

ΝΑΥΣΙΒΙΟΣ ΧΩΡΑ

Περιοδική Έκδοση Ναυτικών Επιστημών



Τεύχος 1/2006

Περιεχόμενα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	3
ΠΡΩΤΗ ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ	5
Σχεδίαση Κεραίας Πολύ Χαμηλών Συχνοτήτων (VLF) με Ασυμμετρικό Φορτίο Κορυφής	6
Ε. Α. Καραγιάννη και Ν. Κ. Ουζούνογλου	
Σκέδαση Η/Μ κυμάτων από τέλεια αγωγίμες κωνικές επιφάνειες	31
Α. Ν. Μαγουλάς	
Ιεραρχική ταξινόμηση ψηφιακά διαμορφωμένων σημάτων σε περιβάλλον πολλαπλών ανακλάσεων με χρήση νευρωνικών ταξινομητών (LVQ) για εφαρμογές σε δέκτες λογισμικού SDR	57
Γ. Χατζηχρήστος, Β. Καλλίας και Ι. Κούκος	
Τεχνολογίες αιχμής που υλοποιούν τον Δικτυοκεντρικό Πόλεμο	72
Ι. Κούκος	
Τεχνολογία Software Defined Radio: Βασικές αρχές, εξελίξεις και προοπτικές	88
Γ. Βαρδούλιας και Ι. Κούκος	
Επίδραση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας: Επισκόπηση των υφιστάμενων προτύπων και τεχνικών υπολογισμού	94
Α. Τσιγκόπουλος, Μ. Η. Φαφαλιός και Γ. Βαρδούλιας	
ΔΕΥΤΕΡΗ ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ: ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗ	110
Η προσομοίωση της θερμοδυναμικής λειτουργίας των κινητήρων diesel	111
Ηλίας Αρ. Υφαντής	
Διαθέσιμες τεχνολογίες συμπαραγωγής	122
Γ. Ν. Μαλαχίας, Ι. Σ. Κατσάνης	
Δυναμική πλοίου: ανάλυση της ευστάθειας πλοίου που πλέει σε περιορισμένα ύδατα .	155
Π. Καπασάκης	
ΤΡΙΤΗ ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ: ΥΛΙΚΑ	174
Μελέτη της διεπιφάνειας στα σύνθετα υλικά με χρήση της Φασματογραφίας Ράμαν 175	
Α. Παϊπέτης, Ν.Μ. Μελανίτης και Χ. Κοϊμτζόγλου	
Φασματομηχανική μελέτη της συμπεριφοράς των ανθρακονημάτων σε θλιπτική καταπόνηση	193
Ν. Ε. Μελανίτης	
Μέτρηση του ανισότροπου μητρώου ελαστικότητας σε σύνθετα υλικά με τη χρήση υπερήχων	205
Α. Παϊπέτης	
Τα ναυτικά υλικά του μέλλοντος	218
Ν. Ε. Μελανίτης	

ΤΕΤΑΡΤΗ ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ: ΦΥΣΙΚΕΣ ΕΠΙΣΤΗΜΕΣ.....223

Μαθηματικές μέθοδοι πρόγνωσης θαλάσσιου κυματισμού. Ένα ολοκληρωμένο επιχειρησιακό σύστημα224

Γ. Ν. Γαλάνης, Γ. Κ. Εμμανουήλ και Γ. Β. Κάλλος

Υπολογισμός των παραγόντων ηλεκτρομαγνητικής μετάβασης πρωτονίου σε Δ (1232) από την Κβαντική Χρωμοδυναμική σε πλέγμα.....236

Α. Τσάπαλης

Ανάπτυξη νέας μεθοδολογίας για τη σύνθεση ετεροκυκλικών ενώσεων με βιολογική δράση και μελέτη της δομής τους με φασματοσκοπικές μεθόδους.....247

Α. Δέτση και Ό. Ιγγλέση-Μαρκοπούλου

ΠΕΜΠΤΗ ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ: ΔΙΕΘΝΕΙΣ ΣΧΕΣΕΙΣ.....257

Γεωπολιτικές Επιδιώξεις και Στρατηγικές Ασφαλείας στη Μεσόγειο: ο ιδιαίτερος ρόλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης258

Δ. Δαλακλής και Π. Σιούσιουρας

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η «Ναυσίβιος Χώρα» εκδίδεται από τη Σχολή Ναυτικών Δοκίμων με τη φιλοδοξία να αποτελέσει περιοδική -ανά διετία- σπουδή στις ναυτικές επιστήμες.

Το πρώτο τεύχος (καλοκαίρι 2006) δημοσιεύεται με πρωτοβουλία του Διδακτικού Εκπαιδευτικού Προσωπικού της Σχολής στο πλαίσιο σχετικής απόφασης του Εκπαιδευτικού Συμβουλίου.

Η κυκλοφορία της «Ναυσιβίου Χώρας» συμπίπτει χρονικά με την έκδοση του Π.Δ. περί Οργανισμού της Σ.Ν.Δ., με την οποία ολοκληρώνεται ο θεσμικός και λειτουργικός εκσυγχρονισμός της Σχολής που επιχειρήθηκε με τους νόμους 3187/2003 και 3413/2005. Συμπίπτει επίσης με την εξέλιξη ευρύτατου διαλόγου για την ανάγκη μεταρρυθμίσεων στο θεσμικό πλαίσιο της ανώτατης εκπαίδευσης στην Ελλάδα και τη δημιουργία μη κρατικών, μη κερδοσκοπικών πανεπιστημίων. Συμπίπτει, παράλληλα, με την κλιμάκωση των προσπαθειών για τη δημιουργία των ιδρυμάτων της ενιαίας ευρωπαϊκής τριτοβάθμιας εκπαίδευσης, αλλά και την ενίσχυση του σκεπτικισμού απέναντι στο πνεύμα της Μπολόνια.

Ανεξαρτήτως των εξελίξεων και της φοράς των πραγμάτων σε ευρωπαϊκό και εθνικό επίπεδο, η επιβίωση των ανωτάτων εκπαιδευτικών ιδρυμάτων της χώρας στο άκρως ανταγωνιστικό ακαδημαϊκό περιβάλλον θα εξασφαλιστεί αν (α) υποστηριχθεί και ενισχυθεί η βασική και εφαρμοσμένη έρευνα, (β) διευρυνθεί η χρήση των ευέλικτων και καινοτόμων νέων τεχνολογιών στην πληροφορική και τις τηλεπικοινωνίες και (γ) θεμελιωθούν και αναπτυχθούν διαπανεπιστημιακές συνεργασίες στις σπουδές – προπτυχιακές και μεταπτυχιακές –και την έρευνα.

Η επένδυση στην παιδεία είναι η πλέον αποδοτική μακροπρόθεσμη επένδυση που ένα κράτος μπορεί να κάνει για το μέλλον του. Στη μακρά –μη γραμμική- ιστορική διαδρομή, τα συλλογικά μορφώματα που έδωσαν προτεραιότητα και κυρίαρχο ρόλο στην παιδεία ευτύχησαν να ζήσουν σημαντικές ιστορικές παρενθέσεις παράγοντας πολιτισμό με υπαρκτικό νόημα και δημιουργώντας κοινωνικά πρότυπα στα οποία ήταν παρόν το υποκείμενο.

Πειραιάς, Ιούνιος 2006

Καθηγητής Ηλίας Αρ. Υφαντής
Κοσμήτορας Σ.Ν.Δ.

Ευχαριστίες

Τη γλώσσα και την εξομάλυνση του ύφους των κειμένων επιμελήθηκε ο Δρ. Παναγιώτης Αρ. Υφαντής.

Τη συνολική διάρθρωση του τεύχους επιμελήθηκε ο Λέκτορας Γεώργιος Βαρδούλιας.

Τους ευχαριστώ θερμά.

Ηλίας Αρ. Υφαντής.

ΠΡΩΤΗ ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ:

**ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ
ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ**

Σχεδίαση Κεραίας Πολύ Χαμηλών Συχνοτήτων (VLF) με Ασυμμετρικό Φορτίο Κορυφής

Ε. Α. Καραγιάννη και Ν. Κ. Ουζούνογλου

Περίληψη

Ο τύπος της κεραίας που παραδοσιακά χρησιμοποιείται για την εκπομπή Πολύ Χαμηλών Συχνοτήτων (VLF) 10-50 KHz είναι το κάθετο μονόπολο με χωρητικό φορτίο κορυφής. Οι συχνότητες VLF χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση σημάτων από σταθμούς ξηράς σε υποβρύχια υπό κατάδυση. Η κεραία Πολύ Χαμηλών Συχνοτήτων αποτελείται από μεταλλικό πύργο, από την κορυφή του οποίου αναρτώνται ακτινωτοί αγωγοί, οι οποίοι, αφού μονωθούν σ' ένα μήκος 100-250m, "αγκυρώνονται" στο έδαφος. Ο ρόλος του φορτίου κορυφής είναι σημαντικός, καθώς αυξάνει το ρεύμα πάνω στον πύργο και εξασφαλίζει βελτίωση της απόδοσης ακτινοβολίας της κεραίας. Κατά κανόνα, το φορτίο κορυφής των κεραιών VLF έχει συμμετρική γεωμετρία με αριθμό αγωγών $N=12÷24$. Επίσης, η κεραία VLF αποτελείται από πλέγμα γείωσης για να μειωθούν οι απώλειες εδάφους και να αυξηθεί η απόδοση εκπομπής.

Στην παρούσα εργασία αναλύεται η χρησιμοποίηση διάταξης αγωγών φορτίων κορυφής χωρίς κυκλική συμμετρία και μελετάται η νέα διάταξη ηλεκτροστατικά και ηλεκτροδυναμικά. Τέλος, εξετάζεται η ένταση ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου στο εγγύς πεδίο, για την προστασία του περιβάλλοντος και του προσωπικού που βρίσκεται κοντά στην κεραία.

Abstract

The type of antenna that is used traditionally for Very Low Frequency (VLF) 10 – 50 KHz transmission is the vertical monopole with capacitive top loading. VLF frequencies are used for signal transmission from land stations to submarines in submerge. A VLF antenna consists of a high metallic tower, a number of symmetrical radius conductors that are suspended from the top of the tower, for capacitive loading. These conductors are insulated with strain insulators in a length of about 100-250m and are pinned to the ground. This capacitive top loading increases the current intensity on the tower, increasing the efficiency characteristics. Also, a VLF antenna consists of a copper ground system for reducing ground losses, improving radiation efficiency. Usually, the top loading of VLF antennas has circular symmetric geometry.

In this paper, non-symmetrical geometries are analyzed of the capacitive top loading, as well as for the ground plane by using electrostatic and electrodynamics methods. Finally, we study the electric and magnetic strengths in near field of VLF antennas to cover the environmental protection and prevention of health hazards to humans living and working close to the VLF Antenna Facility.

I. Εισαγωγή

Οι κεραίες Πολύ Χαμηλών Συχνοτήτων (VLF = Very Low Frequency) εκπέμπουν σε συχνότητες 10 – 50 KHz και βρίσκουν εφαρμογή στη μετάδοση ψηφιακών σημάτων (100-600 bps με διαμορφώσεις FSK, PSK, MSK) από την ξηρά στα υποβρύχια. Λόγω της ιδιότητας των χαμηλών συχνοτήτων να διεισδύουν ικανοποιητικά στον υποθαλάσσιο χώρο, η χρήση τους καθιερώθηκε στις αρχές του προηγούμενου αιώνα για τη μονόδρομη μετάδοση σημάτων από την ξηρά προς τα υποβρύχια εν καταδύσει.

Για να υπάρξει ικανοποιητική ακτινοβολία (δηλαδή, να ακτινοβολείται σημαντικό ποσοστό της ισχύος που αποδίδεται από τον πομπό), θα πρέπει το μέγεθος της κεραίας να είναι συγκρίσιμο με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που επιθυμείται η εκπομπή. Αν υποθέσουμε συχνότητα εκπομπής 30 KHz, τότε θα έχουμε μήκος κύματος

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{30 \cdot 10^3 \text{ Hz}} = 10 \text{ Km} \quad (1)$$

Αφού το μήκος της κεραίας θα πρέπει να είναι συγκρίσιμο με το μέγεθος αυτό, θα έλεγε κανείς ότι θα έπρεπε το ύψος του πύργου να είναι τουλάχιστο $\lambda/10 = 1000 \text{ m}$. Επειδή πρακτικά είναι αδύνατη η κατασκευή κεραίας κάθετου πύργου που να υπερβαίνει τα 250-350m, αναγκαστικά περιοριζόμαστε στο ύψος αυτό και προσπαθούμε να βελτιώσουμε την απόδοση της κεραίας με διάφορους τρόπους, όπως:

- α) τοποθέτηση φορτίου κορυφής (top loading) και
- β) βελτίωση της αγωγιμότητας της γης με την εγκατάσταση ακτινωτού πλέγματος, με κέντρο την κεραία.

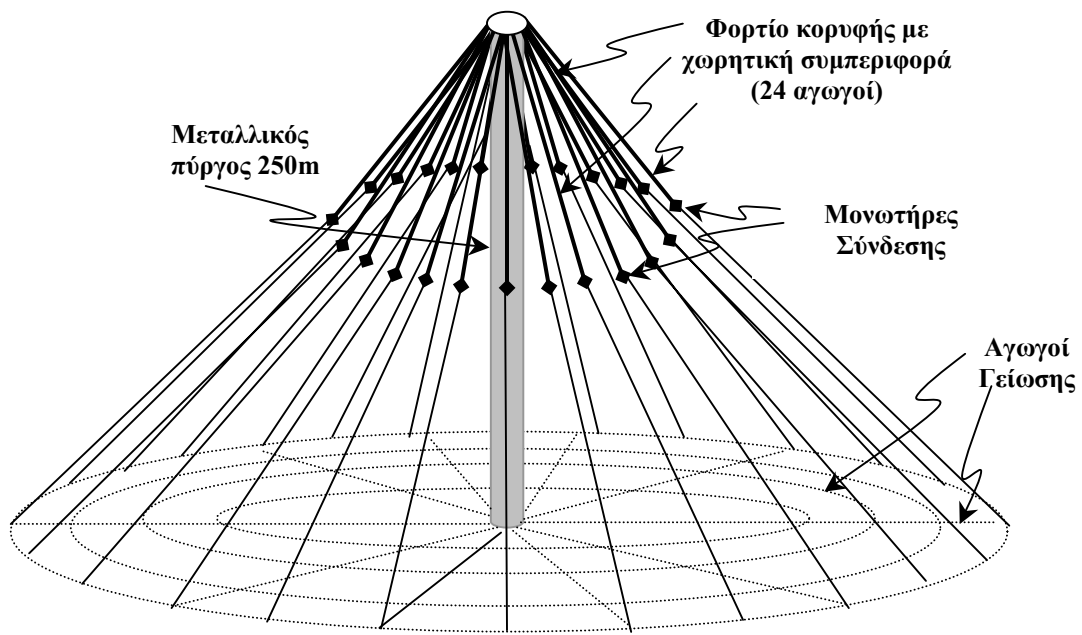
Στο Σχήμα 1 δείχνουμε τη βασική γεωμετρία ενός κάθετου πύργου πάνω από το έδαφος. Η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια πηγάζει από το σημείο διέγερσης στη βάση της κεραίας και η γεννήτρια σημάτων διεγείρει την κεραία ως προς την επιφάνεια της γης.

Τα βασικά πορίσματα της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας ακτινοβολίας οδηγούν στα παρακάτω συμπεράσματα:

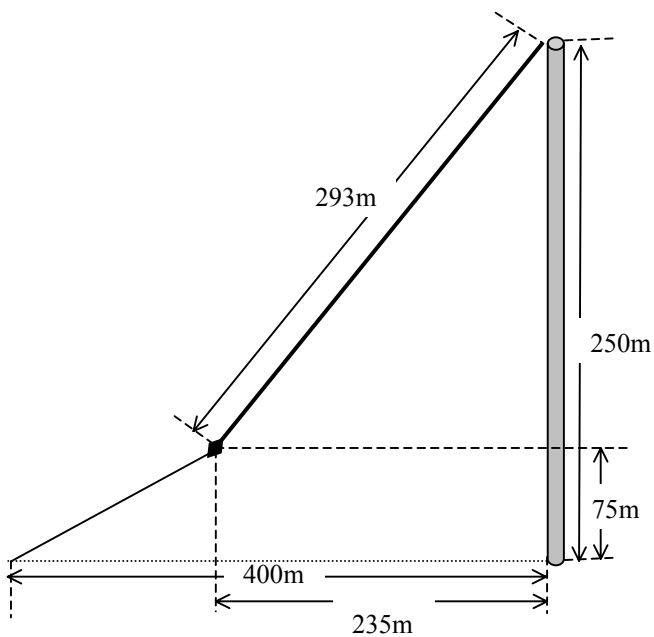
- I) Η εφαρμογή παλλόμενης τάσης στη βάση της κεραίας δημιουργεί ένα στάσιμο κύμα της έντασης ρεύματος κατά μήκος του αγωγίμου πύργου. Η ταχύτητα διάδοσης του κύματος αυτού είναι περίπου ίση με την ταχύτητα διάδοσης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στον ελεύθερο χώρο. Στην κορυφή της κεραίας το ρεύμα μηδενίζεται.
- II) Η ακτινοβολία εκπέμπεται ομοιόμορφα περιφερειακά με ισχυρότερη ένταση στο οριζόντιο επίπεδο ενώ η ακτινοβολούμενη ισχύς στην κάθετη κατεύθυνση είναι μηδενική.
- III) Η σύνδεση της κεραίας με τη γεννήτρια σημάτων, που ονομάζεται στην περίπτωση μας πομπός, προϋποθέτει την ικανοποίηση συνθηκών μέγιστης μεταφοράς ισχύος από την πηγή (γεννήτρια) προς το φορτίο, που στην περίπτωση μας είναι η κεραία. Για να έχουμε την ικανοποίηση της συνθήκης αυτής, θα πρέπει η φαινόμενη αντίσταση εισόδου στη βάση της κεραίας να είναι ίση με την αντίσταση εξόδου του πομπού γεννήτριας. Κατά κανόνα, οι πομποί διαθέτουν αντίσταση εξόδου 50 Ω, πράγμα που επιτρέπει την εύκολη μεταφορά ισχύος σε απόσταση (στην περίπτωση μας 400m περίπου), με χρήση ομοαξονικών γραμμών μεταφοράς. Κεραίες, όπως αυτή του Σχήματος 1, που διαθέτουν ύψος $h \ll \lambda$, παρουσιάζουν σύνθετη αντίσταση εισόδου

$$Z_{in} = R_{in} + j \cdot X_{in} \quad (2)$$

όπου το πραγματικό μέρος της σύνθετης αντίστασης εισόδου $R_{in} = R_{ακτ} + R_{απωλ}$ αποτελείται από την αντίσταση ακτινοβολίας και την αντίσταση που αντικατοπτρίζει τις απώλειες που παρουσιάζονται στο περιβάλλον της κεραίας.



(α)

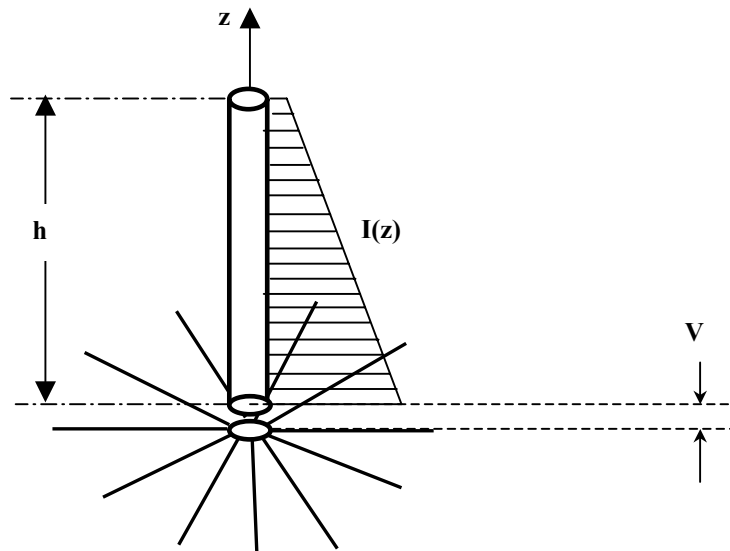


(β)

Σχήμα 1: (α) Παράδειγμα κάθετου μονόπολου με συμμετρικό φορτίο κορυφής που αποτελείται από 24 αγωγούς και πλέγμα γείωσης. (β) Τομή του συστήματος της κεραίας.

