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι οι ρυθμίσεις της Σύμβασης της Γενεύης υιοθετήθηκαν πλήρως και από την Τρίτη Συνδιάσκεψη των ΗΕ για το Δίκαιο της Θάλασσας (γνωστή επίσης και ως UNCLOS III), οι εργασίες της οποίας άνοιξαν το δρόμο για την τελική υπογραφή της Σύμβασης για το Δίκαιο της Θάλασσας (Σύμβαση ΔΘ), για την οποία ήδη μνημονεύτηκε ότι αποτελεί σήμερα το βασικό εργαλείο για την οριοθέτηση των θαλάσσιων ζωνών και οι οποίες αναλύονται λεπτομερέστερα στη συνέχεια [11].



ΣΧΗΜΑ 2. Τρόπος οριοθέτησης θαλασσιών ζωνών [12].

Ως γραμμή βάσης (territorial sea baseline) ορίζεται η αφετηρία μέτρησης των θαλάσσιων ζωνών (βλ. σχήμα 2). Η γραμμή βάσης έχει σημαντικό ρόλο στη Σύμβαση ΔΘ, αφού αποτελεί το διαχωριστικό όριο μεταξύ χωρικών και εσωτερικών υδάτων. Μάλιστα, τα εσωτερικά ύδατα (internal waters) αποτελούν συνακόλουθο θεσμό των γραμμών βάσης, υπό την εξής έννοια: ως εσωτερικά ύδατα ορίζονται τα ύδατα που βρίσκονται εσωτερικά των γραμμών βάσης, δηλαδή, μεταξύ της φυσικής ακτογραμμής και των γραμμών βάσης. Η έννοια των εσωτερικών υδάτων περιλαμβάνει, επίσης, τις λίμνες, τα ποτάμια και τις εκβολές τους, τους λιμένες και τους

κόλπους. Αιγιαλίτιδα ζώνη ή χωρικά ύδατα ή χωρική θάλασσα (territorial sea), είναι η θαλάσσια ζώνη που αποτελεί, σε νομικό επίπεδο, την προέκταση της ξηράς στη θάλασσα. Σε μία διαφορετική διατύπωση, η αιγιαλίτιδα ζώνη είναι η θαλάσσια ζώνη που ακολουθεί τις γραμμές βάσης και κατ' επέκταση τα εσωτερικά ύδατα, εντός της οποίας το παράκτιο κράτος ασκεί πλήρη (και αποκλειστική) κυριαρχία (εκτελεστική - νομοθετική - δικαστική) [13]. Σημειώνεται, επίσης, ότι κάθε σημείο της αιγιαλίτιδας ζώνης απέχει από το πλησιέστερο σημείο της γραμμής βάσης απόσταση ίση με το πλάτος (ή εύρος) αυτής. Σύμφωνα με τη Σύμβαση ΔΘ: «[Κ]άθε κράτος έχει το δικαίωμα να καθορίσει το εύρος της χωρικής του θάλασσας, [το οποίο] δεν [μπορεί] να υπερβαίνει τα 12 ναυτικά μίλια, μετρούμενα από τις γραμμές βάσεως...». Η αιγιαλίτιδα ζώνη αποτελεί αναπόσπαστη συνέχεια του χερσαίου (ηπειρωτικού) εδάφους και των νησιών και βράχων που ανήκουν σε ένα κράτος. Ενώ, κανένα κράτος δεν μπορεί να την αρνηθεί ή να αποποιηθεί τα συγκεκριμένα δικαιώματα και υποχρεώσεις, που το διεθνές δίκαιο (συμβατικό ή εθιμικό) του έχει αναθέσει γι' αυτή. Θα πρέπει να δοθεί βαρύτητα στο γεγονός ότι το παράκτιο κράτος ασκεί πλήρη και απόλυτη «κυριαρχία» στην υπό συζήτηση θαλάσσια ζώνη. Δηλαδή, τα κράτη διατηρούν πλήρες το δικαίωμα να νομοθετούν για τη αιγιαλίτιδα ζώνη τους, να επιβάλλουν τους νόμους και τους κανονισμούς τους, πάντα σύμφωνα όμως με τις αρχές του διεθνούς δικαίου και τις τυχόν διεθνείς συμβάσεις που έχουν κυρώσει. Τέλος, η κυριαρχία του παράκτιου κράτους στην αιγιαλίτιδα ζώνη εκτείνεται, περαιτέρω, και στον εναέριο χώρο που ευρίσκεται άνωθεν αυτής, καθώς επίσης στο βυθό αλλά και το υπέδαφός της [14].

Με την καθιέρωση της Αποκλειστικής Οικονομικής Ζώνης (ΑΟΖ) [15] ικανοποιήθηκε μία από τις σημαντικότερες διεκδικήσεις των παράκτιων κρατών. Οι διεκδικήσεις αυτές αφορούσαν στην καθιέρωση ζωνών - πέραν της αιγιαλίτιδας - εντός των οποίων τα παράκτια κράτη θα είχαν δικαιώματα κατ' αρχήν οικονομικής φύσης (π.χ. ζώνης αποκλειστικής αλιείας). Αξίζει να σημειωθεί ότι μέχρι την Πρώτη Συνδιάσκεψη των ΗΕ για το Δίκαιο της Θάλασσας (1958) το δικαίωμα αλιείας των παράκτιων κρατών μπορούσε να ασκηθεί μόνο εντός της αιγιαλίτιδας ζώνης [16], η οποία σε καμμία περίπτωση δεν μπορούσε να επεκταθεί πέραν των 12 ν.μ. - παρά τη γενικότερη τάση για επέκταση από τα παραδοσιακά όρια των 3 και 6 ν.μ. Λόγω αυτού του γεγονότος, προέκυψε η ανάγκη δημιουργίας μίας *sui generis* ζώνης, εντός της οποίας τα παράκτια κράτη θα είχαν τη δυνατότητα εκμετάλλευσης των πηγών της, ενώ τα τρίτα κράτη δεν θα αποκλείονταν από την άσκηση των βασικών δικαιωμάτων που απορρέουν από τον θεσμό της ελευθερίας των θαλασσών. Επομένως, η ΑΟΖ εισάγεται ως έννοια προκειμένου να αντισταθμίσει τις οικονομικές ανάγκες των παράκτιων κρατών χωρίς, από την άλλη πλευρά, να αυξήσει το εύρος των χωρικών υδάτων (το οποίο, στην εξέλιξη του χρόνου, έτεινε να σταθεροποιηθεί στα 12 ν.μ.) [17]. Με βάση τα παραπάνω, η ΑΟΖ αποτέλεσε πράγματι μια επαναστατική εξέλιξη στο χώρο του Δικαίου της Θάλασσας, επιτυγχάνοντας περαιτέρω την ανατροπή «ριζικά πλέον του διπολικού σχήματος των αρχών της κυριαρχίας και της ελευθερίας που επί αιώνες κυριάρχησε στον θαλάσσιο χώρο» [18]. Σύμφωνα με τη Σύμβαση ΔΘ, η ΑΟΖ έχει εύρος 200 ν.μ. (βλ. σχήμα 2) και εντός αυτής το παράκτιο κράτος μπορεί να ασκήσει : α) τα κυριαρχικά δικαιώματα που ασκούσε στην υφαλοκρηπίδα μέχρι τα 200 ν.μ. Με αυτήν την έννοια, όπως εύστοχα αναφέρεται : «... [η] ΑΟΖ απορρόφησε το καθεστώς της υφαλοκρηπίδας, εκτός βέβαια από τις περιπτώσεις που...η υφαλοκρηπίδα εκτείνεται πέρα από τα 200 ν.μ.» [19] β) κυριαρχικά δικαιώματα που αφορούν στην έρευνα, εκμετάλλευση, διατήρηση των φυσικών πόρων των υδάτων της ΑΟΖ, καθώς επίσης και σε άλλες οικονομικές δραστηριότητες, όπως είναι η παραγωγή ενέργειας από τα ύδατα, τα ρεύματα και τους ανέμους, γ) δικαιοδοσία ή αποκλειστική αρμοδιότητα: i) στην τοποθέτηση και χρησιμοποίηση τεχνητών νήσων και άλλων εγκαταστάσεων, ii) στη διεξαγωγή επιστημονικής έρευνας και iii) στην προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος από τη ρύπανση.

Ακόμη, είναι αλήθεια ότι η Σύμβαση ΔΘ ικανοποίησε ένα μεγάλο μέρος των διεκδικήσεων των παράκτιων κρατών, αφού αυτά διεύρυναν την εθνική τους κυριαρχία στα 12 ν.μ. (άρθρο 3) και ακόμη έθεσαν τα θεμέλια για την οικονομική τους ανάπτυξη με την καθιέρωση του θεσμού της ΑΟΖ (άρθρο 58), εντός της οποίας παραχωρήθηκαν σ' αυτά αποκλειστικά κυριαρχικά

δικαιώματα. Προκειμένου, όμως, να γίνει αυτό εφικτό, «απαλλοτριώθηκε» ένα μεγάλο μέρος της ανοικτής θάλασσας. Ας σημειωθεί ότι σ' αυτή την πράξη (απαλλοτρίωση της ανοικτής θάλασσας) συνέβαλε και το σκεπτικό της «κοινής κληρονομιάς», παρά τα όποια άλλα πλεονεκτήματα της [20]. Ενώ, είναι ενδεικτικά τα όσα αναφέρει ο Καθηγητής Brown, σχετικά με τον αρνητικό προσδιορισμό της ανοικτής θάλασσας: «[Ε]νώ η Σύμβαση του 1958 όριζε τις ανοικτές θάλασσες σαν τα «τμήματα της θάλασσας που δεν περιλαμβάνονται στα χωρικά και εσωτερικά ύδατα ενός κράτους στο άρθρο 1», η Σύμβαση ΔΘ προχώρησε στον σχετικό περιορισμό τους, αφού το άρθρο 86 όρισε τις ανοικτές θάλασσες ως «τα τμήματα της θάλασσας που δεν περιλαμβάνονται στην ΑΟΖ, τα χωρικά ύδατα ή στα αρχιπελαγικά ύδατα ενός κράτους». Αν και αρκετές από τις παραδοσιακές ελευθερίες των ανοικτών θαλασσών διατηρήθηκαν εντός της ΑΟΖ, εντούτοις είναι χαρακτηριστική η μετατόπιση από την αρχή της ελευθερίας των θαλασσών προς την αρχή της κυριαρχίας» [21]. Ανάλογη άποψη διατυπώνει και ο Καθηγητής Κ. Οικονομίδης κατά τον οποίο: «[Η] ανοικτή θάλασσα είναι ... η μεγάλη αδικημένη από την αναθεώρηση του δικαίου της θάλασσας. Ενώ με το ισχύον δίκαιο αμέσως μετά την αιγιαλίτιδα ζώνη έχουμε την ανοικτή θάλασσα, τώρα με το νέο δίκαιο η ανοικτή θάλασσα, σαν αυτοτελές καθεστώς, αρχίζει μετά τα 200 ν.μ., δηλ. μετά το τέλος της ΑΟΖ». Ενδιαφέρον, τέλος, παρουσιάζει το γεγονός ότι η ανοικτή θάλασσα οριζόταν ανέκαθεν αρνητικά. Σύμφωνα με το άρθρο 86 της Σύμβασης ΔΘ ως ανοικτή θάλασσα – που, ας σημειωθεί, είναι ελεύθερη για όλα τα κράτη παράκτια και περικόλιστα - ορίζεται εκείνο το τμήμα της θάλασσας, το οποίο δεν περιλαμβάνεται στην ΑΟΖ, την αιγιαλίτιδα ζώνη και τα εσωτερικά ύδατα ενός κράτους, ή στα αρχιπελαγικά ύδατα ενός αρχιπελαγικού κράτους [22].

Είναι σαφές ότι η θέσπιση της ΑΟΖ διευκόλυνε κατά πολύ τα παράκτια κράτη στις πολυεπίπεδες προσπάθειές τους για μεγαλύτερη πρόσβαση στον «πλούτο» της θάλασσας. Είναι ενδεικτικό ότι η επέκταση της δικαιοδοσίας τους στην ΑΟΖ, περιόρισε κατά 36% την περιοχή που κάλυπτε η ανοικτή θάλασσα, συσσωρεύοντας υπέρ τους ποσοστό 95% περίπου της παγκόσμιας αλιείας. Μάλιστα, εντός αυτής της ζώνης, το παράκτιο κράτος μπορεί να ασκήσει τα κυριαρχικά δικαιώματα που ασκούσε στην υφαλοκρηπίδα μέχρι τα 200 ν.μ. (έρευνα, εκμετάλλευση) και επιπρόσθετα μπορεί να ασκήσει σειρά αποκλειστικών δικαιωμάτων, όπως είναι, π.χ., η αλιεία και η διατήρηση των φυσικών πόρων των υδάτων της ΑΟΖ, ή η παραγωγή ενέργειας από τα ύδατα, τα ρεύματα και τους ανέμους. Ας σημειωθεί, πάντως, ότι παρά τα όσα ωφελήματα απέκτησαν τα παράκτια κράτη εντός της ΑΟΖ παρέμειναν, για όλα τα τρίτα κράτη, παράκτια και περικόλιστα, σύμφωνα με τα άρθρα 58(1) και 87 οι ελευθερίες της ναυσιπλοΐας, υπέρπτησης, τοποθέτησης υποβρυχίων καλωδίων, αλιείας και επιστημονικής έρευνας. Με την υιοθέτηση λοιπόν της ΑΟΖ ανέκυψε το ζήτημα της οριοθέτησής της. Και το ερώτημα που ανέκυψε ήταν πως λαμβάνει στην πράξη η οριοθέτηση επικαλυπτομένων ΑΟΖ, δεδομένης της στενής σύνδεσης υφαλοκρηπίδας και ΑΟΖ. Σύμφωνα, κατ' αρχήν, με το άρθρο 74(1) της Σύμβασης ΔΘ, που έχει τίτλο «[ο]ριοθέτηση της Αποκλειστικής Οικονομικής Ζώνης μεταξύ των Κρατών με έναντι ή προσκείμενες ακτές», η οριοθέτηση της «Αποκλειστικής Οικονομικής Ζώνης μεταξύ των Κρατών με έναντι αλλήλων ή παρακείμενες ακτές πραγματοποιείται κατόπιν συμφωνίας με βάση το Διεθνές Δίκαιο όπως ορίζεται στο άρθρο 38 του Καταστατικού του Διεθνούς Δικαστηρίου (ΔΔ), με σκοπό την επίτευξη δίκαιης λύσης». Ενώ, κατά τη δεύτερη παράγραφο του ίδιου άρθρου, στην περίπτωση που καταστεί αδύνατη η συμφωνία της πρώτης παραγράφου τα ενδιαφερόμενα μέρη, μέσα σε εύλογο χρονικό διάστημα, προσφεύγουν στις διαδικασίες που προβλέπονται στο Μέρος XV. Ας σημειωθεί εδώ ότι ενώ στο Μέρος XV της Σύμβασης ΔΘ προβλέπεται η διευθέτηση της διαφοράς μέσω συνδιαλλαγής, εντούτοις δεν υφίσταται υποχρέωση συμμόρφωσης στη σχετική απόφαση. Από την άλλη πλευρά, σχετικά με την οριοθέτηση της υφαλοκρηπίδας, όπως ορθά αναφέρεται «στη νομολογία και τη διεθνή πρακτική, η οριοθετική γραμμή της υφαλοκρηπίδας συμπίπτει πάντοτε με την οριοθετική γραμμή της Αποκλειστικής Οικονομικής Ζώνης και αντιστρόφως» και «εξυπακούεται ότι τα παράκτια κράτη που έχουν ήδη προβεί σε οριοθέτηση της υφαλοκρηπίδας τους, κατά την

οριοθέτηση της ΑΟΖ θα πρέπει να εφαρμόζουν τις ίδιες αρχές και κανόνες ώστε να υπάρχει η ανωτέρω ταύτιση των οριοθετικών γραμμών» [23].

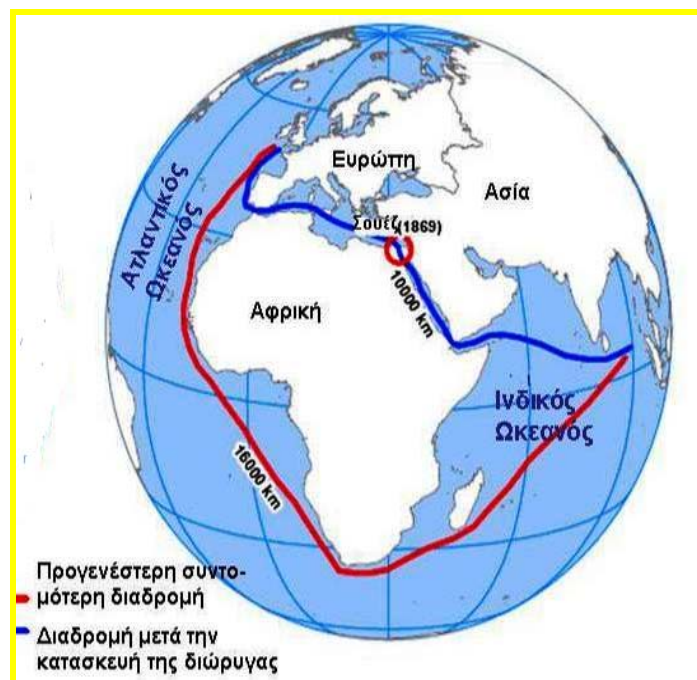
ΓΕΩΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΔΙΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΑΝΑΤΟΛΙΚΗΣ ΜΕΣΟΓΕΙΟΥ

Οι υδρίτες μεθανίου, ή αλλιώς ενυδατωμένοι υδρογονάνθρακες (gas hydrates), [σωματίδια στερεάς μορφής από μόρια νερού και φυσικού αερίου υδρογονάνθρακα], αποτελούν μια νέα μορφή ενεργειακών πόρων που έχουν σημαντικό γεωπολιτικό και τεχνολογικό ενδιαφέρον. Και τούτο διότι οι εκτιμήσεις των αποθεμάτων τους ξεπερνούν όλων των λοιπών συμβατικών ενεργειακών αποθεμάτων. Με την υπάρχουσα τεχνολογία, η εκμετάλλευσή τους αναμένεται στα επόμενα 10-15 χρόνια να κυριαρχήσει στην παγκόσμια αγορά, ενώ θα αποτελέσουν τον πρωταγωνιστικό ενεργειακό πόρο του πλανήτη την επόμενη εικοσαετία. Έχουν τύχει παγκόσμια προσοχής, γιατί αποτελούν ίσως μελλοντικά μία ανεξάντλητη πηγή φυσικού αερίου [24]. Μάλιστα, η ΕΕ έχει αναπτύξει ερευνητικά προγράμματα για τον εντοπισμό πιθανών κοιτασμάτων υδριτών. Μέχρι σήμερα, υδρίτες μεθανίου έχουν βρεθεί στη Νορβηγική Θάλασσα, τη Θάλασσα Μπάρεντς και την Ανατ. Μεσόγειο. Το Κέντρο Γεωλογικών Μελετών των ΗΠΑ (USGS) εκτιμά ότι η Ανατ. Μεσόγειος μπορεί να διαθέτει περισσότερα από 300 τρισ. κυβικά πόδια (Tcf) εκμεταλλεύσιμου φυσικού αερίου [25]. Όσον αφορά τη ΝΑ Μεσόγειο κοιτάσματα έχουν βρεθεί νοτίως της Κρήτης, στην περιοχή νότια του Καστελλόριζου και μεταξύ Ρόδου – Κύπρου (υποθαλάσσια οροσειρά «Αναξίμανδρος») [26] και πιο πρόσφατα στη λεκάνη του Δέλτα του Νείλου (Niger Delta Basin) και στη λεκάνη της Λεβαντίνης (Levant Basin) στα κοιτάσματα «Tamar», «Dalit» και «Leviathan» μεταξύ των Αποκλειστικών Οικονομικών Ζωνών (ΑΟΖ) Κύπρου, Ισραήλ, Λιβάνου και Αιγύπτου (υποθαλάσσια οροσειρά «Ερατοσθένης») [27].

Πέραν της κρίσιμης σημασίας που αδιαμφισβήτητα έχει η παρουσία ενεργειακών πόρων στο βυθό της Ανατ. Μεσογείου, η γεωοικονομική σπουδαιότητα της Μεσογείου Θάλασσας συνολικά ενισχύεται περαιτέρω και από το γεγονός ότι αυτή αποτελεί τον κοινό τόπο τριών ηπείρων: Ευρώπης, Ασίας και Αφρικής. Επισημαίνεται ότι στην παρούσα ανάλυση η Μεσόγειος και ο Περσικός Κόλπος εντάσσονται γεωπολιτικά στην ίδια περιφέρεια, ενώ η Τουρκία και η Αίγυπτος (Σουέζ) μπορούν να αντιμετωπιστούν ως χερσαίες και θαλάσσιες γέφυρες ανάμεσα στην Ευρώπη και τη Μέση Ανατολή – ΝΔ Ασία. Στο πλαίσιο αυτό, η Ελλάδα κατέχει θέση στρατηγικής σημασίας για τις θαλάσσιες μεταφορές που κινούνται στον άξονα Αζορών – Περσικού Κόλπου [28]. Ανέκαθεν η Μεσόγειος αποτελούσε ζώνη πολιτιστικής σύνθεσης αλλά και αντιπαράθεσης ή σύγκρουσης, καθώς ένα μεγάλο μέρος της ιστορικής κληρονομιάς λαών με παντελώς διαφορετική κουλτούρα (αραβικός, μουσουλμανικός, ευρωπαϊκός πολιτισμός) συνδέεται με τη θάλασσα αυτή (Αραβες, Οθωμανοί, Έλληνες, Βυζαντινοί, Ευρωπαίοι). Το γεγονός ότι μέρος αυτών των διαφορετικοτήτων εξακολουθεί και σήμερα να συναντάται, να συνδιαλέγεται και να αντιπαράκειται στη νότια πλευρά της Μεσογείου οφείλεται, πέραν των άλλων, και στη γεωπολιτική και γεωστρατηγική σημασία αυτής της περιοχής, ιδίως της Ανατ. Μεσογείου. Ας σημειωθεί ότι το ανατολικότερο τμήμα της αποτελεί το σημαντικότερο από οικονομική, γεωπολιτική και στρατηγική άποψη [29].

Ειδικά για την Ανατ. Μεσόγειο, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στις δύο θαλάσσιες πύλες της, μέσω των οποίων συνδέεται με άλλες θάλασσες και ωκεανούς. Την πρώτη από αυτές αποτελούν τα Στενά των Δαρδανελλίων, με τα οποία η Μεσόγειος (και το Αιγαίο Πέλαγος) έχουν επικοινωνία με τον Εύξεινο Πόντο και τις Παρευξείνιες Χώρες, ενώ ακολούθως γι' αυτές εξασφαλίζεται η έξοδος στις ανοικτές (θερμές) θάλασσες. Η δεύτερη πύλη της Ανατ. Μεσογείου, που αποτελεί κομβικό σημείο για την ομαλή διεξαγωγή του παγκόσμιου εμπορίου, είναι η Διώρυγα του Σουέζ, η οποία συνιστά τον συνδετικό κρίκο μεταξύ Ατλαντικού και Ινδικού Ωκεανού, καθώς οι μέσω Μεσογείου θαλάσσιες μεταφορές έχουν τη συντομότερη διαδρομή ανάμεσα σε αυτούς (βλ. σχήμα 3). Με τη συγκεκριμένη κατασκευή, η Μεσόγειος επικοινωνεί απρόσκοπτα με την Ερυθρά Θάλασσα και αποκτά πρόσβαση στον Περσικό Κόλπο και τον

Ινδικό Ωκεανό, αποτελώντας με τον τρόπο αυτό έναν αναντικατάστατο κρίκο στη μεταφορική αλυσίδα και στον ανεφοδιασμό της Ευρώπης (αλλά και όλου του λεγόμενου Δυτικού Κόσμου) με τα πετρέλαια της περιοχής του Περσικού Κόλπου και τα εμπορικά προϊόντα της Ασίας και της ανατολικής Αφρικής [30]. Επομένως, η περιοχή της Ανατ. Μεσογείου αναγνωρίζεται ως σημαντικός χώρος διεθνών θαλάσσιων μεταφορών με κόμβους τα μεγάλης εμβελείας ευρωπαϊκά λιμάνια στο νότιο τμήμα της ηπείρου. Χάρη στη Διώρυγα του Σουέζ και τη συνακόλουθη συντόμευση στη σύνδεση μεταξύ Ινδικού και Ατλαντικού Ωκεανού, η Ανατ. Μεσόγειος εξυπηρετεί έναν τεράστιο αριθμό συγκλινουσών (παγκόσμιων) θαλάσσιων ζεύξεων και πληθώρα δρομολογίων. Από την άλλη πλευρά, η Δυτική Μεσόγειος καταλήγει στα Στενά του Γιβραλτάρ μέσω των οποίων συνδέεται με τον Ατλαντικό Ωκεανό. Διαμορφώνονται, επομένως, δύο βασικοί άξονες, με ιδιαίτερη σημασία για τις θαλάσσιες μεταφορές: α) Ατλαντικός - Μεσόγειος - Ερυθρά Θάλασσα - Ινδικός και β) Μαύρη Θάλασσα - Αιγαίο – Μεσόγειος - Ινδικός.

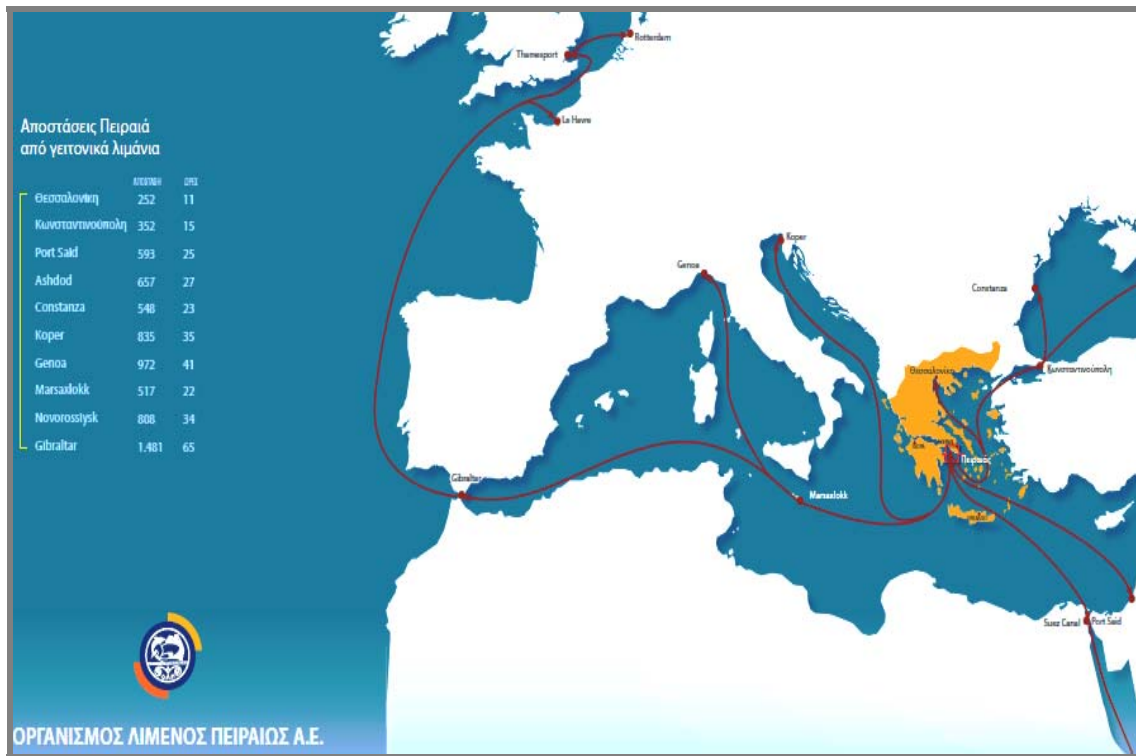


ΣΧΗΜΑ 3. Η επιρροή των Διωρύγων Σουέζ και Παναμά στις θαλάσσιες μεταφορές [31].

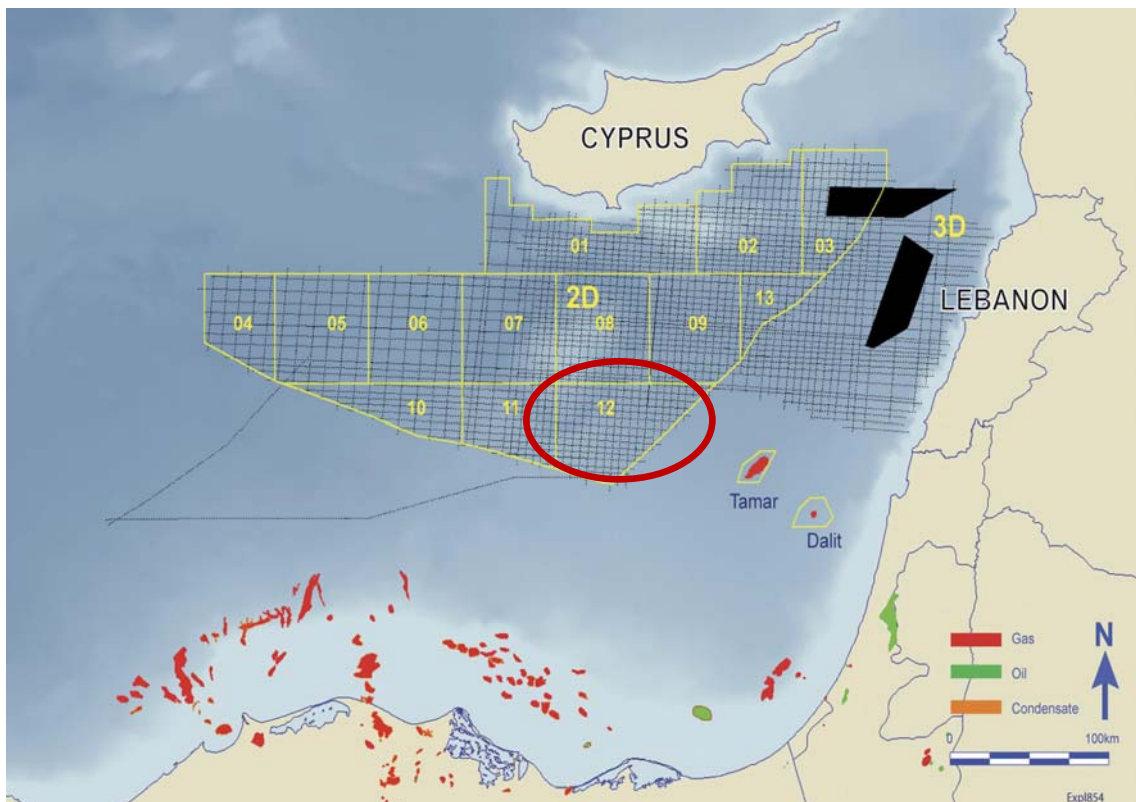
Μάλιστα, η Διώρυγα του Σουέζ διατηρεί σημαντικότερο ρόλο στην εξυπηρέτηση του εμπορίου μεταξύ Ασίας και Ευρώπης, κάτι που λειτουργεί ιδιαίτερα υπέρ της Ελλάδας, εφόσον σημαντικές επιχειρηματικές ευκαιρίες διευκολύνονται λόγω αυτής. Μάλιστα, με τη μετατόπιση αριθμού πλοίων προς το λιμάνι του Πειραιά ή της Θεσσαλονίκης και στη συνέχεια με τη σιδηροδρομική προώθηση των εμπορευμάτων (και ειδικότερα του πετρελαίου μέσω αγωγών) προς τις βαλκανικές χώρες και τις χώρες της Κεντρικής και Ανατολικής Ευρώπης, υπάρχει η δυνατότητα να αποσυμφορηθεί η θαλάσσια κυκλοφορία στη Μεσόγειο (βλ. σχήμα 4) και να μειωθούν τα αυξημένα μεταφορικά κόστη που προκαλεί η επιλογή ως τερματικού σταθμού των πλοίων οποιοδήποτε σημείου δυτικότερα της Ελλάδος. Ιδίως, το λιμάνι της Θεσσαλονίκης και η επέκταση της σιδηροδρομικής του σύνδεσης με τη Βάρνα ή ακόμα και το λιμάνι της Κωσταντζας στη Ρουμανία, στο πλαίσιο των συνδυασμένων μεταφορών, μπορεί να καταστήσει δυνατή τη διεκπεραίωση του εμπορίου με τις χώρες που βρέχονται από τη Μαύρη Θάλασσα, χωρίς να απαιτηθεί η διέλευση των κορεσμένων Στενών του Βοσπόρου [32]. Δεδομένης και της περαιτέρω διεύρυνσης της ΕΕ στον γεωγραφικό χώρο της Βαλκανικής, ανάλογες ευκαιρίες

εντοπίζονται σε υποψήφιες προς ένταξη χώρες, αλλά και σε όσες γειτνιάζουν με την περιφέρεια της ΕΕ. Οι σύγχρονες υποδομές με τις οποίες πλαισιώνεται (ή θα πλαισιωθεί στο ορατό μέλλον) το λιμάνι της Θεσσαλονίκης μπορεί να το αναδείξουν σε πύλη εξυπηρέτησης των μεταφορικών αναγκών που ξεπερνά την περιφερειακή εμβέλεια. Και τούτο διότι το λιμάνι της Θεσσαλονίκης, εκτός από τις γειτονικές χώρες της ΝΑ Ευρώπης, μπορεί να αποφορτίσει τον όγκο φορτίων που διακινείται μέσω Στενών Βοσπόρου - Δαρδανελλίων, καθώς επίσης και τον όγκο των διακινούμενων εμπορευμάτων μεταξύ της Ευρώπης και της Ρωσίας, της Ουκρανίας και των άλλων χωρών στη γενικότερη περιοχή του Καυκάσου.

Όσον αφορά τον τομέα της εκμετάλλευσης ενεργειακών πόρων, η Κύπρος και το Ισραήλ κατά την τρέχουσα χρονική περίοδο έχουν εντατικοποιήσει την συνεργασία τους σημαντικά, καθώς το κοιτάσμα «Λεβιάθαν» που οριοθετείται μεταξύ των δύο χωρών εκτιμάται ότι διαθέτει φυσικό αέριο της τάξης των 300 δισ. κυβικών μέτρων (bcm). Παράλληλα, δεν αποκλείεται το «Λεβιάθαν» να περιέχει και ικανά αποθέματα πετρελαίου. Το κοιτάσμα «Cyprus A», ή αλλιώς «Οικόπεδο 12» (βλ. σχήμα 5), στο όριο της Κυπριακής Αποκλειστικής Οικονομικής Ζώνης (ΑΟΖ), αποτελεί ουσιαστικά μια ενότητα με το «Λεβιάθαν». Τις έρευνες και τις άδειες εκμετάλλευσης των κοιτασμάτων του Ισραήλ έχει αναλάβει η αμερικανική εταιρεία Noble Energy Ltd που εδρεύει στο Χιούστον σε κοινοπραξία με ισραηλινές εταιρείες. Στην ίδια εταιρεία έχει ανατεθεί η άδεια για την έρευνα του παρακείμενου κυπριακού «Οικόπεδου 12». Τα κοιτάσματα φυσικού αερίου και πετρελαίου που έχουν εντοπιστεί στην Ανατ. Μεσόγειο και η διάχυτη πεποίθηση ότι η ευρύτερη περιοχή πολύ πλούσια σε ενεργειακούς πόρους προκαλούν τριβές, ήδη από το 2008. Επισημαίνεται, ωστόσο, ότι η έκρυθμη κατάσταση του αραβικού κόσμου όπως αποτυπώνεται με τους τριγμούς και τη διάλυση των κρατικών δομών πολλών από τα χρόνια παγιωμένα αυταρχικά καθεστώτα της περιοχής, καθώς επίσης και διάφορα ζητήματα που επιδρούν σε κλιμακούμενο βεβαίως βαθμό στις διεθνείς σχέσεις, όπως το Κουρδικό, το Παλαιστινιακό, το Κυπριακό και οι ελληνοτουρκικές διαφορές, καθιστούν τις χώρες πέριξ της Ανατ. Μεσογείου αποδέκτες σημαντικών γεωστρατηγικών επιπτώσεων. Τα παραπάνω, σε συνδυασμό με την πρόκληση των νέων ενεργειακών κοιτασμάτων της Ανατ. Μεσογείου, δημιουργούν ένα ολοένα και πιο περίπλοκο γεωπολιτικό περιβάλλον. Μάλιστα, οι πρόσφατες εξεγέρσεις κατά των καθεστώτων της Μέσης Ανατολής και της Βόρειας Αφρικής μπορούν να λειτουργήσουν αποσταθεροποιητικά και για τον υπόλοιπο αραβικό κόσμο και πιθανότατα να επηρεάσουν αρνητικά και τις άλλες γειτονικές τους περιοχές. Διαφαίνεται λοιπόν ότι δημιουργείται μια συγκρουσιακή κατάσταση αυξομειούμενης έντασης σε βάθος χρόνου, η οποία, εκτός από την επιδείνωση της εσωτερικής κατάστασης ασφάλειας στις ίδιες τις χώρες όπου πραγματοποιούνται οι εξεγέρσεις, θα έχει ως αποτέλεσμα και την ανάδυση νέων απειλών και κινδύνων, καθώς: α) Απειλείται η σταθερότητα στην ευρύτερη περιοχή του αραβικού κόσμου. β) Επηρεάζονται οι σχέσεις συνεργασίας / σύγκρουσης μεταξύ των χωρών που εμπλέκονται στις εξεγέρσεις. γ) Δημιουργούνται προϋποθέσεις για νέα μαζικά ρεύματα μεταναστών και προσφύγων προς τις χώρες της Ευρώπης. δ) Η ενεργειακή ασφάλεια του δυτικού κόσμου τίθεται σε αμφιβολία, και ε) Αυξάνεται η τιμή των ενεργειακών πόρων και διακυβεύεται πιθανώς η ίδια η ανάκαμψη της παγκόσμιας οικονομίας.