Το φανταστικό μέρος της σύνθετης αντίστασης $X_{in} = \text{Im}(Z_{in})$ έχει χωρητικό χαρακτήρα, δηλαδή η κεραία παρουσιάζει μια σημαντική χωρητικότητα, που είναι της τάξης των δεκάδων nF ($1\text{nF} = 10^{-9}\text{F}$) και σχετίζεται με το γεγονός ότι η κεραία αποθηκεύει σημαντική ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας στο περιβάλλον της. Για να έχουμε προσαρμογή της αντίστασης εισόδου της κεραίας σε $50\ \Omega$, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί μια διάταξη προσαρμογής, η οποία στην πραγματικότητα θα είναι ένα κύκλωμα συντονισμού.

IV) Για τη βελτίωση των χαρακτηριστικών της κεραίας απαιτείται η αύξηση του ύψους του πύργου. Οι πρακτικές όμως δυσκολίες εμποδίζουν μια τέτοια προσπάθεια. Ένας τρόπος που βοηθά σημαντικά στη βελτίωση της λειτουργίας της κεραίας είναι η αύξηση της έντασης του ρεύματος κορυφής, δηλαδή η αποτροπή του μηδενισμού του ρεύματος στην κορυφή της κεραίας με την τοποθέτηση αγώγιμων συρμάτων, έτσι ώστε να αυξάνεται η χωρητικότητα της κεραίας ως προς τη γη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ρευματική κατανομή κατά μήκος του αγώγιμου πύργου να γίνει λιγότερο μεταβαλλόμενη και κυρίως στην κορυφή της κεραίας να μη μηδενίζεται (Σχήμα 2). Το μέτρο αυτό βελτιώνει σημαντικά την απόδοση της κεραίας και αυξάνει τη συνολική απόδοση του επικοινωνιακού συστήματος που εξυπηρετεί η κεραία.



Σχήμα 2: Γεωμετρία κεραίας κάθετου μονόπολου.

Τοπογραφικοί περιορισμοί επιβάλλουν πολλές φορές τον περιορισμό του περιβάλλοντα χώρου, με αποτέλεσμα την υποχρεωτική χρήση μη-συμμετρικού φορτίου κορυφής σε κεραίες VLF.

Η ασυμμετρία της διάταξης των αγωγών φορτίου κορυφής διαταράσσει την ακτινική-συμμετρική ροή των επιφανειακών ηλεκτρικών ρευμάτων. Το γεγονός αυτό επιβάλλει την ανάγκη τοποθέτησης πρόσθετων αγωγών γείωσης που αποτελούνται από ακτινικούς αλλά και πρόσθετους ομόκεντρους αγωγούς, οι οποίοι πρέπει να ενώνονται μεταξύ τους στα σημεία όπου τέμνονται.

Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών όσον αφορά τα εξής μεγέθη:

- α) Ηλεκτρική Χωρητικότητα του φορτίου κορυφής και η εξάρτηση αυτής από τον αριθμό των αγωγών και τη γεωμετρική τους διάταξη στο χώρο.
- β) Απόδοση ακτινοβολίας ως συνάρτηση του αριθμού των αγωγών γείωσης (ακτινωτοί και ομόκεντροι αγωγοί).
- γ) Σχεδίαση των διατάξεων πηνίων και πυκνωτών για το συντονισμό της κεραίας VLF.

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών επιβεβαιώθηκαν από πειραματικές μετρήσεις. Η λεπτομερής σχεδίαση που βασίζεται σε υπολογιστικές μεθόδους υπολογιστικού ηλεκτρομαγνητισμού επιτρέπει τη βελτιστοποίηση της απόδοσης της κεραίας.

Τέλος, εξετάζεται η ένταση των πεδίων ηλεκτρονικού και μαγνητικού πεδίου που επάγει μια κεραία VLF στο κοντινό πεδίο, το οποίο παρουσιάζει ιδιαίτερη σημασία για την προστασία του περιβάλλοντος και του προσωπικού που βρίσκεται κοντά στην κεραία.

II. Χαρακτηριστικά συστήματος προσαρμογής της κεραίας

Το σύστημα προσαρμογής της κεραίας VLF που αποτελείται από τον πύργο περίπου 250m, το ακτινωτό σύστημα αγωγών του φορτίου κορυφής και το πλέγμα γείωσης των ακτινωτών αγωγών, από ηλεκτρομαγνητικής πλευράς συμπεριφέρεται σαν ένα μονόπολο με χωρητικότητα κορυφής. Η σύνθετη αντίσταση του συστήματος αυτού, που εμφανίζεται από τη βάση της κεραίας, έχει χωρητικό χαρακτήρα και μοντελοποιείται με το ισοδύναμο κύκλωμα που φαίνεται στο Σχήμα 3. Τα κυκλωματικά στοιχεία που εμφανίζονται αφορούν:

- $R_{\text{ακτ}}$ = Αντίσταση ακτινοβολίας.
- $R_{\text{απ}}$ = Αντίσταση που αντιπροσωπεύει όλες τις απώλειες στους αγωγούς της κεραίας καθώς επίσης και το έδαφος.
- C = Συνολική χωρητικότητα της κεραίας (η παρούσα έχει 22.3 nF).
- ΔC = Χωρητικότητα διαρροής στη βάση της κεραίας (έχει μικρή τιμή 10-20 pF).
- L = Συνολική αυτεπαγωγή του πύργου και της γραμμής στη βάση της κεραίας.

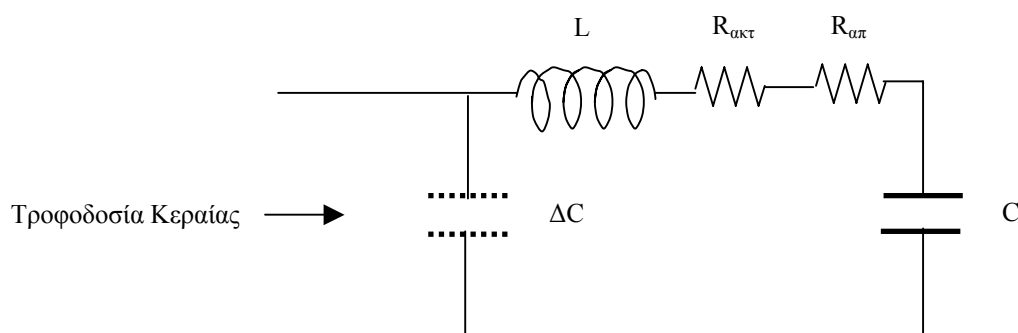
Σημειώνεται ότι η κεραία VLF λειτουργεί σε συχνότητα f πάντοτε υπό τη συνθήκη

$$f \ll \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3)$$

Δηλαδή, για συχνότητες στη ζώνη 10-50 KHz έχουμε λειτουργία σε συχνότητα πολύ χαμηλότερη της συχνότητας συντονισμού της κεραίας και, επομένως, για την περίπτωση ενδιαφέροντός μας:

$$\omega L < \frac{1}{\omega C} \quad (4)$$

όπου $\omega=2\pi f$ είναι η κυκλική συχνότητα της ακτινοβολίας



Σχήμα 3: Μοντέλο ισοδύναμου κυκλώματος κεραίας.

Σύμφωνα με το Σχήμα 3, η αντίσταση εισόδου της κεραίας είναι:

$$Z = R_{\Sigma} + j\omega L - j\frac{1}{\omega C} = R_{\Sigma} + jX_L - jX_C = R_{\Sigma} + jX_{\Sigma} \quad (5)$$

όπου

$$R_{\Sigma} = R_{\alpha\kappa\tau} + R_{\alpha\pi} \quad (6)$$

και

$$X_{\Sigma} = \omega L - \frac{1}{\omega C} = X_L - X_C \quad (7)$$

Βασική προϋπόθεση ορθής λειτουργίας της κεραίας είναι η μετατροπή της σύνθετης αντίστασης Z της εξ. (5) σε φορτίο 50Ω , αφού η χρησιμοποιούμενη ομοαξονική γραμμή μεταφοράς για τη σύνδεση του πομπού με την κεραία έχει κυματική αντίσταση 50Ω .

Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την εξ. (7) στην ακόλουθη μορφή:

$$X_{\Sigma} = \omega L \left(1 - \left(\frac{f_0}{f} \right)^2 \right) \quad (8)$$

όπου

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (9)$$

είναι η συχνότητα συντονισμού της κεραίας.

Με γνωστές τις τιμές L και C μπορούμε να υπολογίσουμε τη συχνότητα συντονισμού της κεραίας και, στη συνέχεια, για διαφορετικές τιμές συχνοτήτων (για παράδειγμα από 30 έως 160 KHz) να υπολογίσουμε τις αντίστοιχες τιμές R_{Σ} και X_{Σ} , οπότε θα γνωρίζουμε τη σύνθετη αντίσταση της κεραίας VLF για μια περιοχή συχνοτήτων.

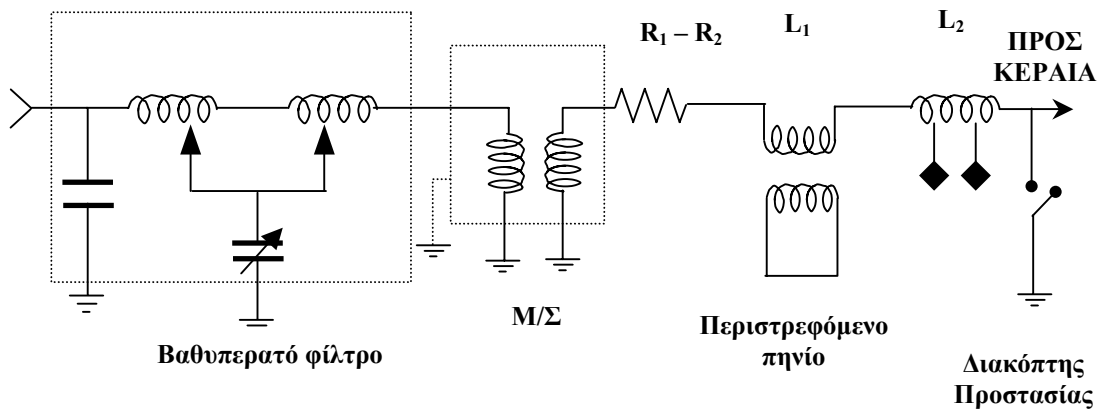
Αν για παράδειγμα $L=235\mu\text{H}$ και $C=17\text{nF}$, προκύπτει η συχνότητα συντονισμού της κεραίας $f_0=80\text{KHz}$. Για συχνότητα εκπομπής $f=50\text{KHz}$, προκύπτει $X_{\Sigma}=-115\Omega$. Όσον αφορά στο πραγματικό μέρος της αντίστασης R_{Σ} , αυτή αποτελείται από το άθροισμα των αντιστάσεων ακτινοβολίας $R_{\text{ακτ}}$ και συνολικών απωλειών $R_{\text{απ}}$. Όπως παρουσιάζεται παρακάτω, στην ενότητα V, προκύπτει ότι για συγκεκριμένη κεραία VLF, $R_{\text{ακτ}}=1,37\Omega$ και $R_{\Sigma}=3,37\Omega$, οπότε προκύπτει η απόδοση της κεραίας:

$$\eta = \frac{R_{AK}}{R_{\Sigma}} \cdot 100\% \cong 40.6\% \quad (10)$$

Στην παρούσα κεραία VLF, η προσαρμογή της επιτυγχάνεται με τη διάταξη του Σχήματος 4. Τα στοιχεία που αναγράφονται στο Σχήμα 4 αναφέρονται στα εξής:

- Τα πηνία L_1 και L_2 τίθενται εν σειρά με την κεραία VLF και, συγκεκριμένα, με το χωρητικό φορτίο.
- Οι αντιστάσεις $R_1 - R_2$ έχουν τοποθετηθεί για αύξηση του εύρους ζώνης της κεραίας (προφανώς με χαμηλότερη απόδοση από την προηγούμενη).

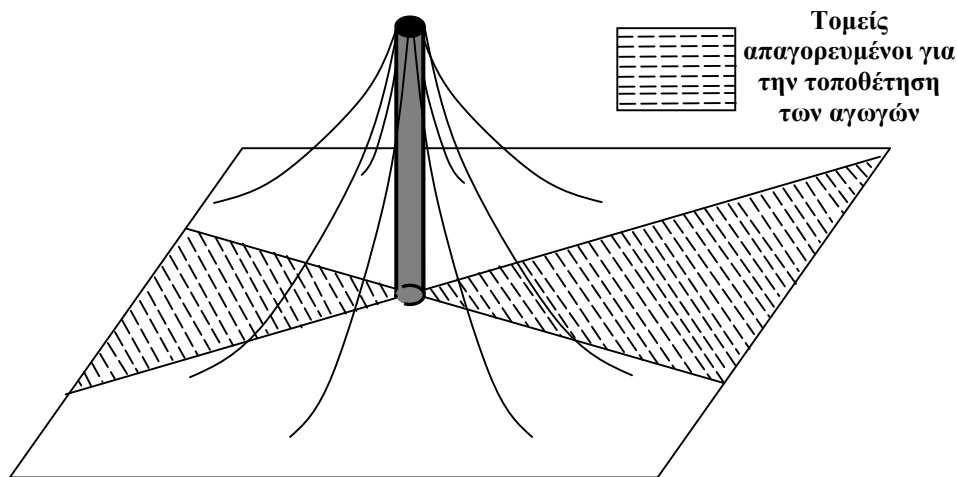
Το κύριο αντικείμενο που απασχολεί την παρούσα μελέτη είναι η αντιμετώπιση της αλλαγής της χωρητικότητας της κεραίας (δηλαδή το φανταστικό μέρος της σύνθετης αντίστασης εισόδου jX_{Σ}), όταν τροποποιηθεί η διάταξη των αγωγών του φορτίου κορυφής. Προκύπτει από τα παραπάνω ότι οι μικρές αλλαγές στην τιμή της X_{Σ} μπορεί να αντιμετωπιστούν με τη μεταβολή του πηνίου L_1 . Σημειώνεται ότι η μεταβολή της χωρητικότητας του φορτίου κορυφής, στο βαθμό που γίνεται στα πλαίσια της μελέτης αυτής, δεν αλλοιώνει το πραγματικό μέρος της αντίστασης, όπως αποδεικνύεται στη συνέχεια. Η παρατήρηση αυτή αποτελεί γνωστή αρχή στην τεχνολογία κεραίων και ειδικά των κεραίων LF [3].



Σχήμα 4: Κύκλωμα τροφοδοσίας της κεραίας VLF.

III. Το πρόβλημα της τροποποίησης της κεραίας με ασυμμετρικό φορτίο κορυφής

Λόγω του μεγάλου εμβαδού επιφάνειας που καταλαμβάνει στο χώρο η κεραία του Σχήματος 1 (περίπου 500 στρέμματα), πολλές φορές το τιθέμενο πρόβλημα είναι η τροποποίηση της κεραίας, ώστε οι προβολές των αγωγών κορυφής στο έδαφος να καταλαμβάνουν μικρότερο εμβαδόν. Τα σημεία αγκίστρωσης των αγωγών στην επιφάνεια της γης, κατά συνέπεια, θα βρίσκονται σε μικρότερη απόσταση από τον πύργο της κεραίας. Το πρόβλημα που μελετάμε στη συνέχεια είναι το ακόλουθο:



Σχήμα 5: Εικόνα της τροποποιημένης μικρότερου εμβαδού επιφάνειας κεραίας.

Ένας αριθμός αγωγών κορυφής (ελάχιστο 3 και μέγιστο 8), στο σημείο που αγκιστρώνονται με την επιφάνεια της γης, θα μπορούσαν να βραχυνωθούν (Σχήματα 1 και 5). Τίθεται το πρόβλημα εύρεσης της βέλτιστης τεχνικής λύσης, ώστε να μην αλλοιωθούν τα τεχνικά χαρακτηριστικά της κεραίας και να εξασφαλιστεί η αποτροπή βιολογικά αρνητικών επιπτώσεων στους γύρω χώρους. Οι αρχικές προσεγγίσεις για την ορθολογική επίλυση του τιθέμενου προβλήματος είναι οι ακόλουθες:

- A) Λαμβανομένου υπόψη ότι ένας αριθμός 3-8 αγωγών φορτίου κορυφής θα πρέπει να αφαιρεθούν από τον υποψήφιο χώρο, προτείνεται η εξέταση της αντιδιαμετρικής αφαίρεσης αριθμού αγωγών, για τη διατήρηση της μηχανικής ισορροπίας του πύργου (όπως φαίνεται στο Σχήμα 5). Παράλληλα όμως, απαιτείται η σύνθετη αντίσταση εισόδου Z_{in} της κεραίας να παραμείνει

όσο το δυνατόν η ίδια, για να μην απαιτηθούν ριζικές αλλαγές στη διάταξη προσαρμογής της κεραίας, παρά μόνο ίσως ελάχιστες ρυθμίσεις.

- B) Επειδή η τροποποίηση αφορά το φορτίο κορυφής, δηλαδή τη χωρητικότητα του συνόλου των αγωγών που ξεκινούν από την κορυφή του πύργου και κρέμονται προς τη γη, η νέα διάταξη των αγωγών κορυφής θα πρέπει να παρουσιάζει όσο το δυνατόν την ίδια χωρητικότητα με το φορτίο κορυφής που διαθέτει ακτινωτή συμμετρία. Η επίτευξη της ίδιας χωρητικότητας απαιτεί τον ακριβή υπολογισμό της χωρητικότητας με ηλεκτροστατικές μεθόδους για την όλη διάταξη, που αποτελείται από το μεταλλικό πύργο (250m) και το συγκεκριμένο σύστημα αγωγών φορτίου κορυφής. Για το σκοπό αυτό, αναπτύχθηκε ειδικό λογισμικό που βασίζεται στη θεωρία «Βοηθητικών Πηγών» και περιγράφεται στην ενότητα IV [1]. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε είναι η πλέον ακριβής για τον υπολογισμό της χωρητικότητας σύνθετων διατάξεων και η ακρίβεια της μεθόδου είναι αυτόματα ελεγχόμενη. Την ίδια μέθοδο εφαρμόσαμε για την ηλεκτροδυναμική μελέτη της κεραίας που παρουσιάζεται στην ενότητα V, χρησιμοποιώντας αυτή τη φορά ως “Βοηθητικές Πηγές” παλλόμενα δίπολα με την ίδια συχνότητα την μεθόδου της ηλεκτροστατικής ανάλυσης, η οποία παρουσιάζεται στην ενότητα IV.
- Γ) Επιδίωξη των ηλεκτρομαγνητικών αναλύσεων θα πρέπει να είναι όχι μόνο η επίτευξη των ίδιων χαρακτηριστικών λειτουργίας του όλου συστήματος ακτινοβολίας-κεραίας, αλλά και ο αριθμός των αγωγών που θα πρέπει να προστεθούν στους δύο κυκλικούς τομείς, όπου επιτρέπεται η τοποθέτηση αγωγών, να μην αυξηθεί σημαντικά από τον αριθμό των αγωγών που ισχύει για ένα συμμετρικό φορτίο κορυφής, που είναι 24.
- Δ) Παράλληλα με την ηλεκτροστατική και ηλεκτροδυναμική ανάλυση θα πρέπει να μελετηθεί η νέα προτεινόμενη δομή από στατικής.

IV. Ηλεκτροστατική ανάλυση της χωρητικότητας της κεραίας VLF

A. Μέθοδος “Βοηθητικών Πηγών”

Ξεκινώντας από το ηλεκτροστατικό πρόβλημα και, συγκεκριμένα, από τα ηλεκτρομαγνητικά χαρακτηριστικά της κεραίας, το βασικό ζήτημα που ανακύπτει είναι ο υπολογισμός της χωρητικότητας του όλου συστήματος της κεραίας (πύργος και αγωγοί κορυφής). Το πρόβλημα συνίσταται στον υπολογισμό του συνολικού φορτίου Q της όλης διάταξης, όταν αυτή ανυψωθεί σε δυναμικό 1 Volt ως προς την επιφάνεια της γης. Η χωρητικότητα C σε μονάδες Farad υπολογίζεται ότι είναι ίση με $C=Q$.