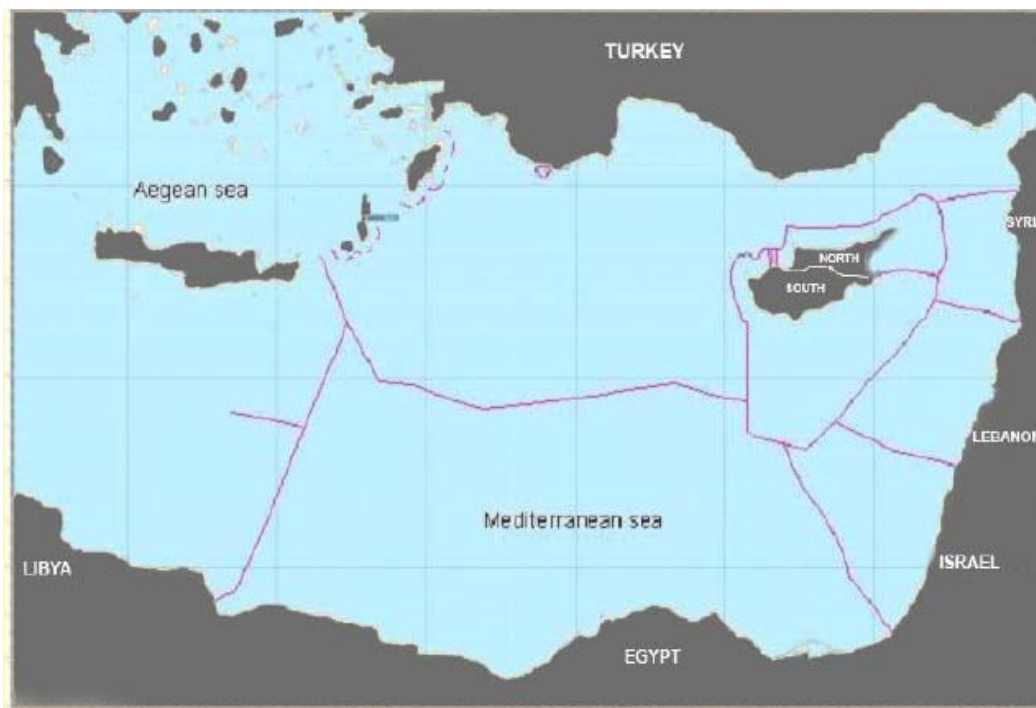
ΣΧΗΜΑ 4. Ελληνικοί λιμένες ως σύνδεσμος για θαλάσσιες μεταφορές [33].



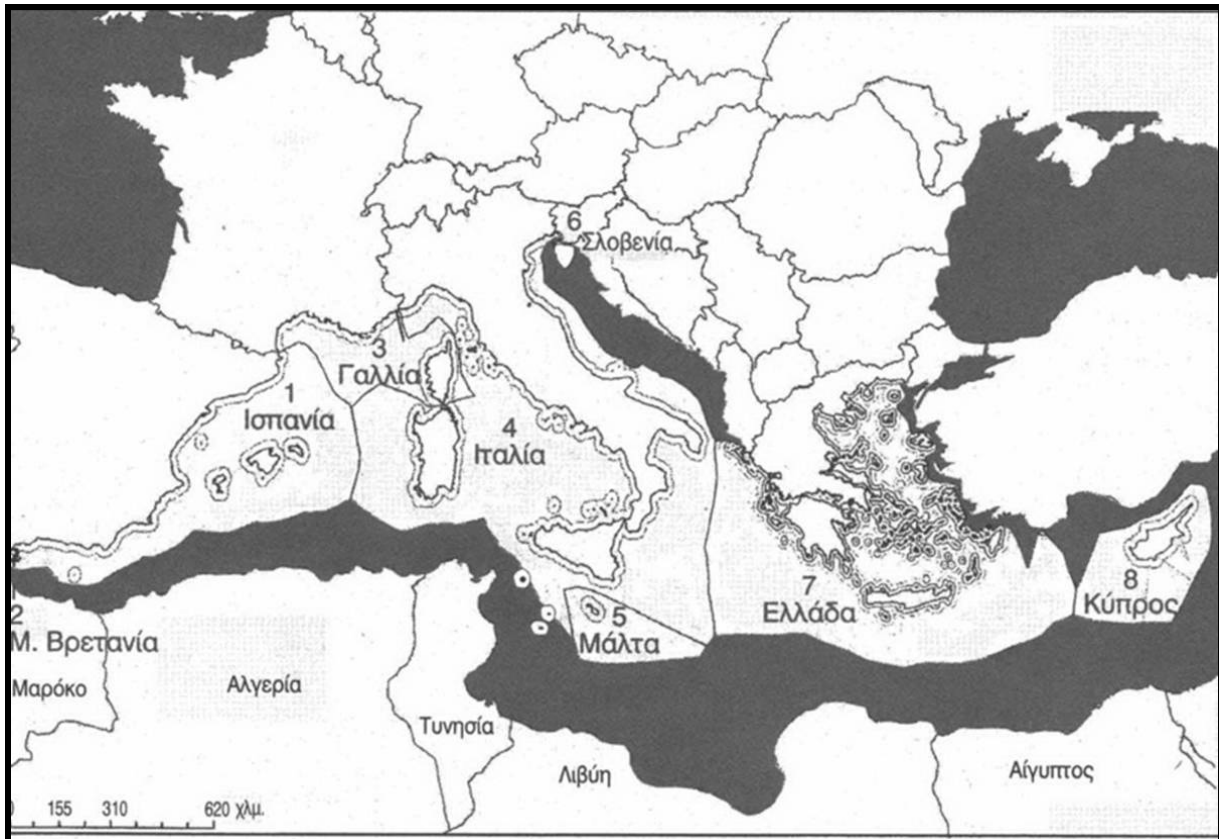
ΣΧΗΜΑ 5. Το Κυπριακό «Οικόπεδο 12» [34].

Η ΚΥΠΡΙΑΚΗ ΠΡΟΣΠΑΘΕΙΑ ΣΤΟΝ ΤΟΜΕΑ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Όπως κατέστη προφανές από τα ανωτέρω, τα ευρήματα στη θαλάσσια περιοχή μεταξύ Κύπρου, Αιγύπτου και Ισραήλ προσέδωσαν ιδιαίτερη ενεργειακή αξία στην περιοχή νότια της Κύπρου [35]. Σε εύλογο χρόνο, η Κύπρος (επί Προεδρίας Τάσσου Παπαδόπουλου) προχώρησε στη διαδικασία του πρώτου γύρου παραχωρήσεων αδειών για έρευνες, όπως προβλέπει η ανάλογη Ευρωπαϊκή Οδηγία και οι νόμοι της Κυπριακής Δημοκρατίας. Οι κινήσεις αυτές ήταν εκδήλωση αποφασιστικότητας για την άσκηση των κυριαρχικών δικαιωμάτων της Κύπρου στην ΑΟΖ της. Η Τουρκία, όμως, δεν παρέμεινε απαθής. Χρησιμοποιώντας τη γνωστή τακτική αυθαίρετων διεκδικήσεων, εξέδωσε άδειες ερευνών στην τουρκική κρατική εταιρεία ΤΡΑΟ, δυτικά της Κύπρου και με μερική επικάλυψη κάποιων μπλοκ της Κυπριακής Δημοκρατίας. Η δημοσίευση των σχετικών χαρτών είχε σκοπό να δημιουργήσει προβλήματα στην εκδήλωση ενδιαφέροντος από ξένες εταιρείες που ήθελαν να συμμετάσχουν στον γύρο παραχωρήσεων της Κυπριακής Δημοκρατίας, αφού, στους χάρτες αυτούς που εξέδωσε η Τουρκία, είναι σαφής η αλληλοεπικάλυψη των παραχωρήσεων της Τουρκίας και της Κύπρου στο ΒΔ μέρος των παραχωρήσεων. Επιπλέον, ήδη από το 2008 η Τουρκία ξεκίνησε τη - γνωστή ήδη από το 1973 αναφορικά με το Αιγαίο - τακτική των προκλητικών ενεργειών στις θαλάσσιες περιοχές κυριαρχικών δικαιωμάτων της Κυπριακής Δημοκρατίας. Εκτός από τα προβλήματα που προκάλεσαν στην Κύπρο, οι συγκεκριμένοι τουρκικοί χάρτες δημιουργούν ταυτόχρονα και σοβαρά ερωτηματικά αναφορικά με τα ελληνικά συμφέροντα. Αγνοώντας επιδεικτικά την Ελλάδα, η Τουρκία εξαφανίζει την υφαλοκρηπίδα - ΑΟΖ του Καστελλόριζου (βλ. σχήμα 6) και παρεμβαίνει έντονα στην (προς διακήρυξη, εφόσον αυτό κριθεί σκόπιμο) ελληνική ΑΟΖ. Εφαρμόζοντας τη γνωστή πρακτική της ανακολουθίας με το Διεθνές Δίκαιο της Θάλασσας [36], ώστε όπου αυτό εξυπηρετεί τις επιδιώξεις της να το εφαρμόζει κατά γράμμα και όπου δεν τη συμφέρει, επιδεικτικά αγνοεί τους αντίστοιχους δικαίους κανόνες, εντάσσοντας στην επιχειρηματολογία της την ασύμβατη με το διεθνές δίκαιο έννοια του «ζωτικού χώρου» [37].



ΣΧΗΜΑ 6. Διαχωρισμός θαλασσιών ζωνών ΝΑ Μεσογείου, κατά την τουρκική άποψη [38].



ΣΧΗΜΑ 7. Αποκλειστικές Οικονομικές Ζώνες των κρατών της ΕΕ στην Αν. Μεσόγειο σύμφωνα με την εν ισχύ Διεθνούς Σύμβασης για το Δίκαιο της Θάλασσας [40].

Στο σχήμα 6 που προηγήθηκε, είναι εμφανής η τουρκική προσπάθεια να θεωρηθεί ότι η Κύπρος αποτελείται από δύο κράτη, με την αποκαλούμενη «Νότιο» Κύπρο να διαθέτει μια αρκετά περιορισμένη ΑΟΖ. Επιπλέον, με αυτόν τον τρόπο οι Τούρκοι κάνουν προφανή την άρνησή τους να δώσουν δικαιώματα ΑΟΖ στην Κρήτη και στα Δωδεκάνησα, ενώ, με την αποτύπωση της συγκεκριμένης οριοθέτησης, διαφαίνεται να δηλώνουν ότι έχουν θαλάσσια σύνορα με την Αίγυπτο. Η σοβαρότητα της υπόθεσης έγκειται στο γεγονός ότι έχουν ήδη προσεγγίσει τις Αιγυπτιακές αρχές για την αποδοχή μια τέτοιας οριοθέτησης που δεν θα δίνει δικαιώματα ΑΟΖ στα ελληνικά νησιά Καστελλόριζο και Στρογγύλη και έτσι να επιτύχουν το ότι η ΑΟΖ της Αιγύπτου συνορεύει με την ΑΟΖ της Τουρκίας. Αυτό βέβαια συνεπάγεται ότι κατά την δική τους προσέγγιση δεν υπάρχουν θαλάσσια σύνορα ανάμεσα στην Ελλάδα και την Κύπρο. Η όλη κατάσταση επιδεινώθηκε το 2009 με την πρόθεση της κυπριακής κυβέρνησης να προχωρήσει σε δεύτερο γύρο παραχωρήσεων, αγνοώντας τις τουρκικές αντιδράσεις. Οι προθέσεις της κυπριακής κυβέρνησης είχαν ως αποτέλεσμα την άμεση αντίδραση της Τουρκίας με έκδοση νέων αδειών με αντίστοιχους χάρτες, στην κρατική εταιρεία πετρελαίου ΤΡΑΟ. Οι μονομερείς κινήσεις της Τουρκίας, ο νέος χάρτης παραχωρήσεων και η τουρκική εμμονή σε περαιτέρω διεκδικήσεις προκαλεί περαιτέρω προβλήματα στην Ελλάδα, η οποία επί του παρόντος έχει αντιδράσει εξαιρετικά ήπια. Οι θαλάσσιες οικονομικές ζώνες Κύπρου και Ελλάδας, θα ήταν ενωμένες αν εφαρμοζόταν το διεθνές δίκαιο. Με τις τουρκικές επιδιώξεις αυτές διχοτομούνται και αποκόπτονται [39]. Το πώς θα οριοθετούνταν οι ΑΟΖ των χωρών της νοτιοανατολικής Μεσογείου αν εφαρμόζονταν ρητά και απαρέγκλιτα οι προβλέψεις του διεθνούς Δικαίου της Θάλασσας παρουσιάστηκε στο σχήμα 7. Είναι εμφανές ότι η ελληνική ΑΟΖ θα είχε κοινά σημεία επαφής με την αντίστοιχη κυπριακή, ενώ, η ΑΟΖ της Αιγύπτου δεν έχει κοινά σύνορα με αυτήν της Τουρκίας, τα οποία και σήμερα η τελευταία φέρεται να διαπραγματεύεται

οριοθέτησή τους. Επίσης, επισημαίνεται ιδιαίτερα η επιθετική πολιτική της Τουρκίας και η χρησιμοποίηση των ερευνών πετρελαίου και της κρατικής εταιρείας της (ΤΡΑΟ) στην άσκηση επεκτατικής πολιτικής. Υπό την έννοια αυτή, για την Ελλάδα, η μέχρι τούδε αναβλητικότητα (σε θέματα οριοθέτησης ΑΟΖ) δύναται να την οδηγήσει στη συρρίκνωση των κυριαρχικών δικαιωμάτων της.

Πέραν των προαναφερθέντων γύρων παραχωρήσεων του έτους 2009 για έρευνες υδρογονανθράκων, τόσο από Κυπριακής όσο και από Τουρκικής πλευράς στην περιβάλλουσα θαλάσσια περιοχή της Κύπρου, η ανακάλυψη των ενεργειακών κοιτασμάτων στα όρια των ΑΟΖ Κύπρου και Ισραήλ, μετέβαλε άρδην την κυπριακή στρατηγική. Τούτο διότι στη συγκεκριμένη περιοχή των κοιτασμάτων (Levant Basin) η Τουρκία δεν έχει τη γεωλογική, γεωφυσική αλλά και διεθνοδικαιϊκή δυνατότητα να διεκδικήσει κοιτάσματα υδρογονανθράκων, αλλά ούτε και με την παρούσα πολιτική της έναντι του Ισραήλ μπορεί να αναμειχθεί σε επιχειρηματικό επίπεδο. Έτσι, η Κύπρος εκμεταλλεζόμενη αυτή τη γεωπολιτική συγκυρία, ήρθε το 2010 σε συνεργασία με το Ισραήλ επιτυγχάνοντας συμφωνία για συνεκμετάλλευση των γειτνιαζόντων κοιτασμάτων «Λεβιάθαν» και «Οικόπεδο 12» της λεκάνης της «Λεβαντίνης» ως μία ενιαία περιοχή ενδιαφέροντος και για τα δύο κράτη. Οι πιο πρόσφατες δε μελέτες εκτίμησαν με ισχυρές ενδείξεις ότι το κοίτασμα «Λεβιάθαν», διαθέτει αέριο 453 δισ. κυβικών μέτρων. Η γεώτρηση στον «Λεβιάθαν» ξεκίνησε εντός του 2011 από την εταιρεία Noble Energy Ltd και, σύμφωνα με τις εκτιμήσεις των εταιρειών που εμπλέκονται προβλέπεται να έχει μεγάλη επιτυχία. Μαζί με το σύμπλεγμα των κοιτασμάτων «Ταμάρ», θα μπορούσε να αποτελέσει μια από τις πιο σημαντικές ανακαλύψεις ενεργειακών πόρων των τελευταίων ετών κι από τις μεγαλύτερες στον κόσμο, ενώ, σύμφωνα με την εφημερίδα *Economist*, τα δύο κοιτάσματα θα μπορούσαν να παράσχουν αέριο αξίας 4 δισ. δολαρίων ετησίως. Ταυτόχρονα, το κοίτασμα «Cyrus A» ή αλλιώς «Οικόπεδο 12» της Κυπριακής Δημοκρατίας εικάζεται ότι έχει πιθανά αποθέματα αερίου 300 δισ. κυβικών μέτρων [41]. Ωστόσο, είναι πολύ πρόωρο να μιλά κανείς με απόλυτη αισιοδοξία, καθώς από τη μια ακόμη δεν είναι σίγουρο τι ακριβώς και σε τι ποσότητα περιέχει το κοίτασμα «Λεβιάθαν», ενώ για να προχωρήσει ένα τέτοιο έργο απαιτείται σειρά διακρατικών συμφωνιών που αφορούν τις θαλάσσιες ζώνες. Η πρώτη, που αφορούσε μια συμφωνία για την οριοθέτηση ΑΟΖ Κύπρου - Ισραήλ, επιτεύχθηκε με την υπογραφή της στις 17 Δεκεμβρίου 2010. Η Συμφωνία αποτελεί περαιτέρω βήμα κατοχύρωσης της ΑΟΖ της Κύπρου, «γεμίζοντας» το κενό μεταξύ Αιγύπτου και Λιβάνου, γειτονικές χώρες με τις οποίες ήδη βρίσκονται ανάλογες συμφωνίες σε ισχύ. Δημιουργεί, δε, τις προϋποθέσεις και για συνεκμετάλλευση του θαλάσσιου πλούτου, με μία ιδιαίτερα ισχυρή χώρα, όπως το Ισραήλ, στέλνοντας σαφές μήνυμα στην Τουρκία για τα κυριαρχικά δικαιώματα της Κυπριακής Δημοκρατίας, τα οποία με αυτό τον τρόπο επαναβεβαίωσε ο άλλος ισχυρός περιφερειακός παράγοντας (Ισραήλ) [42].

Ωστόσο, αγκάθι για την πλήρη εκμετάλλευση των ενεργειακών πόρων της περιοχής παραμένει μια συμφωνία μεταξύ Λιβάνου και Ισραήλ, καθώς το μεν Ισραήλ θεωρεί ότι το πολύτιμο κοίτασμα βρίσκεται σε δική του περιοχή, ενώ ο Λίβανος διεκδικεί το δικό του μερίδιο. Ο Λίβανος, ο οποίος έχει πραγματοποιήσει δικές του έρευνες στην υφαλοκρηπίδα του, ανησυχώντας ότι το Ισραήλ θα προλάβει να κάνει χρήση των κοιτασμάτων στα συνορεύοντα ύδατα, έχει επιταχύνει εδώ και καιρό την προσπάθεια να επικυρώσει σχετικό νόμο για την ενέργεια. Το Ισραήλ υποστηρίζει ότι τα «οικόπεδα», στα οποία πραγματοποιεί έρευνες, δεν επεκτείνονται σε λιβανέζικα ύδατα, ισχυρισμό τον οποίο οι ειδικοί φαίνεται να βρίσκουν σωστό, καθώς τα κοιτάσματα «Ταμάρ» - «Λεβιάθαν» βρίσκονται νοτιότερα της υποτιθέμενης «διαφιλονικούμενης» γραμμής. Όμως τα θαλάσσια σύνορα ανάμεσα στις δύο χώρες δεν έχουν οριστεί ακριβώς. Σύμφωνα μάλιστα με δημοσιογραφικές πηγές, το Ισραήλ σκοπεύει μετά την οριοθέτηση με την Κύπρο να προσεγγίσει διπλωματικά τον Λίβανο ελπίζοντας ότι θα μπορέσει να έρθει σε συμφωνία μαζί του σε καθεστώς διαιτησίας υπό τον ΟΗΕ [43]. Πέραν των ανωτέρω, πριν μερικά χρόνια η κυπριακή πλευρά προσέγγισε την ελληνική κυβέρνηση και της ζήτησε να προχωρήσουν στην οριοθέτηση της ΑΟΖ μεταξύ των δύο κρατών, αλλά η Ελληνική Κυβέρνηση επιφυλάχθηκε να ανταποκριθεί θετικά. Τέλος, σημαντικό ενδιαφέρον παρουσιάζει και το γεγονός

ότι πλην Τουρκίας, Ισραήλ, Συρίας, Λιβύης και Μαρόκου, όλα τα υπόλοιπα Κράτη της Μεσόγειου και Μαύρης Θαλάσσης, έχουν κυρώσει τη Σύμβαση ΔΘ (γνωστή επίσης και ως Σύμβαση του Montego Bay του 1982 ή UNCLOS III). Επίσης, την υπό συζήτηση σύμβαση έχει κυρώσει και η Μ. Βρετανία που στη Μεσόγειο έχει παρουσία λόγω της κτήσης του Γιβραλτάρ και των δύο παραχωρημένης κυριαρχίας Βάσεων στην Κύπρο [44].

ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ένας από τους λόγους που η Τουρκία καταψήφισε τη Σύμβαση ΔΘ (το 1982) ήταν ακριβώς το γεγονός ότι η σύμβαση δεν υιοθέτησε τις τουρκικές προτάσεις σχετικά με τις οριοθετήσεις επικαλυπτόμενων υφαλοκρηπίδων ή ΑΟΖ στις ημίκλειστες θάλασσες, προτάσεις οι οποίες αποσκοπούσαν ουσιαστικά σε μία διχοτόμηση του Αιγαίου Πελάγους. Πρέπει, όμως, εδώ να σημειωθεί το εξής: η Σύμβαση ΔΘ δεν είναι οποιοδήποτε συμβατικό κείμενο. Είναι ένα κείμενο, το οποίο έγινε αποδεκτό από το σύνολο της διεθνούς κοινότητας με ελάχιστες πλέον εξαιρέσεις, ενώ το μεγαλύτερο μέρος του κειμένου του έχει ήδη καταστεί μέρος του εθιμικού δικαίου. Επομένως, η άρνηση της Τουρκίας να αποδεχθεί τις ρυθμίσεις του ισοδυναμεί ουσιαστικά με άρνησή της να αποδεχθεί ισχύον διεθνές δίκαιο. Ορθά αναφέρεται ότι «[η] όλη θεώρηση της Τουρκίας αναφορικά με το Αιγαίο είναι αμιγώς πολιτική, συνοδευόμενη από απειλές τύπου «casus belli». Προκρίνει, πρωταρχικά, τις πολιτικές μεθόδους επίλυσης (π.χ. διαπραγματεύσεις) των οποίων διαφορών αυτή ορίζει, γι' αυτό και η επίκαιρη γενικόλογη επίκληση του άρθρου 33(1) Χάρτη ΗΕ, που καταγράφει, ενδεικτικά, τις νομικές / πολιτικές μεθόδους διευθέτησης των διαφορών. Εξάλλου, δεν αναγνωρίζει τη δικαιοδοσία του Διεθνούς Δικαστηρίου. Οι πολιτικές μέθοδοι επίλυσης διαφορών (διαπραγμάτευση, μεσολάβηση, συνδιαλλαγή, καλές υπηρεσίες) επιτρέπουν σχετικά εύκολα την απομάκρυνση από την αυστηρή εφαρμογή και ερμηνεύει το ισχύον – συμβατικό και εθιμικό – διεθνές δίκαιο, ακόμη κι όταν οι διάδικοι του υποδεικνύουν -με συνυποσχετικό- «δίκαιες λύσεις»- ευθυδικία» [45].

Η Τουρκία έχει υιοθετήσει αιγιαλίτιδα Ζώνη 12 ν.μ. στη Μαύρη Θάλασσα και την Αν. Μεσόγειο, ένα γεγονός σε πλήρη συμφωνία με τις προβλέψεις του άρθρου 3 της Σύμβασης ΔΘ. Ωστόσο, την ίδια στιγμή απειλεί με πόλεμο την Ελλάδα, εφόσον εκείνη πράξει ακριβώς το ίδιο στο Αιγαίο. Επίσης, η χάραξη της αιγιαλίτιδας ζώνης ανάμεσα στα δύο όμορα κράτη, την Τουρκία και τη Σοβιετική Ένωση, έλαβε χώρα -στο σχετικά πρόσφατο παρελθόν- με βάση την αρχή των ίσων αποστάσεων (equidistance). Κάτι το οποίο αρνείται η Τουρκία για το Αιγαίο Πέλαγος, επικαλούμενη την αρχή της ευθυδικίας, που ουδεμία σχέση έχει με την αιγιαλίτιδα ζώνη [46]. Είναι σχεδόν βέβαιο ότι η στάση της Τουρκίας δεν είναι παράνομη με όρους διεθνούς δικαίου. Από την άλλη, όμως, πλευρά είναι απόλυτα βέβαιο ότι τέτοιες πολιτικές οι οποίες συνίστανται σε ευκαιριακή ερμηνεία και εφαρμογή διατάξεων μίας σύμβασης παγκοσμίου χαρακτήρα, όπως είναι η Σύμβαση ΔΘ κάθε άλλο παρά μπορούν να συμβάλλουν στην οικοδόμηση ενός ειρηνικού περιβάλλοντος και ενός περιβάλλοντος συνεργασίας και ασφάλειας στην περιοχή. Πολύ περισσότερο που οι περισσότερες ρυθμίσεις της Σύμβασης ΔΘ έχουν θεσπισθεί σε μορφή package deal, δηλαδή σε βάση «δούναι και λαβείν», που σημαίνει ότι ή αποδέχεται όλες τις ρυθμίσεις της σύμβασης ως «πακέτο» ή συνολικά τις απορρίπτει [47]. Αυτό μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό εάν υποθεθεί ότι ένας αριθμός κρατών που δεν είχε προσχωρήσει στη Σύμβαση ΔΘ έκανε επιλεκτική χρήση των ευνοϊκών διατάξεων της, δηλαδή των σημαντικότερων καρπών αυτής, αγνοώντας τις υποχρεώσεις που ακολουθούν αυτούς τους καρπούς. Θα επικρατούσε αυτόματα μια χαοτική κατάσταση, όχι σε διμερές, αλλά σε παγκόσμιο, πλέον, επίπεδο. Και τούτο είναι άκρως επικίνδυνο για τη διεθνή ασφάλεια που μαζί με την εθνική αξιοπρέπεια που είναι και τα ζητούμενα. Όσο για την Ελλάδα θα πρέπει να πιστέψει στον εαυτό της για να διεκδικήσει αυτά που δικαιούται να έχει, τα οποία εάν δεν διεκδικήσει στο τέλος θα χάσει εφόσον κανείς άλλος δεν θα της τα παραχωρήσει με δική του πρωτοβουλία. Ο χρόνος δεν είναι ο καλύτερος σύμμαχος σε αυτές τις περιπτώσεις.

Η παρούσα μελέτη κινήθηκε στην κατεύθυνση του σχολιασμού των νέων γεωπολιτικών δεδομένων στη Μεσόγειο Θάλασσα και ιδιαίτερα τα τεκταινόμενα στην ανατολική λεκάνη της, όπως αυτά διαμορφώνονται από τις πρόσφατες χρονικά ανακαλύψεις σημαντικών ενεργειακών αποθεμάτων στην εν λόγω περιοχή. Υπάρχει πληθώρα ενδιαφερομένων, οι οποίοι και συναντώνται στην Ανατ. Μεσόγειο, με τις εξελίξεις που καταγράφονται να είναι συνεχείς. Χωρίς η καταγραφή που ακολουθεί να είναι απολύτως πλήρης, επισημαίνονται η Κύπρος, η Ελλάδα, η Τουρκία και το Ισραήλ. Παράλληλα, υπάρχουν και συχτισμοί με άλλους κρατικούς ή/και υπερεθνικούς παράγοντες που παρακολουθούν εκ του σύνεγγυς τα ενεργειακά (και όχι μόνο) δρώμενα στην ευρύτερη περιοχή (όπως η Ρωσία και οι ΗΠΑ), καθώς και το NATO και η ΕΕ. Υφίστανται πολλοί αστάθμητοι παράγοντες στην όλη εξίσωση και δεν θα πρέπει να διαφεύγει της προσοχής μας ότι δεν υπάρχουν μόνιμοι σύμμαχοι, αλλά μόνιμα συμφέροντα, γι' αυτό πρέπει πάντα να υπάρχει και δεύτερο πλάνο στρατηγικής σε περίπτωση που οι συμμαχίες αλλάξουν. Υπό αυτό το πρίσμα, η εμμονή της Ελλάδας για την ενταξιακή πορεία της Τουρκίας στην ΕΕ θα πρέπει να μετριαστεί ή να διαμορφωθεί κατάλληλα ανάλογα με την πορεία των μεταξύ τους σχέσεων, προκειμένου να μην επιβεβαιωθούν οι φόβοι του μεγάλου στρατηγικού θεωρητικού Παναγιώτη Κονδύλη, όταν διαγίνωσκε πως «η ΕΕ, μη μπορώντας να δώσει στην Τουρκία όλα όσα επιθυμεί, θα επιδιώκει να την κατευνάσει με ελληνικό άξονα, πιέζοντας δηλαδή την Ελλάδα να δεχθεί τις τουρκικές αξιώσεις στο Αιγαίο και την Κύπρο. Αν αυτό πράγματι συμβεί, όπως φοβούμαι εντονότατα, τότε θα δούμε μια ακόμα από τις τραγικές εκείνες ειρωνείες, τις οποίες τόσο συνηθίζει η Ιστορία. Ενώ, δηλαδή, η Ελλάδα προσανατολίστηκε ψυχή τε και σώματι στην Ευρώπη για να διασφαλισθεί από τον τουρκικό κίνδυνο, ακριβώς ο ευρωπαϊκός προσανατολισμός της θα μεταβληθεί σε όργανο *de facto* μετατροπής της σε δορυφόρο της Τουρκίας» [48].

Περαιτέρω, παρατίθενται οι κάτωθι προτάσεις σε επίπεδο στρατηγικής, τόσο για την Ελλάδα όσο και για την Κύπρο, με απώτερο στόχο την εξυπηρέτηση κοινών συμφερόντων:

- Ενεργοποίηση εκ νέου των διπλωματικών - νομικών οδών πίεσης για το κυριαρχικό και νόμιμο δικαίωμα επέκτασης της Ελληνικής Χωρικής Θάλασσας στα 12 ν.μ., με παράλληλο καθορισμό με βάση τα εθνικά συμφέροντά της Στενών για τη Διεθνή Ναυσιπλοΐα και υποβολή τους στον Παγκόσμιο Οργανισμό Ναυτιλίας και το αρμόδιο τμήμα του ΟΗΕ.
- Πλήρης ολοκλήρωση των διαδικασιών εφαρμογής του νόμου περί Ίδρυσης Φορέα Υδρογονανθράκων και παροχή ικανών κινήτρων σε εταιρείες με έδρα τόσο στην Ελλάδα όσο και στο εξωτερικό προκειμένου να ξεκινήσουν και πραγματοποιηθούν το συντομότερο δυνατόν οι έρευνες στις ήδη γνωστές και λιγότερο συγκρουσιακού χαρακτήρα με τη γείτονα Τουρκία περιοχές του Ιονίου, αλλά και σε τμήματα του Αιγαίου με την περίπτωση νοτίως της Κρήτης να ξεχωρίζει.
- Προώθηση της σύσφιξης των σχέσεων σε όλα τα επίπεδα - συμπεριλαμβανομένου φυσικά και του στρατιωτικού - με το Ισραήλ και επιδίωξη της υπογραφής επίσημης συμφωνίας για μεταφορά του αερίου των ισραηλινών και κυπριακών κοιτασμάτων προς την Ευρώπη μέσω της Ελλάδος και της Κύπρου.
- Διατήρηση της ευρωπαϊκής προοπτικής της Τουρκίας, αλλά με επανασχεδιασμό της μέχρι τώρα μάλλον υποχωρητικής πολιτικής προς τη γείτονα χώρα, υπό την φρούδα ελπίδα του κατευνασμού των αναθεωρητικών βλέψεών της.
- Πιο ενεργή συμμετοχή στις προσπάθειες επίλυσης του κυπριακού ζητήματος. Μία πρόταση για πιο επιθετική στάση στη γενικότερη παρελκυστική τακτική της Τουρκίας θα μπορούσε να αποτελέσει, για παράδειγμα, η εισαγωγή ρήτρας διακοπής των ενταξιακών διαπραγματεύσεων της στην ΕΕ, εφόσον αρνείται να συμμορφωθεί απόλυτα με τα ευρωπαϊκά κερτημένα.

Τέλος, θα μπορούσε ακόμη και να τεθεί προς συζήτηση η επιδίωξη δημιουργίας πλαισίου για μελλοντικές ενταξιακές διαπραγματεύσεις του Ισραήλ στην ΕΕ, αναλαμβάνοντας άμεσα η

Ελλάδα και η Κύπρος από κοινού πιο ενεργό διαμεσολαβητικό ρόλο στην προσπάθεια επίλυσης του Παλαιστινιακού, με γνώμονα τις αρχές δικαίου και αρμονικής συμβίωσης των δύο λαών υπό πολιτική ισότητα. Στον όποιο προτεινόμενο από την Ελλάδα οδικό χάρτη θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσπάθεια να μη θίγονται τα συμφέροντα του Ισραήλ, αλλά ούτε και να καταπνίγονται τα δικαιώματα του Παλαιστινιακού λαού. Επίσης, θα πρέπει οι προτάσεις που θα τεθούν να ακολουθούν το πνεύμα του, ως προς τα ελληνοκυπριακά συμφέροντα, επιθυμητού τρόπου επίλυσης του Κυπριακού Ζητήματος. Και τούτο διότι ενώ στην Κύπρο η λύση της διζωνικής δικοινοτικής ομοσπονδίας με πολιτική ισότητα, υπό τις αποφάσεις του Συμβουλίου Ασφαλείας του ΟΗΕ για διακοπή των τουρκικών εποικισμών, καθώς και αποχώρηση των τουρκικών στρατευμάτων κατοχής εμφανίζεται ως η καταλληλότερη λύση, στο Παλαιστινιακό η λύση των «δύο κρατών» διαφαίνεται κερδίζει πιο πολύ έδαφος. Στο συγκεκριμένο σημείο θα πρέπει και οι ελληνικές και οι κυπριακές κυβερνήσεις να προσέξουν ιδιαίτερος και να διαμορφώσουν το κατάλληλο μίγμα πολιτικής και στρατηγικής. Ολοκληρώνοντας, επισημαίνεται ότι πρωτίστως η Ελλάδα και η Κύπρος, πρέπει να καταφέρουν να πείσουν το Δυτικό κόσμο ότι ο πιο διαυγής και ειλικρινής, βασισμένος σε ευρωπαϊκές κοινωνικο-πολιτικές αξίες, δρόμος εξυπηρέτησης των στρατηγικών και ενεργειακών συμφερόντων της στην Ανατ. Μεσόγειο και τη Μέση Ανατολή, εξυπηρετείται πρωτίστως από αυτές. Μάλιστα, το όλο εγχείρημα μπορεί να βασιστεί και στο γεγονός ότι ιδίως την τρέχουσα χρονική περίοδο που η αναθεωρητική πολιτική της Άγκυρας φαίνεται να έχει καταστεί παράγοντας αστάθειας στο ζήτημα της Συρίας, αλλά και να την έχει παρασύρει στην κατεύθυνση της συνεργασίας με άλλες δυνάμεις της περιοχής που θεωρούνται ως επικίνδυνες για τα δυτικά συμφέροντα, όπως π.χ. το προσηλωμένο στην απόκτηση πυρηνικών όπλων Ιράν.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Dalaklis D. & Chrysochou G., «Demographic Transition and Civil Conflict in the Arab World», *Strategy Paper Review Research Papers*, Vol. I, Strategy International (ISSN: 1792-9261) Thessaloniki, March 2011, σσ. 14-35.
2. Κούτση Α., «Η Γεωπολιτική της Μείζονος Μέσης Ανατολής στο τέλος του 20^{ου} αιώνα», στη «Γεωστρατηγική της Αν. Μεσογείου και η Δύση κατά τον 20^ο αιώνα», *Διεθνής Επιθεώρηση Στρατιωτικής Ιστορίας*, ΓΕΕΘΑ - Ελληνική Επιτροπή Στρατιωτικής Ιστορίας, Αθήνα, 2001, σ. 97.
3. Αρβανιτόπουλου Κ., *Ανάλεκτα Διεθνούς Πολιτικής*, Εκδόσεις Ι. Σίδηρη, Αθήνα, 2007, σσ. 216-7.
4. Ν.Ζ., «Γεωπολιτική αλλαγή στη Μέση Ανατολή: Λευκωσία – Τελ Αβίβ ψάχνουν στα βαθιά», *Ελευθεροτυπία* [online], 20.06.2010., διαθέσιμο στο <http://www.enet.gr/?i=news.el.article&id=174994> (ημερ. πρόσβασης 10 Οκτ. 2012).
5. Πελώνη Α., «Λεβιάθαν: Το μεγάλο παιχνίδι στην Αν. Μεσόγειο», *Τα Νέα* [online], 20.11.2010, διαθέσιμο στο <http://www.tanea.gr/kosmos/article/?aid=4605176>, επισκεπτόμενο την 15 Οκτ 2012.
6. United States Geological Survey, *World Petroleum Resources Project*, 'Assessment of Undiscovered Oil and Gas Resources of the Nile Delta Basin Province, Eastern Mediterranean', USGS, May 2010.
7. Η Τουρκία έχει υιοθετήσει αιγιαλίτιδα ζώνη με εύρος 12 ν.μ. στη Μαύρη Θάλασσα και στην Ανατ. Μεσόγειο -ειδικότερα στην περιοχή απέναντι από την Κύπρο- στη βάση του άρθρου 3 της Σύμβασης ΔΘ. Την ίδια όμως στιγμή απειλεί με πόλεμο την Ελλάδα εφόσον αυτή πράξει ακριβώς το ίδιο στο Αιγαίο Πέλαγος. Παράλληλα, στο σχετικά πρόσφατο παρελθόν, η χάραξη της αιγιαλίτιδας ζώνης ανάμεσα σε δύο όμορα κράτη, την Τουρκία και τη Σοβιετική Ένωση, έλαβε χώρα με βάση την αρχή των ίσων αποστάσεων (equidistance). Κάτι το οποίο επίσης αρνείται η Τουρκία για το Αιγαίο, επικαλούμενη την αρχή της ευθυδικίας, που ουδεμία σχέση έχει με την αιγιαλίτιδα ζώνη. Βλ. άρθρο 15, Σύμβασης ΔΘ.
8. Για την έννοια της κρατικής κυριαρχίας βλ. Στεφάνου Κ., *Η Θεσμική Μεταρρύθμιση της Ευρωπαϊκής Ένωσης*, Εκδόσεις Παπαζήση, Αθήνα, 1996, σ. 25. Βλ. επ. Chaumont C., «Recherche du Contenu Irréductible du Concept de Souveraineté Internationale de l'État», *Hommage d'une Génération de Juristes au Président Basdevant* 114 (131), 1960 και C. Rousseau, *Droit International Public*, T. II, Editions Sirey, Paris, 1974, σ.77.