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό αυτό είναι η μέθοδος των “βοηθητικών πηγών”. Πρόκειται για μια γενικευμένη μέθοδο επίλυσης ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων όπως π.χ. κεραίων, γραμμών μεταφοράς, συντονιστών κ.λπ. [1]

Η αρχή της υπολογιστικής αυτής τεχνικής βασίζεται στη χρησιμοποίηση “βοηθητικών ηλεκτρικών φορτίων” για την περιγραφή της κατανομής επιφανειακών φορτίων επί των αγωγών της κεραίας (ανεύρεση “βοηθητικών πηγών” μέσα σε αγωγίμα ή διηλεκτρικά σώματα με τέτοιο τρόπο, ώστε να ικανοποιούνται οι οριακές συνθήκες στις διαχωριστικές επιφάνειες). Η μέθοδος αυτή, που παρέχει εξαιρετική ταχύτητα και ακρίβεια σε σχέση με άλλες μεθόδους που έχουν αναπτυχθεί, χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση της κεραίας VLF όσον αφορά τα φαινόμενα ακτινοβολίας και παρουσιάζεται στην ενότητα V (δυναμική συμπεριφορά).

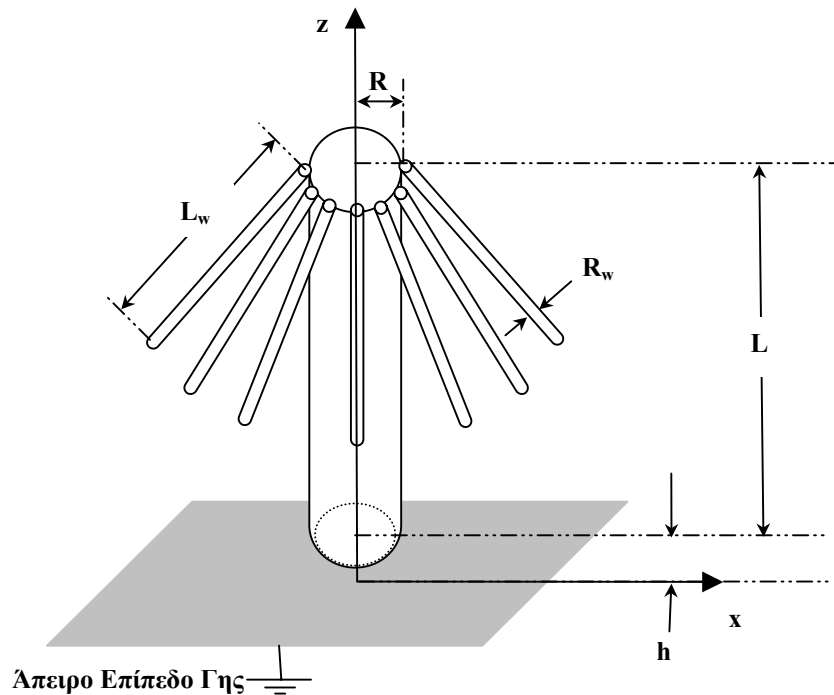
Έχοντας υπόψη τη γεωμετρία του Σχήματος 6, τοποθετούμε “βοηθητικά φορτία” εντός των αγωγών της κεραίας -τόσο μέσα στον αγωγίμο πύργο, όσο και στους αγωγούς κορυφής. Τα “βοηθητικά φορτία” που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη αυτή είχαν τη μορφή φορτίων ευθυγράμμου τμήματος. Υποθέτουμε ότι χρησιμοποιούμε N φορτία συνολικά και χρησιμοποιούμε τη γραμμική σχέση:

$$V_i = \sum_{j=1}^N \Gamma_{ij} Q_j \quad (11)$$

Με τη βοήθεια της εξ. (11) έχουμε τον υπολογισμό του δυναμικού σε ένα τυχαίο σημείο i που έχει συντεταγμένες θέσης στο χώρο (x_i, y_i, z_i) ενώ το φορτίο Q_j βρίσκεται στη θέση (x_j, y_j, z_j) . Εξαναγκάζοντας τα σημεία (x_i, y_i, z_i) για $i=1, 2, \dots, N$ να βρίσκονται πάνω στην κεραία, έχουμε στην εξ. (11) $V_i=1$ Volt και, γνωρίζοντας τις τιμές Γ_{ij} , υπολογίζουμε τα φορτία Q_j . Αυξάνοντας τον αριθμό N των “βοηθητικών φορτίων” έχουμε αύξηση της ακρίβειας υπολογισμού. Σε κάθε περίπτωση, τα αποτελέσματα των υπολογισμών υπερβαίνουν σε ακρίβεια την τιμή 1% .

Τα χαρακτηριστικά της κεραίας που μελετάμε είναι:

Ύψος κεραίας (L):	250 m
Ακτίνα αγκίστρων που προσγειώνουν τους αγωγούς κορυφής:	400 m
Μήκος αγωγών κορυφής (L_w):	293 m
Μέση διάμετρος πύργου ($2R$):	2 m
Διάμετρος αγωγών κορυφής ($2R_w$):	2,5 cm



Σχήμα 6: Γεωμετρία υπολογισμού χωρητικότητας Φορτωμένης Κεραίας.

B. Μελέτη Γεωμετρίας Αγωγών Κορυφής

Αρχικά, εξετάστηκε η χωρητικότητα της κεραίας με συμμετρικό φορτίο κορυφής. Το μοντέλο της κεραίας που χρησιμοποιήθηκε δίνεται στο Σχήμα 1. Ο υπολογισμός της χωρητικότητας δίνει την τιμή $C=19.81$ nF.

Το μοντέλο που χρησιμοποιούμε στους υπολογισμούς για τον πύργο είναι μια πλήρης κυλινδρική επιφάνεια και ο αριθμός των φορτίων κορυφής είναι 24. Στην πραγματικότητα έχουμε πύργο τριγωνικής διατομής και η τιμή που υπολογίσαμε, συγκρινόμενη με την τιμή του κατασκευαστή, δίνει μια διαφορά περίπου 3 nF (η συνολική χωρητικότητα κεραίας με σύνηθες φορτίο 24 συμμετρικών ακτινικών αγωγών κορυφής είναι 22,3 nF, όπως παρουσιάστηκε στην ενότητα II).

Όμως, επειδή μας ενδιαφέρει η σχετική αλλαγή της χωρητικότητας της κεραίας, θα χρησιμοποιήσουμε το παραπάνω μοντέλο κεραίας.

Στις ακόλουθες υπο-υποενότητες, όπου μελετάμε τις διαφορετικές δυνατές γεωμετρίες τροποποίησης της κεραίας, οι υπο-υποενότητες 1 και 2 δίνουν τα πραγματικά αριθμητικά αποτελέσματα της μεθόδου, ενώ οι τιμές χωρητικότητας που αναφέρονται στις υπο-υποενότητες 3 και 4 καθώς και στα Σχήματα 7 και 8 έχουν προσαρμοστεί, εφόσον έχει προστεθεί στις τιμές τους η διαφορά των 2,49 nF, που είναι η σχετική αλλαγή της χωρητικότητας που προαναφέραμε.

1. Βράχυνση 6+6 αγωγών

Σε περίπτωση που θα βραχυνθούν κατά περίπου 70 μέτρα οι 6+6 =12 αγωγοί, προκύπτει από τους υπολογισμούς η χωρητικότητα $C=16.94$ nF. Το ύψος 80m του μονωτήρα των 6+6=12 βραχέων αγωγών κορυφής επιλέχθηκε για να διατηρηθεί αρκετά μεγάλο το μήκος των αγωγών (227m έναντι 293m των αρχικών). Πιο συγκεκριμένα, η επιλογή αυτή έγινε για να έχουμε ελάχιστη μεταβολή της αρχικής χωρητικότητας της κεραίας, όπως επίσης και για να μην αυξηθεί σημαντικά η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στα όρια της απόστασης προσγείωσης των αγωγών. Το σημείο αυτό εξετάζεται λεπτομερώς στην ενότητα VII, όπου τονίζεται ότι η επιλογή του ύψους του μήκους των 80m για τους μονωτήρες των αγωγών που θα βραχυνθούν (βλέπε Σχήμα 8) υπήρξε αποτέλεσμα πολλών υπολογισμών, που αφενός δεν επηρεάζουν σημαντικά τη συνολική χωρητικότητα της κεραίας και αφετέρου περιορίζουν στο ελάχιστο το ηλεκτρικό πεδίο στον περιβάλλοντα ελεύθερο χώρο. Στο Σχήμα 8 δείχνουμε τις γεωμετρίες των αρχικών και νέων αγωγών φορτίων κορυφής. Είναι αξιοσημείωτο ότι η χωρητικότητα δεν αλλάζει δραματικά (διαφορά περίπου 3 nF για περίπου 20 nF).

Στη συνέχεια, μελετώνται διάφορες γεωμετρίες που θα αυξήσουν τη χωρητικότητα της κεραίας στο αρχικό της επίπεδο. Εξετάζονται οι ακόλουθες περιπτώσεις:

2. Αύξηση του αριθμού των βραχέων αγωγών

Ο Πίνακας 1 δείχνει τα αριθμητικά αποτελέσματα που προκύπτουν, όσον αφορά τη συνολική χωρητικότητα της κεραίας, με την πρόσθεση νέων αγωγών φορτίων κορυφής με ομοιόμορφη γωνιακή κατανομή στους δύο απαγορευτικούς τομείς 90^0 του Σχήματος 5. Παρατηρούμε ότι η διαφορά από την αρχική χωρητικότητα 19,81 nF είναι μόλις 1,7 nF για την περίπτωση των 11+11 αγωγών.

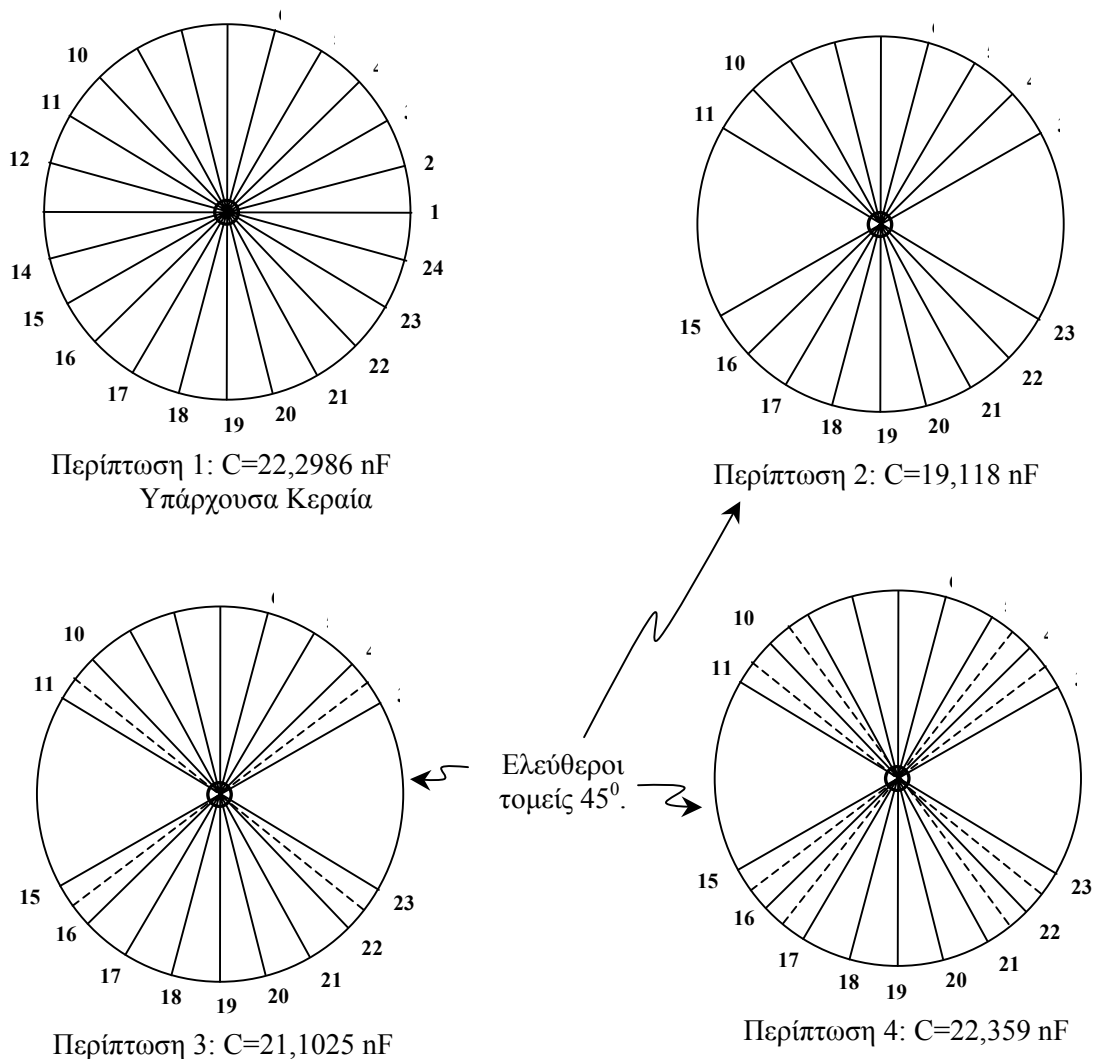
Αριθμός Βραχέων αγωγών Κορυφής	Χωρητικότητα (nF)
7+7	17,31
8+8	17,63
9+9	17,82
10+10	18,08
11+11	18,14

Πίνακας 1: Αλλαγή της συνολικής χωρητικότητας συναρτήσει του αριθμού των βραχέων αγωγών στην τροποποιημένη κεραία με ασυμμετρικό φορτίο κορυφής.

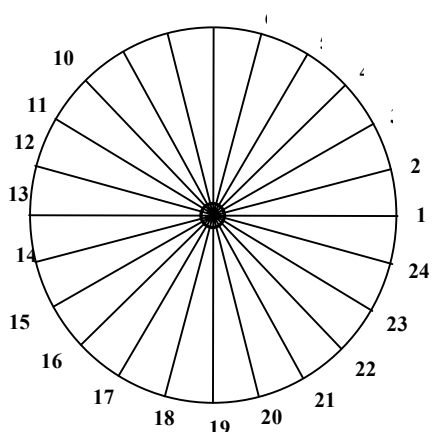
Στον ίδιο Πίνακα, παρατηρούμε την αύξηση της χωρητικότητας με την αύξηση του αριθμού των αγωγών κορυφής, με μείωση όμως του ρυθμού αύξησης της χωρητικότητας, όταν έχουμε αριθμό αγωγών μεγαλύτερο από 10-15. Η μείωση αυτή ερμηνεύεται από το γεγονός της αμοιβαίας εξουδετέρωσης των χωρητικότητων μεταξύ τους. Είναι προφανές ότι αυξάνοντας τον αριθμό των αγωγών κορυφής προς το άπειρο, θα φτάσουμε στο όριο της χωρητικότητας, που θα αντιστοιχεί σε ένα περίπου κωνικό φορτίο κεραίας.

Περιγραφή Γεωμετρίας Αγωγών Κορυφής	Συνολική Χωρητικότητα Κεραίας (nF)
Σύνηθες φορτίο 24 αγωγών κορυφής. (Περίπτωση 1)	22,30
Αφαίρεση 2 αγωγών από την υπάρχουσα κατάσταση και μετακίνηση 4 αγωγών κορυφής στα σύνορα του ελεύθερου κυκλικού τομέα κατά $7,5^{\circ}$ (Ελεύθεροι τομείς $\pm 22,5^{\circ}$). (Περίπτωση 3)	21,10
Αφαίρεση 6 αγωγών από την υπάρχουσα κατάσταση (18 αγωγοί κορυφής με δύο αντιδιαμετρικούς ελεύθερους τομείς $\pm 30^{\circ}$ και $180^{\circ} \pm 30^{\circ}$). (Περίπτωση 5)	19,12
Αφαίρεση 2 αγωγών και πρόσθεση 4 αγωγών κορυφής στις γωνίες $\pm 22,5$, $\pm 37,5$ και αντιδιαμετρικά (Σύνολο αγωγών κορυφής 26 και οι ελεύθεροι τομείς είναι στις θέσεις $\pm 15^{\circ}$ και $180 \pm 15^{\circ}$). Το μήκος των νέων αγωγών είναι 370 m. (Περίπτωση 7)	21,83

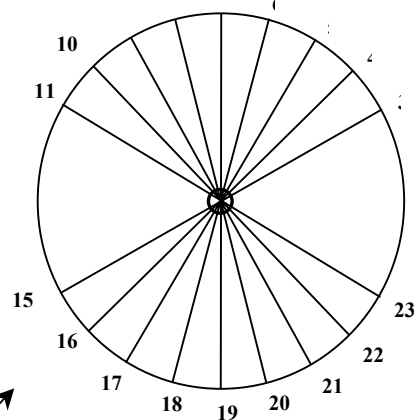
Πίνακας 2: Τροποποιήσεις συμμετρικής κεραίας με τις αντίστοιχες τιμές χωρητικότητας (Οι περιπτώσεις που αναφέρονται στις παρενθέσεις αφορούν στο Σχήμα 8).



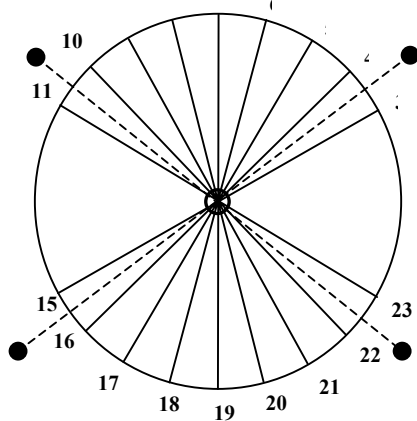
Σχήμα 7(α): Σχηματικά διαγράμματα τροποποιήσεων αρχικής συμμετρικής κεραίας σε κεραίες με ασυμμετρικά φορτία κορυφής.



Περίπτωση 1: $C=22,2986$ nF
Υπάρχουσα Κεραία

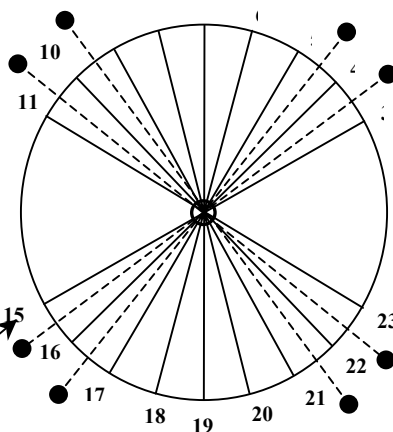


Περίπτωση 5: $C=19,118$ nF



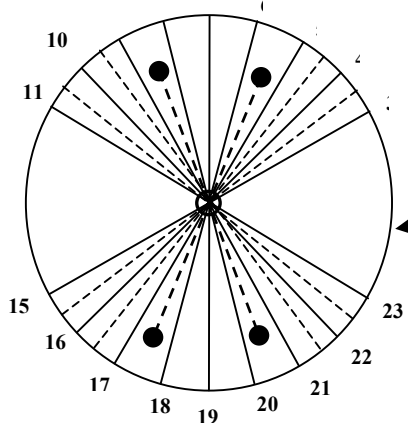
Περίπτωση 6: $C=20,6296$ nF

Ελεύθεροι
τομείς 60° .
Οι αγωγοί
μεγαλύτερου
μήκους είναι
337m.



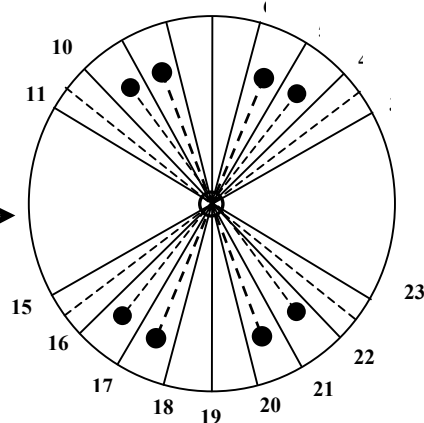
Περίπτωση 7: $C=21,8287$ nF

Ελεύθεροι τομείς
 30° .
Οι αγωγοί
μεγαλύτερου
μήκους είναι
370m.



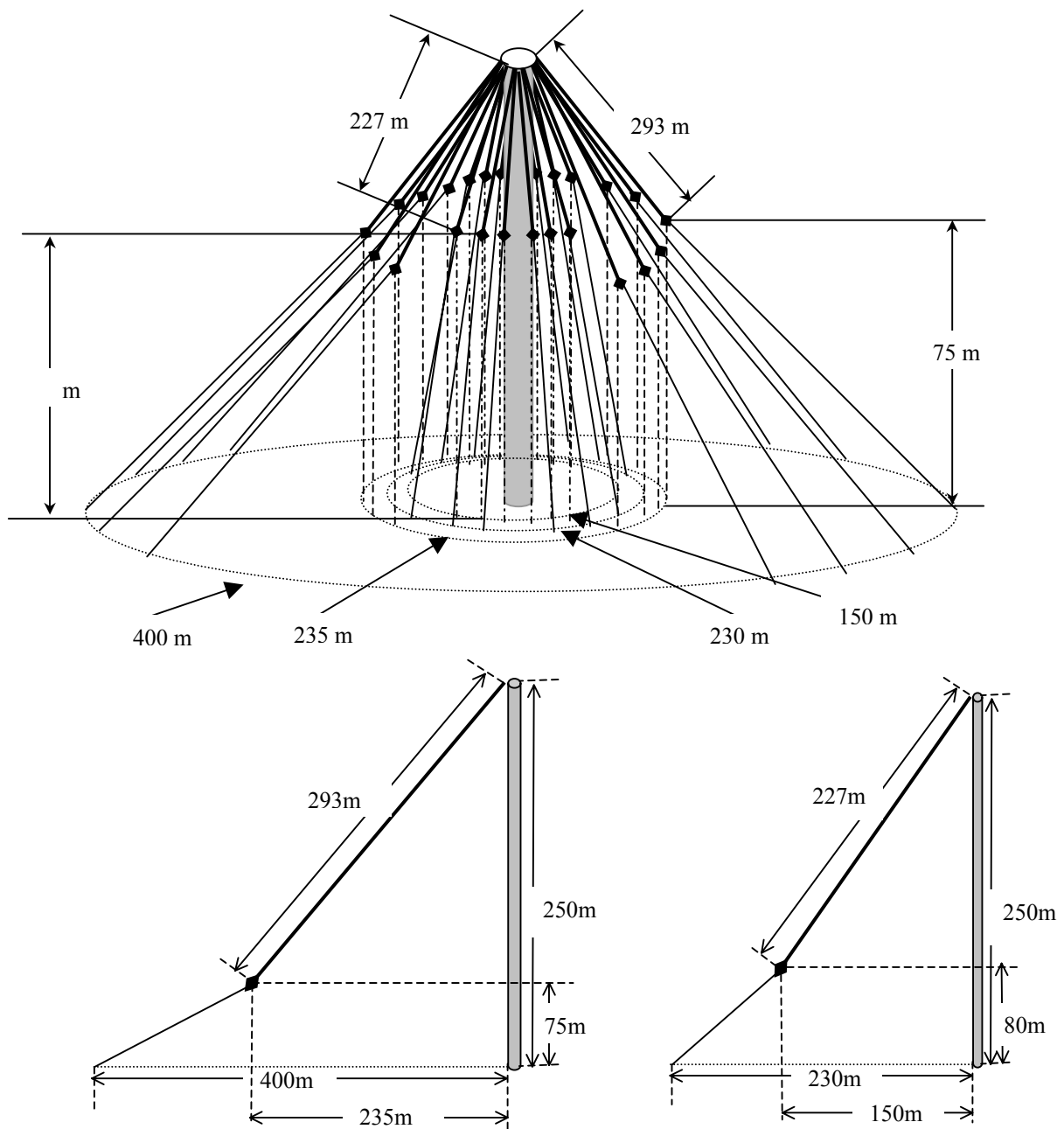
Περίπτωση 8: $C=22,6887$ nF

Ελεύθεροι
τομείς 60° . Οι
αγωγοί
μικρότερου
μήκους είναι
227 m.



Περίπτωση 9: $C=22,21975$ nF

Σχήμα 7(β): Σχηματικά διαγράμματα τροποποιήσεων αρχικής συμμετρικής κεραίας σε κεραίες με ασυμμετρικά φορτία κορυφής (Συνέχεια).



Σχήμα 8: Η τροποποιημένη κεραία με ασυμμετρικό φορτίο κορυφής (Βράχυνση 6+6 συμμετρικών αγωγών φορτίου κορυφής).

Είναι ανάγκη να τονίσουμε ότι:

- A) Πραγματοποιήσαμε τους υπολογισμούς θεωρώντας τους αγωγούς κορυφής ευθύγραμμους. Αν και η μέθοδος των “Βοηθητικών Πηγών” επιτρέπει τον υπολογισμό για την “Καμπύλη Αλυσίδα” εκτιμάται η σχετική σύγκριση των χωρητικοτήτων επιτρέπει την παραπάνω ακολουθούμενη μέθοδο.
- B) Είναι σαφές ότι η υπερβολική αύξηση του αριθμού των αγωγών κορυφής επηρεάζει αρνητικά την απόδοση ακτινοβολίας της κεραίας, καθώς αυξάνεται η ποσότητα της αποθηκευμένης ηλεκτρικής ενέργειας στο περιβάλλον της κεραίας και, κατ’ επέκταση, οι απώλειες στο περιβάλλον του εδάφους.

3. Προσθήκη νέων αγωγών στον Τομέα των μακρών αγωγών

Εξετάστηκαν διάφορες περιπτώσεις προσθήκης αγωγών στους δύο τομείς των μακρών (αρχικών) αγωγών. Για παράδειγμα, σε περίπτωση προσθήκης 2+2 αγωγών πολύ μεγάλου μήκους στον τομέα αυτό με συνολικό ενεργό μήκος 337m, που προσγειώνονται σε απόσταση 500 m από την κεραία, προκύπτει η χωρητικότητα $C_3=20,63$ nF [Περίπτωση 6 του Σχήματος 7(β)]. Ένα άλλο παράδειγμα που αναφέρεται στον Πίνακα 2 είναι η αφαίρεση 2 αγωγών και η πρόσθεση 4 αγωγών κορυφής στις γωνίες $\pm 22,5$, $\pm 37,5$ και αντιδιαμετρικά δημιουργώντας ένα σύνολο αγωγών κορυφής 26 με ελευθέρους τομείς 30° . Το μήκος των νέων μακρών αγωγών είναι 370 m (Περίπτωση 7). Αυτή η λύση δίνει χωρητικότητα 21,83 nF, πολύ κοντά στην αρχική.

Επειδή, όμως, από στατικής πλευράς η προσθήκη μακρών αγωγών δεν είναι επιθυμητή, δεν υιοθετήθηκε μια τέτοια λύση.

4. Περιγραφή διαφορετικών διατάξεων τροποποιημένης κεραίας

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών για διάφορες περιπτώσεις. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται είναι ενδεικτικά, αφού μπορεί κανείς να δημιουργήσει πολλαπλούς αγωγούς αγωγών κορυφής, για να επιτύχει την ίδια επιθυμητή χωρητικότητα με την παρούσα κατάσταση. Στο Σχήμα 7 παρουσιάζονται διάφορα αποτελέσματα υπολογισμών που επιβεβαιώνουν την πολλαπλότητα των λύσεων.

Οι εκτενείς υπολογισμοί που έχουν γίνει δείχνουν τη δυνατότητα επίτευξης της ίδιας περίπου χωρητικότητας με την κατάλληλη μετακίνηση και προσθήκη αγωγών.

Γ. Προτεινόμενη λύση για την κεραία με ασυμμετρικό φορτίο κορυφής

Η βέλτιστη επιλογή λύσης φαίνεται να είναι η επιλογή 1 της υποενότητας Β (να βραχυνθούν κατά 70 μέτρα οι $6+6=12$ αγωγοί), όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 8. Σύμφωνα με την επιλογή αυτή, η σημερινή χωρητικότητα της κεραίας (θεωρητική τιμή) θα μειωθεί κατά 2.87 nF. Επομένως, η αλλαγή είναι περίπου 15% μείωση. Η διαφορά αυτή θα επηρεάσει το φανταστικό μέρος της σύνθετης αντίστασης X_Σ κατά 15%. Επομένως, απαιτείται αύξηση της συνολικής φανταστικής αντίστασης ($L1+L2$) του πηνίου στην ATU κατά 15% από τη σημερινή θέση λειτουργίας, πράγμα που είναι διαθέσιμο άμεσα, λαμβανομένης υπόψη της αυτόματης μεταβολής της τιμής της αυτεπαγωγής του πηνίου L1 (Σχήμα 4).

V. Ηλεκτροδυναμική συμπεριφορά της τροποποιημένης κεραίας

Η ανάλυση της ηλεκτροδυναμικής συμπεριφοράς της υπό μελέτη διάταξης ακτινοβολίας-κεραίας VLF επιτεύχθηκε επίσης με τη χρήση της μεθόδου των “Βοηθητικών Πηγών”. Στην περίπτωση αυτή, όλο το συγκρότημα των ενεργών αγωγών, που αποτελείται από τον πύργο και τους αγωγούς κορυφής, διεγείρεται με την εφαρμογή παλλόμενης τάσης στη σχισμή που δημιουργείται με την επιφάνεια της γης. Ο ρόλος του αγωγίμου πύργου και του φορτίου κορυφής είναι να “κυματοδηγήσουν” ή, πιο σωστά, να “συζεύξουν” την επιβαλλόμενη στην κεραία ισχύ σε ακτινοβολούμενο κύμα. Για την εύρεση της έντασης ηλεκτρικού ρεύματος που διεγείρεται στον πύργο και τους αγωγούς φορτίου κορυφής, θα πρέπει να λυθεί ένα δύσκολο πρόβλημα οριακών συνθηκών, που συνιστάται στην ικανοποίηση οριακών συνθηκών πάνω στην επιφάνεια της κεραίας. Η επίλυση προβλημάτων ακτινοβολίας με αυστηρό τρόπο επιτεύχθηκε για πρώτη φορά τη δεκαετία του 1970, όταν άρχισε η ευρεία χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών. Μέχρι την εποχή εκείνη αλλά ακόμη και σήμερα πολλές φορές χρησιμοποιούνται προσεγγιστικές μέθοδοι στην ανάλυση κεραίων, με την εφαρμογή των αρχών που έχουν ήδη αναφερθεί στην ενότητα I της παρούσας μελέτης.

Για την εκτέλεση των υπολογισμών στα πλαίσια της παρούσας μελέτης χρησιμοποιήθηκε, όπως και στην περίπτωση του ηλεκτροστατικού προβλήματος, η μέθοδος των “Βοηθητικών Πηγών”. Η αρχή

της μεθόδου βασίζεται στην “τοποθέτηση” ισοδύναμων διπολικών πηγών εντός των αγωγίμων κυλίνδρων (πύργος και φορτία κορυφής) και, στη συνέχεια, στον υπολογισμό της βαρύτητας των “Βοηθητικών Πηγών” με την ικανοποίηση των οριακών συνθηκών στις επιφάνειες των αγωγών, πλην της σχισμής στη βάση της κεραίας, όπου επιβάλλεται η τάση εξωτερικά (προερχόμενη από τον πομπό). Η ικανοποίηση των οριακών συνθηκών μάς οδηγεί στον προσδιορισμό των εντάσεων των “Βοηθητικών Διπολικών Πηγών” και, στη συνέχεια, του ηλεκτρικού ρεύματος που ρέει στην επιφάνεια του αγωγίμου πύργου καθώς επίσης βέβαια και στους αγωγούς του φορτίου κορυφής, αν αυτό είναι επιθυμητό. Η παρουσία της επιφάνειας της γης λαμβάνεται υπόψη με τη θεωρία των ειδώλων. Τα κύρια ηλεκτροδυναμικά χαρακτηριστικά της κεραίας VLF είναι:

- α) Η αντίσταση ακτινοβολίας $R_{ακτ}$
- β) Η αντίσταση απωλειών $R_{απ}$
- γ) Το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας
- δ) Η απολαβή της κεραίας

Στη συνέχεια εξετάζουμε τις επιπτώσεις στα παραπάνω μεγέθη, λόγω της τροποποίησης της κεραίας VLF.

A. Αντίσταση ακτινοβολίας

Η αντίσταση ακτινοβολίας $R_{ακτ}$ αναφέρεται στην ιδιότητα της κεραίας να επάγει ακτινοβολούμενη ενέργεια. Η αντίσταση $R_{ακτ}$ βάσει της σχέσης

$$P_{ακτ} = \frac{1}{2} R_{ακτ} |I|^2 \quad (12)$$

καθορίζει την ποσότητα ισχύος $P_{ακτ}$ (W), που εκπέμπεται από την κεραία όταν το ρεύμα στη βάση της κεραίας έχει πλάτος $|I|$. Η τιμή της $R_{ακτ}$ δίνεται από τη σχέση [2]:

$$R_{ακτ} = 160\pi^2 \left(\frac{h_e}{\lambda} \right)^2 \quad (13)$$

όπου h_e = ισοδύναμο ύψος της κεραίας και
 λ = μήκος κύματος ακτινοβολίας.

Το ισοδύναμο ύψος της κεραίας h_e καθορίζεται από τη σχέση:

$$h_e = \frac{1}{|I|} \int_0^h dz I(z) \quad (14)$$

όπου

$$I(z) = |I| \sin(k_0(z - (h + h'))) \quad (15)$$

είναι η ποσότητα του συνολικού ρεύματος (Ampere) που ρέει στην επιφάνεια του πύργου 250 m, $h=250m$ ενώ h' δείχνει το συνολικό μήκος των αγωγών φορτίων κορυφής (για τη δημιουργία χωρητικότητας). Στην τροποποιημένη κεραία $h \approx \frac{227 + 293}{2} = 260m$, επειδή χρησιμοποιούνται

δύο μήκη αγωγών. Με τη διατήρηση της χωρητικότητας κορυφής περίπου ίδιας, η μεταβολή στην αντίσταση ακτινοβολίας είναι ασήμαντη. Το γεγονός αυτό έχει επιβεβαιωθεί με εκτενείς υπολογισμούς, καθώς επίσης και με πειραματικές μετρήσεις σε κεραίες μοντέλα που έχουν κατασκευαστεί για τον ίδιο σκοπό [1].

Στην εξ. (13), αν θέσουμε τις τιμές $h_e=250\text{m}$ και $\lambda=6\text{Km}$ ($f=50\text{KHz}$), προκύπτει η αντίσταση ακτινοβολίας:

$$R_{\text{ακτ}}=1,37\Omega \quad (16)$$

Β. Αντίσταση απωλειών

Η αντίσταση απωλειών οφείλεται στις ωμικές απώλειες που προκαλούνται στα κυκλώματα προσαρμογής της κεραίας (Σχήμα 4), στη θέρμανση του πύργου και, τέλος, στο γεγονός ότι η ροή ακτινωτών ρευμάτων στην επιφάνεια της γης, ξεκινώντας με κέντρο τη βάση της κεραίας, δημιουργεί θέρμανση του εδάφους. Η βράχυνση των αγωγών του φορτίου κορυφής στους δύο τομείς $90^\circ+90^\circ$ έχει ως συνέπεια τη συρρίκνωση τοπογραφικά του ηλεκτρικού πεδίου σε σύγκριση με τους δύο υπόλοιπους τομείς $90^\circ+90^\circ$, των οποίων οι αγωγοί παραμένουν ίδιοι.

Στην επόμενη ενότητα παρουσιάζονται οι υπολογισμοί που έχουν γίνει για την επιφάνεια της γης. Η τοπογραφική συρρίκνωση του εγγύς πεδίου είναι περίπου κατά 170m. Οι ωμικές απώλειες που επάγονται στο εγγύς πεδίο στο έδαφος υπολογίζονται από τη σχέση [2]

$$P_{\text{απ,εδ}} = \int_0^{2\pi} d\phi \int_{\rho=0}^{A(\phi)} \rho d\rho |J_S^\rho|^2 R_{\text{εδ}} \quad (17)$$

όπου $R_{\text{εδ}} = \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{2\sigma}}$ είναι η επιφανειακή αντίσταση του εδάφους, $\omega=2\pi f$ η κυκλική συχνότητα

ακτινοβολίας, σ = η ισοδύναμη αγωγιμότητα του εδάφους, $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m και $|J_S(\rho)|$ το ακτινωτό επιφανειακό ρεύμα της γης. Οι συντεταγμένες ϕ και ρ είναι στην επιφάνεια της γης. Το όριο ολοκλήρωσης $A(\phi)$ στην τροποποιημένη κεραία δεν είναι κύκλος αλλά καθορίζεται από τα όρια των προβολών του τέλους των αγωγών φορτίου κορυφής. Η παραπάνω ανάλυση δείχνει, κατ' αρχάς, ότι ενώ η ρευματική επιφανειακή πυκνότητα $|J_S(\rho)|$ θα αυξάνεται στους τομείς βράχυνσης των αγωγών κορυφής, παράλληλα η μείωση του ορίου ολοκλήρωσης θα μειωθεί στην τιμή $P_{\text{απ}}$, επομένως δεν αναμένεται σημαντική αλλαγή της αντίστασης απωλειών $R_{\text{απ}}$. Ωστόσο, επειδή η αύξηση της επιφανειακής αγωγιμότητας βελτιώνει γενικότερα τη συμπεριφορά της κεραίας, προτείνεται η αύξηση των ακτινωτών αγωγών γείωσης της κεραίας VLF. Το μέτρο αυτό θα αυξήσει την απόδοση της κεραίας. Αυτή η προτεινόμενη βελτίωση των ακτινωτών αγωγών διατυπώνεται με σαφήνεια κατωτέρω, στην ενότητα VI της παρούσας μελέτης.

Γ. Διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας

Η κεραία VLF, όπως ήδη έχει αναφερθεί, λειτουργεί ως ένας ακτινοβολητής πολύ μικρού μεγέθους σε σύγκριση με το μήκος κύματος και, επομένως, το διάγραμμα ακτινοβολίας του ταυτίζεται με αυτό ενός Herzian μονόπολου, τοποθετημένου στην επιφάνεια της γης, και έχει τη γνωστή εξάρτηση $\cos\psi$ από τη γωνία ανύψωσης ψ (μετρούμενης από την επιφάνεια της γης σε κατακόρυφο επίπεδο). Επομένως, η ακτινοβολούμενη ισχύς είναι ομοιοκατευθυντική στο αζιμούθιο (οριζόντιο επίπεδο) ενώ στο κατακόρυφο επίπεδο είναι

$$P_{\text{ακτ}}(\psi) = P_{\text{ακτ}}(\psi = 0) \cos^2(\psi) \quad (18)$$

Η αλλαγή του φορτίου κορυφής δεν έχει καμία επίδραση στο διάγραμμα ακτινοβολίας.

Δ. Απολαβή της κεραίας

Η απολαβή της κεραίας σε απόλυτη τιμή εξαρτάται από δύο παράγοντες σε μορφή γινομένου

$$G=G_0n \quad (19)$$

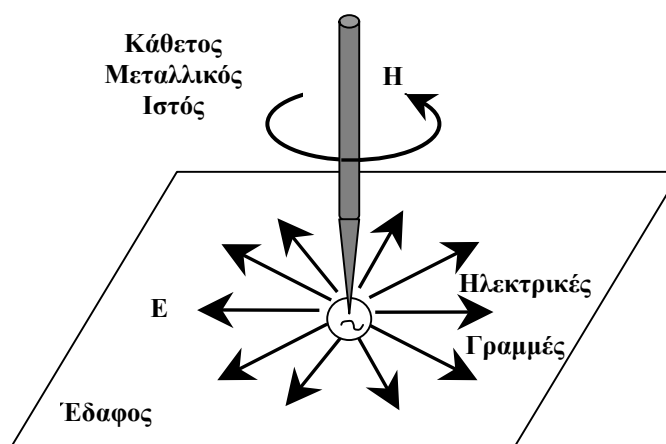
όπου G_0 είναι το κέρδος μιας ιδανικής κεραίας με 100% απόδοση και η η απόδοση της κεραίας που δίνεται στη σχέση (10). Η τιμή G_0 καθορίζεται από τις ιδιότητες του διαγράμματος ακτινοβολίας της προηγούμενης υποενότητας και, επομένως, δεν επηρεάζεται από τη γεωμετρία του φορτίου κορυφής. Με τη βελτίωση του πλέγματος γείωσης στους τομείς των αγωγών φορτίου κορυφής που θα βραχυνθούν, εκτιμάται ότι θα βελτιωθεί η απόδοση η της κεραίας VLF κατά 1.64 φορές και, επομένως, αναμένεται μια αύξηση κατά 2 dB της πραγματικής απολαβής της κεραίας από το σημερινό επίπεδο.