9. Εκφεύγει από τους σκοπούς της παρούσας ανάλυσης η διαμάχη μεταξύ δύο μεγάλων φιλοσόφων-θεωρητικών Γκρότιους (Grotius) και Σέλντεν (Selden), η οποία και τελικά οδήγησε στην απόλυτη επικράτηση της παραπάνω αρχής. Βλ. Vieira M. B., «Mare Liberum vs. Mare Clausum: Grotius, Freitas, and Selden's Debate on Dominion over the Seas», *Journal of the History of Ideas* – τευχ. 64, Ιούλιος 2003, σσ. 361-77. Βλ. επ. Grotius H., *Mare Liberum*, 1609 και του ιδίου (trans. R. v. D. Magoffin), *The Freedom of the Seas*, Batoche Books Limited, Kitchener-Ontario, 2000. Βλ. επ. Selden J., *Mare Clausum*, 1635.
10. Δίπλα Χ., «Το Δίκαιο της Θάλασσας και η Ελληνοτουρκική Περιπλοκή», *Άμυνα και Διπλωματία*, Νοέμβριος 1994, σσ. 85-6.
11. Ροζάκη Χ., *Το Δίκαιο της Θάλασσας και η Διαμόρφωση του από τις Διεκδικήσεις των Παράκτιων Κρατών*, Εκδόσεις Παπαζήση, Αθήνα, 1976, σ. 261.
12. Till G., *Searpower: A Guide for the Twenty – First Century*, Routledge, Taylor & Francis Group LLC, London, 2009, σσ. 312.
13. Άρθρο 2, παρ. 1 της Σύμβασης ΔΘ. Επίσης, το παράκτιο κράτος σύμφωνα με το άρθρο 27 ασκεί ποινική και σύμφωνα με το άρθρο 28 αστική δικαιοδοσία στα ξένα πλοία που διέρχονται από την αιγιαλίτιδα ζώνη του. Ακόμη, μπορεί να αναστέλλει προσωρινά σε ορισμένα τμήματα της ΧΘ το δικαίωμα της «αβλαβούς διελεύσεως», χωρίς όμως διακρίσεις σε πλοία και σημαίες, όταν λόγοι εθνικής ασφαλείας ή λόγοι ασφαλείας της ναυσιπλοΐας το επιβάλλουν.
14. Άρθρο 2, παρ. 2, της Σύμβασης ΔΘ.
15. Μέρος V, στα άρθρα 55-75 της Σύμβασης ΔΘ.
16. Gounari E., «The Extension and Delimitation of Sea Areas under the Sovereignty, Sovereign Rights and Jurisdiction of Coastal States», *Essays on the New Law of the Sea*, Prinosi, 1985, σελ. 87.
17. Extavour W. C., *The Exclusive Economic Zone*, Graduate Institute of International and Development Studies, Geneva, 1981.
18. Καρακωστανόγλου Β., «Τα Δικαιώματα του Παρακτίου Κράτους στην Αποκλειστική Οικονομική Ζώνη: Προκλήσεις και Προοπτικές για το Αιγαίο», από τα Πρακτικά Συμποσίου στη Ρόδο, 4–6 Νοεμβρίου 1994, με θέμα *Το Αιγαίο Πέλαγος και το Νέο Δίκαιο της Θάλασσας*, 1996, σσ. 179.
19. Οικονομιδής Κ., «Βασικές Ρυθμίσεις του Νέου Δικαίου της Θάλασσας», *Διεθνές Δίκαιο και Διεθνής Πολιτική*, τεύχος 9, Παρατηρητής, Θεσσαλονίκη, 1985, σσ. 182.
20. Βλ. Ροζάκη Χ., *Το Δίκαιο της Θάλασσας και η Διαμόρφωση του από τις Διεκδικήσεις των Παράκτιων Κρατών*, Παπαζήση, Αθήνα, 1976, σσ. 253–4, όπου αναφέρεται σχετικά: «[Η] ελευθερία των θαλασσών φαλκιδεύεται εξαιρετικά και περιορίζεται, στην ουσία, στο συστατικό της στοιχείο της ελευθεροπλοΐας ... δεν πρέπει να διαφεύγει από την προσοχή μας το γεγονός ότι μια εντατική εκμετάλλευση των γειτονικών θαλασσών από τα παράκτια κράτη, όπως και μια μελλοντική εκμετάλλευση του υποθαλάσσιου πλούτου από ένα διεθνές όργανο ή οργανισμό στους πέρα από την εθνική δικαιοδοσία χώρους («κοινή κληρονομιά της ανθρωπότητας») θα προκαλέσει, αργά ή γρήγορα, πραγματικές επιβαρύνσεις πάνω στην ελευθεροπλοΐα, που θα 'χει συνέπειες στην ομαλή λειτουργία του θεσμού».
21. Brown E., *The International Law of Sea*, Vol. I, Dartmouth Publishing Co Ltd, Aldershot, 1994, σσ. 277–81.
22. Για την ΑΟΖ βλ. D. J. Attard, *The Exclusive Economic Zone in International Law*, Clarendon Press, Oxford, 1987, R. W. Smith, *The Exclusive Economic Zone Claims: An Analysis and Primary Documents*, Nijhoff Publishers, Dordrecht, 1986, F. O. Vicuna, *The Exclusive Economic Zone: Regime and Legal Nature under International Law*, Cambridge University Press, Cambridge, 1989.
23. Γούναρη Ε., «Το Διεθνές Δίκαιο Αλιείας», *Τετράδια Διεθνούς Δικαίου* 15, Σάκουλας, Αθήνα, 1989, σσ. 46.
24. Μάζη Ι. Θ. & Σγουρού Γ., «Γεωγραφική κατανομή των υδριτών μεθανίου και διεθνής γεωπολιτική της ενέργειας: Κοιτάσματα στην Αν. Μεσόγειο», *Περιοδικό Επίκαιρα*, 15–21 Απρ. 2010, σσ. 34-5.
25. Economides M., Natural Gas: Changing the geopolitics of Eastern Mediterranean and beyond, στο: <http://www.energytribune.com/articles.cfm/6207/Natural-Gas-Changing-the-Geopolitics-of-Eastern-Mediterranean-and-Beyond>, Μάρτιος 2011.
26. Lykousis V. et al., "Mud volcanoes and gas hydrates in the Anaximander mountains (Eastern Mediterranean Sea)", *Marine and Petroleum Geology*, Volume 26, Issue 6, June 2009, σσ. 854-72.
27. TGS-NOPEC, *Offshore Two-dimensional Seismic Measurement Program of the S/E Mediterranean*.
28. Βλάχου Γ. Π. & Νικολαΐδη Ε., *Ναυτιλιακή Οικονομική Γεωγραφία*, εκδόσεις Τζέι & Τζέι Ελλάς, Πειραιάς, 2002, σσ. 63-4, 67.

29. Βλ. εκτενέστερα Δαλακλή Δ. & Σιούσιουρα Π., «Γεωπολιτικές Επιδιώξεις και Στρατηγικές Ασφαλείας στη Μεσόγειο: Ο Ιδιαίτερος Ρόλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης», *Ναυσίβιος Χώρα, Σχολή Ναυτικών Δοκίμων*, Πειραιάς, 2006.
30. Γεωργαντόπουλου Ε. & Βλάχου Γ. Π., *Ναυτιλιακή Οικονομική*, Τζέι & Τζέι Ελλάς, Πειραιάς, 1997, σελ. 34. Ειδικότερα για την επίδραση της Διώρυγας του Σουέζ στις θαλάσσιες μεταφορές βλ. Δαλακλή Δ., «Διώρυγες και Θαλάσσιες Συγκοινωνίες στον 21^ο Αιώνα», *Ναυτική Επιθεώρηση*, τεύχ. 568, Υπηρεσία Ιστορίας Ναυτικού, 2009, σσ. 116-24.
31. Rodrigue J. P., Comtois C. & Slack B., *The Geography of Transport Systems*, Routledge, New York, 2009.
32. Σιούσιουρα Π. & Δαλακλή Δ., «Θαλάσσιες Μεταφορές και ΝΑ Ευρώπη: Οι Γεωπολιτικές και Γεωοικονομικές Διαστάσεις του Λιμένα της Θεσσαλονίκης», στο: Π. Σιούσιουρα (επιμέλεια), *Ευρωπαϊκή Ένωση – Βαλκάνια. Από την Γεωπολιτική της Μετάβασης στην Προοπτική της Ευρωπαϊκής Ένταξης*, Εκδόσεις Ηρόδοτος, Αθήνα, 2010.
33. Διαδικτυακός τόπος του Οργανισμού Λιμένος Πειραιώς.
34. Noble Energy Ltd.
35. Η Κύπρος, έχοντας επικυρώσει τη Σύμβαση ΔΘ την 12^η Δεκεμβρίου του 1988, υπέγραψε συμφωνία για την οριοθέτηση της Αποκλειστικής Οικονομικής Ζώνης (ΑΟΖ) με την Αίγυπτο το Φεβρουάριο του 2003 και με το Λίβανο τον Ιανουάριο του 2007. Η συμφωνία βασίστηκε στη διεθνώς αποδεκτή αρχή της μέσης γραμμής, σε πλήρη αρμονία με τους όρους της Σύμβασης.
36. Η Τουρκία, υιοθέτησε, περί το τέλος του 1986, ΑΟΖ στη Μαύρη Θάλασσα και ήρθε σε συμφωνία με την τότε Σοβιετική Ένωση για τις επικαλυπτόμενες περιοχές χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της μέσης γραμμής. Αργότερα η Τουρκία άρχισε συνομιλίες με την Βουλγαρία και την Ρουμανία για το ίδιο θέμα και ήρθε σε παρόμοια συμφωνία που είχε συνάψει με τους Σοβιετικούς. Έτσι, ενώ η Τουρκία έχει προχωρήσει, σε συνεργασία με παρευξείνια κράτη στην οριοθέτηση της ΑΟΖ στη Μαύρη Θάλασσα – μιας "κλειστής ή ημικλειστής θάλασσας", όπως και η Μεσόγειος – αρνείται να πράξει το ίδιο και στη Μεσόγειο, τη στιγμή που η ίδια δημιούργησε προηγούμενο στη Μαύρη Θάλασσα. Βλ. σχετικά τις ανάλογες ανακοινώσεις του Γραφείου Τύπου και Πληροφοριών της Κυπριακής Κυβέρνησης.
37. Η Τουρκία ουδέποτε υπέγραψε/επικύρωσε τη Σύμβαση του ΟΗΕ για το Δίκαιο της Θάλασσας. Βλ. Γ. Τσάλτα, 'Το Καθεστώς της Ηπειρωτικής Υφαλοκρηπίδας σύμφωνα με τη Νέα Σύμβαση (1982) για το Διεθνές δίκαιο της Θάλασσας και τα Ελληνικά Συμφέροντα', *Διεθνές Δίκαιο και Διεθνής Πολιτική*, τ. 9, Θεσσαλονίκη 1985, σσ. 201-2.
38. Bayram O., Bazeran H. & Sertac H., 'The Exclusive Economic Zone in the Eastern Mediterranean Sea and Fisheries', *J. Black Sea/Mediterranean Environment*, Vol. 14, 2008, σσ. 77-83
39. Κωνσταντίνου Ν. Α., *Οι έρευνες για κοιτάσματα υδρογονανθράκων σε θαλάσσιες ζώνες Ελλάδος και Κύπρου και η πολιτική των γειτονικών χωρών*, στο <http://www.ellinikanea.gr/index.php?>, Νοέμβριος 2010.
40. Χάρτης του Ελληνικού Υπουργείου Εξωτερικών με τίτλο «Απεικόνιση των ορίων της ελληνικής υφαλοκρηπίδας στην Ανατολική Μεσόγειο», όπως σχολιάστηκε από τους Σ. Λυγερό και Δ. Κωνσταντακόπουλο στο άρθρο 'Στο φως οι μυστικές διαπραγματεύσεις', *Εφημερίδα Ελευθεροτυπία*, Σάββατο 27 Νοεμβρίου 2010.
41. Πελώνη Α., «Λεβιάθαν: Το Μεγάλο Παιχνίδι στην Αν. Μεσόγειο», *Τα Νέα* [online], ο.π.
42. Λοϊζου Μ., «Ιστορική Συμφωνία Κύπρου-Ισραήλ», *Σημερινή* [online], 18.12.2010, διαθέσιμο στο <http://www.sigmalive.com/simerini/politics/reportaz/337391>, (ημερ. πρόσβασης 17 Ιαν. 2011).
43. Πελώνη Α., «Λεβιάθαν: Το Μεγάλο Παιχνίδι στην Αν. Μεσόγειο», *Τα Νέα* [online], ο.π.
44. Κ. Ιωάννου – Α. Στρατή, *Δίκαιο της Θάλασσας*, Εκδόσεις Α. Σάκκουλα, Αθήνα 2000, σσ. 545-551.
45. Περράκη Σ., «Ζητούμενο η Ευθυδικία. Οι Ελληνοτουρκικές Διενέξεις και ο Μονόδρομος», *Διπλωματία*, τ. 31, Μάιος, 2006.
46. Βλ. άρθρο 15 της Σύμβασης ΔΘ.
47. Στο πλαίσιο του package deal το δικαίωμα για διακήρυξη ΑΟΖ - την οποία η Τουρκία έσπευσε να υιοθετήσει ήδη από το 1987, αν και η Σύμβαση ΔΘ που την προέβλεψε τέθηκε σε ισχύ το 1994- συνοδεύτηκε με τη θέσπιση του Διεθνούς Βυθού αλλά και με άλλες υποχρεώσεις που ανέλαβαν τα κράτη-μέλη της Σύμβασης, υποχρεώσεις τις οποίες εκ των πραγμάτων η Τουρκία δεν έχει ανέλαβε καθόσον δεν έχει προσχωρήσει στη Σύμβαση. Άλλη χαρακτηριστική περίπτωση package deal είναι η επέκταση της αιγιαλίτιδας ζώνης στα 12 ν.μ. που η ρύθμιση αυτής συνοδεύτηκε με την καθιέρωση Στενών Διεθνούς Ναυσιπλοΐας.
48. Π. Κονδύλη, *Θεωρία του Πολέμου*, Εκδόσεις Θεμέλιο, Αθήνα, 1998, σσ. 408-9

Reducing Defence Expenditure during the Greek Crisis: A Balance between Austerity and Security

Petros M. Migiakis and George A. Zombanakis

Economists, Research Department, Bank of Greece, 21, Panepistimiou str, 102 50 Athens, Greece

Abstract. The prolonged recession entangling the Greek economy has finally convinced the authorities that the emphasis of the fiscal policy must shift away from revenues and on to the expenditures side. As it is usually the case, defence is a popular target when it comes to expenditure reduction for a wide variety of reasons, discussing which lies beyond the scope of the present paper. This paper focuses on an updated assessment of the net economic benefit derived when expenditure cuts aim at the long – run defence procurement programmes in an economic crisis environment. It will be shown, in fact, that defence spending on procurement can not contribute to the long – run growth rate of the Greek economy as its impact on the country's GDP has been found to be steadily adverse. This finding can be explained by the fact that the overwhelming percentage of the Hellenic Armed Forces defence equipment is imported thus leaving just leftovers to the domestic defence industrial base as regards contributing to the country's defence needs.

Keywords: Defence Expenditure, Economic Growth, Debt.

PACS: 88.05 Lg

INTRODUCTION

In the context of the on-going crisis the Greek authorities have been finally convinced that the stabilization policy followed would have been more fruitful if emphasis were placed on the expenditure instead of the revenue side which has been the case until now. Thus the new package of fiscal measures adopted by the policy makers early this year focuses exclusively on spending cuts concerning all public goods and primarily defence. Regarding the latter, this paper aims at contributing an update to the relevant literature by showing that the impact of procurement defence expenditure on the growth rate of the Greek economy tends to be negative in the long run. This is a conclusion which deserves serious consideration by the authorities and triggers a number of questions which this paper aims at answering, in terms of a long – run reconsideration of the country's defence- procurement policy in an environment of profound recession.

The paper first takes a look at the literature on this issue followed by an outline of the Greek defence industry profile as this has been shaping up until only very recently. The empirical section that follows involves the data description and the estimation results while the next section deals with the application of these results in terms of policy considerations. Finally, the closing section of the paper consists of the conclusions offered on the subject.

LITERATURE REVIEW

Starting with the seminal research by Benoit (1978) who tackled the issue of the defence-growth nexus and until only recently when Hartley (2010) approached the subject by asking whether “defence is a worthwhile investment” there is a vast amount of contributions in the literature covering a wide selection of its aspects. Indeed one can consider the case in which defence expenditure contributes to growth under a variety of perspectives like e. g. the extent to which it refers to developed (e. g. Kollias and Paleologou, 2010), or developing (e. g. Galvin, 2003) countries, or both (e. g. Wilkins, 2004), the possibility of involving private or public firms or even forms of partnership between the two (e. g. Parker and Hartley 2003), or, finally, the option of resorting to procurement from domestic sources rather than imports (e. g. Dunne et al, 2007).

Following Benoit’s conclusion that defence expenditure can promote growth in more ways than one, it seems that the subject concerning the extent to which defence spending triggers macroeconomic imbalances has assumed increasing interest since Looney and Frederiksen (1986) studied the relationship between economic growth and defence expenditure in a number of developing countries depending on their resources availability. However, contributions like Brzoska (1983), Deger and Smith (1983), Faini et al. (1984) and Lim (1983) who challenge Benoit’s findings always in the framework of developing economies. After the end of the Cold War, the ensuing defence spending reduction accompanied by rising costs has attracted increasing attention on the subject. Thus, in a rather technical approach Seiglie (1998) considered the effect of defence spending on growth via its effect of fiscal variables like deficits and debts, focusing, however, on developed rather developing economies. Emphasis on technical matters is also given in a very interesting paper by Dunne et, al. (2005), who conclude that the impact of defence spending on growth is related to the threat facing each country and consequently its economy. Thus, military expenditure has a positive effect on output when the threat is high and a negative effect when threat is low. Concerning more recent contributions it appears that interest in the Looney and Frederiksen research has revived in the form of case studies by papers like Karagol (2006) and Yemane (2009) who focus on examining the relationship between external debt, defence spending and growth in the case of Turkey and Ethiopia respectively. Regarding the former, there can always be a pending question concerning the minus sign of the defence expenditure coefficient when affecting the country’s GNP, given that, unlike the Greek case, the Turkish defence industry is thriving supporting a considerable fraction of the country’s armed forces procurement requirements and consequently contributing to growth with no clear evidence of defence-debt relationships (Sezgin, 2004).

It seems, in fact, that Sezgin has invested a great deal of input in looking into the specific matter, as he has been concentrating on the impact of defence expenditure on the Turkish economic growth in several of his publications. It appears, concerning the Turkish case, that defence spending no matter whether it may be used as an aggregate item or just as the military equipment bill, exercises a positive influence on the country’s economic growth (Sezgin, 2001). The corresponding evidence for Greece, by contrast, is more or less contradicting, with Kollias (1995) and Balfousias & Stavrinou (1996) tracing a positive influence of defence spending on growth, unlike Antonakis (1996 and 1997).

There are also two recent and at the same time very interesting contributions by Abu-Qarn (2010) and McDonald and Eger (2010) which deal with the defence – growth relationship in the context of a case study. The findings of both these papers add to the conclusion that defence spending reinforces economic activity despite the adverse political, social and strategic environment outlining the two studies. In fact Abu-Qarn (2010) finds that in the context of the Israeli – Arab conflict there is no adverse repercussion on the rate of growth of the sides involved as a result of defence spending while McDonald and Eger (2010) use a nonlinear

production function to show that the defence sector of the post – Soviet states has favoured their economic growth.

Finally, in terms of an overall assessment, Yang et al. (2011) approach the relationship between defence spending and growth with reference to both income level and threat intensity for a large number of countries.

Focusing on the scope of the present paper which aims at assessing the extent to which defence expenditure can be held responsible for impeding the growth of the Greek economy while adding to the country's external debt, it is interesting to note that Kollias et al. (2004) conclude that defence spending brings about an adverse effect on external debt, a finding which appears reasonable bearing in mind that the bulk of the armed forces procurement requirements comes from external sources. It can not be taken as a simple coincidence that Sezgin (2003) seems to support this conclusion by finding that unlike the Turkish case, equipment defence spending entails adverse repercussions on the economic growth of Greece.

In terms of a more technical approach, Refenes et. al (1995) use neural network methodology to study the determinants of Greek defence spending, a tool of analysis that allows for smaller forecasting errors compared to those attained by using traditional regression methods. Avramides (1997), by contrast, employs the Stone-Geary welfare function to assess the extent to which Greek defence expenditure in level terms depends on the corresponding Turkish variable. The findings are then compared with those derived when using the Deaton-Muellbauer functional form to determine Greek defence expenditure expressed in GDP - share terms. Finally, concentrating on the causality issue, there seems to be no clear-cut answer on the interaction of military spending with the economy, given that, for example, Dunne et al. (2001) find that defence spending Granger - causes economic growth in Greece unlike Kollias and Makrydakis (2000) who trace no Granger causality between growth and defence expenditure. Following Brauer (2003), part of the disagreement in such cases may be attributed to the data selection and specification e. g. to choices between levels and GDP shares. Decisive steps towards resolving the causality issue seem to be taken by Dunne and Smith (2010) who address a number of econometric and methodological issues that affect the causality tests. Thus they argue that one must distinguish between Granger causality and economic causality and try to determine the relationship between the two using an identified structural model. The authors also point to specification as well as intertemporal stability problems reflected in the various causality- tests derived which are taken to account for the variety of results encountered in the literature.

THE GREEK DEFENCE INDUSTRY

Before turning to the technical section of the paper it is necessary to outline the particularities of the Hellenic defence industry and the procurement policies followed since their role is decisive in determining defence expenditure in the country and consequently the specification of the function itself. To begin with the GDP shares denoting defence expenditure in Greece include a wide selection of expenditure categories, the leading ones being the payroll of the Hellenic Armed Forces personnel, including a large number of civilians as well as the cost of the participation of Greece in assignments of international interest like peace – keeping forces. As a result the figure devoted to equipment procurement is on the average only about one fourth of the total defence expenditure figure⁶.

⁶ National Accounts Statistics of Greece and SIPRI (2009 and 2010). It seems however, that the situation is even tighter according to the Defence Minister's statement in the Parliament, at the end of 2009, who declared a reduction of the equipment procurement payments to reach 0.8% of the GDP for 2010, 0.3% of the GDP for 2011 and a bare 0.098% of the GDP for 2012!

Turning to the Hellenic defence industry, this has been created mainly as a result of exogenous pressure applied after the 1974 Greek – Turkish clash rather than following a long term planning procedure. As a result the main focus of the authorities was to relieve the Hellenic Armed Forces from constraints like dependence on foreign suppliers, substantial delivery delays, spare part shortage and considerable foreign exchange outflows. The government encouraged both public and private funds to promote defence industry and as a result a number of essential production units have begun to form the defence infrastructure of the country. Since then, however, the performance of these firms has left a lot to be desired as regards efficiency and support of the armed forces requirements. This is mainly due to serious weaknesses like mismanagement, strong political involvement, absence of coordination with the Hellenic Armed Forces Programme Requirements, the so – called EMPAE (Procurement Programmes) and the country's academic institutions to profit from research and development (R & D) programmes as well as technology transfer. It is easy to see that such weaknesses introduce market distortions and lead to the disorientation of these industries from leading targets like profit – maximisation. Despite recent efforts to privatisation aiming at improving the efficiency of a certain number of firms, the fact remains that the Hellenic defence industrial base as it stands can only meet a small percentage, possibly around 10% of the country's procurement needs in value terms as these are expressed in the medium and long term EMPAE while the rest is imported (ELIAMEP, 2007)⁷. This means that the defence of the country continues to rely heavily on foreign suppliers whose local agents are most happy to collect generous commission fees by promoting business mainly via the so called "military offsets", the value of which in some cases may even exceed 100% of that representing the initial agreement. It appears, however, that the use of such offsets is far from being fruitful for the Greek side, given that the legal framework underlying their application is full of "gray areas" leaving ample room for personal interpretation (ELIAMEP, 2007).

Such tactics, however, tend to threaten the country's balance-of-payments sustainability⁸, a largely technical issue that has been considered most useful in order to evaluate the extent to which placing emphasis on domestic production rather than imports of defence equipment is expected to contribute to the benefit of the Greek economy in more ways than one: Indeed, the more the government opts for promoting procurement from domestic sources at the expense of imports, the more it relieves the balance of payments from its sustainability constraint, given that in such a case the payments involved are not recorded in the external trade flows of the country according to the resident – non resident criterion (IMF 1993). Last but not least, such a policy is expected to contribute to the integration of the Greek industrial complex to the European industry with all the benefits that the resulting technology transfer may entail in such cases⁹.

⁷ According to Frost and Sullivan Defence and Security Reports for Greece (Frost and Sullivan, 2009) the percentage of contribution of local contractors to the armament programs appears to be higher than what it actually is because it reflects the value of contracts undertaken by Greek firms and not their exact production i. e. their value added in each of those contracts. Once this dimension is taken into account the real contribution of the Greek defence industry is not estimated to exceed 10% of real productive contribution.

⁸ The predominantly fiscal nature of the current Greek crisis pointing to its excessive twin deficits has inevitably raised the question of its balance-of-payments sustainability as treated among others by Zombanakis et al. (2009) and Brissimis et al. (2010).

⁹ Sandler T. and K. Hartley (eds) (2007) Handbook of Defence Economics, Vol. 2, North Holland

THE EMPIRICAL INVESTIGATION FRAMEWORK

The variables used are expressed in terms of GDP shares while the estimation period ranges from 1971 to 2011. The source of all variables is the Hellenic National Accounts statistics with the exception of the external debt which uses Bank-of-Greece figures and the SIPRI Yearbook (SIPRI 2009 & 2010) for the defence expenditure breakdown.

The Long - Run Structure

Our analysis is set to distinguish the long run, equilibrium, relationships from the short-run interactions among the variables examined. This is a necessary step when examining non-stationary variables as pointed out in various papers explaining the setting of the cointegration analysis framework (see e. g. Engle and Granger 1987, Johansen 1988). To this end, we follow the formulation of the underlying relationships used by Looney and Frederiksen (1986) and applied in its logarithmic version by Karagol (2006), thus forming (1) to capture the long-run structure of the examined relationship as follows:

$$GDP = f (DEBT, INV) \quad (1)$$

GDP is the level of the Greek GDP, DEBT is the stock of the total external debt of the country and INV is total investment spending, all expressed in logarithmic form. Both explanatory variables are expected to be related to the GDP, because both investment activity and foreign borrowing aim at raising output; as a result, we expect that there may be a long – run direct relationship of the GDP growth of Greece with the country's external debt and the total investment expenditure. Note that, following Benoit's reasoning (Benoit, 1978), defence spending is used only in the short-run structure of the empirical investigation, bearing in mind that due to the inefficiency of the domestic defence industrial base its contribution to the EMPAE requirements is negligible.

Initially, we test the series for stationarity and Table 1 suggests that they all have a unit root. We, therefore, use the first differences of these series (the prefix D denoting first differences of the corresponding variables) to form the short-run relationship (Table 5).

TABLE (1). Unit Root Test Results*

Variable	ADF	DF-GLS	PP	PP-GLS
GDP	-0.74	1.04	-0.74	1.49
DEBT	0.18	0.40	0.04	0.52
INV	-1.50	-1.30	-1.19	-1.15
EDEF	-1.596	-1.538	-1.642	-1.368
DGDP	-5.44**	-0.98	-5.43**	-0.09
DDEBT	-4.40**	-4.45**	-4.43**	-2.90**
DINV	-5.74**	-4.35**	-6.14**	-2.76**
DEDEF	-6.485**	-6.473**	-6.486**	-3.083**
Critical values				
5%	-2.94	-1.95	-2.94	-1.98
10%	-2.61	-1.61	-2.61	-1.62

*Rejection of the unit root null is indicated by ** at a 5% and by * at a 10% confidence interval, respectively

The results of the unit root tests, reported in Table 1, indicate that our data, in terms of levels are non-stationary. We proceed, therefore, to the examination of the existence of cointegration effects among the series of debt, GDP and investment using the well-known Johansen (Johansen, 1988 and Johansen and Juselius, 1990) cointegration analysis, suitable for multivariate systems. The results presented in Table 2 report both the trace and the maximum eigenvalue statistics and indicate that there exists a single stationary linear combination among the three variables at a 1% confidence interval.

TABLE (2). Johansen Cointegration Analysis

Test of the H ₀ :	Trace stat.	Max. Eigenvalue-test
no coint. Vec. = 0	53.35**	37.04**
no coint. vec. = 1	16.31*	16.19*
no coint. Vec. = 2	0.11	0.11

* rejection of the null at a 5% level of significance, ** rejection of the null at a 1% level of significance

Furthermore, we need to test for the composition of the cointegration vector (Johansen and Juselius, 1992) with the respective results reported in Table 3, below indicating that only the GDP series is exogenous in the long-run structure; thus reflecting causality patterns among the GDP and the other two variables. This result indicates that the GDP variable should be used for normalization of the cointegration vector. Aiming at an accurate estimation of the long-run coefficients, we rely on OLS regressions, as suggested by Engle and Granger (1987). Recall, that we have already found that there exists a stationary linear combination among the three variables we examine; as a result, the OLS estimates will serve for the proper identification of the long-run relationship between GDP (as the normalization variable), debt and investment. These results are reported in Table 4, below.

TABLE (3). Structure of the Cointegration Space

Test of exclusion ($\beta=0$):	LR-statistic	P-value
DEBT	8.31	0.06
INV	0.35	0.55
GDP	18.98	0.00

TABLE (4). Estimation Results of the Long-Run Function

DEPENDENT VARIABLE: GDP	COEFFICIENT	t- STATISTIC
CONSTANT	8.6471	16.2656
DEBT	0.2927	13.7829
INV	0.4706	3.3301

which means that the long-run relationship can be shown as a cointegrating vector of the following form:

$$RES_t = GDP_t - 0.2927*DEBT_t - 0.4706*INV_t - 8.6471 \quad (2)$$

(13.7829)
(3.3301)
(16.2656)

According to the results of the unit root tests of Table 1, relationship (2) constitutes a stationary linear combination of the series of GDP, investment and debt and represents, therefore, a long-run equilibrium relationship. In plain terms there exist significant co-movements among the three series in the long run, indicating that the Greek GDP is significantly interlinked with debt and investment. This result, however, requires further investigation of the short-run dynamics of the three series and especially their adjustment towards this long-run equilibrium. Specifically, the residuals of relationship (2) represent an error correction term (which we note by the acronym RES) which may exercise significant adjustment effects on the short-run dynamics of the three series.

The Short - Run Structure

This section describes the dynamics of the relationships analyzed above. In particular, we examine the interlinkages of the variables that we have used to formulate the cointegration relationship, introducing, an additional variable that captures the effects of the Greek defence expenditure on equipment (EDEF) as provided by SIPRI sources. Finally, given the length of the time series used, the specification is completed by the introduction of variables capturing the political cycle, the drachma devaluations, as well as incidents like the invasion to Cyprus, the Imia crisis and the war in Iraq. Thus, this short-run specification aims at describing the impact of the Greek defence procurement spending on the economic activity of the country, its fiscal position and the total investment flows taking into account several specific features of the Greek defense procurement policy, as these were described in section 3.

To do so we use a vector error correction model (VECM), which consists of a VAR in which the GDP, the debt, the total investment flows and the defence expenditure appear in their first differences together with an error correction term that captures adjustment dynamics towards the long-run cointegrating relationship specified by equation (2).

This formulation relieves the analysis of any co-variance effects that may influence the dynamics of the variables involved, thus enabling us to focus on the direction of the causality of the underlying relationships. In fact, the VAR framework aims at treating co-linearity issues by capturing simultaneous effects among the underlying variables in the variance-covariance matrix. For the purposes of the present analysis, we have chosen to insert four lags in the VAR system, in order to approximate the duration of the EMPAE programs. Table 5 reports the results of the VAR.

The results of Table 5 provide a complete picture of the interlinkages between the dependent variables of our system, as well as the effects of the dummy variables on them. It is interesting to point out that disturbances like the uncertainty prevailing during pre-election periods, the various crisis incidents and the drachma devaluations had a negative effect on growth. The defence expenditure effects exercised on the GDP variable are shown to be marginally significant and negative with a lag of four years while the rest of the dependent variables are shown not to be significantly affected. Based on these results we also estimated the impulse response functions, the results of which are illustrated in Figure 1.

POLICY CONSIDERATIONS

Figure 1 summarises the adverse repercussions of the defence procurement policy exercised in Greece with the help of the impulse response analysis. In fact, it is only natural that the long run effect of military procurement on the country's GDP turns out to be negative and certainly negligible given that the overwhelming majority of the defence equipment is imported. The same reasoning applies in the case of investment activity, in which the accumulated response of defence procurement expenditure barely reaches non-negative rates. And recalling

that the military debt has rarely exceeded 1% of the GDP, as we have already pointed out earlier on in this paper, it is easy to justify the negative impact of the equipment defence spending on the country's external debt.

TABLE (5). The Results of the VECM

	DEDEF	DGDP	DDEBT	DINV
DEDEF(-1)	0.058903 (0.23243)	0.000897 (0.11361)	-0.069128 (-1.58407)	0.048374 (1.48560)
DEDEF(-2)	-0.146467 (-0.54932)	-0.006713 (-0.80789)	-0.074189 (-1.61582)	0.019658 (0.57380)
DEDEF(-3)	-0.033162 (-0.14221)	-0.010589 (-1.45700)	-0.068197 (-1.69832)	-0.003004 (-0.10024)
DEDEF(-4)	-0.108525 (-0.45002)	-0.014703 (-1.95640)	-0.033254 (-0.80079)	-0.041932 (-1.35329)
DGDP(-1)	0.729955 (0.11626)	0.457660 (2.33888)	-3.836873 (-3.54875)	2.144330 (2.65803)
DGDP(-2)	3.001201 (0.40991)	-0.143042 (-0.62689)	-2.580027 (-2.04636)	0.487321 (0.51802)
DGDP(-3)	-1.452000 (-0.26461)	0.224448 (1.31247)	-0.106228 (-0.11242)	0.731953 (1.03815)
DGDP(-4)	4.741419 (1.02830)	-0.064533 (-0.44909)	-1.995154 (-2.51279)	-0.559222 (-0.94392)
DDEBT(-1)	0.052974 (0.05317)	-0.014699 (-0.47336)	0.158672 (0.92479)	-0.245038 (-1.91402)
DDEBT(-2)	-0.733205 (-0.63258)	-0.064114 (-1.77492)	0.580541 (2.90865)	0.062873 (0.42217)
DDEBT(-3)	0.149401 (0.12650)	0.014278 (0.38792)	0.071178 (0.34997)	0.042123 (0.27757)
DDEBT(-4)	-0.690880 (-0.69290)	-0.039226 (-1.26236)	0.125722 (0.73224)	0.056974 (0.44472)
DINV(-1)	-2.318013 (-1.17551)	-0.025693 (-0.41808)	1.040649 (3.06466)	-0.509546 (-2.01109)
DINV(-2)	1.531975 (0.83365)	-0.049802 (-0.86958)	1.100163 (3.47662)	-0.193557 (-0.81975)
DINV(-3)	-0.206389 (-0.11886)	-0.094051 (-1.73801)	0.293089 (0.98021)	-0.362535 (-1.62495)
DINV(-4)	-2.674215 (-1.51297)	-0.053401 (-0.96943)	0.708964 (2.32932)	-0.029615 (-0.13040)
Constant	-0.169002 (-0.44801)	0.023804 (2.02482)	0.213665 (3.28925)	-0.077101 (-1.59073)
DELEC	0.076900 (0.14179)	-0.034502 (-2.04123)	0.071796 (0.76875)	-0.004014 (-0.05759)
DDEV	0.237159 (0.74902)	-0.021567 (-2.18560)	0.051848 (0.95094)	0.078703 (1.93457)
DCRISIS	0.479446 (0.93153)	-0.050453 (-3.14542)	-0.263154 (-2.96918)	-0.101424 (-1.53369)
RES(-1)	-0.913299 (-0.44998)	-0.174020 (-2.75113)	1.322725 (3.78456)	-0.169559 (-0.65018)

Note: Parentheses report values of t-statistics.

A number of additional points seem to be worth considering: First, the negative accumulated impulse response of investment on procurement spending in the long run reflects

the fact that there have been practically no FDI flows directed to the domestic defence industrial base during the period under consideration. By contrast, the long run GDP rise may give some room for a slight increase of the funds devoted to defence procurement. Second, the pronounced long run negative accumulated response of the GDP to investment flows verifies the fact that for, at least the last decade, the growth of the Greek economy relied exclusively on consumption.

It appears, therefore, that spending on defence procurement does very little to contribute to growth, a target of particular importance especially during austerity times. One can not help pointing out, however, that the ineffectiveness of any form of policy relying on defence procurement spending to influence fundamental variables of the economy must be a source of concern to the policy makers, in the context of the on going crisis, on one hand and the arms race against Turkey, on another (Andreou and Zombanakis, 2006), a country in which the defence industrial base picture is considerably different. In fact, a literature review on the subject shows that the majority of contributions agree that the effect of defence spending either in aggregate terms or just its procurement component on the Turkish GDP is positive (Sezgin, 2001, Yildirim and Sezgin, 2002). To the extent that defence procurement does not refer to importables, in which case it may be expected to bring about an adverse impact on the country's GDP via the income identity, any long run positive link between defence procurement and growth is more likely to rely on the country's domestic defence industrial base. And in such a case Greece faces a very serious disadvantage because, as Brauer (2003) puts it, "Greece's arms industry still is primarily state – owned, highly inefficient and underutilises its capacity; only very recently are a number of these firms being privatised. In contrast, the Turkish arms industry began privatisation and foreign joint – venture participation in 1983 (rather than mere licence production)" "both countries' arms industries are diversified into air, land and sea transportation systems, ordnance and information technology and associated electronics, but Turkey's arms industry appears substantially more diverse than that of Greece;"

CONCLUSIONS

The defence procurement policy of Greece faces a number of binding constraints, the main one being the dramatic reduction of the defence budget during an economic crisis period. To make the constraint even tighter, the overwhelming fraction in value terms of the equipment required is purchased from external sources, something which heavily burdens the import bill of a current account, the deficit sustainability of which has been repeatedly questioned, as pointed out earlier on in this paper. As a result, focusing on any form of defence expenditure cuts concerning equipment procurement seems to be ineffective in terms of adding to the country's GDP in the peace – dividend sense, a finding that agrees with earlier work on the topic (e. g. Kollias et al. 2004). A possible remedy to the problem would be a gradual shift towards domestic sources procurement, a long – run import – substitution strategy by means of technology transfer, at least for a certain number of items required by the EMPAE programmes. Such a strategy can aim at compromising between an austerity programme that calls for budget cuts and the pressing defence needs of an arms race against Turkey (Andreou and Zombanakis 2011), the defence industry of which contributes to the Turkish growth through its substantial support to the local defence procurement programmes. As Sezgin (1997) puts it, "the defence industry will be an important part of the Turkish industrial sector and productivity and export potential will increase in the future. empirical evidence showed that Turkish defence spending helps economic growth. There is a positive and significant relation between military size and economic growth".

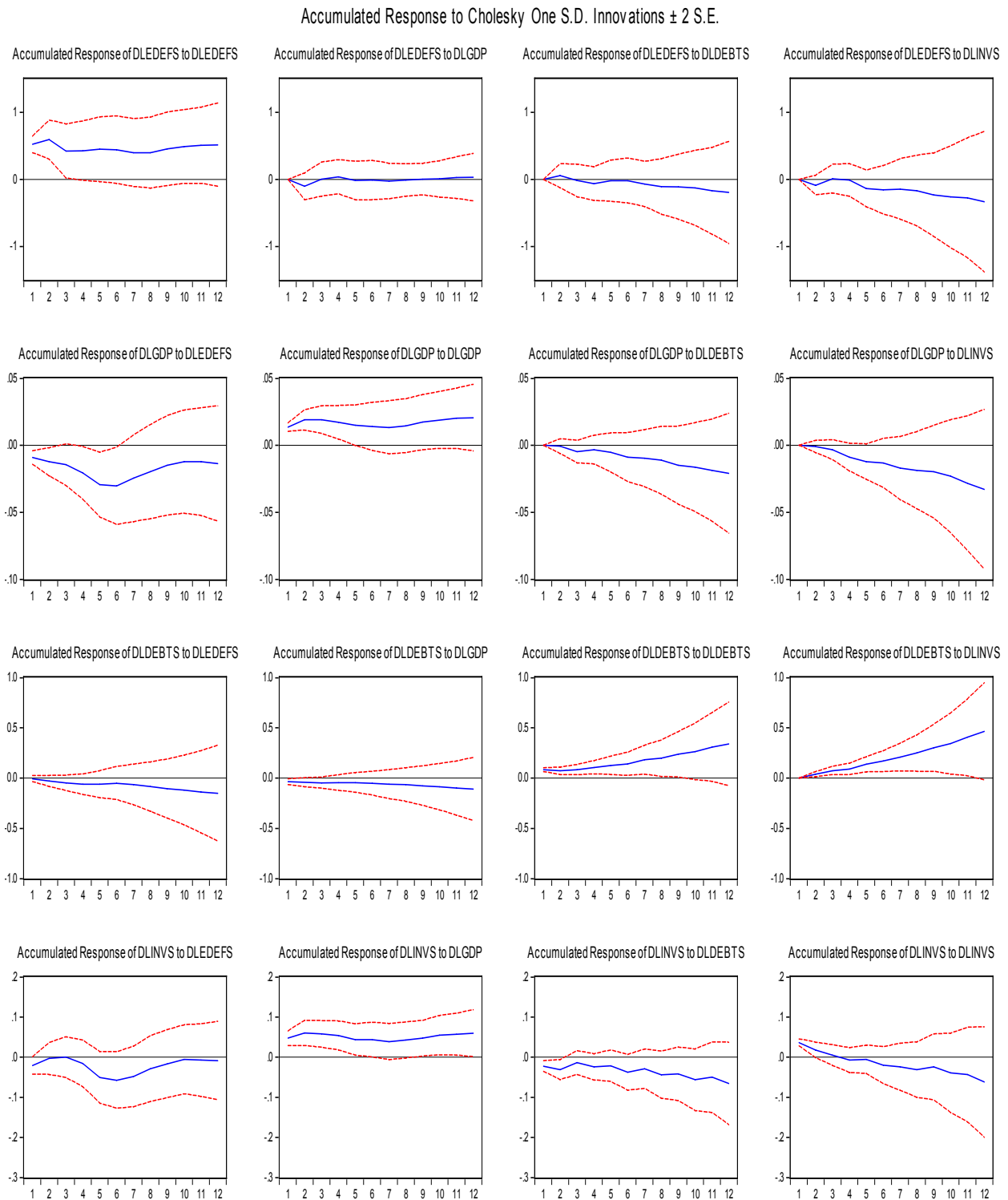


Figure 1. Impulse responses from the VECM

It appears, therefore, that the Turkish recipe may be considered as applicable to contribute to both growth and security in Greece at a time of austerity. After all, quoting Dunne et al. (2005), “Security of persons and property from domestic or foreign threats is essential to the operation of markets and the incentives to invest and innovate. To the extent that military expenditure increases security it may increase output. Adam Smith noted that the first two

duties of the state were ‘that of protecting the society from the violence and invasion of other independent societies ... that of protecting, as far as possible, every member of society from the injustice or oppression of every member of it’”.

REFERENCES

1. Abu – Qarn A. S. (2010) “The Defence – Growth Nexus Revisited: Evidence from the Israeli – Arab Conflict”, *Defence and Peace Economics*, v. 21, (4), p. p. 291-300.
2. Andreou A. S. and G. A. Zombanakis (2006) “The Arms Race between Greece and Turkey: Commenting on a Major Unresolved Issue”, *Peace Economics, Peace Science and Public Policy*, v. 12, (1), p. p. 1-18
3. Andreou A. S. and G. A. Zombanakis (2011) "Financial Versus Human Resources in the Greek-Turkish Arms Race Ten Years On: A Forecasting Investigation Using Artificial Neural Networks", *Defence and Peace Economics*, Vol. 22, No. 4.
4. Antonakis N. (1996), “Military Expenditure and Economic Growth in Less Developed Countries: A Simultaneous Equation Approach with an Application to Greece 1958-1990”, *Economia Internazionale* 49, 3, p. p. 329-346.
5. Antonakis N. (1997) “Defence Spending and Growth in Greece: A Comment and Further Empirical Evidence”, *Applied Economics Letters* 4 , p. p. 651-655.
6. Avramides C. (1997),”Alternative Models of Greek Defence Expenditures”, *Defence and Peace Economics*, v. 8, 2, p. p. 145-187.
7. Balfousias A. and V. Stavrinos (1996), “The Greek Military Sector and Macroeconomic Effects of Military Spending in Greece”, in N. Gleditsch et al. (eds.) *The Peace Dividend*, Amsterdam, Elsevier, p. p. 191-213.
8. Benoit E. (1978), "Growth and Defense in Developing Countries" *Economic Development and Cultural Change* (1978): 271-80.
9. Brauer, J. (2003), “Greece and Turkey: A Comprehensive Critical Review of the Defence Economics Literature”, in Kollias C. and Gunluk-Senesen G. (eds.), *Greece and Turkey in the 21st Century: Conflict or Cooperation*, Nova, New York, Ch. 13.
10. Brissimis S. N, Hondroyiannis G, Papazoglou C, Tsaveas N. T, Vasardani M. A (2010), "Current Account Determinants and External Sustainability in Periods of Structural Change," Bank of Greece Working Paper 117,
11. Brzoska, M. (1983) “Research Communication: The Military - Related External Debt of Third - World Countries” *Journal of Peace Research*, v. 20, (3) p. p. 271-77.
12. Deger S. and R. Smith (1983), “Military Expenditure and Growth in Less Developed Countries”, *Journal of Conflict Resolution*, v. 27, (2), p. p. 335 – 353.
13. Dunne P, E. Nikolaidou and D. Vougas, (2001), “ Defence spending and economic growth: A causal analysis for Greece and Turkey”, *Defence and Peace Economics*, v. 12, 1, p. p. 5 – 26.
14. Dunne P. J, R, P. Smith and D. Willenbockel (2005), “Models of Military Expenditure and Growth: A Critical Review”, *Defence and Peace Economics* v. 16(6), p. p. 449–461
15. Dunne, P, del Carmen Garcia-Alonso, M, Levine P, Smith, R, (2007)“Determining the Defence Industrial Base”, *Defence and Peace Economics* v.18 (3), p. p. 199-211.
16. Dunne P. and R. P. Smith (2010), “Military Expenditure and Granger Causality: A Critical Review”, *Defence and Peace Economics*, Vol. 21(5–6), p. p. 427–441
17. ELIAMEP (2007) “The National Security Policy of Greece in the 21st Century”, Athens.
18. Engle R. and C. W. J. Granger (1987) “Co- Integration and Error Correction: Representation, Estimation and Testing”, *Econometrica*, v. 55 (2) p. p. 251-276.
19. Faini R, P. Annez and L. Taylor (1984) “Defence Spending, Economic Structure and Growth: Evidence Among Countries and over Time” *Economic Development and Cultural Change*, v. 32, (3), p. p. 487 – 498.
20. Frost and Sullivan (2009) *Greece: Defence and Security Report*.
21. Galvin, H. (2003), “The Impact of Defence Spending on the Economic Growth of Developing Countries: A Cross-Section Study”, *Defence and Peace Economics*, 14 (1), p. p. 51- 59.
22. Hartley K. (2010), “The Case for Defence”, *Defence and Peace Economics*, v. 21, (5–6), p. p. 409–426.

23. IMF (1993), Balance of Payments Manual, 5th edition, Washington D. C.
24. Johansen, S. (1988), "Statistical Analysis of Cointegration Vectors," *Journal of Economic Dynamics and Control*, v. 12(2-3), p. p. 231-254
25. Johansen S. and K. Juselius, (1990), "Maximum Likelihood Estimation and Inference on Cointegration--With Applications to the Demand for Money," *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, v. 52(2), p. p. 169-210.
26. Johansen S. and K. Juselius, (1992), "Testing structural hypotheses in a multivariate cointegration analysis of the PPP and the UIP for UK," *Journal of Econometrics*, v. 53(1-3), p. p. 211-244.
27. Karagoç E. (2006) "The Relationship between External Debt, Defence Expenditures and GNP Revisited: The Case of Turkey", *Defence and Peace Economics*, v. 17(1), pp. 47-57
28. Kollias C. (1995), "Preliminary Findings on the Economic Effects of Greek Military Expenditure", *Applied Economics Letters* 2, Nr. 1, p. p. 16-18.
29. Kollias C. and S. Makrydakis (2000), "A Note on the Causal Relationship between Defence Spending and Growth in Greece: 1955-93" *Defence and Peace Economics*, Vol. 11, No 2, p. p. 173-184.
30. Kollias C. Manolas G. and S. M. Paleologou (2004), "Military Expenditure and Government Debt in Greece: Some Preliminary Empirical Findings", *Defence and Peace Economics*, Vol. 15, No 2, p. p. 189-197.
31. Kollias C, and S. M. Paleologou, (2010) "Growth, Investment and Military Expenditure in the European Union-15", *Journal of Economic Studies*, v. 37 , (2), pp.228 - 240 – 240
32. Lim D. (1983), "Another Look at Growth and Defence in Less Developed Countries" *Economic Development and Cultural Change* v. 31 (2), p. p. 377 – 384.
33. Looney R. E. and P. C. Frederiksen (1986), Defense Expenditures, External Public Debt and Growth in Developing Countries, *Journal of Peace Research* v. 23 (4).
34. McDonald B. D. and R. J. Eger (2010) "The Defence – Growth Relationship: An Economic Investigation into Post – Soviet States", *Peace Economics, Peace Science and Public Policy*, v. 16 (1).
35. Parker D. and K. Hartley (2003), "Transaction costs, relational contracting and public private partnerships: a case study of UK defence", *Journal of Purchasing and Supply Management*, v. 9 (3), p. p. 97-108.
36. 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.
37. Sandler T. and K. Hartley (eds.) (2007) Handbook of Defence Economics, Vol. 2, North Holland.
- Seigle C. (1998) "Defence Spending in a Neo-Ricardian World", *Economica* v. 65, p. p. 193-210
38. Sezgin, S. (1997) "Country Survey X: Defence Spending in Turkey", *Defence and Peace Economics*, v. 8, (4), p. p. 381-409.
39. Sezgin, S. (2001) "An Empirical Analysis of Turkey's Defence - Growth Relationships with a Multi – Equation Model, 1956 – 1994", *Defence and Peace Economics* 12, 1, p. p. 69 – 86.
40. Sezgin S. (2003), "A Disaggregated Analysis of Defence Expenditure and Economic Growth: The Case of Turkey and Greece", in Kollias C. and Gunluk-Senesen G. (eds.), *Greece and Turkey in the 21st Century: Conflict or Cooperation*, Nova, New York, Ch. 14.
41. Sezgin S. (2004), "An Empirical Note on External Debt and Defence Expenditures in Turkey", *Defence and Peace Economics*, v. 15(2), p. p. 199-203
42. SIPRI (2009) Yearbook.
43. SIPRI (2010) Yearbook.
44. Wilkins, N (2004), "Defence Expenditure and Economic Growth: Evidence from a Panel of 85 Countries", Retrieved from: <http://cama.anu.edu.au/macroworkshop/Nigel%20Wilkins.pdf>
45. Yemane W. R. (2009) "The Defence – Spending External Debt Nexus in Ethiopia", *Defence and Peace Economics*, Vol. 20(5), p. p. 423-436.
46. Yang A. J. F, W. N, Trumbull, C. W. Yang and B. N. Huang (2011) "On the Relationship Between Military Expenditure, Threat and Economic Growth: A Non – Linear Approach", *Defence and Peace Economics*, Vol. 22 (4), August, pp. 449-45
47. Yildirim and Sezgin (2002), "The Demand for Turkish Defence Expenditure", *Defence and Peace Economics* 13, 2, p. p. 121-128.
48. Zombanakis G. A, Stylianou C, Andreou A. S. (2009), "The Greek Current Account Deficit : Is It Sustainable After All?" Bank of Greece Working Paper 98.

Σημειολογική Προσέγγιση της Οπτικής Μεταφοράς στη Γελοιογραφία

Ιωάννα Ασαργιωτάκη

*Σχολή Ναυτικών Δοκίμων, Τομέας Ανθρωπιστικών και Πολιτικών Επιστημών
annaassario@yahoo.com*

Περίληψη. Η μεταφορά, κεντρικός μηχανισμός αντίληψης της πραγματικότητας και του λόγου, άμεσα συνδεδεμένος με τη γνώση κατά τον Αριστοτέλη, χαρακτηρίζεται από τον Umberto Eco ως «Το πιο φωτεινό από όλα τα ρητορικά σχήματα». Ο Roman Jakobson στις αρχές του 20ού αιώνα δηλώνει πως η μεταφορά είναι υπαρκτή και σε άλλα σημειακά συστήματα όπως η εικόνα, θέση που συμμερίζονται, μεταξύ άλλων, οι Roland Barthes, Jean Francois Lyotard, Umberto Eco και Martine Joly. Μεταφορά και υπερβολή αποτελούν τα πιο λειτουργικά σχήματα λόγου στη γελοιογραφία και στη διαφήμιση, δύο είδη που σύμφωνα με τη θεωρία του R. Jakobson μπορούν να καταταχθούν στα ποιητικά μηνύματα με την ευρεία έννοια. Στον γελοιογράφο Κ. Μητρόπουλο, γίνεται συστηματική χρήση της οπτικής μεταφοράς με μορφή προσωποποίησης-ζωομορφισμού, σύμφωνα με τη γελοιογραφική παράδοση. Με βάση μία γελοιογραφία του πρύτανη της ελληνικής γελοιογραφίας, θα προσπαθήσουμε να αποδείξουμε τον γνωστικό ρόλο της μεταφορικής εικόνας ως οπτικό μηχανισμό παραγωγής του χιούμορ. Σαν μοντέλο ανάλυσης θα χρησιμοποιήσουμε τη σημειολογική δηλωτική-συνδηλωτική προσέγγιση των B.Cocula – C. Peyrouet, με γνώμονα τις λειτουργίες επικοινωνίας του R. Jakobson. Κατόπιν σημειολογικής ανάλυσης της γελοιογραφίας διαπιστώνεται ότι η οπτική μεταφορά στην οποία βασίζεται δεν είναι πραγματολογικά αποδεκτή και η γνωστική αντίθεση που προκύπτει την καθιστά κωμική. Σύμφωνα με τον Henri Bergson : «Όταν η προσοχή μας επικεντρώνεται στην υλική διάσταση μιας μεταφοράς η ιδέα που εκφράζεται αποκτά κωμικό χαρακτήρα».

The Use of Visual Metaphor in the Cartoon/Cartoon Drawing: A semiotic approach

Abstract. Metaphor, a central mechanism in perceiving speech and reality and, according to Aristotle, closely related to knowledge, is characterized by Umberto Eco as “the most bright of all rhetoric schemata”. At the beginning of the 20th century, Roman Jakobson claimed that metaphor exists in other semiotic systems as well, like that of images and his views were shared, amongst others, by Roland Barthes, Jean Francois Lyotard, Umberto Eco and Martine Joly. Metaphor and hyperbole are the most popular figures of speech used in cartoon-drawing and advertising and both of them according to Jakobson can be regarded as poetic messages in a wider sense. K. Mitropoulos, a patriarch of Greek

cartoonists, makes extensive use of visual metaphor, in the form of zoomorphism. The present paper will attempt to highlight the cognitive role of metaphorical image as a visual, humor-invoking mechanism. The analysis model adopted is a synthesis of the B. Cocula-C. Peyrouet semiotic approach, who suggest a denotative-connotative approach according to Jakobson's six communication functions.

The semiotic analysis of a cartoon by Mitropoulos suggests that the visual metaphor on which it is based cannot be realistically acceptable and the arising cognitive antithesis makes it comical. Moreover, according to Bergson, *'When our attention focuses on the materialized dimension of a metaphor, the idea expressed acquires a comic character'*.

Λέξεις-κλειδιά: Σημειολογία, οπτική μεταφορά, γελοιογραφία, χιούμορ.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μεταφορά, κεντρικός μηχανισμός αντίληψης της πραγματικότητας και του λόγου, άμεσα συνδεδεμένος με τη γνώση κατά τον Αριστοτέλη (Ρητορική) (1), χαρακτηρίζεται από τον Umberto Eco (2) ως «Το πιο φωτεινό από όλα τα ρητορικά σχήματα».

Προς την ίδια κατεύθυνση, ο Pierre Fontanier (3) θεωρεί πως η παραδοξότητα που χαρακτηρίζει τη μεταφορά προκαλεί επικοινωνιακή ένταση, κινητοποιεί την ευφυΐα (« frapper l'intelligence ») δημιουργώντας «το νόημα το πιο αληθινό αλλά ταυτόχρονα το πιο βαθύ και το πιο δυναμικό».

Ο Roman Jakobson (4) στις αρχές του 20ού αιώνα δηλώνει πως η μεταφορά είναι υπαρκτή και σε άλλα σημειακά συστήματα όπως η εικόνα. Τη θέση αυτή συμμερίζονται μεταξύ άλλων, οι Roland Barthes (5), Jean Francois Lyotard (6) Umberto Eco (7) (στον οποίο οφείλεται ο όρος οπτικοποίηση) και η Martine Joly (8).

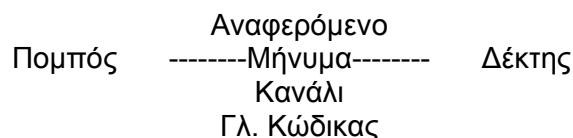
Μεταφορά και υπερβολή αποτελούν τα πιο λειτουργικά σχήματα λόγου στη γελοιογραφία και στη διαφήμιση, δύο είδη που σύμφωνα με τη θεωρία του R. Jakobson μπορούν να καταταχθούν στα ποιητικά μηνύματα με την ευρεία έννοια.

Στο έργο του Κώστα Μητρόπουλου (9) γίνεται συστηματική χρήση της οπτικής μεταφοράς με τη μορφή της προσωποποίησης ή του ζωομορφισμού (10) (βλ. γελοιογραφική παράδοση).

Με βάση μία γελοιογραφία του πρύτανη της ελληνικής γελοιογραφίας, θα προσπαθήσουμε να αποδείξουμε τον γνωστικό ρόλο της μεταφορικής εικόνας ως οπτικό μηχανισμό παραγωγής του χιούμορ.

Σαν μοντέλο ανάλυσης θα χρησιμοποιήσουμε, τη σημειολογική προσέγγιση των B.Cocula – C. Peyrouet (11) οι οποίοι προτείνουν: μία αντικειμενική και μία συνδηλωτική προσέγγιση εκ των οποίων η δεύτερη περιλαμβάνει μία ερμηνευτική διαδικασία που συνδέεται με κοινωνιοπολιτισμικούς, ψυχο-κριτικούς και αισθητικούς κώδικες. Οι τελευταίοι εμπεριέχουν, μεταξύ άλλων, τη ρητορική των αποκλίσεων. Τέλος, προτείνεται μία σύνθεση που περιλαμβάνει τις λειτουργίες της επικοινωνίας.

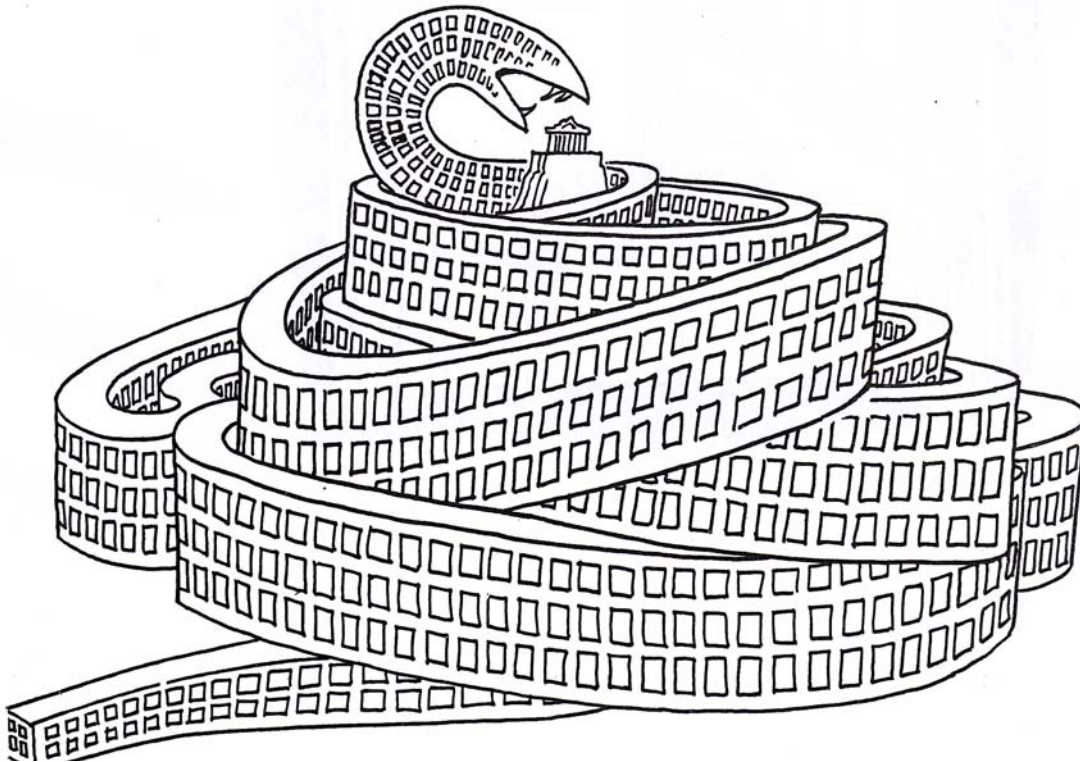
Οι λειτουργίες της επικοινωνίας απορρέουν από το σχήμα επικοινωνίας του Jakobson (12), διαχρονικά αναγνωρισμένο ως μοντέλο προσέγγισης της ρητορικής τέχνης (Martine Joly (13)). Παραθέτουμε το σχήμα επικοινωνίας του Jakobson.



Σε κάθε ένα παράγοντα του σχήματος επικοινωνίας αντιστοιχεί μία γλωσσική λειτουργία: η αναφοριστική στο αναφερόμενο (ή στο πλαίσιο αναφοράς), η συγκινησιακή ή εκφραστική

εκφράζει τα συναισθήματα του πομπού, η βουλευτική αφορά την συμμετοχή του δέκτη, η φατική το κανάλι της επικοινωνίας (φωνή, χαρτί, κ.ά.), η μεταγλωσσική τον γλωσσικό κώδικα (επεξήγηση) και η ποιητική λειτουργία το μήνυμα αυτό καθεαυτό (ρητορική τέχνη).

ΣΗΜΕΙΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΜΙΑΣ ΓΕΛΟΙΟΓΡΑΦΙΑΣ ΤΟΥ ΜΗΤΡΟΠΟΥΛΟΥ (14)



Υπηρετώντας την τέχνη του υπαινιγμού (και όχι της πειθούς που ανήκει στη διαφήμιση), η γελοιογραφία έχει ευγενή σκοπό: να ψυχαγωγήσει και ίσως και να προκαλέσει την κριτική σκέψη. Το κωμικό στοιχείο που εμπειριέχει διαθέτει μία κρυπτολογική λειτουργία δηλαδή « ... βασίζεται σε ένα μηχανισμό απόκρυψης-διαλεύκανσης. Επικοινωνούμε με τους μνημένους εξαιρώντας τους υπόλοιπους. Διπλή ευχαρίστηση που προκύπτει από την ικανοποίηση της ευφύιας μας και την επικύρωση της συμμετοχής μας σε ένα κοινωνιο-πολιτισμικό περιβάλλον» (Jean-Marc Defays (15)).

Η συγκεκριμένη γελοιογραφία είναι χωρίς λόγια, κάτι που την καθιστά αργιστί πιο λειτουργική σε βουλευτικό επίπεδο καθώς η εικόνα, σημειολογικά, έχει τον πρώτο ρόλο σε σχέση με τον λόγο διότι παραπέμπει πιο άμεσα στο αναφερόμενο.

Ανάλυση σύμφωνα με τους B.Cocula – C. Peyroutet

Περιγραφική και δηλωτική προσέγγιση: Η εικόνα εμφανίζει μία τεράστια λωρίδα σε σπειροειδή τροχιά που παραπέμπει σε φίδι, διάστικτη από συμμετρικά ανοίγματα που μικραίνουν στην ουρά και στο κεφάλι. Το κεφάλι, με το στόμα ανοιχτό, από όπου προβάλλουν 3

κοφτερά δόντια, έχει αναρριχηθεί στο ψηλότερο σημείο και βρίσκεται ακριβώς πάνω από ένα αρχαίο ναό, άραγε τον Παρθενώνα (;), έτοιμο να τον κατασπαράξει.

Ερμηνευτική και συνδηλωτική προσέγγιση : Μελέτη των κωδίκων

Κοινωνιο-πολιτισμικό επίπεδο

Ονομαστικός και τοπολογικός κώδικας : Λόγω σύμβασης, εφόσον η γελοιογραφία αποτελεί, εξ ορισμού, ένα σχόλιο για την επικαιρότητα, η αναγνωρισιμότητα της εικόνας είναι δεδομένη. Υπαινικτικά επίσης λειτουργεί και η υπογραφή του γελοιογράφου του οποίου το ύφος είναι εξίσου αναγνωρίσιμο : εδώ λοιπόν ο Μητρόπουλος κάνει αναφορά στην πόλη της Αθήνας.

Κώδικας αναγνώρισης των αντικειμένων και κινησιολογικός κώδικας : αναγνώριση της στυλιζαρισμένης παρουσίας του φιδιού, και σπειροειδής κίνηση της πόλης-φίδι με σκοπό τον υπαινιγμό του πνιγμού - κατασπάραξης.

Κώδικας της απόστασης : η πόλη-ουροβόρος όφεις καταλαμβάνει επιθετικά όλο τον χώρο (καρέ).

Κώδικας των μύθων: Παραπομπή στο αρχέτυπο του πολιτισμού.

Δεν έχουμε χρήση του βουλευτικού κώδικα σε γλωσσικό επίπεδο (γελοιογραφία χωρίς λόγια) αλλά το **εσείς** (2^ο πρόσωπο) και η προστακτική, μερικά από τα βασικά εργαλεία της βουλευτικής λειτουργίας, συνυπάρχουν, υπαινικτικά : Η ίδια η εικόνα, με την επιθετικότητά της, απευθύνει στον αναγνώστη κραυγή βοήθειας.

Ψυχαναλυτική-κριτική προσέγγιση της εικόνας

Η έκκληση του γελοιογράφου, εκφρασμένη μέσα από μια μικτή γκάμα συναισθημάτων (οργή, απαισιοδοξία - τρυφερότητα, συνενοχή, ελπίδα) απευθύνεται στο συλλογικό ασυνείδητο, απεικονίζοντας την πάλη ανάμεσα στην παρόρμηση της ζωής και την παρόρμηση του θανάτου ή αλλιώς, την ανάγκη να υποτάξουμε την αρχή της ηδονής (κοινωνία της αφθονίας) στην αρχή της πραγματικότητας (καταστροφή περιβάλλοντος).

Αισθητικό επίπεδο

Σαφής, λιτή και διαχρονική απεικόνιση σε μαύρο - άσπρο : παρόλο που ο Παρθενώνας έχει μέγεθος μινιατούρας σε σχέση με τον τερατώδη ουροβόρο, η εικόνα είναι εύληπτη.

Ρητορικός κώδικας

Αυτό το οπτικό μήνυμα περιέχει τις εξής αποκλίσεις : μετωνυμία (ο Παρθενώνας για την Αθήνα), αντίθεση (καλό-κακό, μεγάλο-μικρό), μεταφορά-προσωποποίηση-ζωομορφισμός (η πόλη-φίδι), υπερβολή - ειρωνία (αντιστροφή των μεγεθών : ο γιγάντιος ουροβόρος θα κατασπαράξει το λιλλιπούτσιο μνημείο).

Από την αναλογία ανάμεσα σε «το φίδι τρώει την ουρά του» (εντύπωση που δίνει ο ουροβόρος όφεις όταν αλλάζει δέρμα) και σε «η απάνθρωπη πόλη πνίγει τον Παρθενώνα», συσχετισμός που ο ίδιος ο γελοιογράφος επινοεί μέσω της σπειροειδούς κίνησης που δίνει στην πόλη-φίδι, με το απειλητικό κεφάλι του τελευταίου πάνω από το μνημείο, κατασκευάζεται η μεταφορά η οποία είναι σαφώς ασύμβατη με την πραγματικότητα, παράδοξη και άρα κωμική. Αλλωστε σύμφωνα με τον Bergson (16): «Όταν η προσοχή μας επικεντρώνεται στην υλική διάσταση μιας μεταφοράς η ιδέα που εκφράζεται αποκτά κωμικό χαρακτήρα».

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Κατόπιν ανάλυσης, η γελοιογραφία αποδεικνύεται ως μία εντυπωσιακή gestalt (17) σε πλήρη ρήξη με την αναμονή του αποδέκτη, μέσα από μία σύνθετη οπτικοποίηση των ρητορικών

σχημάτων που υπηρετούν την ποιητική λειτουργία η οποία, σε συνδυασμό με τις άλλες (φατική: αναγνωσιμότητα, εκφραστική : συναισθήματα του πομπού) στοχεύει στη βουλητική, και αυτό, σε συνάρτηση με τον πραγματολογικό στόχο του μηνύματος δηλ. το γέλιο. Το γέλιο που σύμφωνα με τον Freud, αποσκοπεί στη διάψευση της πραγματικότητας και αποτελεί μέσον προστασίας από τον πόνο, εξοικονομώντας την ενέργεια που απαιτείται από το συναίσθημα (18).

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Αριστοτέλης, *Ρητορική, τόμος Β*, εκδ. Ζαχαρόπουλος, Αθήνα, σελ.380, στίχοι 20-26.
2. Βλ. Umberto Eco, *Sémiotique et Philosophie du langage*, Paris, P.U.F., 1988, σελ.160, «le plus lumineux de tous les tropes».
3. Pierre Fontanier, *Les figures du discours*, Paris, Flammarion, 1968, σελ.137, « le sens le plus vrai, comme le plus profond et le plus énergique ».
4. Roman Jakobson, *Essais de linguistique générale*, Paris, Minuit, 1963. chap.11, Linguistique et Poétique.
5. Roland Barthes, « Rhétorique de l'image ». Σε : *Œuvres Complètes*, εκδ. Paris, Seuil, 1993, σελ.1422.
6. Jean François Lyotard, *Discours, Figure*, εκδ. Paris, Klincksieck, 1971, σελ.248.
7. βλ. Umberto Eco, *La structure absente*, εκδ. Paris, Mercure de France, 1968, σελ.240, « visualisation ou littéralisation de la métaphore ».
8. Martine Joly, *Introduction à l'analyse de l'image*, Paris, Armand Colin, 2005.
9. βλ.άρθρα, Ioanna Assaryotakis-Kordas:Ιστοσελίδα της E.I.R.I.S (Equipe Interdisciplinaire de Recherche sur l'Image Satirique), Πανεπιστήμιο της Brest (Γαλλία):-« Δύο αιώνες ελληνικής γελοιογραφίας» (Deux siècles de caricature grecque). -«Σύγχρονοι έλληνες γελοιογράφοι : Κώστας Μητρόπουλος» (Caricaturistes grecs actuels : Kostas Mitropoulos). -Βλ.επίσης την ανάλυση της κωμικής μεταφοράς σε μία γελοιογραφία του Μητρόπουλου στην Ανακοίνωση « Στρατηγική της πειθούς του διαφημιστικού μηνύματος» (Stratégie de persuasion du message publicitaire), Πρακτικά του Διεθνούς Συνεδρίου της Συνομοσπονδίας των Καθηγητών της Γαλλικής (FIPF), Κεμπέκ, Ιούλιος, 2008.
- 10.Δημήτρης Σαπρανίδης, *Ιστορία της Ελληνικής Γελοιογραφίας*, 2 τόμοι, εκδόσεις Ποταμός, Αθήνα, 2006.
11. Bernard Cocula – Claude Peyrouet, *Sémantique de l'image*, Paris, Delagrave, 1986.
12. Roman Jakobson, op.cit.
13. Martine Joly, *Introduction à l'analyse de l'image*, εκδ. Paris, Armand Colin, 2005, σελ.46.
14. Κώστας Μητρόπουλος, *Η κοινωνία της αφθονίας*, 1973.
15. Jean-Marc Defays, *Le comique*, Paris, Seuil, 1996, p.37-38.
16. Henri Bergson, *Le rire* σε Oeuvres, Paris, P.U.F, 1970, σελ.442.
17. βλ. σε Bernard Cocula/Claude Peyrouet, ibid. σελ.14-15, Gestaltisme (γερμανικής προέλευσης, 1911) ή Θεωρία της μορφής. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, κάθε αντίληψη μιας εικόνας είναι συνολική (διαισθητική - γνωστική) και επιβάλλει τη δομή της στον θεατή. Αρκεί να αλλάξει ένα στοιχείο της εικόνας για να αλλάξει τελείως το νόημα.
18. Sigmund Freud, *Le mot d'esprit et ses rapports avec l'inconscient*, Paris, Gallimard, 1930, p. 366 : le comique, démenti de la réalité, affirmation du principe de plaisir et moyen de défense contre la douleur, semble conditionné « ...par l'épargne de la dépense nécessitée par le sentiment».

Η Ενίσχυση της Διαπολιτισμικής Μάθησης με τη Συνέργεια της Βιωματικής Μεθόδου στο Μάθημα της Γερμανικής ως Ξένης Γλώσσας

Ευαγγελία Τσιαβού

*Σχολή Ναυτικών Δοκίμων, Τομέας Ανθρωπιστικών και Πολιτικών Επιστημών
και Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο*

Περίληψη. Η διαπολιτισμικότητα είναι πλέον επιταγή τόσο της καθημερινότητας όσο και της εκπαίδευσης. Ειδικά στο ξενόγλωσσο μάθημα είναι απαραίτητο στοιχείο για την επαφή με την αλλότρια κουλτούρα. Συχνά όμως η διαπολιτισμική προσέγγιση καταλήγει θεωρητικό κατασκεύασμα λόγω ελλιπούς επικαιροποίησης του διδακτικού υλικού. Η βιωματική μέθοδος ενέχει αμεσότητα που συμβάλλει στην εφαρμογή και αποτελεσματικότητα της διαπολιτισμικής αλληλεπίδρασης.

Λέξεις-κλειδιά: Διαπολιτισμική μάθηση, βιωματικό μάθημα, Νέα Μέσα, Γερμανικά ως ξένη γλώσσα

Abstract. Interculturality has become essential both for the education and everyday life. Especially in the teaching of Foreign Languages it is necessary for the contact with the foreign culture. Very often, intercultural learning remains a theoretical construction because of the lack of update concerning the teaching material. Active Learning contributes to the realization and the effectiveness of intercultural interaction.

Keywords: Intercultural Learning, German as a Foreign Language, Active Learning, ICT

Στη σημερινή Ευρώπη της κινητικότητας και της διαπολιτισμικής ανταλλαγής όλο και πιο συχνά τίθεται στο προσκήνιο η απαίτηση για πολυγλωσσία. Παρόλη την εξάπλωση των ΤΠΕ στην καθημερινότητά μας, που κάνει την επαφή μας με την ξένη γλώσσα πολύ πιο εύκολη, άμεση και αποτελεσματική και καθιστά δυνατή την εμπειρική εκμάθηση μιας γλώσσας, ο προτιμώμενος τρόπος απόκτησης γλωσσικών γνώσεων παραμένει το «παραδοσιακό» μάθημα. Η σύγχρονη ξενόγλωσση διδασκαλία και τα ανάλογα διδακτικά εγχειρίδια προσανατολίζονται μεν στις μοντέρνες μεθοδικές προσεγγίσεις (επικοινωνιακή και διαπολιτισμική προσέγγιση)(Hackl et al 1998), διαπιστώνεται όμως ότι περιορίζονται στην απλή παράθεση πατριδογνωσικών στοιχείων. Ειδικά στο μάθημα των Γερμανικών ως ξένης γλώσσας, όπου υπάρχει πρόσφορο και πλούσιο υλικό από τις γερμανόφωνες χώρες, θεματοποιούνται αυτά τα στοιχεία από πολλές πλευρές (ιστορία, γεωγραφία, πολιτική κτλ.). Μπορεί να παρέχονται πολλές πληροφορίες για την καθημερινότητα και την οργάνωση της ζωής σε Γερμανία, Ελβετία, Αυστρία κυρίως, αλλά εκεί περιορίζεται και η διαπολιτισμική επαφή.