VI. Σχεδίαση Πλέγματος Γείωσης

A. Αρχές Σχεδίασης Πλέγματος Γείωσης για Χαμηλές Συχνότητες

Η χρήση κάθετων μεταλλικών πύργων στην επιφάνεια της γης υπήρξε από την αρχή της ανάπτυξης της ραδιοτεχνολογίας η βασική μορφή ακτινοβολητή. Τη διάταξη αυτή μελέτησαν από πολύ νωρίς κορυφαίοι φυσικοί, όπως ο Hertz (1880) και ο Sommerfeld (1896) πειραματικά και θεωρητικά, αντίστοιχα. Ο Marconi, που υπήρξε πρωτοπόρος στην ανάπτυξη της τεχνολογίας στον τομέα των ραδιοεπικοινωνιών, χρησιμοποίησε ευρύτατα διατάξεις μεταλλικών πύργων για εκπομπή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Όλες αυτές οι εκτεταμένες μελέτες ανέδειξαν τη σημασία της αγωγιμότητας του εδάφους που βρίσκεται γύρω από το κάθετο μονόπολο, που τροφοδοτείται από μια πηγή τάσης στη βάση του ιστού ως προς το έδαφος.

Όπως δείχνουμε στο Σχήμα 9, οι ηλεκτρικές γραμμές, που ξεκινούν από το μεταλλικό ιστό που διεγείρεται, κατευθύνονται κάθετα στη γη ενώ οι μαγνητικές γραμμές, όπως φαίνεται στο ίδιο Σχήμα, στροβιλίζουν γύρω από τον ιστό. Συνέπεια της πεδιακής αυτής κατανομής που «αναπνέει» με τη συχνότητα ταλάντωσης ακτινοβολίας f είναι η δημιουργία ακτινικών ρευμάτων στην επιφάνεια του εδάφους. Τα ρεύματα αυτά πηγάζουν από τη βάση της κεραίας και «συμπορεύονται» με το ακτινοβολούμενο πεδίο μακριά από την κεραία. Ειδικά, κοντά στην κεραία σε ακτίνα περίπου όσο το ύψος της κεραίας (π.χ. στη συγκεκριμένη περίπτωση περίπου 250 m) έχουμε «αποθήκευση» της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας που μεταβάλλεται από ισχυρά μαγνητική σε ηλεκτρική με περίοδο ταλάντωσης $T=1/f$. Στην περιοχή αυτή όπου έχουμε ισχυρά αποθηκευμένη ενέργεια, η παρουσία υλικών μέσων που έχουν την ιδιότητα απορρόφησης ενέργειας έχει ως αποτέλεσμα την αφαίρεση από την ακτινοβολούμενη ισχύ σημαντικού ποσοστού ισχύος με την απελευθέρωση θερμικής ενέργειας στην ύλη. Στη συγκεκριμένη περίπτωση των κεραιών χαμηλών συχνοτήτων, το υλικό μέσο που απορροφά ηλεκτρομαγνητική ενέργεια είναι το έδαφος γύρω από την κεραία.



Σχήμα 9: Γεωμετρία κάθετου μονόπολου.

Η λεπτομερής μελέτη της συμπεριφοράς των πεδίων γύρω από ένα κάθετο μονόπολο μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι βασικοί μηχανισμοί απορρόφησης ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας στην περίπτωση κάθετου μονοπόλου είναι δύο:

- A) Απορρόφηση λόγω ακτινικών ρευμάτων στην επιφάνεια της γης που σχετίζεται με το μαγνητικό πεδίο, που στροβιλίζεται γύρω από τον ιστό.
- B) Απορρόφηση λόγω των κάθετων στην επιφάνεια της γης ρευμάτων που επάγονται, εξαιτίας του κατακόρυφου ηλεκτρικού πεδίου μέσα στο έδαφος.

Η τοποθεσία ενός σωστά σχεδιαζόμενου πλέγματος γείωσης αποσκοπεί στο να ελαχιστοποιήσει τους παραπάνω δύο τύπους απορρόφησης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Παρακάτω αναλύουμε τα βασικά στοιχεία των δύο αυτών μηχανισμών.

1. Απορρόφηση λόγω Ακτινικών Ρευμάτων

Ο υπολογισμός της απορρόφησης λόγω των επιφανειακών ακτινωτών ρευμάτων επιτυγχάνεται με βάση τη θεωρία διαταραχών [3] και τη χρήση της σχέσης

$$P_H = \iint \rho d\rho d\phi R'_H H_\phi^2 \quad (20)$$

όπου H_ϕ είναι το μαγνητικό πεδίο στην επιφάνεια της γης (A/m), P_H η απορροφούμενη ισχύς (W), R'_H το πραγματικό μέρος της αντίστασης (Ω), και ρ και ϕ είναι οι πολικές συντεταγμένες στην επιφάνεια της γης. Η επιφανειακή αντίσταση R'_H εξαρτάται από την αγωγιμότητα του εδάφους σ (S/m) και τα χαρακτηριστικά των αγωγών γείωσης. Σε περίπτωση που έχουμε N αγωγούς γείωσης εντός του εδάφους με διάμετρο και απόσταση μεταξύ των αγωγών ρ , η επιφανειακή αντίσταση είναι:

$$R'_H \cong 10^{-6} \rho^2 N^{-2} f^2 \sigma^{-\frac{1}{2}} \quad (21)$$

όπου f η συχνότητα ακτινοβολίας και N ο αριθμός των ακτινωτών αγωγών. Η σχέση (16) ισχύει όταν οι αποστάσεις των αγωγών ρ είναι μικρότερες από το βάθος διείσδυσης της ακτινοβολίας (ισχύει απόλυτα στην περίπτωσή μας).

Επίσης η σχέση (20) ισχύει μόνο για την περίπτωση αγωγών γείωσης, ενώ για την περιοχή έξω από την περιοχή του πλέγματος γείωσης η επιφανειακή αντίσταση ορίζεται από την αγωγιμότητα του εδάφους και δίδεται από τη σχέση:

$$R'_{H>} = 2 \cdot 10^{-3} f^2 \sigma^{-\frac{1}{2}} \quad (22)$$

Το μαγνητικό πεδίο κοντά στην κεραία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$H_\phi \approx \frac{I_0}{2\pi} \frac{h}{\rho(\rho^2 + h^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (23)$$

όπου I_0 το ρεύμα βάσης της κεραίας και h το ύψος του μονόπολου.

Χρησιμοποιώντας τις εξ. (21), (22) και (23) στην (20), έχουμε το αποτέλεσμα

$$P_H = \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\rho_0} \rho d\rho H_\phi^2 R'_{H<} + R'_{H>} \int_0^{2\pi} d\phi \int_{\rho_0}^{\infty} \rho d\rho H_\phi^2 \quad (24)$$

όπου ρ_0 η ακτίνα του πλέγματος γείωσης.

Με την εκτέλεση των πράξεων και ορίζοντας τη συνολική αντίσταση γείωσης $R_{\Theta H}$ ακτινωτών αγωγών:

$$R_{\Theta H} = \frac{P_H}{I_0^2} \quad (25)$$

προκύπτει το αποτέλεσμα

$$R_{\Theta H} = \frac{10^{-6} f^{\frac{3}{2}} \sigma^{\frac{1}{2}} \rho_0^2}{2\pi N^2} + \frac{10^{-3} f^{\frac{1}{2}} \sigma^{-\frac{1}{2}}}{2\pi} \left(\frac{h}{\rho_0} \right)^2 \quad (26)$$

Η σχέση (26) έχει ιδιαίτερη σημασία εφόσον καθορίζει την κύρια συνιστώσα απωλειών της συνολικής αντίστασης της κεραίας. Για να υπολογίσουμε την παραπάνω αντίσταση, θέτουμε τις τιμές που ισχύουν (παρουσιάζονται στην επόμενη υποενότητα) και προκύπτει το αποτέλεσμα

$$R_{\Theta H} = 3,37 \Omega \quad (27)$$

2. Απορρόφηση λόγω κατακόρυφου Ηλεκτρικού Πεδίου

Δεύτερος μηχανισμός απορρόφησης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι λόγω επαγωγής κάθετου στην επιφάνεια ρεύματος κοντά στην κεραία. Οι κάθετες ηλεκτρικές γραμμές που εισέρχονται στο έδαφος επάγουν την ένταση χωρικού ρεύματος J που κατευθύνεται εντός της γης και έχει την τιμή αμέσως κάτω από την επιφάνεια του εδάφους

$$J^{(A/m^2)} = \sigma E_z^- \quad (28)$$

όπου σ είναι η γνωστή αγωγιμότητα εδάφους και E_z^- η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μέσα στο έδαφος. Αν γνωρίζουμε την ένταση πεδίου αμέσως πάνω από την επιφάνεια της γης, από το νόμο του Gauss έχουμε:

$$\varepsilon_0 E_z^+ = \varepsilon_0 \left(E_r - j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} \right) E_z^- \quad (29)$$

όπου $\varepsilon_0 = 10^{-9}/(36\pi)$ (F/m) είναι η επιδεκτικότητα του ελευθέρου χώρου, $\omega = 2\pi f$ η κυκλική συχνότητα, $E_r = 4$ (η σχετική διηλεκτρική σταθερά του εδάφους). Χρησιμοποιώντας την εξ. (29) στην (28), προκύπτει η χωρική ένταση ρεύματος

$$J = \sigma \frac{\omega \varepsilon_0}{E_r \omega \varepsilon_0 - j \sigma} E_z^+ \quad (30)$$

Για να υπολογίσουμε τις απώλειες λόγω του ρεύματος αυτού, πρέπει να λάβουμε υπόψη το βάθος που βρίσκεται το πλέγμα γείωσης, αφού στο στρώμα μεταξύ της επιφάνειας του πλέγματος θα έχουμε ισχυρό ρεύμα J . Τονίζεται ιδιαίτερα ότι το πλέγμα θα πρέπει να βρίσκεται κανονικά σε ένα βάθος 20-30cm, ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή τιμή της επιφανειακής αντίστασης R_H' που δίνεται από την εξ. (21) και αποτελεί ουσιαστικό παράγοντα στην επίτευξη μικρών απωλειών και, κατ' επέκταση, υψηλής απόδοσης της κεραίας. Στην άλλη κατεύθυνση, αν το βάθος που τοποθετείται το πλέγμα είναι μεγάλο, τότε θα έχουμε αύξηση των απωλειών, λόγω του κατακόρυφου ηλεκτρικού πεδίου που συνήθως είναι αμελητέες για βάθος 20-30cm για το πλέγμα γείωσης αποτελεί βάθος ασφάλειας ώστε να αποφευχθεί η αποκάλυψη των αγωγών γείωσης.

Οι απώλειες ισχύος λόγω E-πεδίου δίνονται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$P_E = \iint_A \bar{h} \frac{1}{\sigma} J J^* \rho d\rho d\phi \quad (31)$$

όπου J^* είναι το μιγαδικό συζυγές του J . Αντικαθιστώντας την εξ. (30) στην εξ. (31), προκύπτει:

$$P_E = \frac{\sigma(\omega E_0)^2}{\sigma^2 + (\omega E_0 E_r)^2} \iint \rho d\rho d\phi |E_z^+|^2 \bar{h} \quad (32)$$

όπου \bar{h} είναι το ισοδύναμο βάθος του πλέγματος γείωσης μέσα στο έδαφος. Για την περίπτωση του ακτινωτού πλέγματος γείωσης η μελέτη δείχνει ότι

$$\bar{h} = \frac{2\pi\rho}{N} \quad (33)$$

όταν το βάθος του πλέγματος γείωσης είναι 0,3 – 1,0m.

Το ηλεκτρικό πεδίο E_z^+ κοντά στην κεραία υπολογίζεται από τη σχέση

$$E_z^+ \cong \frac{I_0}{\omega C \rho \ln\left(\frac{h}{2a}\right)} \quad (34)$$

όπου C η χωρητικότητα της κεραίας και a η διάμετρος του ιστού.

Αντικαθιστώντας τις εξ. (33) και (34) στην (32) και λαμβάνοντας υπόψη ότι $\sigma \gg \omega E_0 E_r$, έχουμε ότι

$$P_E = \frac{(\omega E_0)^2}{\sigma} \int_{\rho=\alpha}^{2\pi} d\phi \int \rho d\rho \frac{I_0^2 \rho (2\pi)}{\omega^2 C^2 \rho^2 N \left(\ln\left(\frac{h}{2a}\right)\right)^2} \quad (35)$$

Η αντίσταση απωλειών θα είναι:

$$R_{\Theta E} = \frac{P_E}{I_0^2} = \frac{\varepsilon_0^2 (2\pi)^2 \rho_0}{\sigma C^2 N \left(\ln\left(\frac{h}{2a}\right)\right)^2} \quad (36)$$

Αντικαθιστώντας στην εξ. (36) τις τιμές: $\varepsilon_0=8,856 \times 10^{-12}$ F/m, $\sigma=10^{-2}$ S/m, $C=17 \times 10^{-9}$ F, $h=250$ m $\approx \rho_0$, $a=2$ m, έχουμε το αποτέλεσμα:

$$R_{\Theta E} \approx 0,016 \Omega \quad (37)$$

Η παραπάνω ανάλυση δείχνει ότι η κύρια συνιστώσα απωλειών αγωγιμότητας είναι η αντίσταση $R_{\Theta H}$, δηλαδή αυτή που οφείλεται στην ακτινική ροή του επιφανειακού ρεύματος. Οι απώλειες λόγω του κατακόρυφου ηλεκτρικού πεδίου είναι περίπου 350 φορές μικρότερες από τις απώλειες λόγω του επιφανειακού ρεύματος, εφόσον ισχύουν τα δεδομένα που προαναφέρθηκαν.

B. Περιγραφή του τροποποιημένου συστήματος γείωσης

Με τη βράχυνση των 6+6=12 αγωγών φορτίου κορυφής της κεραίας σε δύο συμμετρικούς τομείς, προκειμένου να έχουμε βελτίωση της απόδοσης της κεραίας όσον αφορά την ακτινοβολούμενη ισχύ, τοποθετήθηκε νέο πλέγμα γείωσης ξεκινώντας από την ακτίνα 100m μέχρι την απόσταση περίπου

225m, αποτελούμενο από 100 ακτινικούς αγωγούς με βήμα 10m. Ο λόγος που τοποθετήθηκε πλέγμα ομόκεντρων κύκλων οφείλεται στο γεγονός ότι η ασυμμετρία που απέκτησε το φορτίο κορυφής επάγει μη ακτινικά ρεύματα στα τέσσερα ίχνη του φορτίου κορυφής, όπου έχουμε μεταβολή του μήκους ακτίνων κορυφής.

VII. Περιβαλλοντολογικές Επιπτώσεις της εκπομπής από την κεραία

A. Επιδράσεις H/M ακτινοβολίας στον άνθρωπο

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται σε διεθνές επίπεδο ένα αυξημένο ενδιαφέρον εκ μέρους τόσο των απλών πολιτών όσο και των αρμόδιων κρατικών υπηρεσιών σχετικά με τις πιθανές αρνητικές επιπτώσεις της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στην υγεία του γενικού πληθυσμού και, βέβαια, των εργαζομένων σε χώρους που διαθέτουν ισχυρές εντάσεις ηλεκτρομαγνητικών πεδίων.

Επειδή τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα που αφορούν ταλαντώσεις από πολύ χαμηλές συχνότητες (πχ. 1 Hz) μέχρι το άνω όριο του ορατού φάσματος (υπεριώδης ακτινοβολία με μήκος κύματος 0.36 μm ή ισοδύναμα συχνότητα 8×10^{15} Hz) δεν προκαλούν χημικές αλλοιώσεις στα μόρια των βιολογικών οργανισμών, αποκαλούνται πολλές φορές με τον όρο μη-ιονίζουσα ακτινοβολία, με σκοπό τον απόλυτο διαχωρισμό τους από τη ραδιενεργό ακτινοβολία, που αφορά συχνότητες μεγαλύτερες από 8×10^{15} Hz και ονομάζεται ιονίζουσα ακτινοβολία.

Η μακρόχρονη μελέτη των φαινομένων αλληλεπίδρασης των βιολογικών οργανισμών με ηλεκτρομαγνητικά πεδία-κύματα (Μη-ιονίζουσα ακτινοβολία) έχει οδηγήσει στα παρακάτω κύρια συμπεράσματα:

- A) Ο κύριος μηχανισμός επίδρασης των μη-ιονιζουσών ακτινοβολιών στο ανθρώπινο σώμα έχει θερμικό χαρακτήρα. Ο μηχανισμός αυτός συνίσταται στην αύξηση της κινητικής ενέργειας των μορίων των ζώντων οργανισμών και στην αύξηση της θερμοκρασίας των ιστών που υφίστανται αυτή την επίδραση. Ο βαθμός αύξησης της θερμοκρασίας ενός ιστού που υφίσταται την επίδραση της εξωτερικής ακτινοβολίας εξαρτάται από την ποσότητα της απελευθερωμένης ισχύος μέσα στον ιστό αλλά επίσης και από το βαθμό αιμάτωσης του ίδιου του ιστού, αφού η ροή του αίματος έχει εξαιρετικές ικανότητες μεταφοράς μάζας και άρα θερμότητας. Σε περίπτωση που είτε σε τοπικό επίπεδο είτε συνολικά το ανθρώπινο σώμα θερμανθεί πάνω από $42,5^{\circ}\text{C}$, συμβαίνουν μη ανατρέψιμα φαινόμενα. Βέβαια, το γεγονός ότι η αύξηση της θερμοκρασίας γίνεται αισθητή από τον άνθρωπο εμποδίζει την εμφάνιση τέτοιων εξαιρετικών φαινομένων.
- B) Όπως φαίνεται από τα παραπάνω, η γενικότερη αποδεκτή επιστημονική άποψη είναι ότι το κύριο φαινόμενο που αφορά την επίδραση μη-ιονιζουσών ακτινοβολιών είναι θερμικού χαρακτήρα. Ωστόσο, από τα τέλη της δεκαετίας του 1970 μέχρι σήμερα πλήθος επιστημονικών δημοσιεύσεων επισημαίνουν την ύπαρξη μη-θερμικών επιδράσεων και κυρίως την πιθανή αρνητική επίδραση του μαγνητικού πεδίου του βιομηχανικού ρεύματος των 50 Hz (για την αμερικανική ήπειρο 60 Hz). Αν και πολλές επιστημονικές εργασίες ως ένα σημείο αλληλοαναιρούνται μεταξύ τους, το θέμα των πιθανών αρνητικών επιπτώσεων των μαγνητικών πεδίων 50/60Hz παραμένει ανοικτό. Επιπρόσθετα, επειδή η παρουσία ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων σε σχετικά χαμηλές συχνότητες (1 KHz – 1 MHz) έχει αποδειχτεί ότι μπορεί να αλληλεπιδρά με διάφορες βιολογικές διεργασίες, έχουν μελετηθεί σε αρκετά μεγάλο βαθμό φαινόμενα που αφορούν αυτή την περιοχή συχνοτήτων και εμφανίζονται ως μη-θερμικά φαινόμενα.

Έχοντας υπόψη τα παραπάνω, τα τελευταία 30 χρόνια διάφοροι διεθνείς οργανισμοί αλλά και κυβερνήσεις έχουν εκδώσει κατά καιρούς Κανονισμούς-Συστάσεις και Νόμους για την προστασία του γενικού πληθυσμού αλλά και των εργαζομένων από τις πιθανές αρνητικές επιδράσεις των μη-ιονιζουσών ακτινοβολιών.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση και η Ελληνική Πολιτεία πρόσφατα ενέκριναν ένα αρκετά ολοκληρωμένο νομοθετικό πλαίσιο για την προστασία από τις μη-ιονίζουσες ακτινοβολίες. Έχοντας υπόψη ότι στην παρούσα μελέτη μας ενδιαφέρει η ακτινοβολία με συχνότητα 50 KHz, τα όρια προστασίας, σύμφωνα με την ισχύουσα νομοθεσία, ορίζονται ότι είναι:

A) Ως βασικός περιορισμός, θα πρέπει το επαγόμενο ρεύμα στο ανθρώπινο σώμα σε οποιοδήποτε σημείο να έχει πυκνότητα μικρότερη από $100 \mu\text{A}/\text{m}^2$.