Ωστόσο, η πρόσληψη όλων αυτών των πληροφοριών δεν συνεπάγεται και την κινητοποίηση του θυμικού των διδασκομένων από διαπολιτισμική σκοπιά. Η παρουσίαση πληροφοριών πατριδογνωσίας δεν επαρκεί για τη διαμεσολαβητική λειτουργία της διαπολιτισμικής

προοπτικής. Συχνά δεν αποτελεί αφορμή για περαιτέρω γόνιμη αντιπαράθεση με την ξένη πραγματικότητα, γεγονός που θέτει στο επίκεντρο του ενδιαφέροντός της η διαπολιτισμική πατριδογνωσία. Επιπλέον, η σύγχρονη ελληνική πραγματικότητα της συμβίωσης με ανθρώπους διαφορετικών εθνικοτήτων, ειδικά στην πρωτοβάθμια και δευτεροβάθμια εκπαίδευση, καθιστά επιτακτική την ανάγκη χειρισμού της διαφορετικότητας. Σκοπός είναι να τεθούν βάσεις για την ενίσχυση της επικοινωνίας, της αποδοχής και της διαπραγμάτευσης με το Ξένο, που απαιτούνται σε όλα τα προσωπικά εξελικτικά και επαγγελματικά στάδια.

Οι αιτίες παραμέλησης της διαπολιτισμικής ανταλλαγής έγκεινται κυρίως στην έλλειψη επιμόρφωσης των εκπαιδευτικών αλλά και επίκαιρου κατάλληλου υλικού. Αυτές οι δύο ελλείψεις μπορούν να αρθούν με τη σύνοψη βασικών αρχών της διαπολιτισμικής μάθησης όπως και με τη βοήθεια πρακτικών οδηγιών εφαρμογής. Συγκεκριμένα, με την αρωγή της βιωματικής μεθόδου μπορεί να ενισχυθεί η διαπολιτισμικότητα και να προλάβει ή να αποσοβήσει εντάσεις μέσα στο πολυεθνικό περιβάλλον διαφόρων εκπαιδευτικών δομών, πρόταση πάνω στην οποία θα εστίασε η παρούσα εργασία.

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΔΙΑΠΟΛΙΤΙΣΜΙΚΗΣ ΜΑΘΗΣΗΣ ΣΤΗΝ ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ

Χωρίς να υπεισέλθουμε σε ιστορικές μεθοδολογικές αναφορές, χρήσιμο κρίνεται να υπενθυμίσουμε επιγραμματικά τις βασικές συντεταγμένες της διαπολιτισμικής μάθησης, που θα αποτελέσουν πρακτική αναφορά και γνώμονα για την περαιτέρω ανάλυση.

Μπορεί σε όλες τις μεθοδολογικές προσεγγίσεις (γνωστική, επικοινωνιακή, διαπολιτισμική προσέγγιση) να θεματοποιείται η πατριδογνωσία και να αποτελεί βάση του διαπολιτισμικού μαθήματος, ωστόσο καλό θα ήταν να τονιστούν ορισμένες διαφορές μεταξύ διαπολιτισμικότητας και πατριδογνωσίας, γιατί συχνά οι δύο όροι/ τα δύο περιεχόμενα συγχέονται μεταξύ τους. Ναι μεν δεν αλληλοαναιρούνται, όμως δεν αντικαθιστούν ούτε ισοδυναμούν αλλήλοις (Zeuner online). Η διαφορά της πατριδογνωσίας από τη διαπολιτισμική μάθηση έγκειται στο γεγονός ότι η πρώτη φροντίζει την επαφή και η δεύτερη την αντιπαράθεση της αλλότριας πραγματικότητας με την προσωπική/εθνική. Επιπλέον, σημαντικό ρόλο παίζει η συνειδητοποίηση της ετερότητας και η αποδοχή της, που ως κύριος στόχος της διαπολιτισμικής μάθησης θέτει στο επίκεντρο την κοινωνική και πολιτιστική ευαισθητοποίηση αφενός και την καλλιέργεια στρατηγικών αυτόνομης απόκτησης γνώσης αφετέρου (Pauldrach 1992:4). Προς αυτήν την κατεύθυνση γίνεται βασικό εργαλείο για τη διαπολιτισμική μάθηση η σύγκριση στοιχείων καθημερινότητας, εθνικών χαρακτηριστικών ή δημογραφικών πληροφοριών (Geistmann 2002:13). Σκοπός είναι η καλλιέργεια της ενσυναίσθησης, η σχετικοποίηση στερεοτύπων και προκαταλήψεων, η αλλαγή εντυπώσεων και στάσεων αντιμετώπισης προσώπων και καταστάσεων (Mueller στο Kast/Neuner 1994:94-96) όπως και η ανάπτυξη κριτικής ανοχής (ABCD Thesen), σύμφωνα με τις αρχές της διαπολιτισμικής διδακτικής (Mueller στο Kast/Neuner 1994:96-99). Σημαντική επίσης είναι η ανάπτυξη στρατηγικών και δεξιοτήτων που θα καταστήσουν την επαφή με ξένες κουλτούρες και κοινωνίες πιο γόνιμη (Pauldrach 1992:8). Η σύγκριση αποτελεί μόνιμη διαδικασία κατανόησης με βασικές παραμέτρους το προσωπικό και εθνικό περιβάλλον αφενός και τις εμπειρίες μαζί με τις πληροφορίες για την αλλότρια κουλτούρα αφετέρου (Picht 1989:57).

Σημαινούσα ιδιαιτερότητα της εφαρμογής της διαπολιτισμικής προοπτικής στο ξενόγλωσσο μάθημα είναι η στενή, άμεση σχέση κάθε γλώσσας με την αντίστοιχη κουλτούρα, που ξεκινάει από το πρώτο μάθημα κιόλας. Προϋπόθεση είναι η συνειδητοποίηση της προσωπικής πολιτιστικής προέλευσης για να γίνουν δυνατά ο συσχετισμός, η ανάκλαση πολιτιστικών δεδομένων και η αναγνώριση της σχετικότητάς τους (House 1994:85). Επίσης, ο μαθητής

καλείται να κατανοήσει προσωπικές/εθνικές επικοινωνιακές τακτικές, να τις χρησιμοποιήσει με στόχο την ανάπτυξη δεξιοτήτων διαμεσολάβησης μεταξύ των δύο κουλτούρων. Απαραίτητη είναι η καλλιέργεια της ικανότητας χειρισμού αντιπαραθέσεων και συγκρούσεων που θα συντελέσει στην κατανόηση και αποκατάσταση εντάσεων, αρχής γενομένης από την τάξη.

Πέραν τούτων, σημαντική για το ξενόγλωσσο μάθημα είναι η στάση αποδοχής των λαθών, που θα οδηγήσει το διδασκόμενο να δοκιμάσει εναλλακτικούς τρόπους έκφρασης και μοντέλα συμπεριφοράς και να εντάξει εξωγλωσσικές στρατηγικές διάδρασης με παράπλευρο κέρδος την ανάπτυξη μεταεπικοινωνιακών ικανοτήτων κατανόησης (Luchtenberg 1999:209). Στους στόχους του ξενόγλωσσου μαθήματος ανήκουν και ο γνωστικός, ο συναισθηματικός και ο διεκπεραιωτικός παράγοντας. Σύμφωνα με τον House (1996:3), η διαπολιτισμική ικανότητα αντιμετωπίζεται καθαρά συναισθηματικά και συμπεριφοριστικά, εις βάρος των άλλων δύο παραγόντων, και παρουσιάζεται πολύ μονόπλευρα, ιδεαλιστικά και φορτισμένη ιδεολογικά. Γι' αυτό και δε θα έπρεπε να περιοριστεί σε επίπεδο έκφρασης απόψεων, αλλά να συμπεριλάβει και τους άλλους διδακτικούς στόχους και να δημιουργήσει τις προϋποθέσεις πλήρωσής τους (Geistmann 2002:38). Προς αυτήν την κατεύθυνση συνάδουν η κοινωνικοπολιτισμική ευαισθητοποίηση και η εκμάθηση στρατηγικών αυτόνομης απόκτησης της γνώσης (Hackl et al 1998:5). Τα κοινωνικά και πολιτιστικά φαινόμενα που απαιτούν ενσυναίσθηση και κατανόηση αρχών επικοινωνίας και αλληλεπίδρασης με Γερμανόφωνους, αφορούν σε γλωσσικά στοιχεία, συνήθειες/τελετουργικά και κοινωνικές δομές (Neuner 2005:170-171).

Τέλος, καλό θα ήταν να γίνει συνειδητό στους διδασκόμενους ότι τα σημειόμενα σε μια γλώσσα είναι πολιτισμικά καθορισμένα και αντικατοπτρίζουν μια ιστορικά δημιουργηθείσα ανάγκη ζωής μιας κοινωνίας. Βάσει συγκεκριμένων παραδειγμάτων θα διαπιστώσουν ότι μαζί με την ξένη γλώσσα καλούνται να μάθουν μια νέα πραγματικότητα, ένα νέο σύστημα αξιών, εννοιών και συσχετισμών. Η απόκτηση αυτού του νέου συστήματος γίνεται σταδιακά σε μια διαρκή διαδικασία δημιουργίας υποθέσεων και επιβεβαίωσης ή απόρριψής τους. Εξάλλου, οι διδασκόμενοι οφείλουν να δίνουν βαρύτητα σε εκείνους τους παράγοντες που καθορίζουν τη σημασία των λέξεων σε συγκεκριμένες καταστάσεις, δηλαδή ανάλογα με το συγκεκριμένο συγκείμενο και αναφορικά με τις λειτουργίες της γλώσσας (Bachmann 1995:12). Μεθοδολογικά, οι ABCD-Thesen (1990/3, 60-61. Σημεία 9-18) και η μέθοδος της σύγκρισης μπορούν να αποτελέσουν εργαλείο για τη διαπολιτισμική μάθηση, ενώ χρήσιμες οδηγίες εμπεριέχονται και στο ΑΠΣ (online) όπως και στο ΔΕΠΠΣ (online).

ΒΙΩΜΑΤΙΚΟ ΜΑΘΗΜΑ: ΜΙΑ ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΜΕΣΗ ΠΡΟΤΑΣΗ

Ωστόσο, η επίτευξη της διαπολιτισμικότητας παραμένει θεωρητική επιταγή αν η διαδικασία μάθησης αρκестεί σε παραδοσιακά μεθοδολογικά μοντέλα ή επιδιωχθεί βάσει κάποιου διδακτικού εγχειριδίου. Τα αποτελέσματα θα είναι σαφώς πιο λίγα, καθώς θα περιοριστούν στη συνάντηση της κουλτούρας του διδασκόμενου με την κουλτούρα της γλώσσας-στόχου (εν προκειμένω της γερμανικής). Παρόλο που αυτός είναι ο σκοπός της διαπολιτισμικής μάθησης, παραμένει κάπως απόμακρος ως προς την αμεσότητα του ζητούμενου, καθώς οι διδασκόμενοι καλούνται όχι μόνο να υπερκεράσουν την απόσταση ανάμεσα στη γλώσσα και τον πολιτισμό προέλευσης και στόχου αλλά και να χρησιμοποιήσουν την προκύπτουσα ευαισθητοποίηση και ενσυναίσθηση στην καθημερινότητά τους, στην επαφή τους με αλλοεθνείς στο ίδιο εκπαιδευτικό και κοινωνικό περιβάλλον. Προς αυτήν την κατεύθυνση συμβάλλει αποφασιστικά η εφαρμογή της βιωματικής μεθόδου, που είναι πιο πρακτική και άμεση σε σχέση με το παραδοσιακό μάθημα, καθώς δημιουργεί μια στενή επαφή ανάμεσα στους διδασκόμενους, μεταδίδει γνωστικά και συναισθηματικά περιεχόμενα, διαμεσολαβεί στη μετάδοση προσωπικών σχετικών εμπειριών για να προκαλέσει συγκεκριμένες (αντι)δράσεις στους επικοινωνούντες (Stoytcheva 2004:1).

Στη βάση της βιωματικής μεθόδου βρίσκονται παράμετροι κοινωνικοποίησης, ανθρωπολογικές-ψυχολογικές (θεωρία της μάθησης) και διδακτικές-μεθοδολογικές (Gudjons 2008: 67). Το βιωματικό μάθημα είναι η αναγκαία προσπάθεια υποστήριξης της ενεργητικής απόκτησης κουλτούρας σε μορφή παιδαγωγικά οργανωμένων διαδικασιών δράσης. Μέσω της (ανα)παραστατικής απόκτησης γνώσεων και γνωστικών σχημάτων δίνεται η δυνατότητα δημιουργίας δομών σκέψης και πρόσβασης στον κόσμο όχι με τη βοήθεια απεικονίσεων αλλά με τη συμβολή αισθητηριακών εμπειριών. Ως εκ τούτου, η ικανότητα δραστηριοποίησης με τη βιωματική έννοια ορίζεται ως ενεργητικός χειρισμός αντικειμένων και ως δράση σε κοινωνικούς ρόλους σε συμβολικό/διανοητικό επίπεδο (Gudjons 2008:68 και Raasch 1983:24-27).

Αναφορικά με τις ανθρωπολογικές-ψυχολογικές παράμετρους, προϋποτίθεται ότι η σκέψη προκύπτει από την ενέργεια και επανεπιδρά σε αυτήν ως ρυθμιστής δράσης. Στην απόκτηση κουλτούρας ανήκει και η ικανότητα επικοινωνίας και λεκτικής έκφρασης. Ακριβώς επειδή η γλώσσα είναι πλούσια σε δομές πραγματικότητας και αποτελεί βασικό μέσο επικοινωνίας σε διαδικασίες δραστηριοποίησης, η γλωσσική μάθηση καθίσταται απαραίτητο συστατικό μέρος του βιωματικού μαθήματος (Gudjons 2008:70).

Από διδακτική/μεθοδολογική άποψη, το βιωματικό μάθημα δε φιλοδοξεί να διεκδικήσει πληρότητα, είναι μάλλον αποσπασματική και επικουρική η απόκτηση γνώσεων. Στόχος δεν είναι η απομνημόνευση όρων αλλά η δημιουργική ανακάλυψή τους και ο νέος συνδυασμός υπαρχόντων δεδομένων. Πρόκειται για γενετική και ανακαλυπτική μάθηση. Η αυτοδιαχείριση, η συμφωνία/ορισμός στόχων, η ευθύνη, η διαθεματική μάθηση αποτελούν κύρια χαρακτηριστικά του βιωματικού μαθήματος. Ωστόσο, δύο είναι τα πιο καθοριστικά στοιχεία του: ο διδασκόμενος καθορίζει αυτόβουλα την επικείμενη δράση, συμμετέχει στο σχεδιασμό, ταυτίζεται με το νόημα του εγχειρήματος. Στην αρχή κάθε δράσης βρίσκεται μια ανακολουθία, δηλ. ένα ζήτημα απόκλισης της διαθέσιμης από την επιθυμητή ικανότητα, με άλλα λόγια, ένα πρόβλημα προς επίλυση (Gudjons 2008:69). Επιπλέον, το βιωματικό μάθημα είναι προσανατολισμένο στο παραγόμενο αποτέλεσμα αλλά και στη διαδικασία (learning by doing) (Leonardo-Projekt 2004:202). Άμεσες συνέπειες είναι η παροχή κινήτρων, η αυτονομία, η αυτοπεποίθηση, η χαρά πειραματισμού, η κοινωνική ικανότητα και η μεθοδολογική εμπειρία (Leonardo-Projekt 2004:203).

Οδηγίες διαπολιτισμικής βιωματικής εκμάθησης μιας ξένης γλώσσας

Ως προς τα θέματα των βιωματικών δραστηριοτήτων μπορούν να αντληθούν από την εμπειρία των διδασκόμενων ή του διδάσκοντα, από τα ενδιαφέροντα και τις ανάγκες τους και από ζητήματα κοινωνικού προβληματισμού άμεσα συναρτώμενα με το θέμα του Οικείου/Ξένου. Στα πλαίσια του ξενόγλωσσου μαθήματος, επιδιώκεται η εξάσκηση γλωσσικών δράσεων που είναι συνδεδεμένες με συγκεκριμένες “εξωσχολικές” επιταγές και δραστηριότητες. Σημαντική είναι η χρήση της ξένης γλώσσας ως αυθεντικό μέσο κατανόησης, γεγονός που επιτυγχάνεται με (E-mail-) project και τέλος, η μάθηση τεχνικών εκμάθησης γλωσσικών δομών (στρατηγικές ανάγνωσης, δημιουργικής γραφής κ.ό.) (Leonardo-Projekt 2004:208). Μιας και η ύλη των διδακτικών εγχειριδίων συχνά δεν επαρκεί, ο εκπαιδευτικός μπορεί να κάνει χρήση των ΤΠΕ επικαιροποιώντας έτσι το διδακτικό υλικό του. Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι ο ρόλος του διδάσκοντα δεν είναι κανονιστικός αλλά συμβουλευτικός και επικουρικός (Δεδούλη online:152), παρόλο που στο ξενόγλωσσο μάθημα, που είναι προσανατολισμένο στη διαπολιτισμικότητα ενδέχεται να επιφορτιστεί με διαπραγματευτικές ικανότητες προς επίλυση εντάσεων και συγκρούσεων.

Τα στάδια της βιωματικής μάθησης σύμφωνα με τον Kolb (1984: 42 στη Δεδούλη online:151) είναι τα ακόλουθα: 1. συγκεκριμένη εμπειρία 2. αναστοχαστική παρατήρηση 3. αφηρημένη εννοιοποίηση 4. ενεργός προγραμματισμός. Αναφερόμενη στο ξενόγλωσσο μάθημα, η Stoytcheva (2004:3) προσαρμόζει τα στάδια στην εισαγωγική φάση (σχεδιασμός), στη φάση της επεξεργασίας (διεξαγωγή) και σε κείνη της αποτίμησης (έλεγχος, αξιολόγηση, κατάταξη). Στην πρώτη φάση οι μαθητές έρχονται αντιμέτωποι με μια προβληματική και ενεργοποιούν τις υπάρχουσες γνώσεις και ικανότητές τους, προγραμματίζουν τη λύση και διατυπώνουν το στόχο (π.χ. Για να επιλυθεί ένα πρόβλημα μπορεί να είναι απαραίτητη η σύνταξη ενός E-mail). Έτσι χρησιμοποιούν και εξασκούν υπάρχουσες και νεοαποκτηθείσες γνωστικές ικανότητες και γλωσσικές γνώσεις. Παράλληλα, έρχονται σε πρώτη επαφή με ζητήματα διαπολιτισμικότητας, γεγονός που αφυπνίζει στερεότυπα, προκαταλήψεις, κοινωνικά και πολιτικά επικρατούσες απόψεις και επιδρά στο θυμικό τους.

Στη δεύτερη φάση αναζητούνται πληροφορίες, ελέγχονται, κατηγοριοποιούνται, σχεδιάζεται η επίλυση και προετοιμάζεται το αποτέλεσμα. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η απόκτηση γλωσσικών γνώσεων καθώς οι διδασκόμενοι εργάζονται με τη βοήθεια των γλωσσικών μέσων για να επιτύχουν το στόχο τους. Σε αυτό το στάδιο ενδέχεται να προκύψουν εντάσεις ως προς την παγιωμένη αντίληψη και άποψη των διδασκομένων αναφορικά με την αλλότρια κουλτούρα. Χρήσιμο εργαλείο αποτελεί η σύγκριση πολιτισμών και απαραίτητη είναι η καλλιέργεια/ενίσχυση της ενσυναίσθησης με βραχυπρόθεσμο σκοπό την αποσόβηση εντάσεων και μακροπρόθεσμο τη σχετικοποίηση προκαταλήψεων. Στην τρίτη φάση, παρουσιάζεται το προϊόν/ το αποτέλεσμα/η λύση, αιτιολογούνται οι παράμετροι, γίνεται συζήτηση, παρατίθεται η επιχειρηματολογία, κρίνεται και συγκρίνεται με τη στοχοθεσία της πρώτης φάσης. Εδώ μπορούν να ενεργοποιηθούν ή να καλλιεργηθούν μεταγνωστικές δομές αξιολόγησης της εμπειρίας και γενίκευσης των αποτελεσμάτων σε πανανθρώπινο επίπεδο.

Μορφές βιωματικής μάθησης

Η Δεδούλη (online:153-5) παρουσιάζει εκτενώς τις βιωματικές πρακτικές: προσομοίωση, παιχνίδι ρόλων, αφηγηματική ανασύνθεση, ταξίδια κατευθυνόμενης φαντασίας, συγκρουσιακή ιδεοθύελλα ή αντιτιθέμενες απόψεις, δραστηριότητες άμεσης εμπειρίας, δραματοποίηση, οργάνωση συζήτησης στρογγυλού τραπεζιού, δραστηριότητες δημιουργικής έκφρασης, μυθοπλασία, δημιουργία εκπαιδευτικού υλικού, επισκέψεις σε χώρους πολιτισμικής αναφοράς. Πολλές από αυτές είναι ιδιαίτερα κατάλληλες για τη διαπολιτισμική μάθηση, μιας και μπορούν να αποτελέσουν τη βάση για γόνιμη αντιπαράθεση και αναθεώρηση αξιών.

Εφόσον όμως παράλληλα επιδιώκεται και η απόκτηση γλωσσικών γνώσεων, υπάρχουν διάφορες τεχνικές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις εκάστοτε διδακτικές φάσεις και να υποστηρίξουν το σκοπό και τις λειτουργίες τους:¹⁰

- Μέθοδοι με σκοπό τον προσωπικό και ουσιαστικό προσανατολισμό. Ερώτηση: “Ποιο είμαστε εμείς;” [Παιχνίδια γνωριμίας/τεχνικές warming-up, παρουσίαση προσωπική και της ομάδας, σκιαγράφηση προσωπικού προφίλ, συνοπτική παρουσίαση, καθρέφτης της ομάδας].

10 Οι Hoffmann/Langefeld (1998 στη Stoytcheva 2004:5-7) τις ονομάζουν μεθόδους, κατά την άποψή μου πρόκειται μάλλον για τεχνικές, ωστόσο εδώ θα χρησιμοποιηθεί η ορολογία που χρησιμοποιούν εκείνοι.

- Μέθοδοι με σκοπό την εύρεση προβλήματος: εισαγωγή, ενεργοποίηση, σχεδιασμός. Ερώτηση: “Τι θέλουμε να επιτύχουμε;” “Πως μπορούμε να το επιτύχουμε;” [Λίστα ABC, Aquarium, Brainstorming, Mind Map, Παιχνίδι ρόλων, Υπέρ και κατά, Παρουσίαση, Μετα-σχέδιο].
- Μέθοδοι με σκοπό την επίλυση του προβλήματος. Προσανατολισμός στο υλικό, επεξεργασία θεματικών πεδίων, αξιοποίηση διδακτικών περιεχομένων, επεξεργασία πληροφοριών, γενίκευση. [Επερώτηση ειδικών, case study, στάδια εκμάθησης/εκμάθηση σταδίων, Μετα-σχέδιο, καθοδηγητικό κείμενο, Project].
- Μέθοδοι με σκοπό την εδραίωση γνώσεων, την ανάκλαση και τη μεταβίβαση. Ερωτήσεις: “Τι κάναμε;”, “Τι μάθαμε;”, “Επιτύχαμε αυτό που επιδιώξαμε;” [Λίστα ABC, Mind Map, παιχνίδι Ρόλων, Υπέρ και κατά, παιχνίδια, παρουσίαση αποτελέσματος].

Αξιοσημείωτο είναι ότι μιας και η βιωματική μέθοδος είναι αρκετά ανοιχτή, ευέλικτη και προσαρμόσιμη στον εκάστοτε στόχο και στην εκάστοτε ομάδα συμμετασχόντων, η διαχείριση της δυναμικής των επιμέρους στοιχείων του μαθήματος (κοινωνικές μορφές, μέσα και μορφές του μαθήματος) αποτελεί επιταγή και προϋπόθεση αποτελεσματικής εφαρμογής της μεθόδου (Stoytcheva 2004:7).

Η Linthout (2004:123-141) θεωρεί ότι στα πλαίσια του βιωματικού ξενόγλωσσου μαθήματος η μέθοδος project μπορεί να έχει βέλτιστα αποτελέσματα και προτείνει διάφορους τρόπους εφαρμογής, επισημαίνοντας ταυτόχρονα και τη διαπολιτισμική διάσταση τους. Κατά τη γνωριμία/παρουσίαση του ατόμου ή της ομάδας με σκοπό τη διεπαφή με μια αντίστοιχη ομάδα, σημαντική είναι η ερώτηση αν υπάρχουν διαφορές και κοινά με κείνη, ενώ καλό θα ήταν να αναζητηθούν οι αιτίες. Με τη χρήση οπτικοακουστικού υλικού, που λειτουργεί υποστηρικτικά για το διαπολιτισμικό στοιχείο, μπορεί να διαπιστωθεί η εικόνα του Οικείου και του Ξένου και να βρεθούν κοινά σημεία αναφοράς κ.ό. Ζητήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη και που μπορεί να προκαλέσουν εντάσεις και προβλήματα είναι π.χ. ο χειρισμός και η αντιμετώπιση προκαταλήψεων και στερεοτύπων, ενδεχόμενες ρατσιστικές αντιδράσεις και σχόλια, θέματα εξουσίας/ελέγχου ή αίσθημα κατωτερότητας μιας ομάδας κ.ό. (Linthout 2004:139). Πριν τη διεξαγωγή του project καλό θα ήταν ο εκπαιδευτικός να προετοιμαστεί για ενδεχόμενες συμπεριφορές που μπορούν να προκαλέσουν εντάσεις αναρωτώμενος για τα κίνητρα της συμπεριφοράς των διδασκομένων και του ίδιου, την επίδραση αυτών των στάσεων σε άλλους, τους λόγους εκνευρισμού που προέρχονται από αρνητικά στερεότυπα και τη λειτουργία των τελευταίων. Τέλος, τίθεται το θέμα κατά πόσο θέλει και πρέπει να διορθώσει κανείς μια αρνητική εικόνα, ενώ κείριο είναι το ερώτημα, τι εκφράζει αυτή που έχει ο άλλος για μας τους ίδιους (Linthout 2004:139).

Σημαντική είναι η ανάγκη να είναι επικαιροποιημένα τα εργαλεία του βιωματικού μαθήματος, για να μην υπάρχει η αίσθηση ετεροχρονισμού και άρα απόσταση ανάμεσα στο βίωμα και το διδασκόμενο αντικείμενο. Αυτό το γεγονός επιτυγχάνεται με τη χρήση των ΤΠΕ, που έχουν καθοδηγητική αλλά και πληροφοριακή λειτουργία. Αξιωματημόνευτο ωστόσο είναι ότι αποκτούν εργαλειακό ρόλο σε μια διαφοροποιημένη σχέση διδασκόμενου και περιβάλλοντος, ακριβώς επειδή μόνο το βιωματικό μάθημα είναι σε θέση να δομήσει γνωστικές δομές μέσω της αισθητηριακότητας, της εμπειρίας, της ενέργειας/δράσης/βιώματος (Gudjons 2008:69). Ενδεικτικά να αναφέρουμε ότι όλα τα Νέα Μέσα (ίντερνετ, διαδραστικού πίνακα, πλατφόρμας, ταινιών, εκπαιδευτικών πολυμεσικών εργαλείων και CD-ROM) μπορούν να συμβάλουν στο βιωματικό διαπολιτισμικά προσανατολισμένο ξενόγλωσσο μάθημα. Ειδικά το internet-project *Das Bild der Anderen* (Goethe-Institut: online) προσφέρει τη δυνατότητα επαφής και γνωριμίας με τη γερμανική ιστορία καθώς παρουσιάζει σημαντικές ιστορικές στιγμές όπως τις βίωσαν

απλοί άνθρωποι. Μέσα από αυτό το παράδειγμα, οι διδασκόμενοι θα συνειδητοποιήσουν ότι όλοι οι άνθρωποι σε όλον τον κόσμο χαίρονται και φοβούνται με τον ίδιο τρόπο.¹¹

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Υπακούοντας στις σύγχρονες κοινωνικές επιταγές με σκοπό να προληφθούν και να αποσοβηθούν εντάσεις και συγκρουσιακές καταστάσεις μέσα στο μάθημα καλείται ο εκπαιδευτικός της Γερμανικής ως ξένης γλώσσας να ανακαλύψει ή να εφεύρει διδακτικές πρακτικές που θα διευκολύνουν το έργο του. Εφόσον στη βάση κάθε ξενόγλωσσου μαθήματος βρίσκεται η επαφή με την “άλλη” κουλτούρα, καλό είναι να αξιοποιηθεί αυτό το δεδομένο προς όφελος της διεύρυνσης των προσωπικών οριζόντων. Μια πρακτική με άμεσα αποτελέσματα είναι το βιωματικό μάθημα, που είναι σε θέση να ενισχύσει τη διαπολιτισμικότητα και να επιστημάνει την παγκοσμιότητα του πανανθρώπινου στοιχείου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. *ABCD-Thesen zur Rolle der Landeskunde im Deutschunterricht*, στο *Fremdsprache Deutsch*, **3**, 60-61 (1990).
2. *ΑΠΣ Γερμανικής Γλώσσας* (Αναλυτικό Πρόγραμμα Σπουδών Γερμανικής Γλώσσας), Παιδαγωγικό Ινστιτούτο, στο <http://www.pi-schools.gr/programms/depps/>, ημερομηνία πρόσβασης: 13.10.2012.
3. S. Bachmann και S. Gerhold και B.-D. Müller και Wessling, G: *Sichtwechsel neu 1, 2, 3. Eine Allgemeine Einführung. Mittelstufe Deutsch als Fremdsprache*. Stuttgart: Klett 1995.
4. Μ. Δεδούλη, “Βιωματική μάθηση-Δυνατότητες αξιοποίησής της στο πλαίσιο της Ευέλικτης Ζώνης”, στο www.pi-schools.gr/download/publications/epitheorisi/.../deloudi.PDF, ημερομηνία πρόσβασης: 10.11.2012, 145-159.
5. *ΔΕΠΠΣ Διαθεματικό Ενιαίο Πλαίσιο Προγραμμάτων Σπουδών*, Παιδαγωγικό Ινστιτούτο, στο <http://www.pi-schools.gr/programs/depps/>, ημερομηνία πρόσβασης: 13.10.2012
6. C. Geistmann, *Interkulturelle Kompetenz- Eine wichtige und förderbare Fähigkeit in der internationalen Zusammenarbeit*, Erlangen- Nürnberg: Books on Demand, 2002.
7. Goethe-Institut, *Das Bild der Anderen*, στο http://www.goethe.de/ins/pl/lp/prj/bld/deindex.htm?wt_sc=bild, ημερομηνία πρόσβασης: 10.11.2012.
8. H. Gudjons, *Handlungsorientiert lehren und lernen. Schüleraktivierung, Selbsttätigkeit, Projektarbeit*, Bad Heilbrunn, Klinkhardt, 2008.
9. W. Hackl και W. Langner, και M. Simon-Pelanda, „Landeskundliches Lernen“, στο *Fremdsprache Deutsch*, 18 (1998)
10. J. House, „Zum Erwerb interkultureller Kompetenz im Unterricht des Deutschen als Fremdsprache“, στο *Zeitschrift für interkulturellen Fremdsprachenunterricht* (online) <http://www.ualberta.ca/~german/ejournal/house.htm>, ημερομηνία πρόσβασης: 13.10.2012.
11. E. Karagiannakis, “Projektorientierte Landeskunde im DaF□Unterricht – Eine Kooperation zwischen DaF□Lernern und Lehramtsstudierenden”, στο http://opus.bibliothek.uni-wuerzburg.de/volltexte/2009/3909/pdf/Profil1_komplett.pdf. ημερομηνία πρόσβασης: 10.11.2012.
12. B. Kast και G. Neuner (Επ.), *Zur Analyse, Begutachtung und Entwicklung von Lehrwerken*, Berlin και München, Langenscheidt, 1994.
13. Leonardo-Projekt: *Handlungsorientiertes Ausbildungsprogramm für DaF im Beruf auf Fachschulniveau* στο www.goethe.de/be/ams/cdleon ημερομηνία πρόσβασης: 13.10.2012.

¹¹ Φυσικά το παρόν κείμενο δεν εγείρει αξιώσεις πληρότητας, καθώς υπάρχουν άπειρες πρακτικές εφαρμογές που καθορίζονται πάντα από το ανθρώπινο δυναμικό (διδάσκοντες/διδασκόμενοι) και από το πλαίσιο.

14. G. Linthout, *Handlungsorientierter Fremdsprachenunterricht. Ein Trainingsprogramm zur Kompetenzentwicklung für den Beruf*, Amsterdam και New York, Rodopi, 2004.
15. S. Luchtenberg, *Interkulturelle kommunikative Kompetenz: Kommunikationsfelder in Schule und Gesellschaft*, Opladen, Westdt, 1999.
16. G. Neuner, „Zur Rolle des Englischen in einem europäischen Konzept von Mehrsprachigkeit“, στο S. Duxa και A. Hu και B. Schmenk, (Επ.), *Grenzen überschreiten. Menschen, Sprachen, Kulturen*, Tübingen, Narr, 2005, 163-178.
17. A. Pauldrach, „Eine unendliche Geschichte. Anmerkungen zur Situation der Landeskunde in den 90er Jahren“, στο *Fremdsprache Deutsch*, 6, 4-15, 1992
18. R. Picht, „Kultur- und Landeswissenschaften“, στο: Bausch, K.-R. Christ, H., Hüllen, W., Krumm, H.-J. (Επ.), *Handbuch Fremdsprachenunterricht*, Tübingen, Francke, 1989, 54-60.
19. A. Raasch (Επ.), *Handlungsorientierter Fremdsprachenunterricht und seine pragmalinguistische Begründung*, Tübingen, Narr, 1983.
20. C. Ramos και D. Wildenauer-Józsa, *Eine handlungsorientierte Fortbildungsveranstaltung über Handlungsorientierung*, στο http://opus.bibliothek.uni-wuerzburg.de/volltexte/2009/3909/pdf/Profil1_komplett.pdf, ημερομηνία πρόσβασης: 10.11.2012. 33.
21. C. Ramos, *Handlungs- und Aufgabenorientierung*, στο http://opus.bibliothek.uni-wuerzburg.de/volltexte/2009/3909/pdf/Profil1_komplett.pdf, ημερομηνία πρόσβασης: 10.11.2012. 45-49.
22. Χ. Τσίρος, “Μαθαίνω πως να μαθαίνω ευχάριστα: η αξιοποίηση του αντιληπτικού, γνωσιακού και συναισθηματικού συστήματος διδάσκοντος και διδασκόμενου”, στο Πρακτικά του 5ου Πανελληνίου Συνεδρίου του Ελληνικού Ινστιτούτου Εφαρμοσμένης Παιδαγωγικής και Εκπαίδευσης με θέμα *Μαθαίνω Πως να Μαθαίνω*, αμφιθέατρο Μαρασλείου Διδασκαλείου Δημοτικής Εκπαίδευσης Πανεπιστημίου Αθηνών, 7-8-9 Μαΐου 2010.
23. U. Zeuner, *Landeskunde und interkulturelles Lernen. Eine Einführung*, στο <http://rks2.urz.tu-dresden.de/sulifg/daf/landesku/start.htm>, ημερομηνία πρόσβασης: 10.11.2012.

Σχολεία του Φράχτη: Αποτυπώσεις και Συνάψεις Εκπαίδευσης, στο Θεατρικό Έργο - *Translations* του Ιρλανδού Συγγραφέα Brian Friel

Αναστασία Καραντζή

Σχολή Ναυτικών Δοκίμων, Τομέας Ανθρωπιστικών και Πολιτικών Επιστημών

Περίληψη. Η παρούσα εργασία αντλεί το πλαίσιο αναφοράς της από το θεατρικό έργο *Translations* του Ιρλανδού συγγραφέα Brian Friel, το οποίο διαδραματίζεται στην Ιρλανδική επαρχία το 1833. Πρωτοανέβηκε το 1980, στην Βόρεια Ιρλανδία, σηματοδοτώντας την ίδρυση της εταιρίας Field Company, συνιδρυτής της οποίας ήταν ο συγγραφέας του έργου. Επικεντρώνεται στην παρουσίαση του άτυπου εκπαιδευτικού θεσμού των *Σχολείων του Φράχτη*, ο οποίος είχε ευρεία απήχηση στο σύνολο της αποικιοκρατούμενης Ιρλανδίας, όλο τον 18^ο και μεγάλο μέρος του 19^{ου} αιώνα. Επιπλέον, αποπειράται μια διερεύνηση των εννοιών γλώσσα και ταυτότητα, όπως αυτές υπονοούνται και καταδεικνύονται στο θεατρικό κείμενο.

Λέξεις κλειδιά: *Σχολεία του Φράχτη, Brian Friel, Translations, Γλώσσα και Ταυτότητα*

Abstract. The present paper draws its frame of reference from the play *Translations* of the Irish playwright Brian Friel, which takes place in the Irish countryside in 1833 and was originally staged in 1980 in North Ireland, celebrating the establishment of the Field Company, which was co-founded by the writer. It focuses on the presentation of the informal educational institution of *Hedge Schools*, which was very popular in colonized Ireland during the eighteenth and a large part of the nineteenth century. Additionally it attempts to examine the issues of language and identity, based on the way they are insinuated and signified in the theatrical text.

Key words: *Hedge Schools, Brian Friel, Translations, Language and Identity*

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αλλοτροπία της ανθρώπινης ψυχής δημιούργησε τον άνθρωπο- σκηνοθέτη πολύ πριν από τον συλλέκτη, τον τεχνίτη ή τον νοήμονα άνθρωπο, διότι η 'σκηνή' που κάθε φορά ετίθετο, ήταν το σύμβολο της 'άλλης σκηλής', του ασυνείδητου περιεχομένου της, που συναντούσε τα όρια της φύσης και της ιστορίας. [1]

Οι Βρετανοί, από πολύ παλιά, προσπάθησαν, ποικιλοτρόπως, να αποτρέψουν την αφομοίωση των Άγγλων από την ντόπια Κελτική παράδοση, γεγονός που ποτέ δεν κατέστη απολύτως εφικτό. Ήδη από το 1800, έτος της επίσημης ένταξης της Ιρλανδίας στην Μεγάλη Βρετανία, δεν έπαψε να αποτελεί ένα προβληματικό ζήτημα. Ο Robert Winder, στο βιβλίο του

Bloody Foreigners [2], αναφέρει ότι η μεγαλύτερη τονωτική ένεση μεταναστών στην Βρετανία του 19^{ου} αιώνα έγινε από Ιρλανδούς. Αν και οι δυσκολίες μετακίνησης είχαν αρθεί με την ένωση, οι Ιρλανδοί εργάτες δεν ήρθαν με στόχο την εγκατάσταση και την οικονομική τους αναβάθμιση και αναψυχή σε ένα περιβάλλον με περισσότερες ευκαιρίες. Αναζητούσαν τρόπο να χρηματοδοτήσουν τις εξαθλιωμένες οικογένειες που έμειναν πίσω. Ο λιμός της πατάτας του 1840 έδωσε την χαριστική βολή και οι άνθρωποι άρχισαν να στοιβάζονται στα πλοία με προορισμό τα δυτικά λιμάνια της Αγγλίας. Όσοι είχαν την δυνατότητα, έφυγαν στην Αμερική. Τους παρακινούσε η απελπισία και οι οργή, γιατί στην κορύφωση του λιμού έβλεπαν τα καλύτερα προϊόντα τους να φεύγουν από την χώρα, με στρατιωτική συνοδεία. Ελάχιστοι μετανάστες ήταν λιγότερο καλοδεχούμενοι από τους Βρετανούς, όσο οι Ιρλανδοί. Ζούσαν σε γκέτο, του οποίου εθεωρούντο δημιουργοί και όχι θύματα, κάτω από άθλιες συνθήκες υγιεινής και αντιμετωπιζόνταν σαν άγρια ζώα, γεμάτα αρρώστιες. Ένας λόγος επιπλέον ήταν ότι έφεραν την απειλή του Καθολικισμού. Το όνομα τους έγινε συνώνυμο της φτώχειας και της απαξίωσης.