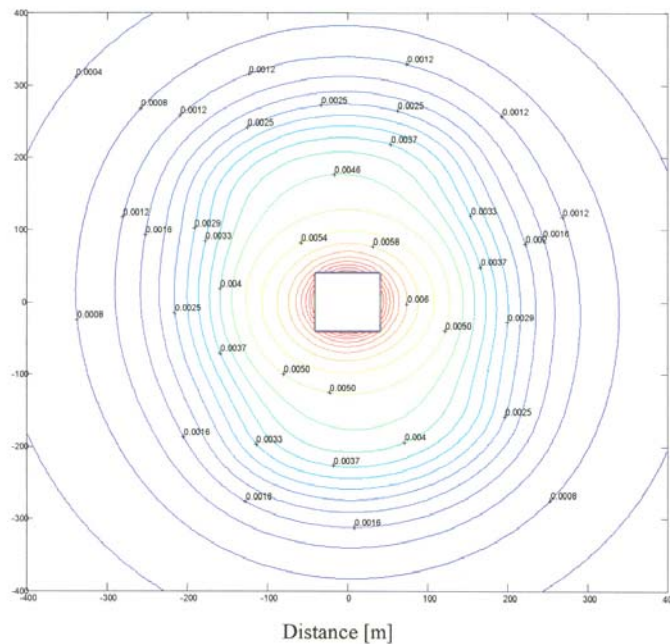
B) Επειδή η εκτίμηση του παραπάνω μεγέθους είναι πολύ δύσκολη, ο νομοθέτης έχει καθορίσει τα επίπεδα αναφοράς:

Ηλεκτρικό πεδίο: $87\text{V}/\text{m}$ (rms).

Μαγνητική Επαγωγή: $6.25 \mu\text{T}$ (rms).

Εφόσον δεν παραβιάζονται τα παραπάνω επίπεδα αναφοράς, υπάρχει πλήρης εξασφάλιση της προστασίας του γενικότερου πληθυσμού.

Έχοντας υπόψη την προηγηθείσα ανάλυση, προκύπτει η απαίτηση του λεπτομερούς υπολογισμού του ηλεκτρικού πεδίου που θα προκαλείται γύρω από την κεραία VLF και, ειδικά, όταν αυτή τροποποιείται με τη βράχυνση των αγωγών φορτίων κορυφής σε δύο τομείς 90° .



B. Υπολογισμός του Εγγύς Πεδίου της κεραίας VLF

Με τη χρήση του υπολογιστικού προγράμματος που αναπτύχθηκε με τη μέθοδο των “Βοηθητικών Ηλεκτρικών Φορτίων”, έγιναν υπολογισμοί του εγγύς πεδίου για όλες τις πιθανές υποψήφιες περιπτώσεις γεωμετρικών αγωγών φορτίων κορυφής. Οι υπολογισμοί αυτοί, μαζί με τους υπολογισμούς της χωρητικότητας καθώς επίσης και τους στατικούς υπολογισμούς, μας οδήγησαν στη συγκεκριμένη λύση που συνίσταται στη βράχυνση των 6+6 αγωγών φορτίου κορυφής. Στο Σχήμα 10 δίνουμε την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια της γης για την προτεινόμενη λύση, όταν η κεραία διεγείρεται με τάση $V=1\text{ Volt}$.

Παρατηρούμε ότι υπάρχει μία συρρίκνωση των γραμμών του ηλεκτρικού πεδίου στον τομέα βράχυνσης των αγωγών φορτίου κορυφής, πράγμα που είναι επιθυμητό για μείωση του ηλεκτρικού πεδίου στην περιοχή που τοπογραφικά είναι απαγορευτική για την ύπαρξη της κεραίας. Για να υπολογίσουμε το ηλεκτρικό πεδίο στις πραγματικές συνθήκες, όταν η κεραία εκπέμπει με πλήρη ισχύ 50 KW, υπολογίζουμε την τάση σε V (rms) (Volt) στη βάση της κεραίας, χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$P_{εκ} = \frac{|V_{rms}|^2}{R_{\Sigma}^2 + X_{\Sigma}^2} \cdot R_{\Sigma} \quad (38)$$

όπου $P_{εκ}=50\text{KW}$, $R_{\Sigma}=1.65\Omega$, $X_{\Sigma}=-105.6 \Omega$ (μείωση κατά 10% από την τιμή -117.3Ω της συμμετρικής κεραίας) και, επομένως,

$$|V_{rms}| \cong \frac{X_{\Sigma}}{\sqrt{R_{\Sigma}}} \cdot \sqrt{P_{εκ}} = 18\text{KV} \quad (39)$$

Στον Πίνακα 3 δίνουμε τις τιμές του $E(\text{V/m})$ για αποστάσεις από το κέντρο της κεραίας στην γύρω περιοχή των τομέων 90^0 , όπου έχει γίνει βράχυνση των αγωγών.

Απόσταση R(m)	E(V/m)
200	45
250	23
300	18

Πίνακας 3: Ένταση Ηλεκτρικού πεδίου συναρτήσει της απόστασης.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν δείχνουν ότι στο όριο μεταξύ του πεδίου της κεραίας VLF και του περιβάλλοντα χώρου η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι 50% μικρότερη από το πλέον αυστηρό όριο έκθεσης που ορίζει η ισχύουσα νομοθεσία στη χώρα μας.

Όσον αφορά την έκθεση στο μαγνητικό πεδίο, η τιμή του παραγόμενου πεδίου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$H_{\phi} = \frac{I}{2\pi\rho} \quad (40)$$

όπου I το ρεύμα (rms) τροφοδοσίας της κεραίας, που είναι:

$$I = \frac{50.000W}{18.000V} = 2.8A \quad (41)$$

Και για την απόσταση $\rho=200\text{m}$ από τη βάση της κεραίας έχουμε $H_{\phi}=2.2\text{mA/m}$, που είναι εξαιρετικά μικρή τιμή από το όριο 5000 mA/m , όπως ορίζεται από την ισχύουσα νομοθεσία.

Γ. Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Είναι ανάγκη να αναφερθεί ότι η ισχύουσα σήμερα νομοθεσία στην Ευρωπαϊκή Ένωση και κατ' επέκταση στην Ελληνική Δημοκρατία για τα όρια προστασίας από την Μη-Ιοντίζουσα ακτινοβολία είναι αποτέλεσμα μακρόχρονων ερευνητικών προσπαθειών και εργασιών διεθνών οργανισμών. Συγκεκριμένα, αναφέρεται ότι στις δεκαετίες 1970 και 1980 υπήρχε μεγάλη διαφοροποίηση των ορίων μεταξύ των κρατών και, ειδικά, μεταξύ αυτών που είχαν υιοθετηθεί από την π. Ε.Σ.Σ.Δ. (πολύ χαμηλά όρια) και των Η.Π.Α. Η Διεθνής Ένωση Ηλεκτρολόγων-Ηλεκτρονικών Μηχανικών (IEEE), με βάση τις συστάσεις της Διεθνούς Ένωσης Ακτινοπροστασίας (IRPA= International Radio Protection Association), το έτος 1991 καθόρισε ότι το όριο ήταν $E=600\text{V/m}$ (rms), που είναι πολύ μεγαλύτερο από το προαναφερθέν όριο 87V/m . Θα πρέπει όμως να τονιστεί ότι το όριο 87V/m είναι επίπεδο αναφοράς.

VIII. Συμπεράσματα

Η βασική δυσκολία στη σχεδίαση κεραιών Χαμηλών (LF) ή Πολύ Χαμηλών Συχνοτήτων (VLF) είναι η φυσική αδυναμία να ικανοποιηθούν ταυτόχρονα οι απαιτήσεις μεταξύ του μέγιστου πρακτικού μεγέθους της κεραίας και του μήκους κύματος της συχνότητας που πρέπει να “κυματοδηγηθεί”. Το σύστημα της κεραίας αποτελείται από τον πύργο ύψους περίπου 250 μέτρων (και ουσιαστικά πρόκειται για ένα κάθετο μονόπολο), έναν αριθμό αγωγών (24) με χωρητικό χαρακτήρα οι οποίοι αναρτώνται από την κορυφή του πύργου σε σχήμα ομπρέλας και απέχουν μεταξύ τους 15° , καθώς και το πλέγμα γείωσης σε όλη την επιφάνεια που καταλαμβάνει η κεραία. Οι αγωγοί φορτίου κορυφής έχουν μήκος μεγαλύτερο του πύργου κατά 50 μέτρα περίπου και, αφού μονωθούν σ' αυτό το μήκος, αγκιστρώνονται στο έδαφος. Η γεωμετρία του συστήματος της κεραίας είναι συμμετρική και καταλαμβάνει πολύ μεγάλο εμβαδόν επιφάνειας.

Τοπογραφικοί περιορισμοί επιβάλλουν πολλές φορές τον περιορισμό του περιβάλλοντα χώρου, με αποτέλεσμα την υποχρεωτική χρήση μη-συμμετρικού φορτίου κορυφής σε κεραίες πολύ χαμηλών συχνοτήτων. Η μελέτη του συστήματος της κεραίας με μη-συμμετρικό φορτίο κορυφής έγινε από στατική, από ηλεκτροστατικής και από ηλεκτροδυναμικής πλευράς. Από άποψη στατική, οποιαδήποτε παρεμβολή στο σύστημα της κεραίας πρέπει να γίνεται αντιδιαμετρικά, για τη διατήρηση της μηχανικής ισορροπίας του πύργου. Από άποψη ηλεκτροστατική, προκειμένου να διατηρήσουμε το ίδιο χωρητικό φορτίο, επιλέχθηκε η βέλτιστη λύση (οικονομοτεχνικά) μεταξύ πολλών, που είναι η αντιδιαμετρική βράχυνση 6+6 αντιδιαμετρικών αγωγών κατά 70 περίπου μέτρα, με χρήση της μεθόδου των “Βοηθητικών Πηγών”. Η ασυμμετρία της διάταξης των αγωγών φορτίου κορυφής διαταράσσει την ακτινική-συμμετρική ροή των επιφανειακών ηλεκτρικών ρευμάτων. Το γεγονός αυτό επιβάλλει την ανάγκη τοποθέτησης πρόσθετων αγωγών γείωσης.

Το εμβαδόν της επιφάνειας του συστήματος της κεραίας με μη-συμμετρικό φορτίο κορυφής μειώθηκε κατά 30%. Η ηλεκτροδυναμική μελέτη επιβεβαίωσε τη βελτίωση της απόδοσης της κεραίας ενώ εξετάστηκαν και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις του συστήματος της κεραίας στο κοντινό πεδίο και επιβεβαιώθηκε ότι το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο είναι στα επιτρεπτά όρια, για την προστασία του περιβάλλοντος και του προσωπικού που βρίσκεται κοντά στην κεραία.

Αναφορές

1. R. S. Zaridze, R. Jobava, G. Bit-Babik, D. Karasbadze, D. Economou and N. K. Uzunoglu, “*The Method of Auxiliary Sources and Scattered Field Singularities (Caustics)*”, Journal of Electromagnetic Waves and Applications, Vol. 12, pp. 1491-1507, 1998.
2. Ι. Φικιώρης “*Κεραίες*”, ΕΜΠ, 1992.
3. A. D. Watt, “*VLF Radio Engineering*”, Pergamon Press Inc., Oxford, 1967.

Σύντομα βιογραφικά σημειώματα

Ευαγγελία Α. Καραγιάννη. Γεννήθηκε στη Λέρο Δωδεκανήσου το 1969. Αποφοίτησε από το τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ) το 1994. Ξεκίνησε μεταπτυχιακές σπουδές στο ίδιο τμήμα και καθ' όλη τη διάρκεια των διδακτορικών της σπουδών είχε υποτροφία από τον Ειδικό Λογαριασμό Έρευνας του ΕΜΠ. Αναγορεύτηκε επίσημα διδάκτωρ ΕΜΠ το 2000. Τα ερευνητικά της ενδιαφέροντα είναι: Σχεδίαση με χρήση CAD πακέτων Μικροκυματικών κυκλωμάτων σε τεχνολογία Microwave Integrated Circuits καθώς και Microwave Monolithic Integrated Circuits μέχρι τη συχνότητα των 40 GHz, Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου, Κεραίες, Ενισχυτές, Υπεραγωγίμα Υλικά, Ηλεκτρονικό Εμπόριο. Έχει 11 επιστημονικές δημοσιεύσεις σε περιοδικά και συνέδρια και έχει συγγράψει 1 βιβλίο. Έχει εργαστεί στην Intracom, στη ΔΕΗ, στο Εργαστήριο Μικροκυμάτων και Οπτικών Ινών του Ερευνητικού και Πανεπιστημιακού Ινστιτούτου Συστημάτων Επικοινωνιών και Υπολογιστών, ως υπεύθυνη μετρήσεων καθώς και ως υπεύθυνη διαχείρισης δικτύου. Έχει εργαστεί επίσης, ως καθηγήτρια Ηλεκτρονικών, στις Στρατιωτικές Σχολές Ευελπίδων, Ναυτικών Δοκίμων και Ικάρων. Διδάσκει το μάθημα ΜΜΙC του προγράμματος Διδακτορικών-Μεταπτυχιακών Σπουδών στη Μικροηλεκτρονική του Πανεπιστημίου Αθηνών. Είναι μέλος του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας (ΤΕΕ), του Πανελλήνιου Συλλόγου Διπλωματούχων Ηλεκτρολόγων και Μηχανολόγων Μηχανικών (ΠΣΔΗΜΜ), της Ένωσης Armed Forces Communications & Electronics Association (AFCEA), του Μητρώου Εκπαιδευτών του Εθνικού Κέντρου Πιστοποίησης Δομών (ΕΚΕΠΙΣ) καθώς και της Ελληνικής Επιτροπής του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος (ESA). Σήμερα είναι Λέκτορας στη Σχολή Ναυτικών Δοκίμων.

Νικόλαος Κ. Ουζούνoglou. Γεννήθηκε στην Κωνσταντινούπολη το 1951 και αφού σπούδασε στα Ελληνικά Σχολεία της Α/θμιας και Β/θμιας εκπαίδευσης -Ζωγράφειο Γυμνάσιο- έλαβε το δίπλωμα Bachelor of Science in Electronic Engineering από το Istanbul Technical University. Στη συνέχεια, έλαβε τα διπλώματα Master of Science (1974) και Doctor of Philosophy από το Βρετανικό Πανεπιστήμιο του Essex. Εγκατέλειψε την Κων/λη λόγω των διωγμών κατά του Ελληνισμού και ήλθε στην Ελλάδα το 1976. Προσελήφθη από το Πολεμικό Ναυτικό-ΓΕΤΕΝ το 1977, όπου εργάστηκε ως Ειδικός Επιστήμων μέχρι το 1985, οπότε εκλέχθηκε Αναπληρωτής Καθηγητής στη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών. Το έτος 1981 αναγορεύθηκε Υφηγητής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου στο αντικείμενο Ηλεκτροπτικών Συστημάτων. Στην ίδια Σχολή εξελέχθηκε στη βαθμίδα του Καθηγητή το 1987. Εκλέχθηκε Πρόεδρος της ίδιας Σχολής τρεις φορές, κατά την περίοδο 1988-94. Υπήρξε Διευθυντής του Ερευνητικού Πανεπιστημιακού Ινστιτούτου Συστημάτων Επικοινωνιών και Υπολογιστών κατά την περίοδο 1991-99. Διετέλεσε επιστημονικός υπεύθυνος 40 ερευνητικών προγραμμάτων της Ευρωπαϊκής Επιτροπής και της Γενικής Γραμματείας Έρευνας και Τεχνολογίας του Υπ. Ανάπτυξης. Ο αριθμός των εργασιών του που έχουν δημοσιευθεί σε διεθνή περιοδικά με κριτές είναι 205 και έχει συγγράψει 6 βιβλία. Το ερευνητικό πεδίο του καλύπτει τα θέματα: Ηλεκτρομαγνητική Θεωρία και Εφαρμογές της, Τηλεπικοινωνίες, Συστήματα Ραντάρ και Τηλεπισκόπησης. Έχει ευρύτατη συνεργασία με τους Κλάδους των Ε.Δ. σε θέματα Ηλεκτρονικών Εφαρμογών. Είναι μέλος της Ακαδημίας Επιστημών της Αρμενίας.

Σκέδαση Η/Μ κυμάτων από τέλεια αγωγίμες κωνικές επιφάνειες

A. N. Μαγουλάς

Περίληψη

Είναι γνωστό ότι το πρόβλημα της σκέδασης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων αποτελεί ένα από τα από τα πλέον δυσεπίλυτα προβλήματα της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας και παρουσιάζει σημαντικότερο ενδιαφέρον τόσο από θεωρητική όσο και από πρακτική άποψη. Για τη αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού έχει προταθεί πλήθος τεχνικών επίλυσης, μεταξύ των οποίων και πολλές καθαρά αριθμητικές τεχνικές που κυκλοφορούν σήμερα υπό τη μορφή “υπολογιστικών πακέτων” με αμφίβολη, κατά τον γράφοντα, αξιοπιστία.

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται το πρόβλημα αυτό για την περίπτωση τέλεια αγωγίμων σωμάτων (σκεδαστών) και χρησιμοποιείται μία υβριδική (αναλυτική-αριθμητική) μέθοδος επίλυσης. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην επίλυση μίας ολοκληρωτικής εξίσωσης (MFIE- Magnetic Field Integral Equation) με άγνωστο μέγεθος την επιφανειακή πυκνότητα ρεύματος στην επιφάνεια του σκεδαστή. Για την εφαρμογή της μεθόδου επιλέγεται το γεωμετρικό σχήμα τού κώνου (πεπερασμένος κώνος), το οποίο παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον και από πρακτικής άποψης (κεφαλές πυραύλων κ.λπ.).

Αναλύοντας, συνοπτικά, τη μέθοδο αυτή αναφέρουμε τα ακόλουθα: Ο σκεδαστής είναι σώμα το οποίο μπορεί να προκύψει “εκ περιστροφής” από μία γενέτειρα καμπύλη. Η γενέτειρα αυτή καμπύλη εκφράζεται σε κυλινδρικές συντεταγμένες (ρ και z) με παράμετρο το μήκος τόξου ℓ . Η συνολική επιφάνεια του σκεδαστή χωρίζεται σε ένα αριθμό N στοιχειωδών τμημάτων με εμβαδόν ΔS , στα οποία η επιφανειακή πυκνότητα ρεύματος θεωρείται σταθερή. Ο υπολογισμός της επιφανειακής πυκνότητας ρεύματος σε κάθε στοιχείο γίνεται αθροίζοντας τις συμβολές από όλα τα υπόλοιπα αλλά και από το ίδιο, (πράγμα το οποίο συχνά αγνοείται σε πολλές μεθόδους). Η ολοκληρωτική εξίσωση μεταπίπτει τελικά σε ένα αλγεβρικό σύστημα εξισώσεων, με αγνώστους τις τιμές των επιφανειακών πυκνοτήτων ρεύματος (2 συνιστώσες) σε κάθε στοιχείο ΔS . Εφόσον είναι γνωστά τα επιφανειακά ρεύματα, μπορεί εύκολα να υπολογιστεί το πεδίο σκεδάσεως και διάφορες άλλες παράμετροι, όπως π.χ. το RCS (Radar Cross Section). Παρατίθενται αρκετά αριθμητικά αποτελέσματα της μεθόδου, για διάφορες περιπτώσεις.

Abstract

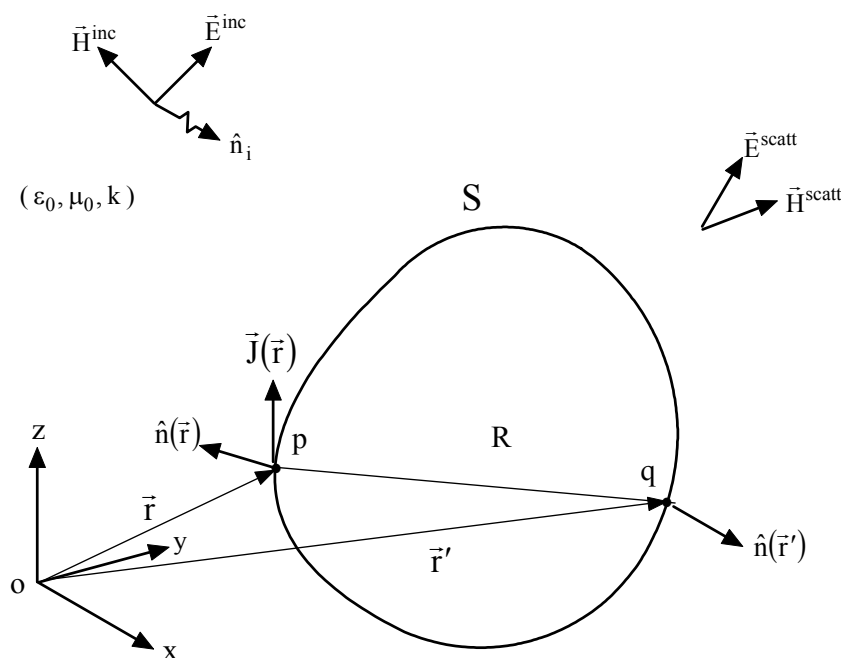
Subject of this work is the problem of scattering of electromagnetic waves from perfect conductors. A hybrid method of solving Maue's singular surface integral equation is developed. The integrals involved can be shown to be convergent for smooth enough scatterer surfaces S (for instance, when the normal on S is continuous). In this work the study is restricted to perfectly conducting scatterers without edges. As unknown serves the surface current density \vec{J} induced on S .

From this point on the analysis is further restricted to surfaces S of revolution around an axis z . In this case S is completely defined by the given functions $\rho = \rho(\ell)$, $z = z(\ell)$, where ℓ measures arc length along the generating curve on S . This description of circularly symmetric S 's by single-variable functions simplifies their representation and provides a good starting and quite general case for the analytical evaluation of certain surface integrals.

In our approach the surface S is divided into N small “trapezoidal” surface elements, or patches, ΔS . It is understood that the surface current density is practically constant over ΔS . When \vec{r} and \vec{r}' are far apart we reduce the surface integrals to trivial ones. When \vec{r} and \vec{r}' belong to the same patch the contribution to the surface integrals from the self-patch evaluated analytically using local Taylor expansions of the numerators and denominators of the integrands around the point of evaluation and retaining only their leading terms. Finally we have a system of $2N$ linear equations with unknowns J_φ and J_t , the complex components of the surface current density induced on S at the centers of the chosen patches. Once these values are known it is simple to compute scattered field quantities on the basis of well-known surface integrals over S , particularly in the far field. The explicit formulas corresponding to the evaluation of the surface integrals are developed. They are then applied to the case of a cone and the results for the current $\vec{J}(\vec{r})$ and the scattered field were found in excellent agreement with existing ones.

I. Εισαγωγή: Διατύπωση του προβλήματος της σκέδασης

Στο Σχήμα 1 φαίνεται η γεωμετρία του προβλήματος της σκέδασης:



Σχήμα 1: Το πρόβλημα της σκέδασης.

Θεωρούμε ένα τέλεια αγωγίμο σώμα αυθαιρέτου σχήματος, το οποίο θα αποκαλούμε σκεδαστή, και ονομάζουμε S την εξωτερική επιφάνεια του σώματος αυτού. Στο σώμα (σκεδαστή) έχουμε πρόσπτωση ενός γνωστού επιπέδου H/M κύματος $\vec{E}^{inc}, \vec{H}^{inc}$. Στην επιφάνεια S του σκεδαστή επάγεται επιφανειακή πυκνότητα ρεύματος $\vec{J}(\vec{r})$ A/m, η οποία είναι και το άγνωστο μέγεθος του προβλήματος. Η επιφανειακή αυτή πυκνότητα ρεύματος δημιουργεί ένα νέο πεδίο, το πεδίο σκέδασης $\vec{E}^{scat}, \vec{H}^{scat}$. Η γνώση της επιφανειακής πυκνότητας ρεύματος επιτρέπει τον εύκολο υπολογισμό του πεδίου αυτού και διαφόρων άλλων παραμέτρων σχετικών με τον σκεδαστή, όπως το RCS κ.λπ. Η επιφανειακή αυτή πυκνότητα μπορεί να υπολογιστεί από τη λύση μιας ολοκληρωτικής εξίσωσης. Μία από τις μορφές της εξίσωσης αυτής είναι:

$$\frac{1}{2} \vec{J}(\vec{r}) - \frac{1}{4\pi} \iint_S \hat{n}(\vec{r}) \times [\vec{J}(\vec{r}') \times \nabla' G(\mathbf{R})] dS' = \hat{n}(\vec{r}) \times \vec{H}^{inc}(\vec{r}) \quad (1)$$

Όπου:

\vec{r} : διάνυσμα θέσης του σημείου υπολογισμού p της επιφανειακής πυκνότητας ρεύματος

\vec{r}' : διάνυσμα θέσης του μεταβλητού σημείου ολοκλήρωσης q

$\vec{n}(\vec{r})$: το κάθετο μοναδιαίο διάνυσμα στην επιφάνεια S στο σημείο p

$$\mathbf{R} = |\vec{r} - \vec{r}'|$$

$$G(\mathbf{R}) = \frac{e^{jkR}}{R} \quad \text{η συνάρτηση Green του ελευθέρου χώρου}$$

και $\epsilon_0, \mu_0, k = \omega\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$ οι σταθερές του εκτός S χώρου.

Η χρονική εξάρτηση στην εργασία αυτή θεωρείται ότι είναι η $e^{-j\omega t}$.

Η εξ. (1) είναι γνωστή στην βιβλιογραφία και ως εξίσωση του Maue ή ως Magnetic Field Integral Equation (MFIE).

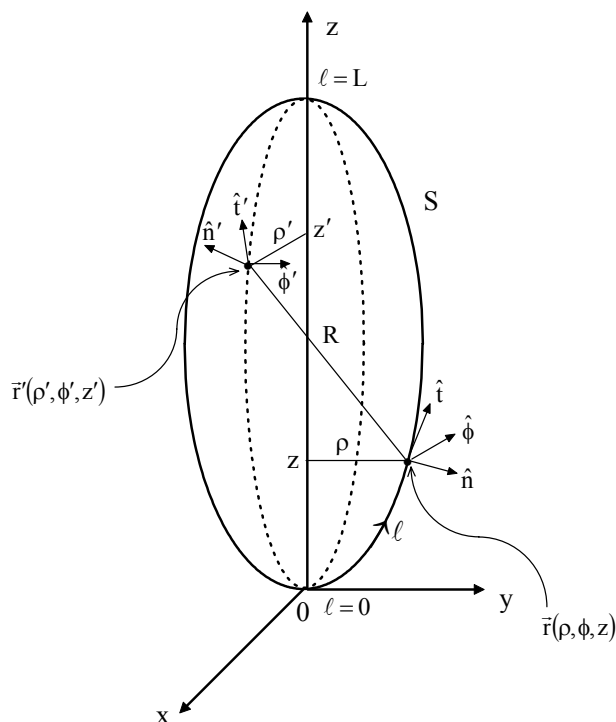
Στη μελέτη που ακολουθεί, η κλειστή επιφάνεια S θα θεωρηθεί ότι ικανοποιεί το κριτήριο της συνεχούς καθέτου $\vec{n}(\vec{r})$ σε κάθε σημείο της ή, διαφορετικά, ότι δεν θα εμφανίζει “αιχμές” ή “ακμές”. Η απαίτηση αυτή είναι απαραίτητη γιατί έτσι εξασφαλίζεται η ύπαρξη του ολοκληρώματος της εξ. (1) στην περίπτωση όπου το $p(\vec{r})$ και το $q(\vec{r}')$ συμπίπτουν κατά τη διάρκεια της ολοκλήρωσης και το ολοκλήρωμα γίνεται μη κανονικό (improper). Η πλήρης ανάλυση του θέματος αυτού εκφεύγει από τα περιορισμένα όρια της παρούσας εργασίας. Ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει για περαιτέρω εμβάθυνση στο θέμα στις βιβλιογραφικές παραπομπές [2, 3].

II. Περιγραφή υβριδικής μεθόδου για σκεδαστές εκ περιστροφής

A. Διατύπωση της ολοκληρωτικής εξίσωσης του Maue για σκεδαστές εκ περιστροφής

Στο σημείο αυτό εξειδικεύουμε τη μελέτη σε μια περίπτωση που παρουσιάζει πρακτική αξία. Συγκεκριμένα, θα θεωρήσουμε ότι η επιφάνεια S του σκεδαστή είναι επιφάνεια “εκ περιστροφής” περί άξονα z . Στην περίπτωση αυτή, διευκολύνεται σημαντικά ο τρόπος υπολογισμού του ολοκληρώματος της εξίσωσης Maue ενώ παράλληλα μπορούμε να μελετήσουμε μεγάλη ποικιλία σχημάτων σκεδαστών, μεταξύ των οποίων και ο κώνος.

Στο Σχήμα 2 φαίνεται αναλυτικά η γεωμετρία του προβλήματος.



Σχήμα 2: Επιφάνεια εκ περιστροφής.

Για τη μελέτη του προβλήματος στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούμε κυλινδρικές συντεταγμένες (ρ, ϕ, z) . Η γενέτειρα καμπύλη, από την περιστροφή της οποίας περί τον άξονα z προκύπτει η επιφάνεια S , περιγράφεται πλήρως από τις συντεταγμένες της ρ και z σε οποιοδήποτε μεσημβρινό επίπεδο. Ως ανεξάρτητη μεταβλητή, για τα ρ και z , επιλέγεται το μήκος τόξου ℓ της καμπύλης με τιμές από $\ell = 0$ έως $\ell = L$, συνεπώς η επιφάνεια S περιγράφεται από τις ανεξάρτητες μεταβλητές ℓ και ϕ .

Αρα, συνοψίζοντας, για την έκφραση της επιφάνειας S , μέσω της γενέτειρας καμπύλης, αρκούν οι συναρτήσεις $\rho(\ell)$ και $z(\ell)$.

Το κριτήριο της συνεχούς καθέτου που προαναφέραμε για την επιφάνεια S ικανοποιείται, εφόσον:

-οι παράγωγοι $\frac{d\rho(\ell)}{d\ell}$, $\frac{dz(\ell)}{d\ell}$ είναι συνεχείς συναρτήσεις

-οι δεύτερες παράγωγοι $\frac{d^2\rho(\ell)}{d\ell^2}$, $\frac{d^2z(\ell)}{d\ell^2}$ είναι φραγμένες.

Στο σημείο υπολογισμού \vec{r} έχουμε το επιφανειακό-κάθετο σύστημα αξόνων $(\hat{\phi}, \hat{t}, \hat{n})$ και, αντίστοιχα, στο μεταβλητό σημείο ολοκλήρωσης \vec{r}' το σύστημα $(\hat{\phi}', \hat{t}', \hat{n}')$.

Η άγνωστη επιφανειακή πυκνότητα ρεύματος θα έχει δύο επιφανειακές συνιστώσες και θα γράφεται:

$$\vec{J}(\vec{r}) = J_\phi(\vec{r})\hat{\phi} + J_t(\vec{r})\hat{t}$$

Πολλαπλασιάζουμε εσωτερικά την εξ. (1) επί $\hat{\phi}$ και \hat{t} και την αναλύουμε σε δύο βαθμωτές συζευγμένες ολοκληρωτικές εξισώσεις:

$$\frac{1}{2} J_{\varphi}(\vec{r}) + H_t^{\text{inc}}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi} \iint_S \left\{ -\frac{\partial G}{\partial n} [\hat{\phi}(\vec{r}) \cdot \vec{J}(\vec{r}')] + \frac{\partial G}{\rho \partial \varphi} [\hat{n}(\vec{r}) \cdot \vec{J}(\vec{r}')] \right\} dS' \quad (2)$$

$$\frac{1}{2} J_t(\vec{r}) - H_{\varphi}^{\text{inc}}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi} \iint_S \left\{ -\frac{\partial G}{\partial n} [\hat{t}(\vec{r}) \cdot \vec{J}(\vec{r}')] + \frac{\partial G}{\partial t} [\hat{n}(\vec{r}) \cdot \vec{J}(\vec{r}')] \right\} dS' \quad (3)$$

B. Αναλυτικοί υπολογισμοί των ολοκληρωμάτων (Μορφή A και B)

Οι εκφράσεις των παραγώγων $\frac{\partial G}{\partial n}$, $\frac{\partial G}{\partial t}$, $\frac{\partial G}{\rho \partial \varphi}$ όπως επίσης και των εσωτερικών γινομένων $\hat{\phi}(\vec{r}) \cdot \vec{J}(\vec{r}')$, $\hat{n}(\vec{r}) \cdot \vec{J}(\vec{r}')$, $\hat{t}(\vec{r}) \cdot \vec{J}(\vec{r}')$, που εμφανίζονται στις εξ. (2) και (3), μπορούν να γραφούν, μετά από αρκετές αλγεβρικές πράξεις, συναρτήσει των ανεξαρτήτων μεταβλητών (ℓ, φ) (για το \vec{r}) και (ℓ', φ') (για το \vec{r}').

Τα αποτελέσματα είναι:

$$\frac{\partial G}{\partial n} = -\frac{1 - jkR}{R^3} e^{jkR} \left\{ \frac{dz}{d\ell} [\rho - \rho' \cos(\varphi' - \varphi)] + \frac{d\rho}{d\ell} (z' - z) \right\} \quad (4)$$

$$\frac{\partial G}{\rho \partial \varphi} = \frac{1 - jkR}{R^3} e^{jkR} \rho' \sin(\varphi' - \varphi) \quad (5)$$

$$\frac{\partial G}{\partial t} = -\frac{1 - jkR}{R^3} e^{jkR} \left\{ \frac{d\rho}{d\ell} [\rho - \rho' \cos(\varphi' - \varphi)] - \frac{dz}{d\ell} (z' - z) \right\} \quad (6)$$

$$\text{όπου } R = \sqrt{(z'(\ell') - z(\ell))^2 + \rho^2(\ell) + \rho'^2(\ell') - 2\rho(\ell)\rho'(\ell')\cos(\varphi' - \varphi)} \quad (7)$$

$$\vec{J}(\vec{r}') \cdot \hat{\phi}(\vec{r}) = J_{\varphi}(\ell', \varphi') \cos(\varphi' - \varphi) + J_t(\ell', \varphi') \frac{d\rho'}{d\ell'} \sin(\varphi' - \varphi) \quad (8)$$

$$\vec{J}(\vec{r}') \cdot \hat{t}(\vec{r}) = -J_{\varphi}(\ell', \varphi') \frac{d\rho}{d\ell} \sin(\varphi' - \varphi) + J_t(\ell', \varphi') \left[\frac{dz}{d\ell} \frac{dz'}{d\ell'} + \frac{d\rho}{d\ell} \frac{d\rho'}{d\ell'} \cos(\varphi' - \varphi) \right] \quad (9)$$

$$\vec{J}(\vec{r}') \cdot \hat{n}(\vec{r}) = -J_{\varphi}(\ell', \varphi') \frac{dz}{d\ell} \sin(\varphi' - \varphi) - J_t(\ell', \varphi') \left[\frac{d\rho}{d\ell} \frac{dz'}{d\ell'} - \frac{dz}{d\ell} \frac{d\rho'}{d\ell'} \cos(\varphi' - \varphi) \right] \quad (10)$$

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις (4) έως (10) στις βαθμωτές ολοκληρωτικές εξ. (2) και (3), επιτυγχάνουμε τη ρητή έκφραση αυτών, συναρτήσει των μεταβλητών (ℓ, φ) και των μεταβλητών ολοκλήρωσης (ℓ', φ') .

Για τον αριθμητικό υπολογισμό των ολοκληρωμάτων των εξ. (2) και (3), η γενέτειρα καμπύλη χωρίζεται σε N_{ℓ} διαστήματα μήκους $\Delta\ell_i$, $i = 1, \dots, N_{\ell}$, όχι απαραίτητα ίσα μεταξύ τους, και, συνεπώς, η επιφάνεια S χωρίζεται σε N_{ℓ} δακτυλιοειδή τμήματα. Το i -οστό δακτυλιοειδές τμήμα χωρίζεται κατά την φ -έννοια σε $N_{\varphi i}$ ίσα μεταξύ τους διαστήματα μήκους $\rho(\ell_i) \Delta\varphi_i$ (όπου

$\Delta\varphi_i = \frac{2\pi}{N_{\varphi i}}$). Έτσι, η επιφάνεια S χωρίζεται τελικά σε $N = \sum_{i=1}^{N_\ell} N_{\varphi i}$ στοιχειώδη τμήματα

εμβαδού $\Delta S_i = \Delta\ell_i \rho(\ell_i) \Delta\varphi_i$.

Σε κάθε στοιχειώδες τμήμα ΔS_i , τα μεγέθη $J_\varphi(\vec{r})$ και $J_t(\vec{r})$ θεωρούνται σταθερά και υπολογίζονται στο κέντρο του.

Έχοντας λοιπόν N στοιχειώδη τμήματα ΔS_i , με 2 αγνώστους (J_φ, J_t) σε κάθε τμήμα, έχουμε συνολικό αριθμό αγνώστων $2N$ αλλά και $2N$ ανεξάρτητες εξισώσεις (2 εξισώσεις για κάθε τμήμα ΔS_i). Συνεπώς, καταλήγουμε σε ένα γραμμικό σύστημα εξισώσεων ($2N \times 2N$), από τη λύση του οποίου προκύπτουν οι τιμές των J_φ και J_t για κάθε τμήμα ΔS_i .

Είναι προφανές από τις (2) και (3) ότι η τιμή των $J_\varphi(\vec{r})$ και $J_t(\vec{r})$ σε κάθε στοιχειώδες τμήμα ΔS_i οφείλεται στη συνεισφορά όλων των υπολοίπων τμημάτων αλλά και τού ίδιου του τμήματος στον εαυτό του. (self-cell contribution).

Όταν τα \vec{r} και \vec{r}' βρίσκονται σε διαφορετικά στοιχειώδη τμήματα, δεν παρουσιάζεται κανένα πρόβλημα στους υπολογισμούς (δεν παρουσιάζονται απειρισμοί, αφού $R \neq 0$). Ονομάζουμε αυτό τον τρόπο έκφρασης και υπολογισμού των ολοκληρωμάτων **Μορφή Α (Mode A)**.

Όταν όμως τα \vec{r} και \vec{r}' βρίσκονται στο ίδιο στοιχειώδες τμήμα, τότε το R μηδενίζεται και τα ολοκληρώματα είναι μη κανονικά. Στην περίπτωση αυτή υπολογίζουμε τα ολοκληρώματα αναλυτικά εφαρμόζοντας την ακόλουθη διαδικασία, την οποία ονομάζουμε **Μορφή Β (Mode B)**:

Θεωρούμε και πάλι σταθερές τις τιμές των $J_\varphi(\vec{r})$ και $J_t(\vec{r})$ στο κέντρο του τμήματος. Αναπτύσσουμε τους αριθμητές και παρονομαστές των ολοκληρωτέων συναρτήσεων των (2) και (3) σε τοπικές σειρές Taylor γύρω από το σημείο \vec{r} .