Η εικόνα της Ιρλανδίας παρουσιάζεται κατακερματισμένη και γεμάτη αντιθέσεις. Ο Greene [3] αναφέρει ότι οι δραματουργοί, στο σύνολό τους, ισχυρίζονταν, ο καθένας για τον εαυτό του, ότι ήταν ικανός να αποδώσει και να αποκαταστήσει την πραγματική Ιρλανδία, ο χαρακτήρας της οποίας θεωρούνταν ότι είχε πλήρως αλλοιωθεί. Αναγνωρίζει, ωστόσο, ότι τρία έργα θεωρούνται τα πλέον χαρακτηριστικά, αναφορικά με τον προβληματισμό για την αποτύπωση της αυθεντικής Ιρλανδικής ταυτότητας: Το *Shaughroun* του Boucicault (1894), το *John Bull's other island* του Shaw (1904) και το *Translations* του Friel (1980). Ο Friel στο έργο του διερευνά, μέσα από το τοπικό ιδίωμα και την χειρονομία, το ρόλο που μπορεί να διαδραματίσει η γλώσσα στην διαμόρφωση της πολιτισμικής ταυτότητας [4]. Ο συγγραφέας συνδέει το σώμα, την γεωγραφία και την γλώσσα με ιδεολογικά ζητήματα, που σχετίζονται με την εθνική ταυτότητα [5].

TO ΕΡΓΟ TRANSLATIONS

Η υπόθεση έχει ως εξής: Ο Hugh, δάσκαλος και διευθυντής του παλιού σχολείου, έχει γιο τον Manus, που τον βοηθάει στο σχολείο και τον Owen που έφυγε στο Δουβλίνο για να ασχοληθεί με άλλες δουλειές, επικερδείς. Μετά από χρόνια, ο Owen επιστρέφει στο χωριό ως συνεργάτης-διερμηνέας των Άγγλων και ανακοινώνει στους κατοίκους ότι ο Βρετανικός Στρατός πρόκειται να κάνει νέα χαρτογράφηση της Ιρλανδικής υπαίθρου και όλα τα τοπωνύμια να μεταφραστούν από τα Gaelic στην Αγγλική γλώσσα. Στο μεταξύ, ένας Βρετανός αξιωματικός γοητεύεται από το τοπίο και θέλει να ζήσει μαζί με τους Ιρλανδούς, ενώ, ταυτόχρονα, ερωτεύεται μια νεαρή Ιρλανδέζα και επιθυμεί να είναι μαζί της. Ωστόσο, καταλαβαίνει, ότι θα παραμείνει ένας ξένος και δεν μπορεί να ενσωματωθεί στην τοπική κοινωνία. Στο τέλος εξαφανίζεται, χωρίς να γνωρίζουμε εάν αποφάσισε να περιπλανηθεί, ή δολοφονήθηκε από κάποιους. Το κοινό μένει να αναρωτιέται για την έκβαση των γεγονότων.

Η πρεμιέρα του έργου *Translations* έγινε στις 23 Σεπτεμβρίου του 1980, εγκαινιάζοντας την θεατρική εταιρεία Field Company, η οποία συστήθηκε από έξι διανοούμενους καλλιτέχνες της Βόρειας Ιρλανδίας, προεξάρχοντος του συγγραφέα. Έχοντας εξασφαλίσει μια βασική χρηματοδότηση από τις αρμόδιες επιτροπές πολιτιστικών θεμάτων, τόσο του Βορρά όσο και του Νότου, είχε ως κύριο στόχο το ανέβασμα θεατρικών έργων και την περιοδεία τους και στις δυο πλευρές. Οι ιδρυτές της Εταιρείας διατύπωσαν την ανάγκη τους να ανταποκριθούν στην παραχώδη πολιτική και κοινωνική κατάσταση, με τον τρόπο που οι ίδιοι έκριναν ότι ενδείκνυται: αφενός κοινωνικά και ηθικά, αφετέρου δημιουργικά. Δε θα ήταν άστοχο να πει κανείς ότι η Field Company ιδρύθηκε, ακριβώς, ως αντίδραση απέναντι στην βία και σε όλα εκείνα τα ακραία φαινόμενα που είχαν από καιρό αρχίσει να πλήττουν, κυρίως, την Ιρλανδική περιφέρεια [6].

Η έναρξη των παραστάσεων του έργου στο Derry, στην Βόρεια Ιρλανδία, θεωρήθηκε εξαιρετική τόνωση του χαμηλού ηθικού μιας πόλης, που άγγιζε τα όρια του καταθλιπτικού.

Τοιουτοτρόπως, βαθιά ευγνώμονες στάθηκαν από κοινού, εθνικιστές, ενωτικοί, προτεστάντες αλλά και καθολικοί, απέναντι σε μια τέτοια πολιτιστική πρωτοβουλία [7]. Το έργο, ήδη από την βραδιά της πρεμιέρας, αντιμετωπίστηκε με ιδιαίτερη θερμότητα, από τους κριτικούς. Γνώρισε πολύ μεγάλη επιτυχία, σε όλη την Ιρλανδία και στο εξωτερικό, δίνοντας στον δημιουργό του μια εξέχουσα θέση, ανάμεσα στους σημαντικότερους και αντιπροσωπευτικότερους Ιρλανδούς συγγραφείς του σήμερα. Όπου παίχτηκε, κατέκτησε πληθώρα διαφορετικών κοινών, ενώ ακόμη και όσοι κατέκριναν ορισμένες ιστορικές του ανακρίβειες, δεν παρέλειπαν να τονίσουν την δραματουργική του αξία. Εύλογα γεννάται το ερώτημα, λοιπόν, τι είδους χορδές δόνησε; Τι ήταν αυτό που συγκίνησε τόσους πολλούς, σε ένα έργο που μιλάει για γλώσσες, από τις οποίες άλλες έχουν εκλείψει, παντελώς και άλλες, σχεδόν, δεν ομιλούνται, πλέον, ενώ έχει για πρωταγωνιστή έναν δάσκαλο που του αρέσει να πίνει και διδάσκει άχρηστα, κατά πολλούς, πράγματα, μέσα σε έναν αχυρώνα; [8]

Ο τόπος είναι μια Ιρλανδική κοινότητα του Donegal, το 1833, σε ένα Σχολείο του Φράχτη σε μια μικρή πόλη το Ballybeg. Πρόκειται για την αγαπημένη φανταστική πόλη του Friel, το όνομα της οποίας προέρχεται από το Κελτικό *baile beag*, που σημαίνει *μικρή πόλη* [9]. Η γενική ατμόσφαιρα είναι εκείνη της απειλής, πρωτίστως, γιατί ο δάσκαλος επιμένει να διδάσκει στους μαθητές του Αρχαία Ελληνικά και Λατινικά, οδηγώντας τους, ταυτόχρονα, στην συνομιλία τους με πολιτισμούς, που δεν υφίστανται, πλέον. Ταυτόχρονα, η ίδια η Ιρλανδική γλώσσα είναι υπό απειλή, διότι ο Αγγλικός στρατός έχει ξεκινήσει την χαρτογράφηση της περιοχής, με σκοπό να αντικαταστήσει κάθε Ιρλανδικό τοπωνύμιο με ένα Αγγλικό. Η αναστάτωση είναι μεγάλη: το Σχολείο του Φράχτη πρόκειται να αντικατασταθεί από ένα καινούριο Εθνικό, απαιτείται πλέον από όλους να μάθουν την καινούρια γλώσσα, την Αγγλική, η αρρώστια στις πατάτες επανεμφανίστηκε, η πόλη θα αποκτήσει καινούργιο όνομα και όλα όσα ήσαν οικεία μέχρι τώρα, ξαφνικά θα γίνουν ξένα. Το στοιχείο του ξένου και του ανοίκειου διατρέχει, υποδόρια, το έργο, σε όλη του την έκταση. Οι πρωταγωνιστές διακρίνονται σε δυο κατηγορίες: αφενός, σε αυτούς που προτιμούν το οικείο και ας μην οδηγεί πουθενά, και, αφετέρου, σε αυτούς που επιλέγουν το καινούργιο και ανοίκειο, όπως η Maire, που είναι αποφασισμένη να παραδοθεί σε αυτό, με οποιεσδήποτε επιπτώσεις, γιατί επιθυμεί να προχωρήσει στην ζωή της. Ο στόχος της είναι να μεταναστεύσει στην Αμερική, για ένα καλύτερο αύριο.

«...Πρέπει όλοι μας να μάθουμε να μιλάμε στα εγγλέζικα. Είναι η δεύτερη επίσημη γλώσσα του έθνους. Αυτό λέει η μάνα μου, αυτό λέω κι εγώ. Αυτό είπε και ο αρχηγός του Κόμματος Καθολικών...ορίστε τι είπε: η παλιά μας γλώσσα είναι εμπόδιο για τον εκσυγχρονισμό. Την αγγλοποίηση. Εγώ δεν χρειάζομαι ούτε αρχαία ελληνικά, ούτε αρχαία λατινικά. Αγγλικά χρειάζομαι. Θέλω να μπορώ να μιλάω τα εγγλέζικα επειδή φεύγω για Αμερική μόλις αποσώσουμε το θερσίμο...» [10]

Οι αναφορές ελληνικών και λατινικών τύπων και η προβληματική σχετικά με τις γλώσσες αυτές, κατέχουν κομβικό ρόλο, σε ολόκληρο το έργο. Εξάλλου, η διδασκαλία τους στα Σχολεία του Φράχτη, μαζί με τα άλλα κύρια μαθήματα, ήταν ένας επιπλέον λόγος για να γίνουν αυτά γνωστά και να διατηρηθούν, τόσα χρόνια. Οι Ιρλανδοί μαθητές των Αγροτικών Σχολείων διδάσκονταν τους κλασικούς, από πολύ μικρή ηλικία, αναπτύσσοντας, με αυτούς, οικειότητα και ιδιαίτερους δεσμούς. Τόσο τα Λατινικά όσο και τα Αρχαία Ελληνικά χαρακτηρίζονται, συνήθως, ως νεκρές γλώσσες. Στην πραγματικότητα, τα Σχολεία του Φράχτη κατόρθωσαν να τις ζωντανέψουν, καθώς οι μαθητές τους τις μιλούσαν [11]. Στο έργο ο Hugh, ο δάσκαλος και διευθυντής του Σχολείου του Φράχτη διδάσκει τους κλασικούς, εδώ και τριανταπέντε χρόνια. Οι Λατινικές και οι Αρχαίες Ελληνικές λέξεις που υπάρχουν στο κείμενο, λέγονται αυτούσιες, χωρίς μετάφραση. Όλοι οι συμμετέχοντες στο θεατρικό γίνεσθαι, μικροί και μεγαλύτεροι, τις καταλαβαίνουν. Οι μόνοι που δεν τις καταλαβαίνουν, είναι οι δυο Άγγλοι στρατιώτες, διότι δεν ομιλούν καμία άλλη γλώσσα, εκτός της Αγγλικής. Πρόκειται για ένα εύγλωττο, σιωπηρό σχόλιο του συγγραφέα, ο οποίος δείχνει να συντάσσεται με τους μεγάλους Ιρλανδούς ποιητές, όπως ο Yeats και ο Joyce, που σφυρηλάτησαν την γλώσσα τους πάνω στα θεμέλια της Ελληνικής και

της Λατινικής, των ίδιων γλωσσών που μιλούν οι ήρωες του Friel. Έτσι, υπενθυμίζεται στους Άγγλους ότι, όπως ο ελληνικός πολιτισμός υπήρξε το θεμελιώδες πρότυπο, όπως, αργότερα, οι Ρωμαίοι κυριάρχησαν στην Αγγλία, έτσι και τώρα ένας Ιρλανδός χρησιμοποιεί την Αγγλική με τέτοιο τρόπο, ώστε να επαναεπιβάλει την Ρωμαϊκή κυριαρχία στην γλώσσα του κατακτητή του, χωρίς ο ίδιος να έχει κυριαρχηθεί, ποτέ από τους Ρωμαίους [12]. Ιδιαίτερα εύστοχος ακούγεται, στο σημείο αυτό, ο χαρακτηρισμός του Martin McDonagh ότι το χαρακτηριστικό της Ιρλανδικότητας είναι ότι, πάντα, πολεμούσε τους αποικιοκράτες με τους κλασικούς, ενώ αντίθετα οι Άγγλοι έβλεπαν, ανέκαθεν, το κλασικό σαν επαναστατικό [13].

Κατά την διάρκεια της συγγραφής του έργου, ο συγγραφέας κρατούσε ημερολόγιο, στο οποίο κατέγραφε τις σκέψεις, αλλά και τις αγωνίες του, σχετικά με την πορεία της δουλειάς. Εκεί αναφέρει τις πέντε πηγές που τον είχαν επηρεάσει ιδιαίτερα, στην σύλληψη και εκτέλεση του θεατρικού: Τα *Γράμματα*, του Τζων Ο' Ντόνοβαν (1834), οι *Αναμνήσεις* του Κόλμπυ (1837), το *Χάρτινο Τοπίο* του Τζων Άντριους (1975), τα *Αγροτικά Σχολεία της Ιρλανδίας* του Ντόουλινγκ (1935) και το *Μετά τη Βαβέλ* του Στάινερ (1975) [14]. Ο Friel, στο ημερολόγιό του, δίνει επιγραμματικά το στίγμα των προθέσεών του, καταθέτοντας ότι το έργο σχετίζεται, αποκλειστικά, με την γλώσσα, υποστηρίζοντας ότι, αν το πολιτικό στοιχείο είχε πιο βαρύνουσα θέση, θα ήταν καταστροφικό. Εστιάζει στο κλίμα που υπάρχει στο Ballybeg, εκείνη την εποχή, παρατηρώντας ότι πρόκειται ένα κλίμα που αρχίζει να εκλείπει, με θύματα τις μεταβατικές ηλικίες, που χάνονται περιπλανώμενες και ανέστιες σε ξένη γη [15]. Η περιπλάνηση των μεσήλικων σε ένα πραγματικό, όσο και σε ένα συμβολικό επίπεδο, φαίνεται να είναι κομβικό σημείο των προθέσεών του. Εξάλλου, όπως αναφέρεται, συχνά, στην Ιρλανδία, ο τόπος, πάντα, έχει μεγάλη σημασία. Το ίδιο και στο έργο του Friel: τα όρια και οι περιορισμοί είναι παρόντες και δυσεπίλυτοι και ο κόσμος το γνωρίζει. Όρια τόσο γεωγραφικά, όσο και προσωπικά. Οι κοινότητες είναι μοιρασμένες, οι απόψεις δίστανται, οι αναμνήσεις είναι πολλές και διαφορετικές για τον καθένα, τα άτομα παλεύουν με εσωτερικές διαμάχες. Χαρακτηριστική είναι η άποψη ότι το έργο χαρτογραφεί τον διαμοιρασμένο εαυτό της ίδιας της Ιρλανδίας [16].

ΣΧΟΛΕΙΑ ΤΟΥ ΦΡΑΧΤΗ: ΕΝΑ ΑΤΥΠΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕ ΔΙΑΡΚΕΙΑ

Τα Αγροτικά Σχολεία ή Σχολεία του Φράχτη υπήρξαν η απάντηση των τοπικών ιρλανδικών κοινοτήτων, απέναντι στους ιδιαίτερα σκληρούς νόμους των Άγγλων αποίκων, σύμφωνα με τους οποίους απαγορευόταν στους Ιρλανδούς Καθολικούς και Αποστάτες να μορφώνονται. Το όνομά τους προέρχεται από τον τόπο στον οποίο λάμβανε χώρα η διδασκαλία, που δεν ήταν άλλος από το τέλος ενός απομακρυσμένου φράχτη, στο ύπαιθρο, όταν ο καιρός το επέτρεπε, με κάποιο μαθητή να παραφυλάει για να ειδοποιήσει, εγκαίρως, σε περίπτωση που εμφανίζονταν, ξαφνικά, Άγγλοι στρατιώτες. Ο φράχτης και η βλάστηση δίπλα σε αυτόν, προφανώς, λειτουργούσαν ως φυσικό καμουφλάζ. Άλλα ιρλανδικά ονόματα για τα τοπικά σχολεία, που δήλωναν το φυσικό περιβάλλον, στο οποίο υπάγονταν, ήταν *σχολείο στον τοίχο*, ή *σχολείο στο χαντάκι*, *σχολείο της τάφρου* ή *σχολείο στο γρασίδι*. Το τελευταίο καταδεικνύει το μικρό κομμάτι γης που καλλιεργούσε, πολλές φορές, ο δάσκαλος, για την επίβιώςή του. Το 1829, όταν νομιμοποιήθηκε ο Καθολικισμός και τα τοπικά σχολεία έπαψαν να είναι παράνομα, αυτά άρχισαν να λειτουργούν σε στεγασμένους χώρους, παραπήγματα, μαντριά και στάβλους. Έτσι, ονομάστηκαν *σχολεία της καλύβας*, καθώς παρέπεμπαν σε μέρη παρόμοια με εκείνα που ζούσαν οι βοσκοί [17].

Τα μαθήματα στα περισσότερα αγροτικά σχολεία γίνονταν στην Ιρλανδική γλώσσα και τα παιδιά διδάσκονταν τα τρία R (reading, writing, arithmetic: ανάγνωση, γραφή και αριθμητική). Σε πολλές περιπτώσεις, όμως, διδάσκονταν, επίσης, λατινικά, ελληνικά, μαθηματικά και άλλα μαθήματα, κυρίως στην Νοτιοδυτική Ιρλανδία. Πολλές αναφορές Άγγλων περιηγητών κάνουν

λόγο για την ύπαρξη κλασικών μελετητών, σε απομακρυσμένες αγροτικές κοινωνίες, όπως είναι στο έργο ο Hugh και ο Jimmy Jack. Στα περισσότερα θέματα, όπως ιστορία, κλασικές γλώσσες και λογοτεχνίες, μαθηματικά, αγγλική και ιρλανδική γλώσσα, διέθεταν πολλή και καλή ενημέρωση, με κάποιους να διδάσκουν ακόμη πιο εξειδικευμένα μαθήματα, όπως επιστασία, αστρονομία ή και ναυσιπλοΐα. Δεν είναι σπάνιο το φαινόμενο παροχής διδασκαλίας από γνωστούς Κέλτες ποιητές, οι οποίοι, με αυτόν τον τρόπο, εξασφάλιζαν τα προς το ζην και την δυνατότητα να γράφουν. Η πληρωμή των δασκάλων αντιστοιχούσε είτε σε μια μικρή χρηματική αμοιβή, είτε, πολύ συχνά, σε καρπούς και προμήθειες, όπως, λ.χ., γάλα στην περίπτωση της Maire του έργου. Πολλά αγροτικά σχολεία διέθεταν καλό εξοπλισμό σε βιβλία και εγχειρίδια. Στο έργο, ο Hugh αναφέρει το σχέδιο του να συγγράψει ένα εγχειρίδιο σχετικό με τις γλώσσες, τον *Πεντάγλωσσο Δέκτη*. Πρόκειται για βιβλίο που, πράγματι, εκδόθηκε το 1796 από έναν δάσκαλο ονόματι Πάτρικ Λιντς, στο Δουβλίνο [18].

Τα Σχολεία του Φράχτη γεννήθηκαν, αναπτύχθηκαν, εξαπλώθηκαν και διατηρήθηκαν για πολλά χρόνια βασισμένα στην βαθιά επιθυμία των ντόπιων να μορφώσουν τα παιδιά τους και να διατηρήσουν την γλώσσα και την κουλτούρα τους. Η αγγλική στάση απέναντι στο ζήτημα της εκπαίδευσης, από αρχική αδιαφορία, μετατράπηκε σε απόπειρα επιβολής της Αγγλικής γλώσσας και της Αγγλικής Προτεσταντικής κουλτούρας ως μόνης νόμιμης και έγκυρης. Η πρώτη αναφορά του 1825 της επιτροπής των Άγγλων επιτετραμμένων για το Ιρλανδικό εκπαιδευτικό ζήτημα, παρουσιάζει τις κυβερνητικές προσπάθειες χειραγώγησης της εκπαίδευσης ως βασικό εργαλείο κοινωνικού ελέγχου, άκαρπες. Η χρηματοδότηση Προτεσταντικών ομάδων, ώστε να παρέχουν βασική εκπαίδευση στις χαμηλότερες τάξεις των Καθολικών, απέβη ανεπιτυχής. Η επιτροπή κατέληγε στην αντίστοιχη πρόταση μιας προηγούμενης επιτροπής του 1812: Ο μόνος τρόπος για να μορφωθεί ο πληθυσμός, με την ταυτόχρονη ικανοποίηση όλων των θρησκευτικών μερών, είναι η εδραίωση ενός ουδέτερου, πολυμερούς, εθνικού εκπαιδευτικού συστήματος. Αυτό οδήγησε και στην σύσταση του Εθνικού Σχολικού συστήματος το οποίο, εκτός από την βασική εκπαίδευση για τις χαμηλές τάξεις, προέβλεπε και την προσέγγιση και ενσωμάτωση των έως τότε διαφερόντων πλευρών, καθώς και την εισαγωγή θρησκευτικής εκπαίδευσης, με τέτοιο τρόπο ώστε να μην προκληθούν έχθρα και εντάσεις. Ωστόσο, στην πράξη, εξαιτίας των εκατέρωθεν εκκλησιαστικών πιέσεων, κατέληξε, χωρίς θρησκευτικό προσανατολισμό, σε αντίθεση με τις διακηρύξεις του νομικού του πλαισίου [19].

Τα Εθνικά Σχολεία λειτούργησαν το 1831, όταν και τα Σχολεία του Φράχτη είχαν να αντιμετωπίσουν έναν σκληρό ανταγωνισμό με ένα σχολικό σύστημα, που διέθετε την υποστήριξη της κυβέρνησης, και έτσι διαφημιζόταν ως αποτελεσματικότερο, τουλάχιστον, από εκπαιδευτικής άποψης. Στην πραγματικότητα, το κυριότερο πλεονέκτημα των Εθνικών Σχολείων ήταν τα σχεδόν μηδαμινά δίδακτρα που απαιτούντο από τους μαθητές, επιχείρημα που βάρυνε υπέρ της επιλογής τους, στην εκτίμηση των γονέων, ιδίως μετά την περίοδο του μεγάλου λιμού, όπου οι οικονομικά υποδεέστεροι άγγιζαν τα όρια της εξαθλίωσης. Στο μεταξύ, είχε γίνει εντελώς αδύνατον για τους ντόπιους να κάνουν οτιδήποτε, εάν δεν γνώριζαν Αγγλικά, τα οποία ως επίσημη, πλέον, γλώσσα τους ήταν απαραίτητα, ακόμη και για να είναι σε θέση να εξασφαλίσουν άδεια, ώστε να πουλούν, σε πάγκο, τις πατάτες τους, στο παζάρι. Το Εθνικό Σύστημα Εκπαίδευσης σταδιακά περιθωριοποίησε και αργότερα αχρήστευσε το Αγροτικά Σχολεία, πρωτίστως, όμως, κατάφερε καίριο πλήγμα στην κελτική γλώσσα και την παράδοση της ιστορικής και κλασικής ιρλανδικής παιδείας [20]. Αρχικά, οι γονείς αντιμετώπισαν με πολύ δισταγμό τα Εθνικά Σχολεία, διότι αφενός οι συνθήκες στέγασής τους ήταν αντίστοιχα κακές με εκείνες των Αγροτικών, αφετέρου γιατί η κοινότητα στο σύνολό της έτρεφε μεγαλύτερο σεβασμό για τους εκπαιδευτικούς των δευτέρων. Επιπλέον, ενώ στα Εθνικά σχολεία εφαρμοζόταν, κυρίως, η αλληλοδιδασκτική μέθοδος, η διδασκαλία στα Σχολεία του Φράχτη είχε πιο εξατομικευμένο χαρακτήρα. Ωστόσο, αργά αλλά σταθερά, η μεταπήδηση των δασκάλων των Αγροτικών Σχολείων στο Εθνικό Σύστημα έγινε αναπόφευκτη, καθώς, όταν διαλυόταν ένα Σχολείο του Φράχτη, δεν υπήρχαν άλλες επιλογές. Λίγοι δάσκαλοι, όμως, διατήρησαν τις θέσεις τους, για σημαντικό χρονικό διάστημα, σε αυτά, καθώς ο πλήρης κρατικός έλεγχος και η

ασφυκτική παρεμβατικότητα σε ζητήματα ακόμη και πλέον των ακαδημαϊκών, τους έκανε να παραιτούνται και να αναζητούν την τύχη τους αλλού ως μετανάστες ή να επιστρέφουν στο σύστημα των Αγροτικών Σχολείων. Προσπαθούσαν να ανασυστήσουν κάποιο από αυτά, ώστε να εξακολουθούν να είναι ανεξάρτητοι, αυτοδύναμοι και κύριοι του εαυτού τους.

Σε κάθε περίπτωση, τα Σχολεία του Φράχτη, διέψευσαν τις αρχικές προβλέψεις σχετικά με την προσδοκώμενη ταχεία εξαφάνισή τους. Ήδη το 1841, δέκα χρόνια μετά την εμφάνιση των Εθνικών Σχολείων, μόλις το ένα τρίτο των μαθητών τα παρακολουθούσαν. Η πλειονότητα των δυο τρίτων παρέμενε οπαδός των Αγροτικών Σχολείων, γεγονός που οφειλόταν, κυρίως, στην σταθερή προτίμηση που τους έδειχναν οι γονείς. Η παρουσία των Αγροτικών Σχολείων, καθόλη την διάρκεια του 18^{ου} και τις αρχές του 19^{ου} αιώνα, υπήρξε σταθερή και δυναμική, σε όλη την Ιρλανδία. Γίνεται κατανοητή, όμως, η ιδιαίτερα μειονεκτική και ελλιπή θέση της εκπαίδευσης εκείνης της εποχής, αν υπολογίσει κανείς ότι το 1841, στην περιοχή του Ντόνεγκαλ όπου διαδραματίζεται και το έργο, το 62% του πληθυσμού ήταν παντελώς αναλφάβητο [21].

ΓΛΩΣΣΑ ΚΑΙ ΤΑΥΤΟΤΗΤΑ: ΟΙ ΔΥΟ ΚΕΝΤΡΙΚΟΙ ΑΞΟΝΕΣ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ

Οι έννοιες γλώσσα και ταυτότητα είναι στενά συνδεδεμένες. Ο Anderson, στο βιβλίο του *Φαντασιακές Κοινότητες* [22], ισχυρίζεται ότι με την εμφάνιση του Καπιταλισμού οι έντυπες γλώσσες που προήλθαν από τη συνάρθρωση των συναφών καθομιλουμένων γλωσσών έθεσαν και τα θεμέλια της εθνικής συνείδησης με τους εξής τρόπους: Δημιούργησαν πεδίο επικοινωνίας σε ένα επίπεδο χαμηλότερο των λατινικών και υψηλότερο της καθομιλουμένης. Η ευρεία χρήση εντύπων προσέδωσε μια σταθερότητα στη γλώσσα που διευκόλυνε τη συγκρότηση της εικόνας της αρχαιότητας ως κεντρικού άξονα στην αντίληψη περί έθνους κι επιπλέον καθιερώθηκαν γλώσσες εξουσίας διαφορετικού τύπου από τις προηγούμενες γλώσσες που χρησιμοποιούσε η διοίκηση. Συμπληρώνει ότι η χαρτογράφηση κι η απογραφή υπήρξαν πρακτικές πλήρως εναρμονισμένες με την κυρίαρχη εξουσία. Επίσης, διευκρινίζει, ότι το Έθνος συλλαμβάνεται ως κυρίαρχο εφόσον η έννοια γεννιέται με την καταστροφή της ελέω Θεού Μοναρχίας από το Διαφωτισμό και την Επανάσταση και εκλαμβάνεται ως μια οριζόντια σχέση με κύριο χαρακτηριστικό το βάθος και τη συντροφικότητα.

Ο Hobsbawm [23] τονίζει αφενός ότι στην σημερινή, κυρίως πολιτική της έννοια, η ιδέα του Έθνους είναι πολύ νέα ιστορικά, αφετέρου ότι ανέκαθεν υπήρχαν διαμάχες σχετικά με το αν η έννοια της γλώσσας και άλλες παρόμοιες έννοιες μπορούν ή δεν μπορούν να αποτελέσουν κοινό γνώρισμα του έθνους.

Ωστόσο, εκτός από τις κάθε είδους διαμάχες, η διαπίστωση ότι οι στάσεις απέναντι σε γλώσσες είναι αξιολογήσιμες απέναντι σε ολόκληρες ομάδες κι ότι προσεγγίζοντας τις, διευρύνουμε τις δυναμικές τους αναπαραστάσεις μοιάζει να είναι αποδεκτή [24].

Σύμφωνα με τον Bourdieu, εκπρόσωπο του ρεύματος της Διαδραστικής Κοινωνιογλωσσολογίας, οι γλωσσικοί σχηματισμοί είναι *‘πάντοτε συσχετισμοί συμβολικής δύναμης και οι γλωσσικές πρακτικές ως κατεξοχήν σχέσεις επικοινωνίας είναι σχέσεις συμβολικής εξουσίας’* [25]. Ο Bourdieu [26], αναφέρθηκε σε ένα εθνικό μοντέλο γλωσσικής αγοράς μέσα στο οποίο υπάγονται και συσχετίζονται οι έννοιες της γλώσσας και της κοινωνικοπολιτικής εξουσίας [27].

Από τη δική του σκοπιά, το θέατρο, ως μια υλική, κοινωνική και πολιτισμική πρακτική, προσφέρει την δυνατότητα για την διερεύνηση της εθνικής ιστορίας και συμπεριφοράς, γεγονότων και ιδεών, ανοίγοντας το πεδίο για αναστοχασμό και αντιπαραθέσεις. Χρησιμοποιεί το περιεχόμενο και την αισθητική απόλαυση, προκειμένου να προάγει ένα δημιουργικό διάλογο με τις εντάσεις, στον εθνικό ιστό. Κάνει χρήση ενός δημιουργικού τόπου όπου διερευνάται το παράδοξο, η συνθετότητα και η αμφισημία γύρω από ζητήματα παράδοσης, ταυτότητας, αυθεντικότητας και αισθητικής σε σχέση με το έθνος [28].

Το έργο *Translations*, μεταξύ άλλων, πραγματεύεται και την επάρκεια της γλώσσας ως επικοινωνιακού εργαλείου. Η αλλαγή είναι αναπόφευκτη και αυτό το στοιχείο της παρουσιάζεται ως πλαίσιο ικανό να εμπειριέξει μια δύναμη πολιτισμική συνάντηση. Σύμφωνα με τον Knowles [29], κουλτούρα ενός τόπου θεωρείται η καθημερινή βιωμένη πραγματικότητα συγκεκριμένων ανθρώπων, σε συγκεκριμένο μέρος και συγκεκριμένο χρόνο. Δύναται να υπάρξει μόνο εφόσον βιώνεται μέσα από καθημερινές δράσεις και τελετουργικά ατόμων και κοινοτήτων, έτσι όπως διαπραγματεύονται την θέση τους στον κόσμο.

Ο Thomas Davies, Ιρλανδός, επαναστατικός συγγραφέας και ιδρυτής της οργάνωσης *Young Ireland*, μεταξύ άλλων, έχει δηλώσει ότι άνθρωποι χωρίς δική τους γλώσσα, αποτελούν μισό έθνος. Το έθνος πρέπει να διαφυλάξει την γλώσσα του περισσότερο από τα σύνορα του. Σύμφωνα με πολλούς μελετητές, αυτός ο ορισμός βρίσκεται στην καρδιά του έργου [30].

Η ταυτότητα στο έργο είναι άμεσα συνυφασμένη με την γλώσσα. Θα μπορούσε να πει κανείς ότι η κεντρική αλήθεια του έργου είναι ότι η Maire χρειάζεται να μάθει Αγγλικά. Αυτή η αλήθεια είναι που ενεργοποιεί και την αλλαγή της ταυτότητας. Ο κόσμος δείχνει να το έχει καταλάβει, καθώς έχει χωριστεί στα δυο: Από την μια, εκείνοι που μην θέλοντας τα Αγγλικά, διατηρούν μια ταυτότητα που φαίνεται να μην τους οδηγεί πουθενά και στερείται πρακτικότητας. Από την άλλη, εκείνοι που επιδοκιμάζουν, με κάθε τρόπο την αλλαγή, χωρίς ακόμη να έχουν μια αρκετά ξεκάθαρη εικόνα του τι αυτή συνεπάγεται. Ο τίτλος *Translations (μεταφράσεις)* ισούται με μεταμόρφωση. Η ίδια η γη, πλέον, γίνεται η απαρχή της μεταμόρφωσης. Η σοδειά είναι αποτυχημένη και έχει αρρώστια, προοιωνίζεται ο μεγάλος λιμός, η εισβολή είναι, πλέον, πραγματικότητα και, με τη σειρά της, φέρνει την εκκένωση. Η ίδια η εκκένωση αφήνει χώρο στον ερχομό της μετάφρασης, της μετάβασης των ανθρώπων και της κίνησης, μέσω του χρόνου και του τόπου [31].

Έχει υποστηριχτεί ότι ο ρόλος της ομιλούσας γλώσσας ως κυρίαρχος δείκτης Ιρλανδικής ταυτότητας, υπήρξε ανέκαθεν αμφιλεγόμενος. Υποστηρίζεται ότι, με την απόκτηση γλώσσας, το ανθρώπινο ον αποκτά ταυτότητα. Ο άνθρωπος με το να συμμετέχει στο συμβόλαιο, *δια λόγου*, δεν αποδέχεται μόνο το σύστημα της γραμματικής, αλλά και τους κανόνες μιας συγκεκριμένης κουλτούρας. Η γλώσσα έχει ταυτιστεί με την ιδεολογία και θεωρείται ένα μέσο διατήρησης της ιεραρχίας. Επομένως, είναι εύλογο, όταν ένα έθνος που ήταν πρώην αποικία αποκτά δύναμη διακυβέρνησης, να ανακηρύσσει την ντόπια γλώσσα ως επίσημη. Αυτό συνέβη στην περίπτωση του συντάγματος της Ιρλανδίας το 1922, με τα Ιρλανδικά. Ωστόσο, το 1972 οι Gaeltacht, ο πληθυσμός, δηλαδή, που ομιλούσε τα Ιρλανδικά, μειώθηκε στους 32.000, ενώ το 1973 η γλώσσα έπαψε να είναι υποχρεωτική, τόσο για το απολυτήριο όσο και την είσοδο στον στρατό [32].

Ο Yolland, ο Άγγλος αξιωματικός του έργου, στην κεντρική σκηνή που δείχνει το ζευγάρι να προσπαθεί να εκφράσει τον έρωτά του, χωρίς να μιλά ο ένας την γλώσσα του άλλου, απαγορεύει στην Maire να τον αποκαλεί στρατιώτη. Ξέρει ότι η λέξη δημιουργεί ταυτότητα και αυτός θέλει να αποχωριστεί την στρατιωτική του ταυτότητα [33]. Ονομάζει ένα προς ένα τα μέρη του τόπου της στα Ιρλανδικά, σε μια απόπειρα να την καλέσει κοντά του. Και η Maire το καταλαβαίνει, έλκεται από αυτό και πλησιάζει. Εκείνη του μιλάει στα λατινικά, που του είναι άγνωστα. Υπάρχει ροή ανάμεσα στα αισθήματα και τις σκέψεις τους. Η επικοινωνία τους χωρίς λόγια, κορυφώνεται σε ένα φιλή. Η ερωτική σκηνή είναι η μόνη σκηνή που εκτυλίσσεται στην ύπαιθρο και συνδέεται με έναν άλλο χώρο εκτός σκηνής, το πάρτι που γίνεται στο χωριό [34]. Το ένα σχήμα, εκείνο της ερωτικής συνάντησης, εμπειριέχει και ταυτόχρονα εμπειριέχεται σε ένα δεύτερο, εκείνο της μετάφρασης. Πρόκειται για την κορυφαία σκηνή της δεύτερης πράξης, και την κεντρική σκηνή του έργου.

Το έργο βρίθει συμβολισμών που καταδεικνύουν αποτυπώσεις ταυτότητας. Η χρήση Λατινικών και Ελληνικών λέξεων είναι εκτεταμένη. Η μαθήτρια Sarah που δεν μπορεί να μιλήσει, στην έναρξη του έργου καταφέρνει να αρθρώσει το όνομά της, ως μια πρώτη απόπειρα απόκτησης ταυτότητας, ωστόσο στο τέλος του έργου επιστρέφει στην απόλυτη σιωπή της. Ενδεικτική είναι η άποψη πολλών μελετητών οι οποίοι υποστηρίζουν ότι η σιωπή σε συνθήκες

απόπειρας επιβολής δύναμης, ελέγχου και καταστολής, αποτελεί το τελευταίο μέσο έκφρασης που απομένει στους κυριαρχούμενους. Κατ' αυτόν τον τρόπο η σιωπή συνιστά μορφή αντίστασης [25]. Η μικρή μαθήτρια με την σιωπή της αναδεικνύεται σε σύμβολο αντίστασης απέναντι στον εισβολέα, που, στην προκειμένη περίπτωση, υποδηλώνεται με την υποχρεωτική μετονομασία των τόπων στην γλώσσα του, την Αγγλική.

Ίσως, όμως, ο χαρακτηριστικότερος συμβολισμός να δίνεται με το τέχνασμα του Friel να χρησιμοποιήσει την διπλή σύμβαση στην γλώσσα του έργου. Το έργο εκτυλίσσεται όλο στα Αγγλικά, ενώ υποτίθεται ότι όλοι οι χαρακτήρες μιλάνε στα κέλτικα, εξαιρουμένων των Άγγλων στρατιωτών. Οι θεατές καταλαβαίνουν, από την αρχή μέχρι το τέλος, τι λέγεται επί σκηνής, και οι λατινικές κι ελληνικές λέξεις που ακούγονται, παραφράζονται, αμέσως, μετά τη χρήση τους, οπότε ερμηνεύονται και αυτές. Αυτό το παράδοξο, προφανώς, εξυπηρετεί την άποψη που εκφέρει ο Ιρλανδός δάσκαλος Hugh στο έργο, ότι, τελικά, για να υπάρξει ανάκληση της Ιρλανδικής ταυτότητας, τα Αγγλικά πρέπει να γίνουν η δική τους γλώσσα. Ο Friel, στο *Translations*, πραγματεύεται το θέμα της γλώσσας με αυτόν, ακριβώς, τον τρόπο: Υπάρχει μεγάλη ανάγκη να αναμορφώσουν την Αγγλική γλώσσα, να την υιοθετήσουν, καθώς δεν είναι μόνο η γλώσσα του παρελθόντος αλλά και αυτή που ατενίζει στο μέλλον [36]. Ο Wheaton [37], αναφέρει ότι η ελπίδα για μελλοντική συμφωνία εναπόκειται στην γλώσσα του παρελθόντος και του μέλλοντος μαζί. Στο έργο, ο δάσκαλος Hugh επισημαίνει τον κίνδυνο στον γιο του να θυμάται κανείς τα πάντα, και το παρομοιάζει με είδος τρέλας. Η εικόνα, η μνήμη, το νόημα, προσδίνουν ή δεν προσδίνουν την ταυτότητα. Ο Hugh, θαρραλέα, φαίνεται να έρχεται πρόσωπο με πρόσωπο με το τέλος της παλαιάς εποχής και την αρχή της νέας, δηλώνοντας την συγκατάθεσή του να διδάξει Αγγλικά. Η άφιξη των ξένων στον τόπο, που κουβαλούν, στις αποσκευές τους, την νέα κουλτούρα, δεν αντιμετωπίζεται μόνον ως η επιβολή του ισχυρού στον πιο αδύναμο, αλλά προσλαμβάνεται και ως ένας ενδιάμεσος χώρος που πρέπει να πληρωθεί με την ανακάλυψη και την δημιουργία νέων νοημάτων [38]. Ο δάσκαλος μοιάζει να κατανοεί την επείγουσα ανάγκη για τη διαφύλαξη του κοινωνικού ιστού και την ευελιξία εκείνη που θα επιτρέψει στα μέλη της κοινότητας να επαναπροσδιορίσουν την ταυτότητα τους συλλογικά σε σχέση με τις νέες συνθήκες χωρίς ωστόσο να αφομοιωθούν από τη νέα διευρυμένη κοινωνικοπολιτικά πραγματικότητα. Μοιάζει να ασπάζεται την άποψη των ειδικών της ψυχικής υγείας που επισημαίνουν το γεγονός ότι η δυσλειτουργία μιας κοινωνίας κλονίζει τη βιώσιμη ισορροπία των ατόμων κι ότι ένα σταθερό σύστημα αξιών και κανόνων μέσα στην κοινωνία διευκολύνει τις υγιείς ταυτίσεις, τα κύρια θεμέλια της ανθρώπινης ταυτότητας [39].

Η ΚΡΙΤΙΚΗ

Οι απόψεις των κριτικών για το έργο δίστανται. Αρκετοί κριτικοί εστίασαν στην απουσία πολιτικής του έργου. Κριτικοί στην Νότια Ιρλανδία εστίασαν στην κεντρική ιδέα του έργου για τον βιασμό της τοπικής κοινωνίας. Άγγλοι κριτικοί μίλησαν για έλλειψη πολιτικής πολεμικής και για δραματική παρουσίαση των *Αγροτικών Σχολείων*, εξαίροντας το ανοιχτό τέλος του έργου, γεγονός που κέρδισε τον διεθνή θαυμασμό του κοινού. Ωστόσο, αυτό καυτηριάστηκε από ακαδημαϊκούς και ιστορικούς κύκλους [40]. Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι το έργο λειτουργεί σε πολλά και διαφορετικά επίπεδα και, για τον λόγο αυτό, μια μονοδιάστατη προσέγγιση θα το αδικούσε κατάφορα. Εξάλλου έχει υποστηριχθεί ότι σήμερα πιο μεγάλο ζήτημα αποτελούν οι αντίπαλες ερμηνείες ενός έργου παρά οι πολλαπλές αναγνώσεις ως πλούτος της μίας και μόνο ερμηνείας [41]. Ο Γ. Μάρκου, στο εισαγωγικό σημείωμα, που συνόδευε το πρόγραμμα της παράστασης του έργου, που ανέβηκε από τον Καλλιτεχνικό Οργανισμό Φάσμα το 2002, ισχυρίζεται, ότι ακόμα κι αν δεν δέχεται κανείς τις απόψεις του Friel, στο έργο *Translations*: *‘Διεθνοποιούνται τέσσερα ιδιαίτερα σημαντικά προβλήματα του τέλους του 20^{ου} αιώνα: ο ξεριζωμός των αγροτικών περιοχών, η μετανάστευση, η έννοια της εθνικής υπερηφάνειας και η δυναμικότητα της γλώσσας ως μέσου επικοινωνίας και έκφρασης πολιτισμικών αξιών’* [42].

Η ίδια η μετάφραση είναι χωροταξική. Καταδεικνύει την μετάβαση από έναν τόπο νοήματος σε έναν άλλον. Το έργο *Translations* προσφέρει μια απεικόνιση της σχέσης τόπου και μνήμης. Ο Friel, προσεγγίζοντας τα βασικά πολιτικά ζητήματα, με διακριτικότητα, επιλέγει να εστιάσει σε ένα θέατρο που φαίνεται να πλαγιοδρομεί. Ωστόσο, στην ουσία, επικεντρώνεται στην ψυχολογική ουσία της πολιτικής πράξης [43]. Οι πιο αποστασιοποιημένοι συναισθηματικά παρατηρητές συγκλίνουν στην άποψη ότι το έργο δομείται πάνω σε ένα πολυφωνικό χτίσιμο της σχέσης μεταξύ γλώσσας και πολιτισμικής ταυτότητας, προτείνοντας, ουσιαστικά, την ανακωχή. Η γλώσσα διαμορφώνει την κουλτούρα ενός τόπου και αυτή, με την σειρά της, την ταυτότητα. Κανένα στοιχείο από μόνο του δεν αποτελεί και την μοναδική ουσία της ταυτότητας. Η ίδια η γλώσσα, εξάλλου, είναι τόσο ρευστή που συναπαντάται, διαρκώς, με νέες δυνατότητες ανανέωσης. Η λεπτή πολυεπίπεδη κειμενική σύνθεση ενισχύει, ακριβώς, την αίσθηση της ρευστότητας, ενός στοιχείου που δίνει την δυνατότητα στην ιρλανδική κουλτούρα και τον ιρλανδικό χαρακτήρα να ξεπεράσουν τόσο την αποικιοκρατική όσο και την ακραία εθνικιστική προσδοκία [44]. Η παρουσίαση του θεσμού των Σχολείων των Φράκτη, πέρα από τις όποιες ιστορικές αντιρρήσεις για τον τρόπο που αυτά παρουσιάζονται στο έργο, εκτός από την αναβίωση του παρελθόντος, σχηματίζει και το πλαίσιο μέσα στο οποίο ξεδιπλώνονται οι σκέψεις και οι προβληματισμοί του συγγραφέα, το οποίο δεν είναι άλλο από το εκπαιδευτικό.

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Η άποψη ότι το θέατρο προσφέρει πολύ περισσότερα πράγματα από το να καθρεφτίζει μόνο την πίσση των καιρών, και, στην πραγματικότητα, να διαμορφώνει τις ζωές μας μοιάζει ευρέως αποδεκτή [45]. Μπορεί το θέατρο να κρατά έναν καθρέφτη στο έθνος, ωστόσο αυτό δεν σημαίνει ότι καθρεφτίζει και την ακριβή εικόνα. Αυτή μπορεί να είναι διαστρεβλωμένη, μεγεθυμένη ή ουτοπική. Το σημαντικότερο, όμως, φαίνεται να είναι ότι δεν καθρεφτίζει μόνον όσα συμβαίνουν στο έθνος, την συγκεκριμένη χρονική στιγμή, αλλά μπορεί και να συνεισφέρει και στην ίδια την δημιουργία του έθνους μέσα από τις αναπαραστάσεις που παρέχει και τις ιστορίες που επιλέγει να αφηγηθεί [46].

Παρακολουθώντας το έργο *Translations* σήμερα, και συνειδητοποιώντας το ευρύτερο γεωπολιτικό πλαίσιο στο οποίο αντίστοιχα γεγονότα λαμβάνουν χώρα, όπως η παγκόσμια κίνηση κεφαλαίου, αγαθών και ανθρώπων, τα ζητήματα διεθνούς χρέους, ο ανταγωνισμός για τις πηγές ενέργειας και τους τρόπους με τους οποίους η συγκεντρωμένη ευμάρεια σε ένα μέρος του κόσμου μπορεί να εξαρτάται από την ένδεια ενός άλλου, πιθανόν, να μη θεωρήσουμε αυτές τις σκηνές τόσο μακριά από εμάς. Εξάλλου, η πολιτική ποιότητα του θεάτρου περιλαμβάνει την ζωντάνια και την κοινωνικότητά του [47]. Εκτός όμως από αυτή τη διάσταση, υπάρχει και η άποψη ότι η μεγάλη επιτυχία του έργου σε μεγάλη ποικιλία πληθυσμών οφείλεται κυρίως στο ότι έχει να πει και κάτι διαφορετικό στον καθένα [48].

Έχει διατυπωθεί η άποψη ότι το θέατρο όπως και η γλώσσα, μπορεί να λειτουργήσουν ως όπλα καταστολής αλλά και ως όπλα απελευθέρωσης [49].

Ο Friel μοιάζει να υιοθετεί την άποψη ότι η γλώσσα δεν είναι σταθερή και ακίνητη όσο η πέτρα και η μπιλιά, ως άλλα καλλιτεχνικά εργαλεία. Οι γλώσσες βρίσκονται σε κατάσταση συνεχούς εξέλιξης και μόνο φαινομενικά δεν αλλάζουν [50]. Υποστηρίζει ότι η γλώσσα είναι ανάξια εμπιστοσύνης, καθώς δεν κάνει τίποτε άλλο από το να καθρεφτίζει τις ατομικές εκλογικεύσεις των βασανισμένων συνειδήσεων. Ωστόσο, ταυτόχρονα, ισχυρίζεται ότι δουλειά του δραματουργού είναι να εμβαθύνει και να φωτίζει τα γεγονότα και τους χαρακτήρες του, να δουλεύει με την τελετουργία, την χειρονομία και την θεραπευτική διάσταση του δραματικού γεγονότος. Μέσα από αυτή την προοπτική, ο Friel αποπειράται να επαναφέρει το θέατρο στις καθαρτικές και μετασχηματιστικές του ρίζες [51]. Το έργο *Translations* κάνει χώρο για μια νέα γλώσσα, εκείνη της ειρήνης. Και για αυτό στο πέσιμο της αυλαίας, ο δάσκαλος του Σχολείου

του Φράχτη Hugh, αρχίζει, ήδη, να ξεχνάει τις πρώτες γραμμές της Αινειάδας της παλιάς ιστορίας του πολέμου

“ ... Μα τι διάολο έχω πάθει; Αφού το κείμενο αυτό το έχω αποστηθίσει. Ξαναρχίζω. *Urbs antiqua fuit* - Ήταν μια παλιά πολιτεία, λέει, που αγάπησε η Ήρα πιο πολύ από κάθε χώρα. (τα φώτα αρχίζουν να χαμηλώνουν). Στόχος και ελπίδα τρανή της θεάς, αυτή να γίνει βασίλισσα των πάντων- αν έδιναν την άδεια οι Μοίρες....” [52]

ACKNOWLEDGMENTS

Το παρόν συγγραμματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και εθνικούς πόρους στο πλαίσιο της πράξης ‘Ενίσχυση του Ανθρώπινου Ερευνητικού Δυναμικού μέσω Υλοποίησης Διδακτορικής Έρευνας- ΗΡΑΚΛΕΙΤΟΣ II του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης’, του Επιχειρησιακού Προγράμματος ‘Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση’

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Πεφάνης, Γ., *Το Θέατρο και τα Σύμβολα: Διαδικασίες Συμβόλισης του Δραματικού Λόγου* Ελληνικά Γράμματα, Αθήνα, 1999.
2. Winder, R., *Bloody Foreigners: The story of immigration to Britain* Abacus, London, 2011.
3. Greene, N., *The politics of Irish Drama: Plays in Context from Boucicault to Friel* Cambridge University Press, Cambridge, 1999.
4. Wheaton, S. *Idioms of Change: The Structuring of Cultural Identities through Language in Friel's Translations* Colby Quarterly, Volume 37, no. 3, p. 236-246, 2001.
5. Llewellyn-Jones, M., *Contemporary Irish Drama and Cultural Identity* Intellect, Bristol, 2002.
6. Shaun Richards (ed.), *The Cambridge Companion to Twentieth-Century Irish Drama* Cambridge University Press, Cambridge, 2004.
7. Βλ. ό.π. 3
8. Roche, A., *Contemporary Irish Drama second edition* Palgrave Macmillan, Hampshire, 2009.
9. Βλ. ό.π. 8
10. Καλλιτεχνικός Οργανισμός Φάσμα Μπράιαν Φρίελ: *Translations-Ο Ξεριζωμός* (Πρόγραμμα Παράστασης με κείμενο σε μετάφραση Παύλου Μάτεση), Απλό Θέατρο, Κεντρική Σκηνή, Θεατρική Περίοδος 2002-2003, Αθήνα 2002, Πράξη Πρώτη, σελ.53
11. Arkins, B. *The Role of Greek and Latin in Friel's Translations* Colby Quarterly, Volume 27, no.4, 1991, p. 202-209
12. Βλ. ό.π. 11
13. Βλ. ό.π. 3
14. Βλ. ό.π. 8
15. Βλ. ό.π. 10, σελ. 31
16. Βλ. ό.π. 6
17. Fernandez- Suarez, Y., *An Essential Picture in a Sketch-Book of Ireland: The Last Hedge Schools* Estudios Irlandeses, Number 1, 2006, pp. 45-57
18. Brannigan, J., *Translations, Brien Friel Notes* Pearson Education, London, 2004.
19. Βλ. ό.π. 17
20. Βλ. ό.π. 10, εισαγωγή
21. McGrath, F.C., *Brian Friel and the Politics of the Anglo-Irish Language* Colby Quarterly, Volume 26, no4, 1990, p. 241-248
22. Αντερσον, Μ., *Φαντασιακές κοινότητες. Στοχασμοί για τις απαρχές και τη διάδοση του εθνικισμού* Νεφέλη, Αθήνα, 1997.
23. Hobsbawm, E.J., *Έθνη και εθνικισμός από το 1780 μέχρι σήμερα. Πρόγραμμα, μύθος, πραγματικότητα* Καρδαμίτσας, Αθήνα, 1994.
24. Μαργαρώνη, Μ., *Εβραίοι, γλώσσα και ταυτότητα: Ζητήματα ετερότητας και αποκλεισμού στο νεοελληνικό κράτος από την ίδρυσή του μέχρι και το Β΄ παγκόσμιο πόλεμο*, στο: Κωνσταντίνος

- Δημάδης (επιμ.), *Δ΄ Ευρωπαϊκό Συνέδριο Νεοελληνικών Σπουδών. Γρανάδα, 9-12 Σεπτεμβρίου 2010. Πρακτικά. Ταυτότητες στον ελληνικό κόσμο (από το 1204 έως σήμερα)*, τμ. Γ΄. Αθήνα: Ευρωπαϊκή Εταιρεία Νεοελληνικών Σπουδών, σσ. 255-272, 2011.
25. Μαργαρώνη, Μ., *Γλώσσα και Εγκλεισμός: Στάσεις αναπαράστασης και συμβολικές μορφές γλωσσικής λειτουργίας* Σπανίδης, Ξάνθη, 2008.
26. Βλ. ό.π. 25
27. Bourdieu, P., *Γλώσσα και συμβολική εξουσία* Καρδαμίτσας, Αθήνα, 2008.
28. Holdsworth, N., *Theatre & Nation* Palgrave Macmillan, China, 2010.
29. Knowles, R., *Theatre & Interculturalism* Palgrave Macmillan, China, 2010.
30. Pine, E., *Brian Friel and Ireland's Drama* Routledge, London, 1990.
31. Βλ. ό.π. 30
32. Βλ. ό.π. 5
33. Βλ. ό.π. 4
34. Edgar, D., *How plays work* Nick Hern Books Limited, London, 2010.
35. Βλ. ό.π. 25
36. Βλ. ό.π. 5
37. Βλ. ό.π. 4
38. Pine, R., *THE DIVINER. The art of Brian Friel*, University College Dublin Press, Dublin, 1999.
39. Μανιαδάκης, Γ., Βλαχάκη, Ε., Σταθάκος, Δ. Γιανναράς, Χ., Κυριαζής, Δ., *Ρωτούσαν για την ταυτότητα: Πολιτισμική κρίση και ψυχική απορία στην ελληνική πραγματικότητα* Αρμός, Αθήνα, 2006.
40. Βλ. ό.π. 3
41. Hawthorn, J., *Ξεκλειδώνοντας το κείμενο: Μια εισαγωγή στη θεωρία της λογοτεχνίας* Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, Ηράκλειο, 1999.
42. Βλ. ό.π. 10, σελ. 38
43. Βλ. ό.π. 38
44. Βλ. ό.π. 4
45. Billington, M., *State of the Nation: British Theatre since 1945* Faber and Faber, London, 2007.
46. Βλ. ό.π. 28
47. Kelleher, J., *Theatre & Politics* Palgrave Macmillan, China, 2009.
48. Chambers, L. & Jordan, E. (eds) *The Theatre of Martin McDonagh: A World of Savage Stories* Carysfort Press Ltd, Dublin, 2006.
49. Boal, A., *Theatre of the Oppressed* Pluto Press, London, 2008.
50. Βλ. ό.π. 41
51. Morse, D., Bertha, C., and Kurdi, M. (editors) *Brian Friel's Dramatic Artistry: 'The work has value* Carysfort Press, Dublin, 2006.
52. Βλ. ό.π. 10, σελ. 85

PART E:

NAVAL OPERATIONS

Small Arms and Light Weapons (SALWs) Illegal Trafficking: Another Challenge for Global Security

Dalaklis Dimitrios, Cdr. H.N. and Chrysochou Georgios, Lt. H.N.,

Hellenic Naval Academy, Department of Combat Systems, Naval Operations, Sciences of the Sea, Navigation, Electronics and Communication Systems

Abstract: The end of the Cold War brought about new security challenges for the conventional arms control field. Many conflicts, interstate and intrastate ones, started to emerge (or better re-emerge) around the globe. Especially in countries of the developing world, numerous armed clashes occurred based on ethnic and religious divisions. These conflicts benefited from a deregulated arms market, which made the nature of the conventional arms trade more vigorous than ever before, thus created new security challenges for the agenda of conventional arms control field. Taking into account that human life and dignity are being threatened worldwide by the circulation and accumulation of Small Arms and Light Weapons (SALWs), new tasks for the Military and particularly the Naval Operations Doctrines started to take effect and be implemented through the Naval Blockade and Maritime Interdiction Operations (MIO) during the recent interstate and intrastate conflicts. Therefore, the old-fashioned arms control agenda must be expanded under a comprehensive and holistic approach to include issues like the effective control of arms transfers at a global level and combating illicit arms trafficking and arms brokering, especially in the category of SALWs.

Keywords: Maritime Transport, Small Arms Stockpiles, Arms Trade, Light Weapons Proliferation, Disarmament, EU Code of Conduct on Arms Exports.

PACS: 89.40.Cc

INTRODUCTION

With the end of the cold-war era, the international system has changed significantly and patterns within the international arms trade domain moved towards a different direction. [1] Quite often, it has been argued that: *“the bulk of the trades in major weapons become banal, posing no clear threat to security”*. [2] The specific market is now characterized as **smaller** and **looser** when compared with the recent past, but clearly there is still a very large volume of transactions involved; it also remains extremely complicated and with rather limited potential for effective control. Of course, numerous initiatives for the regulation of the various aspects of arms trade -both globally and regionally, or even at the national level- are already in place. Well known examples are the United Nations (UN) Register for Conventional Arms, the European Union (EU) Code of Conduct on Arms Trade and many others. [3] However, a large number of on-going (low-intensity, or intra-state conflicts) round the globe turned the international

community's attention towards the Small Arms and Light Weapons (SALWs) issue, revealing the disproportionate impact of SALWs. While accounting for only one-fifth of the global arms trade, they are responsible for heavy injuries and killings of far more people world-wide than any other conventional weapon. Small arms were the most commonly used weapons in the more than a hundred conflicts fought worldwide between 1989 and 1996. A study commissioned by the United Nations World Health Organization and the World Bank found that by 2020, the number of deaths and injuries resulting from war and violence would overtake the number of deaths caused by diseases.[4] Conceived as a serious threat for global security, the aforementioned issue started to be considered and endorsed under the agenda of the traditional conventional arms control context, constituted before merely of the Conventional Forces in Europe (CFE) Treaty and the Certain Conventional Weapons (CCW) Convention.[5] It is widely accepted that the conclusion of the super-powers' confrontation resulted in the supply of SALWs to exceed demand, thus becoming cheap and relatively easy to obtain. In its turn, this might lead to the arming of the local criminal groups and eventually the circulation of weaponry abroad, perpetuating the opportunities for rioting and violent armed insurrection elsewhere. [6] Needless to mention, there is an obvious connection between the recent increase of piracy activity in Africa (Somalia and Gulf of Guinea) because of the easy access to various types of weapons for the local population. [7] And, of course, during the last years a large number of naval operations (i.e. coalition forces during the 1st Gulf War, or NATO in the recent Balkan Wars and the Libyan Civil Conflict) had as major task of their mission the disruption of the weapons supply routes to the warring factions and/or opponents. There is a simple reason behind this action: oceans and seas of the planet are by far the most frequently used medium of transport (see Figure 1).

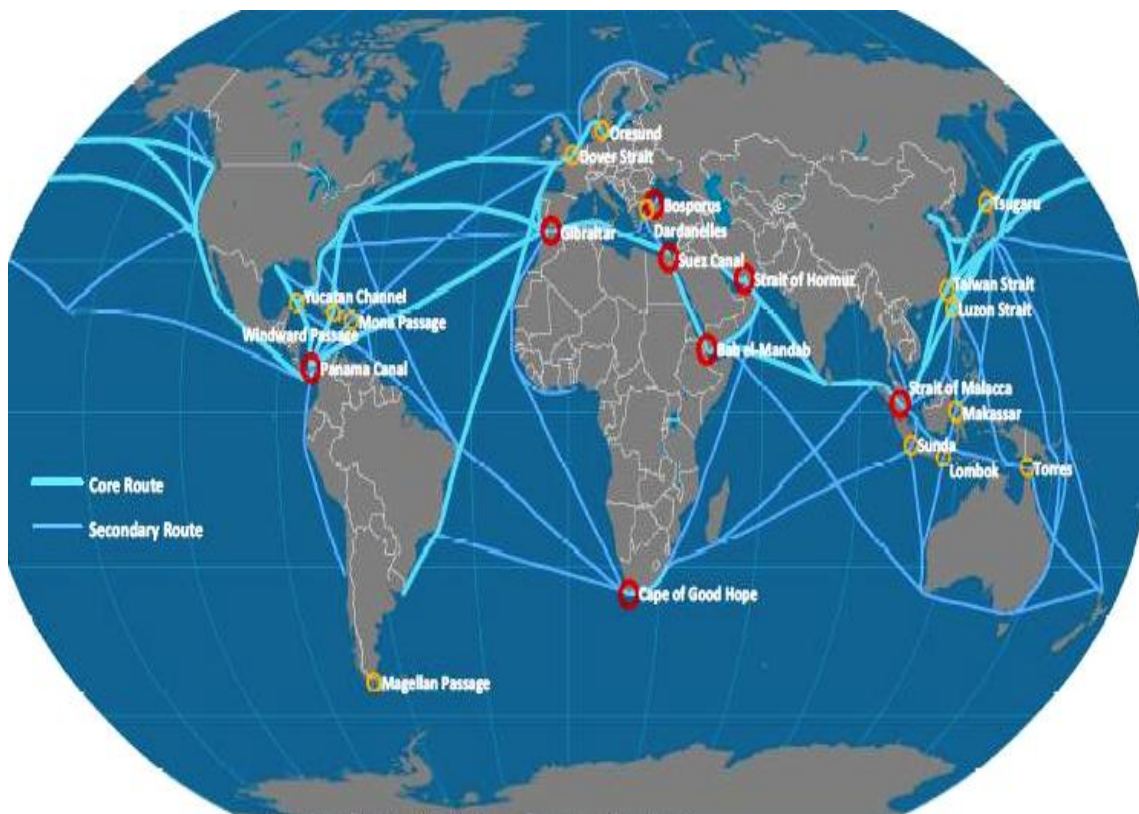


FIGURE 1. Core and Secondary maritime routes [8]

Illegal weapons trafficking, although an old product of the cold-war period, has been considered with much greater seriousness only during the last few years. The primary sources of this plague, have been the states of the Former Soviet Union (FSU) being at that time under economic dislocation; the Afghan Pipeline, a distribution system established by the Central Intelligence Agency (CIA) in the 1980s for the supply of the Mujahedeen; some African countries under past interstate and intrastate conflicts, like Angola and Mozambique; and some South-eastern Asian countries through the oddments of their past wars, namely Cambodia and Vietnam. A relatively recent United Nations' Conference on SALWs revealed that eight million guns are made every year and 25 per cent of the four billion US\$ small arms trade is illicit. [9] Inconsistent policies of export controls and embargoes have played a major role, assisting many of the significant transfers of weapons and related technology that have taken place covertly, including those which are illegal, when international embargoes and national licensing procedures are circumvented.

Moreover, even when these "grey market" transactions have been difficult to be kept out of the public eye due to regional and international transparency regimes, the "black market" of the uncontrolled and unobserved movement of vast quantities of small weapons and ammunition has posed the most serious impediments for an effective control and has inflicted the worst consequences. The problem has received extremely large dimensions, so that one estimate suggests that the size of the illegal arms market could range from US\$1 billion to US\$10 billion, about half of the "legal" arms trade when the demand is high. [10] Small arms are widely accepted as the most widely used tools of violence; the comment of a human rights campaigner of Amnesty International is characteristic: *"As a human rights campaigner, I've visited countless countries where people suffer terrible abuses...Behind so many of these atrocities is one common factor: the gun...and behind that gun are the arms dealers, profiting from a trade that's barely regulated and spiraling out of control"*. [11]

The reverberation of the above issue has started to compel the global community to minimize all small arms transfers. In that context, under a conference held in New York in 2001, the international community started to work on this task, establishing a UN Program of Action to Prevent, Combat and Eradicate the Illicit Trade in Small Arms and Light Weapons, in All Its Aspects (PoA). Additionally, there was a signing of an international Protocol against the Illicit Manufacturing of and Trafficking in Firearms, Their Parts and Components and Ammunition, as a supplementation of the UN Convention against Transnational Organized Crime. [12] These initiatives continued in a similar UN conference under the auspices of the Group of Governmental Experts for the purpose of tracing illicit arms trade and of addressing the issue of Man-Portable Air Defense Systems (MANPADS). [13] However, the arms trade and especially the illicit and covert arms trade in SALWs poses itself as one of the most controversial international issues of our actuality. Moreover, the inter-linkages with the conventional arms control agenda and the peace-management processes complicate further its character, revealing different problematic areas and approaches in several regions of the globe and a long-term confrontation between unilateralism and multilateralism in every initiative or discussion concerning its effective management and control.

ILLICIT AND COVERT ARMS TRADE: THE "GREY" AND "BLACK" MARKET

The illicit and covert arms trade, divided into the *grey market* and the *black market*, involves a range of state and non-state actors. As it was stated in Jane's Intelligence Review, *"although often considered to work independently of one another, one of the most important traits of the illicit arms trade is the extent to which the licit and illicit world are complicit in their actions"*. [14] The grey market is associated with the diversion of legal stockpiles and refers to

state supplies of arms to non-state actors or to embargoed states. It has started during the Cold War, allowing the superpowers to arm insurgent groups involved in conflicts throughout satellite states and continued in the Post-Cold War era, where NATO members supplied the Kosovo Liberation Army during the Balkan conflict and private military companies -with the knowledge of western states- have supplied weapons to Sierra Leone and Liberia, in spite of the UN's sanctions.

On the other hand, apart from direct government supplies, legal stockpiles are eventually diverted to the black market in other ways, like violations of arms embargoes by private arms brokers, theft from military arsenals, and theft of stockpiles in collapsed states. In that context, the involvement of organized crime in the illicit arms trade is almost entirely limited to the black market. [15] The criminal groups involved in the black market have their own dynamics in structure and function. Retailers and middlemen operate based on the principle of demand and supply, looking for new routes for transporting weapons should a new demand occur in any given part of the world. These dynamics made some experts in several conferences related to the subject in question to argue that what started as an enterprise spawned by a political revolution, soon became an enterprise operated for financial gain, which under the threat of crossing international borders, makes the internal security of all nations vulnerable. [16] This was obvious in the case of the uprisings in Albania in 1991 and 1997, where one million small arms were stolen from the Albanian arsenals and first used in Kosovo, while soon a network of gangs emerged, developing routes for arms sales that extended to the rest of Europe, the Middle East, the US and Turkey.

In general, the operation dynamics of the illicit arms trade are concentrated on transportation, mainly in the maritime domain where opportunity is always present. Shipments of illicit arms often virtually disappear while moving from source to final destination; on the documentation, where appropriate documentation is obtained in several ways, including through the corruption of authorized officials, or through the use of forged or counterfeit papers, or even through documentation fraud; on corruption, where, used by all actors involved in arms smuggling, it is sometimes needed to access state-controlled stockpiles or to circumvent export licensing and customs regulations; and finally, on the financing and banking, where payments can take the form of commercial payments to avoid bank involvement, or shipments can be paid in the form of letters of credit and direct transfers of hard-currency funds under the process of money laundering in order to disguise the final destination. [17]

Taking into account the overarching lack of transparency within the legal arms trade, be it state-controlled or by private manufacturers, the generally accepted fact by the majority of international authorities that the demand for weapons is high and unlikely to diminish in the immediate future, and the downward trend in prices (for example, the AK-47 Kalashnikov automatic rifle used to cost about 125 dollars straight from the factory in the FSU and now it can be purchased for 30 dollars at Russian flea markets) [18], the whole situation has started to be very worrying. Armed conflicts, or authoritarian and unrecognized "de facto" states, which appear after these conflicts serve as a source of terrorist activities and illegal arms trade, destabilizing even further the particular regions, as well as the border security of the neighboring states. It is not possible to install viable export regulatory regimes in territories, like Nagorny Karabakh or the Kurdish populated territory of Eastern Turkey and Northern Iraq. [19] Another case study, the one of Slovakia, reveals more complicated dimensions of the problem, particularly in the Slovak-Ukrainian border, where poorly-paid and poorly-trained conscripts who guard the weapon stores and the borders are susceptible to bribes and intimidation, easing the possible transit of illegal weapons. [20] On the other hand, the situation of the illicit arms trade, especially that concerning the SALWs, in other selected regions of the world, like Southern Africa, Northwestern South Asia and Central America, seems to be much more complicated and unscrupulous, involving many of the superpowers and modern European states that claim to

fight this scourge. The routes of this kind of proliferation are presented on Figures 2 and 3 respectively.

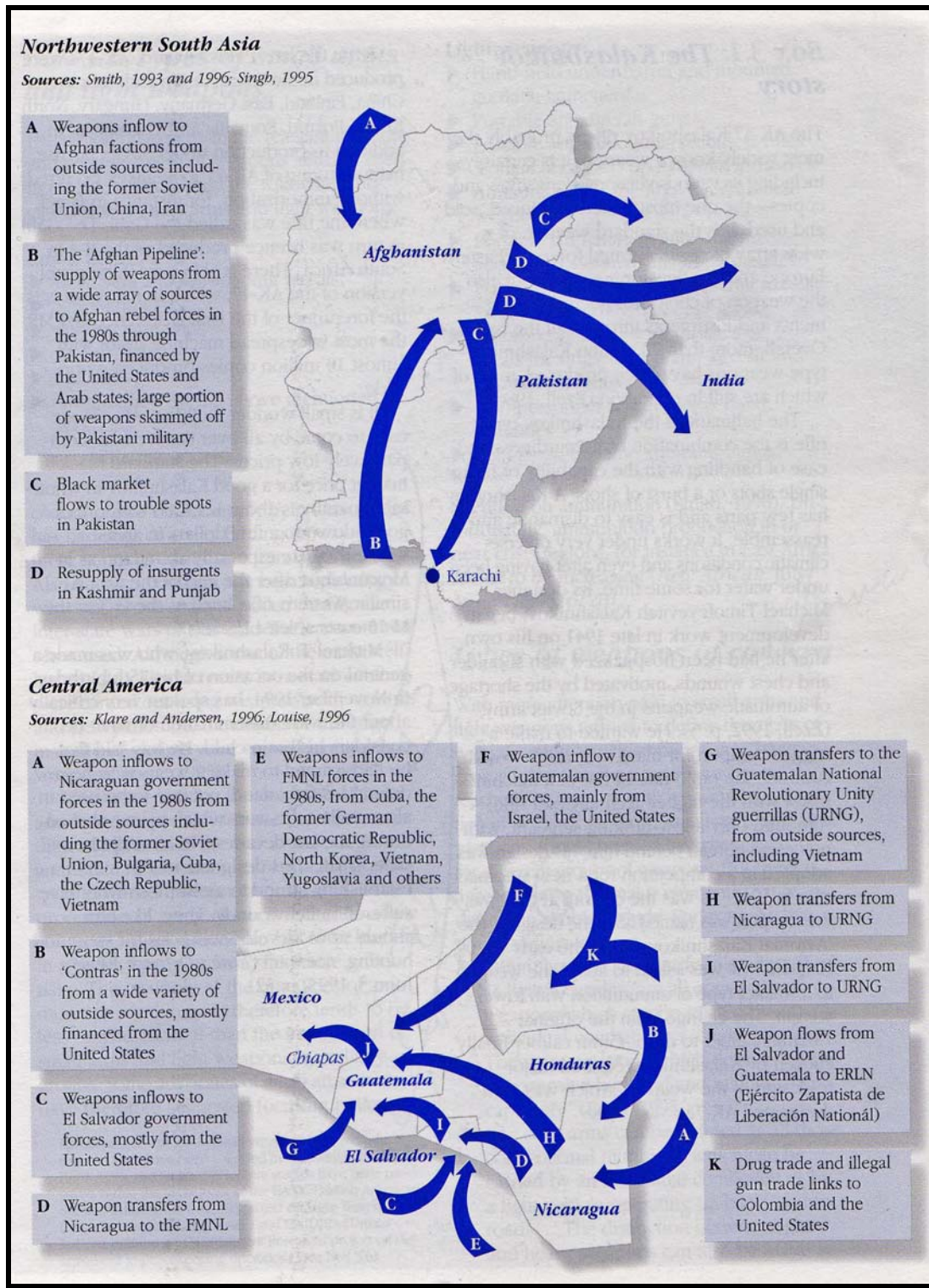


FIGURE 2. Light weapons proliferation and circulation in selected regions (1) [21].

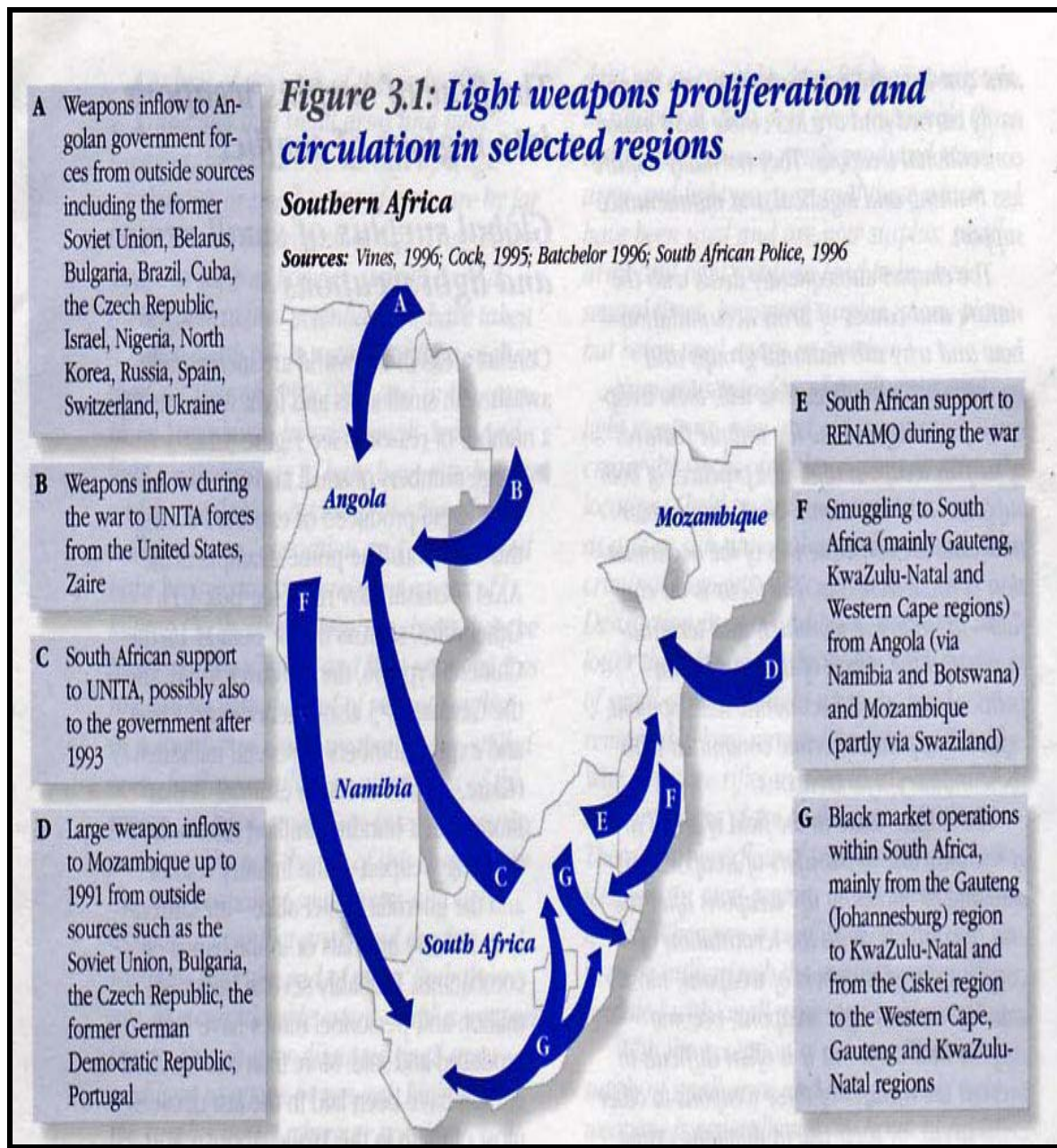


FIGURE 3. Light weapons proliferation and circulation in selected regions (2) [22].

SALWs: SECURITY CHALLENGES AND IMPLICATIONS

Security challenges of the SALWs arise from their distinctive features, being their **low cost**, their **portability**, their **minimum training requirements** and their **concealability**. Light arms cost a tiny fraction of the price of major conventional weapon systems. They can be carried by an individual soldier or by light vehicles and they require very little of a repair and maintenance infrastructure. In addition, an individual combatant is able to receive the necessary training to fire a gun or a light weapon in only a few hours or days, and finally, SALWs can be concealed in the clothing or hand luggage of a single individual, making them the perfect tools

for assassinations, terrorism and banditry. [23] An example of their concealability is the case study of Slovenia, where the relevant authorities have identified various methods of hiding weapons and their components, as inside televisions, radios, books, dog food, or even inside a loaf of bread, a chocolate bar or a coffee pack. [24]

On the other hand, the above distinctive characteristics are in accordance with the dynamics of this sort of weapons, being their increased lethality, especially after the end of the cold war, and the proliferation of their making technology. For instance, modern assault guns can fire a burst of 30-35 bullets, inflicting the death of many people at once, particularly in crowded environments, as the February 1994 Hebron massacre committed with a 35-round Galil assault gun. Moreover, while the production of major conventional weapon systems is confined to a dozen of industrial powers, the production of SALWs is spread to a much larger group of countries. It is a fact that by 1999, approximately 45 nations were producing light weapons of one sort or another, 22 of them being in the developing world. [25] According to the survey of 2005 made by the World Policy Institute of New York, small arms are responsible for two million casualties each year. Almost 300,000 – mostly civilians – are killed in wars and other armed conflicts and insurgencies; another 200,000 people are killed in homicides, suicides and unintentional shootings, while small arms fires wound one and a half million people around the world annually. [26] Totally aware of this terrible reality, The former UN Secretary General, Kofi Annan, stated in the UN's SALWs Conference of New York in June-July 2006 that the proliferation of light weapons, such as machine guns, has spawned a “*culture of violence*”. [27] This is evident from the data in Table 1.

TABLE 1. Small Arms Stockpiles and ratio of population per arms [28]

Country	Small Arms Stockpiles				Ratio: Population per Arms			
	Population	Armed Forces Weapons	Police Weapons	Civilian Weapons		Total Weapons*	Num. of Citizens per Weapon	
Egypt	74,035,000	1,935,000	257,000	N/A	Egypt	74,033,000	2,192,000	33.7
Jordan	5,703,000	313,000	20,000	600,000	Jordan	6,900,000	933,000	7.3
Turkey	68,234,000	3,947,000	199,000	8,000,000	Kuwait	2,687,000	147,000	18.2
Yemen	20,975,000	340,000	73,000	7,000,000	Lebanon	3,600,000	674,000	5.3
Israel	5,374,000	1,363,000	22,000	503,000	Morocco	29,231,000	939,000	31.1
US	293,027,000	15,000,000	1,000,000	240,000,000	Saudi Arabia	24,573,000	638,000	38.5
					Tunisia	9,563,000	201,000	47.5
					Turkey	68,234,000	12,146,000	5.6
					U.A.E	4,496,000	207,000	21.7
					Yemen	20,975,000	7,500,000	2.7
					Israel	5,374,000	1,888,000	2.8
					US	293,027,000	256,000,000	1.1

*Minimum small arms total stockpiles, including armed forces, police and privately-owned weapons.

Trying to identify how this vast accumulation of light weapons occurs, the Bonn International Centre Conversion Survey argues that three models of the global spread of SALWs have been put forward. The first one is the *proliferation model*, which, following the familiar pattern of the conventional arms trade, supports that there are a handful of major producers exporting weapons to a large number of recipients, so policies must focus on detaining the flow on the supply and recipient side. The second one is the *circulation model*, which, maintaining that the number of small arms already transferred to volatile areas cannot be controlled with supply-oriented approaches due to the illicit trade basically with government involvement, supports that disarmament policies must be devised and focus not only on lowering the domestic availability, but also on lowering the relevant demand for them. Finally, the last model, known as the *diffusion model* combines the aforementioned ones, by giving a typology of the ways by which these weapons are acquired by parties to a conflict. These include [29]:

- Indigenous production.
 - Purely domestic.
 - Imported technology and licensed production.
- Legitimate import.
 - Government grants.
 - Government sales.
 - Commercial sales.
- Illicit import.
 - Covert arms transfer from foreign governments.
 - Foreign government gifts to paramilitary groups.
 - Black market arms imports.
 - Imports from allied foreign insurgent groups.
- In-country circulation.
 - Theft from government arsenals.
 - Seizure of equipment from opponents.
 - Exchanges between domestic insurgent organizations.
 - Exchanges between domestic insurgent and criminal organizations.

While the first model is usually related to a multilateral approach in conventional arms trade control, preferred by supporters of the traditional arms trade regimes like the Wassenaar Arrangement (WA), the EU Code of Conduct on Arms Exports, the UN's Protocol on Firearms and few more, it lacks of the ability to embrace the regional and domestic problematic folds and it is driven in majority by politically binding directives. The second model is often based on a unilateralist approach in the field in question, so lacking of the universality of norms and principles. The third model, in a policy perspective of course, can drive through thorough and in-depth integrated approaches in the issue of SALWs control, but it requires the willingness of all the actors under a common reference point and a legally binding regime, such as a possible international arms trade treaty, including the issue of SALWs and their ammunition.

International level

The three major international regimes in the field of conventional arms trade control are the UN's Register of Conventional Arms, merely limited on the field of transparency and information exchange; the UN's Firearms Protocol as a supplementation of the UN's Convention against Transnational Organized Crime, which excludes of its agenda the state-to-state or state-to-non-state actors transactions of the particular weapons; and the UN's Program of Action to Prevent, Combat and Eradicate the Illicit Trade in SALWs in All Its Aspects, which does not include the "legal" trade of these weapons and does not provide any enforcement mechanisms,

being only politically binding. The UN Register of Conventional Arms, established on 9 December 1991 by the UN General Assembly, called upon all the UN states to provide annually information on the previous years' imports and exports of seven types of weapons: tanks; ACVs, large-caliber artillery, combat aircraft, attack helicopters, missiles and missiles launchers. [32] Recently, two amendments have been included concerning the lowering of artillery threshold reporting down to 75mm and the inclusion of MANPADS. [33] Although the Register calls upon member-states to exercise restraint in exports and imports of conventional arms by placing adequate laws and administrative procedures, it is not a legally binding convention and contains many qualitative and quantitative shortcomings. For example most of Russia's declared arms exports, including those to China and Taiwan, could not be verified, because many of the recipients do not participate in the Register, like China, most Arab states and African countries. [34] The main reason for that participation unwillingness is the non-inclusion of SALW in the Register and its discriminatory character, since it includes only transfers and not weapon inventories. This, results in a fairly accurate notion about the arms inventories of the importing countries not possessing a significant indigenous defense industry, whereas the major arms producers, not importing much have got considerably less to report, keeping the actual state of their inventories undisclosed. [35] Consequently, the Register does not provide so much transparent assessment for the military potential of many countries, having additionally a lot of discrepancies on the type and model of weapons, both in qualitative and quantitative terms. [36]

The only legally binding document concerning global measures to regulate international transfers of weapons, but limited itself in the category of small arms, has been the UN Protocol against the Illicit Manufacturing of and Trafficking in Firearms, Their Parts and Components and Ammunition, which has been established in June 2001 by a relevant General Assembly resolution as a supplementation of the UN Convention against Transnational Organized Crime. [37] The parties to the Protocol have undertaken the legal commitments to combat the illicit trade in firearms by criminalizing the trafficking-related activities in their domestic laws; seizing and destroying confiscated weapons; keeping records and providing for an exchange information, experience and technical assistance; marking weapons at the manufacturing point and at import; complementing the import and transit licensing requirements under a common content; and finally establishing security measures for the prevention of theft, loss or diversion of weapons. [38] However, despite its global, legally binding applicability, the Protocol comprises imperfections and weaknesses. To begin with, it applies merely to the illicit manufacturing and trafficking of firearms and their components and to the investigation and prosecution of offences established under Article 5 of the Protocol, where those offences are transnational in nature, involving organized criminal groups as well. [39] This means that it does not apply to state-to-state transactions or to state-to-non-state actors transactions and moreover it does not enable itself to the regulation of the legal trade in arms, which under the globalized and innovating market networks of rogue states and relevant non-state actors, may sounds legal formally but it is illegal by nature. Additionally, it merely encourages state-parties that have established a system of licensing or authorization of manufacturing or a system of licensing and authorization of brokering, to include the relevant information in their exchanges of information. In addition, it only suggests for national registration and licensing systems of arms brokers, without any obligatory mandate on that field. [40]

Eventually, a modest (but significant) step towards the development of international norms and practices for restrictions on SALWs has been the UN Program of Action to Prevent, Combat and Eradicate the Illicit Trade in Small Arms and Light Weapons in All Its Aspects, known as UN PoA, which contains measures to be undertaken at the national, regional and global levels. [41] At the national level, the UN PoA agreed, *inter alia*, to put in place adequate laws and administrative procedures to exercise effective control over the production, exports, imports and retransfers of SALWs, criminalizing the relevant illicit activities; to establish national coordination agencies for policy guidance and monitoring as well as national point of contacts as

a liaison between states; to ensure the reliable and licensed marking procedures as well as the accurate record-keeping; to assess applications for export authorizations according to strict national regulations; to use authenticated end-user certificates and effective legal and enforcement measures; to make notifications to the original exporting states about re-exports; to develop laws and procedures regulating the activities of those engaged in SALWs brokering; to take all the appropriate legal and administrative issues against any activity violating the UN arms embargoes; to ensure that confiscated small arms are destroyed or disposed under officially authorized processes; to destroy surplus SALWs; and to develop effective DDR programs where possible. At the regional level the UN PoA agreed, *inter alia*, to strengthen the moratoria in the affected regions; to establish sub-regional and regional mechanisms for combating the illicit trade in SALWs across borders; to encourage the promotion of safe stockpile management under the regional mechanisms; to encourage negotiations, where appropriate, with the aim of concluding relevant legally binding instruments; to establish a point of contact within sub-regional and regional organizations acting as liaison on matters relating to the implementation of PoA; and to encourage regions to develop, where appropriate and on a voluntary basis, measures to enhance transparency.

At the global level the UN PoA agreed, *inter alia*, to request the UN Secretary General to collate data provided by states on a voluntary basis on the implementation of the program; to encourage co-operation with the World Customs Organization and the International Criminal Police Organization (Interpol) in order to identify groups and individuals engaged in the illicit trade of SALWs; to encourage states to consider ratifying or acceding to international legal instruments against terrorism and transnational organized crime; and finally to co-operate with the UN system for the effective implementation of the UN arms embargoes. [42] Although through a general assessment of the UN PoA it is noticeable that it has provided general guidance for governments, regional and international organizations as well as the civil society in combating the illicit trade on SALWs, yet it is not legally binding, it does not offer compulsory transparency mechanisms and in addition, owing to the opposition of the USA, it has never reached consensus on the need to establish effective controls over the private ownership of SALWs or on the need to halt sales of such weapons to non-state actors. [43] However, this program of action has been the incentive for other similar regional and sub-regional initiatives.

Regional and sub-regional level

In a regional or sub-regional level there's been a number of initiatives and strategies on the field of arms trade control, like the Economic Community Of West African States (ECOWAS) Moratorium on the Importation, Exportation and Manufacture of SALWs in West Africa, projecting West Africa as the first region globally to announce a halt to the procurement of SALWs, yet not legally binding, and promoting the moratorium as a possible Convention in the future. [44] Some other examples can be pin-pointed in America, like the Inter-American Convention against the Illicit Manufacturing of and Trafficking in Firearms, Ammunition, Explosives and Other Related Materials (CIFTA) [45] or in South-Eastern Europe, like the Stability Pact for SEE Regional Implementation Plan (SCSP RIP) and the South-Eastern European Clearinghouse SALW Control (SEESAC), [46] the latter working under the OSCE principles and the efforts of the participating states to accede in the EU. In contrast, in Asia, the efforts of ASEAN Regional Forum (ARF) and the Shanghai Cooperation Organization (SCO) are of a very limited scope and effectiveness. [47]

At the inter-European level the major initiatives for conventional arms trade regulations, including the categories of SALWs and MANPADS can be observed on the Wassenaar Arrangement, the relevant principles and documents of OSCE and the relevant codes of conduct and joint actions of the EU. Wassenaar Arrangement, formally established in 1996 has been the first multilateral export control regime covering both armaments and sensitive dual-use

goods and technology. Actually, it is a voluntary export control regime whose 39 members exchange information on transfers of conventional weapons and dual-use technologies. Its purpose is to promote "greater responsibility" among its members in arms exports and to prevent 'destabilizing accumulations'. It targets at 'states of concern' to member-states. [48] During the recent years it has been expanded in scope to include best practices and guidelines for the control of SALWs [49] and MANPADS [50] as well as to provide elements for effective legislation on arms brokering among its state-parties. [51] However, member-states continue to be divided over Wassenaar's scope, primarily whether the arrangement should become more than just a body for exchanging and collecting information. In addition there is no consensus among members over the definitions 'states of concern' and 'destabilizing transfers' and because the arrangement operates by consensus, a single country can block any proposal. This lack of legally binding provisions renders it difficult to achieve uniformity in arms exports policies and more importantly, some major arms exporters, such as Belarus, China, Israel and South Africa, are not members of the arrangement. [52]

One of the first ethical approaches concerning the regulation of the arms trade started under the agenda of OSCE principles in 1993 when its members, by reaffirming the principles governing the conventional arms transfers, they further broadened the aim of a cooperative and common approach to security. This has been achieved by considering among the others for their export policies, the respect for human rights in the recipient country; its record of compliance with its international commitments; the legitimate security needs of the recipient country; and its proportionate response to the security treats confronting it. [53] Under the Document of 2003 on SALWs, driven by the UN PoA, member-states agreed to ensure effective national control over manufacturing and licensing authorizations as well as to prosecute under appropriate penal codes those engaged in illegal production of SALWs. Each participating state should ensure its efficacy in enforcing its international commitments on SALWs through its national authorities and judicial system. The document provided for information exchange on SALWs exports and imports as well as of surplus, seized or destroyed small arms on an annual basis. [54] The additional decisions of OSCE on end-user certificates, [55] on stockpiles of conventional ammunition, [54] on control of SALWs brokering [56] as well as control of MANPADS [57] exports, broadened its scope of application. However, the OSCE principles on arms exports and the relevant supplementary documents on SALWs and MANPADs produce the same shortcomings as the UN PoA, yet in a lesser degree since OSCE has got an integrated, cooperative and common approach to security.

However, the most comprehensive efforts on the control of arms transfers and SALWs have been undertaken by the EU: through the EU Code of Conduct On Arms Exports, [58] the EU Council Common Position of 2003 on the Control of Arms Brokering [59] and the EU Strategy to Combat Illicit Accumulation and Trafficking of SALWs and their Ammunition, [60], the latter supplementing the relevant EU Council Joint Action of July 2002. [61] The EU Code of Conduct On Arms Exports is based on standard ethical criteria, including the respect for human rights in the recipient country; the preservation of regional peace and stability; the national security of state-parties as well as the security of friendly and allied countries; the behavior of the recipient with regard to terrorism and international law; and the compatibility of arms exports with the technical and economic capacity of the recipient country. The operative provisions of the Code of Conduct obliges member-states to circulate through diplomatic channels details of licenses refused accompanied by the relevant explanation and in depth consultation among the members for any transaction, pursuing in that way a uniformity in the arms exports policies. [62] The only shortcoming of the code is that the final decision to transfer or deny the transfer of any item remains at the national discretion of each state since the code is only politically binding. However, all the members under the Common Security and Foreign Policy follow more or less a similar comprehensive approach to their national policies incorporating the commitments. A

characteristic example is the Consolidated EU and National Arms Export Licensing Criteria of the UK's policy. [63]

Moreover, the EU Strategy against the illicit accumulation and trafficking of SALWs and their ammunition has developed a comprehensive and coherent approach which harnesses all forms of leverage at the European's Union disposal and in addition, it has developed a multifaceted action to cover all the dimensions of the illicit accumulation and trafficking of SALWs, both preventive and reactive. Finally it supports effective multilateralism and all the relevant international and regional initiatives under diplomatic channels, field missions, partnership and cooperation, assistance programs and generally a promotion of the relevant successful European Union's national and regional control systems for adaptation all around the world. The most significant objectives of the EU Strategy are the support of the adoption of a legally binding international instrument on the tracing and marking of SALWs and ammunition and the establishment of a consensus within exporting countries to only supplying SALWs to governments, in accordance with restrictive and appropriate regional and international criteria on arms exports. [64] Nevertheless, in the quest of these objectives, the best template would be an international, legally binding arms trade treaty and the step-up of the institutional capacity and scope of all the other regional organizations. Nevertheless, the whole policy of EU in the domain of arms transfers and SALWs regulation thrusts itself forward as the most comprehensive and integrated regime on the entire field of conventional arms control.

THE LINK OF DISARMAMENT AND SALWs ISSUES WITH THE PEACE-MANAGEMENT PROCESS

A major issue within the post-conflict agenda has been the exclusion of the prominent issue of SALWs from the formal post-conflict arms control arrangements, since the opposing parties and the peacekeeping forces treat it as a distinct security issue. For example, the *Dayton* process for the disarmament, following the war in ex-Yugoslavia, has not included weapon categories such as small arms and mines, being a "proxy" of the classical CFE Treaty process. [65] Having in mind the flow of such weapons to neighboring countries or other volatile regions in the aftermath of the conflicts through the organized crime nets, the negative consequences of this omission can be significant. One possible but not fully credible justification for the above omission is that the acknowledgment that often the process of disarmament is rendered more complicated by the inward role that weapons have come to play in some societies is missing from the existing literature on disarmament and conventional arms control. In many post-civil war societies, *gun culture* is well developed, reflecting a symbol of manhood rather than a weapon of violence and posing resistance in every effort to curb private ownership. This mannerism entails the necessity for disarmament strategies to bear in mind the "normal" role of guns in the society should they seek a greater chance of success. Based on this home truth, a certain number of academics supports that what is required are a mixture of limited disarmament and rigorous arms control with the preference to strengthen existing tribal structures and norms as restricting sources, rather than attempt to impose greenhorn and outlandish norms from without. [66] However, this complexity is not the only incompatibility of classical conventional arms control and disarmament when attempted to apply in several regions and societies of the world with different social, political, religious and security cultures. For example, Peter Jones, a Research Associate at the Munk Centre for International Relations in Toronto University, has argued for the relevant situation in Middle East: "*Arms control is not achieved in a vacuum. Without an effort to establish a new regional political and security order it is highly unlikely that the most serious matters of arms control can be addressed. Of course, this is not to say that discussions over arms control issues should wait for the day when a regional system is fully established*". [67]

Such a system, as it was mentioned above, similar to the OSCE or the Stability Pact for South Eastern Europe (SEE), could establish political and security bonds in the opposing parties and therefore, address issues like far-reaching arms control arrangements and arms transfers' policies. If it is linked as well with the major international or other multifold regional initiatives, like the UN PoA in SALWs, the WA and EU Code on Arms Exports, it can provide solid foundations for the eve of a new, more secure and more promising for development era of the Middle East or the North Africa. [68] Inspired, mainly by the situation in Middle East and the remorseless global trade in arms, especially in unstable regions of the world, two contradictory approaches on conventional arms trade management and particularly on SALWs management have started to emerge. For convenience reasons one could define that as the controversy between *unilateralism* and *multilateralism* in the specific field. The controversy arguably defined as unilateralism against multilateralism on the domain of small arms trade regulatory efforts, is based actually on the two main policy attitudes concerning the field in question.

The first approach proceeds from the assumption that international efforts must focus on combating the illegal trade in all its aspects, including the illegal production, storage and transfer of SALWs. The related legal trade, under this approach, should be considered as a state's sovereign right by the international community and be out of the field of major international and legally binding agreements. The advocates of this view, including US, China, India and Pakistan, are in favor of concentrating on formation of national practices and regulations under international exchange of information and collaboration and oppose against possible introductions of international transparency measures in SALWs production, stocks and transfers. [69] The statement of US Under-Secretary of State John Bolton during the Preparatory Committee process of the UN Conference on the Illicit Trade in Small Arms and Light Weapons in All its Aspects – held in New York from 9-20 July 2001, is representative of such an approach: *"The United States will not join consensus on a final document that contains measures contrary to our constitutional right to keep and bear arms"*. [70] The second approach, often called "comprehensive approach", is typical of the European Countries, inspired in many respects by the EU Code of Conduct on Arms Exports, and it presumes that legal and illegal trade should not be rigidly separated. Moreover the advocates of this approach support that the uncontrolled proliferation of small arms should be prevented through the elimination of their destabilizing accumulation and legal binding transparency measures of their legal transfers and stocks. The justification given is that illegally traded arms had been operated in on legal basis and coverage under the operational networks of the black market. Many of the supporters of this approach stand not only for eliminating illegal trade under global, legally binding measures of transparency and national accountability, but also for establishing international control regimes over the production, stocks, storage and supply of arms. [71]

CONCLUSIVE REMARKS

Conventional arms control is currently in a transitional phase, both in its conceptual framework and field of application. After the end of the Cold War it started to include in its agenda the issues of conventional arms trade and the SALWs transfers, although these domains have never been considered as components of the classical conventional arms control content. The post-cold war era has also revealed that reducing access to armaments will not significantly reduce the scale of ethnic conflicts in certain cases. The main reason is that too often these wars are not fought for political and strategic objectives -that are amenable to outside diplomacy- but for the perceived notion of survival being at stake between the warring factions. In that case, lack of proper weapons cannot often guarantee compromise, but only an invitation to improvise. The on-going civil conflict in Syria is a very strong example that illegal weapons will somehow find a way to enter a region in unrest. So, what is the objective of all the

recently established controls on conventional arms trade? Is it to end conflicts? The answer of course is no. However, avoiding thinking so narrowly, it is easy to understand that the more comprehensive and legally binding agreements and initiatives the international community is willing to establish, the less blood will be lost in conflicts. Moreover, it would be much more cost-effective to agree and implement internationally binding treaties than to spend assets and resources in Naval Operations and other similar military operations, such as MIO, to cope with the problem in the second phase. Additionally, the fact that these arms, especially SALWs, circulate in the aftermath of conflicts all around the globe, affecting significantly the peaceful societies under the networks of organized crime, highlights the importance of a holistic approach to the specific field.

REFERENCES

1. For example, the notion of the world divided into spheres of influence could no longer provide a sufficient explanation of the dynamics of arms supply and demand. See Cornish, Paul, *Controlling the Arms Trade*, London, Bowerdean Publishing Ltd., 1996, p. 31.
2. See Roberts, B., *Weapons Proliferation in the 1990s*, Massachusetts, The MIT Press, 1995, p. 61.
3. For a brief -but comprehensive- report and analysis of the initiatives regarding the regulation of arms trade at a global and regional level see Goldblat, Jozef, "Constraints on Conventional Arms and Technology Transfers", *Arms Control: The New Guide to Negotiations and Agreements*, London SAGE Publications Ltd., 2002, pp. 241-246.
4. See IRIN, service of the UN Office for the Coordination of Humanitarian Affairs, "In-depth: Guns out of Control: the continuing threat of small arms", IRIN, Nairobi, 9 May 2006, <http://www.irinnews.org/IndepthMain.aspx?IndepthId=8&ReportId=58952>, (Accessed 9 May 2012). Specially, the case of the African Continent is characteristic: The persistence and the complication of wars in Africa are partially due to small arms proliferation. The International Action Network on Small Arms, Saferworld, and Oxfam International emphasized this perspective, when they reported that armed conflict cost Africa \$18 billion each year and about US\$300 billion in the period 1990-2005. During that time, 23 African nations experienced war. See Bahati Jacques, "Impact of Small Arms Proliferation on Africa", Africa Faith and Justice Network, 2 June 2009, <http://www.afjn.org/focus-campaigns/militarization-us-africa-policy/105-commentary/648-impact-of-small-arms-proliferation-on-africa.html>, (Accessed 27 May 2012).
5. The Conventional Armed Forces in Europe (CFE) Treaty, negotiated and signed during the final years of the cold war is often referred as 'the cornerstone of European security' since it eliminated the FSU's overwhelming quantitative advantage in conventional weapons in Europe by establishing equal limits on the amount of tanks, ACVs, heavy artillery, combat aircrafts and attack helicopters between NATO and the Warsaw Pact, covering an area between the Atlantic Ocean and the Ural Mountains. More specifically, NATO and Warsaw Pact were each limited to 20,000 tanks, 30,000 ACVs, 20,000 heavy artillery pieces, 6,800 combat aircrafts and 2,000 attack helicopters for the treaty's area of application. For a further detailed view of the CFE Treaty provisions see US Department of State, "Fact Sheet: Conventional Armed Forces in Europe (CFE) Treaty", 18 June 2002 and Organization for the Security and Cooperation in Europe (OSCE), "Treaty on Conventional Armed Forces in Europe", [online], <http://www.osce.org/library/14087>, (Accessed 2 June 2012). The Convention on Prohibitions or Restrictions on the Use of Certain Conventional Weapons Which May Be Deemed to Be Excessively Injurious or to Have Indiscriminate Effects as amended on 21 December 2001 (CCW) is usually referred to as the Convention on Certain Conventional Weapons (CCW Convention). It is also known as the Inhumane Weapons Convention. The purpose of the Convention is to ban or restrict the use of specific types of weapons that are considered to cause unnecessary or unjustifiable suffering to combatants or to affect civilians indiscriminately. For more details see International Committee of the Red Cross, "Conventional weapons and international humanitarian law", and United Nations Office in Geneva (UNOG), "The Convention on Certain Conventional Weapons", <http://www.unog.ch/80256EE60058594>, (Accessed 02 June 2012).
6. See Smith, C., "International, Light Weapons Proliferation: A Global Survey", *Jane's Intelligence Review* [online], 01 July 1999, 011(007), Available via: Jane's Online, (Accessed 02 April 2011).

7. See Siousiouras, P. and Dalaklis, D., *Modern Maritime Transports and the Piracy Phenomenon*, Athens, Sideris Publications, 2011, ch. 2, pp. 153-256.
8. J. P. Rodrigue, C. Comtois & B. Slack, B. Slack, *The Geography of Transport Systems*, Routledge, New York, 2009.
9. See United Nations, "Crash the Illicit Trade in Small Arms", UN Small Arms Review Conference 2006, Press Release 10 July 2006.
10. See Cornish, P., *Controlling the Arms Trade*, op.cit. p. 251.
11. See Jagger, B., "Comment and Debate: One death every minute: The arms trade makes big money for the richest nations while fuelling conflict across the world". *The Guardian* [online], 25 January, 2006, p.27. Available via: Proquest, (Accessed 30 April 2012).
12. The United Nations Conference on the Illicit Trade in Small Arms and Light Weapons in All Its Aspects was held in New York from 9 -20 July 2001 as decided in United Nations General Assembly Resolution 54/54 V. Preceded by three preparatory committee sessions, the two-week Conference resulted in the adoption of the 'Programme of Action to Prevent, Combat and Eradicate the Illicit Trade in Small Arms and Light Weapons in All Its Aspects.' States are required to report to the United Nations on the progress of their implementation of the UN Programme of Action, commonly known as the PoA. The United Nations General Assembly scheduled a review conference in New York which was held from 26 June to 7 July 2006. The Review Conference was plagued by disagreements and states were unable to agree on a substantive outcome document. There have also been four Biennial Meetings of States to consider the implementation of the Program of Action, in 2003, 2005, 2008 and 2010. The 2008 Biennial Meeting of States resulted in the adoption, by vote, of an Outcome Document focusing on three main issues: international assistance, cooperation and capacity-building, stockpile management and surplus disposal and illicit brokering in small arms and light weapons. The Fourth Biennial Meeting in 2010 was able to adopt, for the first time by consensus, a substantive Outcome Document which addresses the issue of illicit trade across borders. A review conference of the Program of Action is scheduled for the September 2012.
13. See United Nations, *The United Nations Disarmament Yearbook*, Volume 28:2003, New York, United Nations Publications, 2004, pp. 110-11.
14. See Makarenko, T., "Tracing the dynamics of the illicit arms trade", *Jane's Intelligence Review* [online], 01 September 2003, Available via: Jane's Online, (Accessed 14 April 2012).
15. Ibid.
16. See George C. Marshall European Center For Security Studies, Ed., *A report of the George C. Marshall European Center for Security Studies Conference on Organized Crime: The National Security Dimension*, Garmisch-Partenkirchen, Germany, 29 August - 02 September, 1999, Germany, The George C. Marshall European Center for Security Studies and The Federal Bureau of Investigation, Garmisch-Partenkirchen, 1999.
17. See Makarenko, T., "Tracing the dynamics of the illicit arms trade", *Jane's Intelligence Review* [online], op. cit.
18. See Prezelj, Iztok and Gaber, Marija, *Athena Papers Series No. 5: Smuggling as a Threat to National and International Security: Slovenia and the Balkan Route*, Garmisch-Partenkirchen Germany, Partnership for Peace Consortium of Defence Academies and Security Studies Institutes, 2005, p. 12.
19. See Polyakov, Leonid, *Managing The Challenge Of Illegal Arms Transfers*, Defence Academy of the United Kingdom, Conflict Studies Research Centre, Surrey, 2003, pp. 2-3.
20. See Kogan, E. *Southeastern European Defence Industry: International Cooperation and Market Opportunities*, Defence Academy of the United Kingdom-Conflict Studies Research Centre, Surrey, 2005, pp. 4-5.
21. See Davidson-Seger, Moida, Ed., *Conversion Survey 1997*, (Project of Bonn International Center for Conversion), New York Oxford University Press Inc., 1997, p. 144.
22. Ibid., p. 145.
23. See Dhanapala, Jayantha et al, *Small Arms Control: Old Weapons, New Issues*, Albershot, Ashgate Publishing Ltd., 1999, pp. 4-5.
24. See Prezelj, Iztok and Marija Gaber, *Athena Papers Series No. 5: Smuggling as a Threat to National and International Security: Slovenia and the Balkan Route*, op. cit., p. 54.
25. See Dhanapala, Jayantha et al, op.cit. p. 6.
26. See Martin, J. "Small arms trigger alarms", *Middle East* [online], October 2005, (360), 26. Available via: Proquest, (Accessed 19 June 2008).

27. See BBC NEWS, "Annan warns of 'violence culture'" [online], BBC NEWS UK, London, 2006, <http://news.bbc.co.uk/1/hi/world/americas/5118678.stm>, Accessed: 12 May 2012).
28. See Graduate Institute of International Studies (Geneva); Bonn International Centre for Conversion Research; JAM Small Arms Survey 2005; Just Facts (US): JAM Research.
29. See Davidson-Seger, Moida, Ed., Conversion Survey 1997, (Project of Bonn International Center for Conversion), New York, Oxford University Press Inc., 1997, p. 150.
30. See Cornish, P., Controlling the Arms Trade: The West versus the Rest, London, Bowerdean Publishing Company Ltd., 1996, pp. 46-50.
31. Ibid. pp. 54-55.
32. See Arms Control Association, "Russia Tops in Quantity of Arms Shipped in 2002" [online], Arms Control Association, 2003, http://www.armscontrol.org/act/2003_11/Unregister.asp, (Accessed 7 July 2011).
33. See UN Centre for Disarmament Affairs, United Nations Register of Conventional Arms, New York, UNCTAD, 2003.
34. See Arms Control Association, "Russia Tops in Quantity of Arms Shipped in 2002", op.cit.
35. See Goldblat, Jodef, Arms Control: The New Guide to Negotiations and Agreements, London, SAGE Publications Ltd., 2002, p. 247.
36. See UN Department for Disarmament Affairs, The Future of Disarmament: Edited transcripts of meetings held at UN in 1997, New York, 10 April – 23 October 1997, New York, UN Centre for Disarmament Affairs, 1998, pp. 131-155.
37. See United Nations General Assembly, Resolution 55/255 adopted by the General Assembly on 8 June 2001: Protocol against the Illicit Manufacturing of and Trafficking in Firearms, Their Parts and Components and Ammunition, supplementing the United Nations Convention against Transnational Organized Crime.
38. See Goldblat, Jodef, Arms Control: The New Guide to Negotiations and Agreements, op.cit. p. 251.
39. See Article 4 of the Resolution 55/255 adopted by the General Assembly on 8 June 2001: Protocol against the Illicit Manufacturing of and Trafficking in Firearms, Their Parts and Components and Ammunition, supplementing the United Nations Convention against Transnational Organized Crime.
40. Ibid, Article 15.
41. See Goldblat, Jodef, Arms Control: The New Guide to Negotiations and Agreements, op. cit. p. 254-256.
42. See UN Centre for Disarmament Affairs, Conventional Arms: Programme of Action to Prevent, Combat and Eradicate the Illicit Trade in Small Arms and Light Weapons in All Its Aspects, (UN Document A/CONF.192/15/).
43. See Goldblat, Jodef, Arms Control: The New Guide to Negotiations and Agreements, op. cit. p. 254-256.
44. See United Nations, The United Nations Disarmament Yearbook, Volume 29:2004, New York, United Nations Publications, 2005, pp. 138-144.
45. Ibid, p. 146.
46. See Stability Pact for Southern Eastern Europe Regional Implementation Plan (Revised 2006), Combating the Proliferation and Impact of Small Arms and Light Weapons, SEESAC, 2006.
47. See United Nations, The United Nations Disarmament Yearbook, op.cit. pp. 148-151.
48. See Boese, Wade, "The Wassenaar Arrangement at a Glance" [online], Arms Control Association, 2005, <http://www.armscontrol.org/factsheets/wassenaar.asp>, (Accessed 10 June 2011).
49. See The Wassenaar Arrangement on Export Controls for Conventional Arms and Dual-Use Goods and Technologies, "Best Practice Guidelines for Exports of Small Arms and Light Weapons, as adopted by the plenary of 11-12 December 2002" [online], Wassenaar, WA, 2002, Available at: http://www.wassenaar.org/docs/best_practice_sapw.htm, (Accessed 10 June 2010).
50. See The Wassenaar Arrangement on Export Controls for Conventional Arms and Dual-Use Goods and Technologies, Elements for Export Controls of Man-Portable Air Defense Systems, agreed at the WA Plenary, 1 December 2000, SEESAC, 2002.
51. See The Wassenaar Arrangement on Export Controls for Conventional Arms and Dual-Use Goods and Technologies, Elements for Effective Legislation on Arms Brokering, agreed at the 2003 Plenary, SEESAC, 2003.
52. See Boese, Wade, "The Wassenaar Arrangement at a Glance", op.cit.
53. See Goldblat, Jodef, Arms Control: The New Guide to Negotiations and Agreements, op.cit. p.243.

54. See OSCE, OSCE Document On Small Arms and Light Weapons, SEESAC, 2005.
55. See OSCE, Decision No 5/04: Standard Elements of End-User Certificates and Verification Procedures for SALW Exports, SEESAC, 2005.
56. See OSCE, OSCE Document on Stockpiles of Conventional Ammunition, SEESAC, 2005.
57. See OSCE, Decision No 8/04: OSCE Principles on the Control of Brokering in Small Arms and Light Weapons, SEESAC, 2005.
58. See OSCE, Decision No 3/04: OSCE Principles For Export Controls of Man-Portable Air Defence Systems (MANPADS), SEESAC, 2005.
59. See The Council of European Union, EU Code Of Conduct On Arms Exports, SEESAC, 2005.
60. See The Council of European Union, Council Common Position 2003/468/CSFP of 23 June 2003 on the Control of Arms Brokering, SEESAC, 2005.
61. See The Council of European Union, EU Strategy to combat illicit accumulation and trafficking of SLAW and their ammunition, adopted by the EU Council on 15-16 December 2005, SEESAC, 2005.
62. See The Council of European Union, Council Joint Action of 12 July 2002 on the European's Union contribution to combating the destabilizing accumulation and spread of small arms and light weapons and repealing Joint Action 1999/34/CSFP, SEESAC, 2005.
63. See Burkard Schmitt, European armaments cooperation: Core documents, Alencon, EU Institute for Security Studies, 2003, pp. 23-28.
64. See Goldblat, Jozef, Arms Control: The New Guide to Negotiations and Agreements, op.cit. p. 245.
65. See UK Foreign and Commonwealth Office, "Export Controls and Sanctions: The Consolidated EU and National Arms Export Licensing Criteria" [online], London, FCO UK, 2006, <http://www.fco.gov.uk/servlet/Front?pagename=OpenMarket/Xcelerate/ShowPage&c>, (Accessed 1 June 2010).
66. See The Council of European Union, EU Strategy to combat illicit accumulation and trafficking of SLAW and their ammunition, adopted by the EU Council on 15-16 December 2005, op. cit.
67. See Tanner, Fred, "Arms Control, Civil War and Peace Settlements", *Civil Wars*, 3(2), Winter 2000, p. 53.
68. See Spear, Joanna, "The Disarmament and Demobilization of Warring Factions in the Aftermath of Civil Conflicts: Key Implementation Issues", *Civil Wars*, 2(2), Summer 1999, p.3.
69. See Jones, P., "Arms Control in the Middle East: is it time to renew ACRS?" *Disarmament Forum: UN Institute for Disarmament Research Quarterly Journal*, 2, 2005, pp 57-62.
70. However, some of the relevant experts do not embrace such a similar approach for the Middle East. For instance, Keith Krause, the program director of the Small Arms Survey launched in the Middle East periodical type, suggests that the biggest challenge for the resolution of conflicts in the Middle East is not to get the two sides to talk, but to get their small arms out of circulation. See Martin, J., "Small arms trigger alarms", *Middle East* [online], October, 2005, (360), 26, op. cit.
71. See Centre for Analysis of Strategies and Technologies (CAST), "Small Arms and Light Weapons – Global and Regional Aspects", *Eksport Vooruxheniy*, January - February 2001, pp 24-27.