Δηλαδή:

$$\rho(\ell') - \rho(\ell) = \frac{d\rho}{d\ell}(\ell' - \ell) + \frac{1}{2} \frac{d^2\rho}{d\ell^2}(\ell' - \ell)^2 + \dots$$

$$z(\ell') - z(\ell) = \frac{dz}{d\ell}(\ell' - \ell) + \frac{1}{2} \frac{d^2z}{d\ell^2}(\ell' - \ell)^2 + \dots$$

και η απόσταση R μπορεί να γραφεί προσεγγιστικά, όταν τα \vec{r} και \vec{r}' είναι κοντά [7].

$$R \cong \sqrt{(\ell' - \ell)^2 + \rho^2(\ell)(\varphi' - \varphi)^2}$$

Αρχικά, για το ολοκλήρωμα

$$\iint_{\Delta S'} \frac{\partial G}{\partial n} dS' = \iint_{\Delta S'} \frac{1 - jkR}{R^3} e^{jkR} \left\{ \frac{dz}{d\ell} [\rho(\ell) - \rho'(\ell') \cos(\varphi' - \varphi)] + \frac{d\rho}{d\ell} (z'(\ell') - z(\ell)) \right\} dS'$$

Παρατηρούμε ότι το ολοκλήρωμα αυτό εμφανίζεται στις (2) και (3) μαζί με τους όρους $[\hat{\phi}(\vec{r}) \cdot \vec{J}(\vec{r}')]$, $[\hat{t}(\vec{r}) \cdot \vec{J}(\vec{r}')]$ και επειδή $\vec{r} \approx \vec{r}'$, στην περίπτωση αυτή, λαμβάνουμε:

$$[\hat{\phi}(\vec{r}) \cdot \vec{J}(\vec{r}')] \approx J_{\phi}(\vec{r}') \quad \text{και} \quad [\hat{t}(\vec{r}) \cdot \vec{J}(\vec{r}')] \approx J_t(\vec{r}')$$

Χρησιμοποιώντας τις προσεγγίσεις $jkR \cong 0$, $e^{jkR} \cong 1$

και με αντικατάσταση των αναπτύξεων Taylor, περί το ℓ , και χρήση των σχέσεων

$$\cos(\varphi' - \varphi) = 1 - 2 \sin^2\left(\frac{\varphi' - \varphi}{2}\right) \quad \text{και} \quad dS' = \rho'(\ell') d\varphi' d\ell'$$

κάνοντας τις πράξεις και κρατώντας όρους μέχρι 2ας τάξεως, καταλήγουμε στη σχέση:

$$\iint_{\Delta S'} \frac{\partial G}{\partial n} dS' \cong -\rho(\ell) \iint_{\Delta S'} d\ell' d\varphi' \frac{1}{R^3} \left[2\rho(\ell) \frac{dz}{d\ell} \sin^2 \frac{\varphi' - \varphi}{2} + \frac{1}{2} \left(\frac{d\rho}{d\ell} \frac{d^2 z}{d\ell^2} - \frac{dz}{d\ell} \frac{d^2 \rho}{d\ell^2} \right) (\ell' - \ell)^2 \right] \quad (11)$$

Για τον υπολογισμό του ολοκληρώματος $\iint_{\Delta S'} \frac{\partial G}{\rho \partial \varphi} dS'$ λαμβάνουμε μαζί και τον όρο $[\hat{n}(\vec{r}) \cdot \vec{J}(\vec{r}')]$.

Χρησιμοποιώντας, λοιπόν, τις ίδιες προσεγγίσεις όπως πριν, έχουμε:

$$\begin{aligned} \iint_{\Delta S'} [\hat{n}(\vec{r}) \cdot \vec{J}(\vec{r}')] \frac{\partial G}{\rho \partial \varphi} dS' &\cong -J_{\phi}(\vec{r}') \frac{dz}{d\ell} \iint_{\Delta S'} \frac{1}{R^3} \rho^2(\ell) \sin^2(\varphi' - \varphi) d\ell' d\varphi' - \\ &- J_t(\vec{r}') \left[\frac{d\rho}{d\ell} \frac{d^2 z}{d\ell^2} - \frac{dz}{d\ell} \frac{d^2 \rho}{d\ell^2} \right] \iint_{\Delta S'} \frac{\rho^2(\ell) \sin(\varphi' - \varphi)}{R^3} (\ell' - \ell) d\ell' d\varphi' \quad (12) \end{aligned}$$

Τέλος, για το ολοκλήρωμα: $\iint_{\Delta S'} [\hat{n}(\vec{r}) \cdot \vec{J}(\vec{r}')] \frac{\partial G}{\partial t} dS'$, ακολουθώντας αντίστοιχη διαδικασία, έχουμε

τελικά:

$$\begin{aligned} \iint_{\Delta S'} [\hat{n}(\vec{r}) \cdot \vec{J}(\vec{r}')] \frac{\partial G}{\partial t} dS' &\cong -J_{\phi}(\vec{r}') \frac{dz}{d\ell} \iint_{\Delta S'} \frac{\sin(\varphi' - \varphi)}{R^3} (\ell' - \ell) \rho(\ell) d\ell' d\varphi' - \\ &- J_t(\vec{r}') \left[\frac{d\rho}{d\ell} \frac{d^2 z}{d\ell^2} - \frac{dz}{d\ell} \frac{d^2 \rho}{d\ell^2} \right] \iint_{\Delta S'} \frac{\rho(\ell)}{R^3} (\ell' - \ell)^2 d\ell' d\varphi' \quad (13) \end{aligned}$$

Για τον αναλυτικό υπολογισμό των ολοκληρωμάτων των (11), (12), (13) έχουμε τα ακόλουθα:

Θέτουμε: $x = \ell' - \ell$ και $y = 2\rho(\ell) \sin \frac{\varphi' - \varphi}{2} \cong \rho(\ell)(\varphi' - \varphi)$

άρα: $dx = d\ell'$ και $dy \cong \rho(\ell) d\varphi'$

επομένως $R^2 \cong x^2 + y^2$ και, τελικά, έχουμε :

$$\iint_{\Delta S'} \frac{\partial G}{\partial n} dS' \cong -\frac{1}{2\rho(\ell)} \frac{dz}{d\ell} \int_{x_-}^{x_+} dx \int_{y_-}^{y_+} \frac{y^2 dy}{(x^2 + y^2)^{3/2}} - \frac{1}{2} \left(\frac{d\rho}{d\ell} \frac{d^2 z}{d\ell^2} - \frac{dz}{d\ell} \frac{d^2 \rho}{d\ell^2} \right) \int_{y_-}^{y_+} dy \int_{x_-}^{x_+} \frac{x^2 dx}{(x^2 + y^2)^{3/2}}$$

$$\iint_{\Delta S'} [\hat{n}(\vec{r}) \cdot \vec{J}(\vec{r}')] \frac{\partial G}{\rho \partial \varphi} dS' \cong -J_{\phi}(\vec{r}') \frac{dz}{d\ell} \frac{1}{\rho(\ell)} \int_{x_-}^{x_+} dx \int_{y_-}^{y_+} \frac{y^2 dy}{(x^2 + y^2)^{3/2}} - J_t(\vec{r}') \left(\frac{d\rho}{d\ell} \frac{d^2 z}{d\ell^2} - \frac{dz}{d\ell} \frac{d^2 \rho}{d\ell^2} \right) \int_{x_-}^{x_+} x dx \int_{y_-}^{y_+} \frac{y dy}{(x^2 + y^2)^{3/2}}$$

$$\iint_{\Delta S'} [\hat{n}(\vec{r}) \cdot \vec{J}(\vec{r}')] \frac{\partial G}{\partial t} dS' \cong -J_\varphi(\vec{r}') \frac{dz}{d\ell} \frac{1}{\rho(\ell)} \int_{x_-}^{x_+} x dx \int_{y_-}^{y_+} \frac{y dy}{(x^2 + y^2)^{3/2}} - J_t(\vec{r}') \left(\frac{d\rho}{d\ell} \frac{d^2 z}{d\ell^2} - \frac{dz}{d\ell} \frac{d^2 \rho}{d\ell^2} \right) \int_{y_-}^{y_+} dy \int_{x_-}^{x_+} \frac{x^2 dx}{(x^2 + y^2)^{3/2}}$$

όπου, προφανώς:

$$x_+ = \Delta\ell'/2, \quad x_- = -\Delta\ell'/2, \quad \text{και} \quad y_+ = \rho(\ell)\Delta\phi'/2, \quad y_- = -\rho(\ell)\Delta\phi'/2$$

Εμφανίζονται δύο τύποι ολοκληρωμάτων, τα οποία μπορούν να υπολογιστούν αναλυτικά :

$$D(x_+, x_-; y_+, y_-) = \int_{x_-}^{x_+} x^2 dx \int_{y_-}^{y_+} \frac{dy}{(x^2 + y^2)^{3/2}} = y_+ \ln \frac{x_+ + \sqrt{x_+^2 + y_+^2}}{x_- + \sqrt{x_-^2 + y_+^2}} - y_- \ln \frac{x_+ + \sqrt{x_+^2 + y_-^2}}{x_- + \sqrt{x_-^2 + y_-^2}}$$

$$E(x_+, x_-; y_+, y_-) = \int_{x_-}^{x_+} x dx \int_{y_-}^{y_+} \frac{y dy}{(x^2 + y^2)^{3/2}} = -\sqrt{x_+^2 + y_+^2} + \sqrt{x_-^2 + y_+^2} + \sqrt{x_+^2 + y_-^2} - \sqrt{x_-^2 + y_-^2}$$

Μετά από τους υπολογισμούς προκύπτει ότι:

$$D(x_+, x_-; y_+, y_-) = 4y_+ \ln \frac{x_+ + \sqrt{x_+^2 + y_+^2}}{|y_+|} \quad \text{και}$$

$$E(x_+, x_-; y_+, y_-) = 0$$

Συνεπώς, οι τελικοί τύποι για την **Μορφή Β** θα είναι:

$$\iint_{\Delta S'} \frac{\partial G}{\partial n} dS' \cong -\frac{1}{2\rho(\ell)} \frac{dz}{d\ell} D(y_+, y_-; x_+, x_-) - \frac{1}{2} \left(\frac{d\rho}{d\ell} \frac{d^2 z}{d\ell^2} - \frac{dz}{d\ell} \frac{d^2 \rho}{d\ell^2} \right) D(x_+, x_-; y_+, y_-) \quad (14)$$

$$\iint_{\Delta S'} [\hat{n}(\vec{r}) \cdot \vec{J}(\vec{r}')] \frac{\partial G}{\rho \partial \varphi} dS' \cong -J_\varphi(\vec{r}') \frac{dz}{d\ell} \frac{1}{\rho(\ell)} D(y_+, y_-; x_+, x_-) \quad (15)$$

$$\iint_{\Delta S'} [\hat{n}(\vec{r}) \cdot \vec{J}(\vec{r}')] \frac{\partial G}{\partial t} dS' \cong -J_t(\vec{r}') \left(\frac{d\rho}{d\ell} \frac{d^2 z}{d\ell^2} - \frac{dz}{d\ell} \frac{d^2 \rho}{d\ell^2} \right) D(x_+, x_-; y_+, y_-) \quad (16)$$

Αναφέρουμε, τέλος, ότι στα δύο ακραία σημεία της S, το ανώτερο και το κατώτερο, εκλέγουμε στοιχειώδη τμήματα ΔS κυκλικού σχήματος ακτίνας $\Delta\ell_1$, γύρω από τα σημεία $\ell = 0$, $\ell = L$. Αποδεικνύεται [7] ότι η συμβολή αυτών των κυκλικών στοιχείων στο εαυτό τους είναι μηδενική.

Γ. Κατάστροψη του συστήματος με αγνώστους τα επιφανειακά ρεύματα

Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα για τον υπολογισμό των επιφανειακών ρευμάτων J_φ, J_t , ο σκεδαστής χωρίζεται σε N στοιχεία εμβαδού ΔS , όπου σε κάθε στοιχείο τα J_φ, J_t θεωρείται ότι έχουν σταθερή τιμή. Οι εξ. (2) και (3) μεταπίπτουν σε ένα γραμμικό σύστημα $2N \times 2N$, με αγνώστους τα J_φ, J_t σε κάθε στοιχείο. Παρακάτω διατυπώνεται αναλυτικά ο τρόπος κατάστροψης του γραμμικού αυτού συστήματος.

Αρχικά γίνεται αρίθμηση των επιφανειακών στοιχείων ΔS με τον δείκτη p , όπου προφανώς: $p = 1, 2, \dots, N$ και έχουμε αντίστοιχα: $\Delta S_1, \Delta S_2, \dots, \Delta S_p, \dots, \Delta S_N$.

Κάθε στοιχείο ΔS_p έχει τα αντίστοιχα l_p, φ_p , που καθορίζονται από τη μορφή του “πλέγματος”, το οποίο χρησιμοποιείται για την προσεγγιστική έκφραση της επιφάνειας του σκεδαστή. Οι τιμές l_p, φ_p αναφέρονται στο κέντρο του αντίστοιχου σημείου ΔS_p .

Με βάση τα προηγούμενα, οι ολοκληρωτικές εξ. (2) και (3) γράφονται:

$$\frac{1}{2} J_\varphi(p) + H_t^{\text{inc}}(p) = \sum_{q=1}^N \left\{ \alpha_{pq} J_\varphi(q) + \alpha_{p,q+N} J_t(q) \right\}$$

$$\frac{1}{2} J_t(p) - H_\varphi^{\text{inc}}(p) = \sum_{q=1}^N \left\{ \alpha_{p+N,q} J_\varphi(q) + \alpha_{p+N,q+N} J_t(q) \right\}$$

για $p = 1, 2, \dots, N$

Όταν $p \neq q$ και χρησιμοποιείται η μορφή “A” (Mode A), οι συντελεστές $\alpha_{pq}, \alpha_{p,q+N}, \alpha_{p+N,q}, \alpha_{p+N,q+N}$ προκύπτουν από τις σχέσεις (2), (3) και από τις (4) έως (10), ενώ όταν $p = q$, τότε προφανώς έχουμε την περίπτωση συμβολής του ίδιου στοιχείου στον εαυτό του (self-cell contribution), και οι αντίστοιχοι συντελεστές προκύπτουν από τις σχέσεις (14) έως (16).

III. Εφαρμογή της μεθόδου για το σχήμα του κώνου

A. Εύρεση των εξισώσεων ορισμού κωνικής επιφάνειας

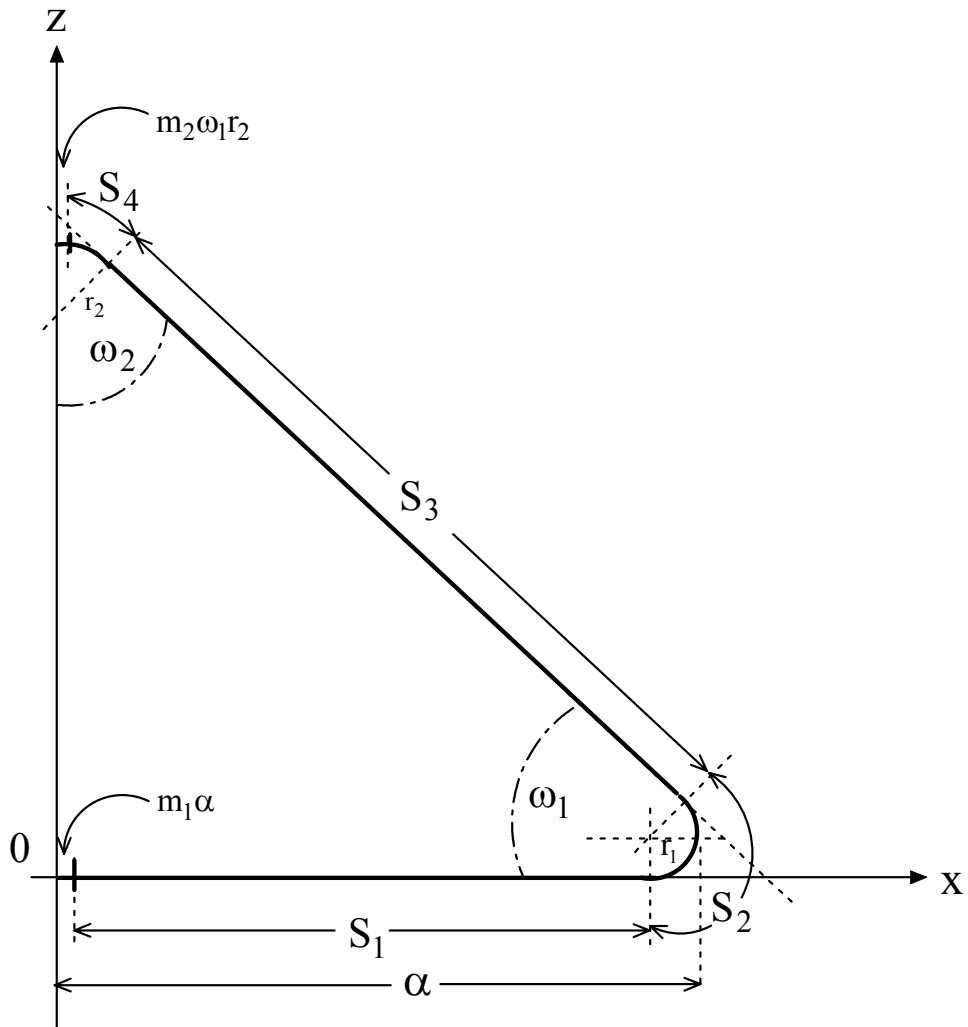
Όπως προαναφέρθηκε, θα πρέπει αρχικά να βρεθεί η μαθηματική έκφραση της γενέτειρας καμπύλης του κώνου, δηλαδή οι συναρτήσεις $\rho(\ell)$ και $z(\ell)$, όπου ℓ το μήκος τόξου. Παράλληλα, θα πρέπει η κωνική επιφάνεια να μην έχει “ακμές” ή “αιχμές”, ώστε να ικανοποιείται το κριτήριο της συνεχούς καθέτου. Αυτό αντιμετωπίζεται με την αντικατάσταση των γωνιών από κυκλικά τμήματα με πολύ μικρή ακτίνα καμπυλότητας. Στο Σχήμα 3 φαίνεται η σχετική γεωμετρία.

Η κωνική επιφάνεια χαρακτηρίζεται από τις γωνίες ω_1, ω_2 και από την ακτίνα α της βάσης του κώνου. Η γενέτειρα καμπύλη, προφανώς, δεν είναι ένα ορθογώνιο τρίγωνο αλλά ένα τρίγωνο με “στρογγυλεμένες” τις γωνίες του, με τμήματα περιφερειών πολύ μικρών ακτινών r_1 και r_2 .

Η γενέτειρα καμπύλη χωρίζεται στα ακόλουθα τμήματα (αρχίζοντας από τη βάση του κώνου):

- 1) Τμήμα μήκους $m_1 \alpha$ που αντιπροσωπεύει την ακτίνα του κάτω μικρού κυκλικού στοιχείου (το $m_1 \ll 1$).
- 2) Τμήμα μήκους $S_1 = \alpha - m_1 \alpha - r_1$ (επίπεδη βάση του κώνου).
- 3) Τμήμα μήκους $S_2 = (\pi - \omega_1) r_1$ (αντιπροσωπεύει τη “στρογγύλευση” της γωνίας ω_1).
- 4) Τμήμα μήκους $S_3 = (\alpha - r_1 + (r_1 - r_2) \sin \omega_1) / \sin \omega_2$ (παράπλευρη επιφάνεια του κώνου).
- 5) Τμήμα μήκους $S_4 = \omega_1 r_2 - m_2 \omega_1 r_2$ (αντιπροσωπεύει τη “στρογγύλευση” της ω_2 γωνίας της κορυφής).

- 6) Τμήμα μήκους $m_2\omega_1r_2$ είναι αυτό ακριβώς που αφαιρείται από το προηγούμενο τμήμα S_4 (προφανώς $m_2 \ll 1$) και αντιπροσωπεύει την ακτίνα του άνω μικρού κυκλικού στοιχείου.



Σχήμα 3: Γεωμετρία της γενέτειρας καμπύλης κώνου.

Για το κάθε ένα από τα έξι αυτά τμήματα μπορούν να γραφούν οι αντίστοιχες συναρτήσεις $\rho(\ell)$ και $z(\ell)$ και να υπολογιστούν οι παράγωγοι αυτών, όπως απαιτείται στις σχέσεις (). Έτσι, θα έχουμε :

- 1) Κάτω μικρός κύκλος $\ell = 0$

$$\rho(\ell) = 0 \quad z(\ell) = 0$$

- 2) Τμήμα S_1 $m_1\alpha < \ell < m_1\alpha + S_1$

$$\rho(\ell) = \ell \quad z(\ell) = 0$$

- 3) Τμήμα S_2 $m_1\alpha + S_1 < \ell < m_1\alpha + S_1 + S_2$

$$\rho(\ell) = m_1\alpha + S_1 + r_1 \sin \gamma \quad z(\ell) = r_1 - r_1 \cos \gamma \quad \text{όπου} \quad \gamma = \frac{\ell - S_1 - m_1\alpha}{r_1}$$

4) Τμήμα S_3 $m_1\alpha + S_1 + S_2 < \ell < m_1\alpha + S_1 + S_2 + S_3$

$$\rho(\ell) = \alpha - r_1 + r_1 \sin \omega_1 - (\ell - m_1\alpha - S_1 - S_2) \cos \omega_1$$

$$z(\ell) = r_1 + r_1 \cos \omega_1 + (\ell - m_1\alpha - S_1 - S_2) \sin \omega_1$$

5) Τμήμα S_4 $m_1\alpha + S_1 + S_2 + S_3 < \ell < m_1\alpha + S_1 + S_2 + S_3 + S_4$

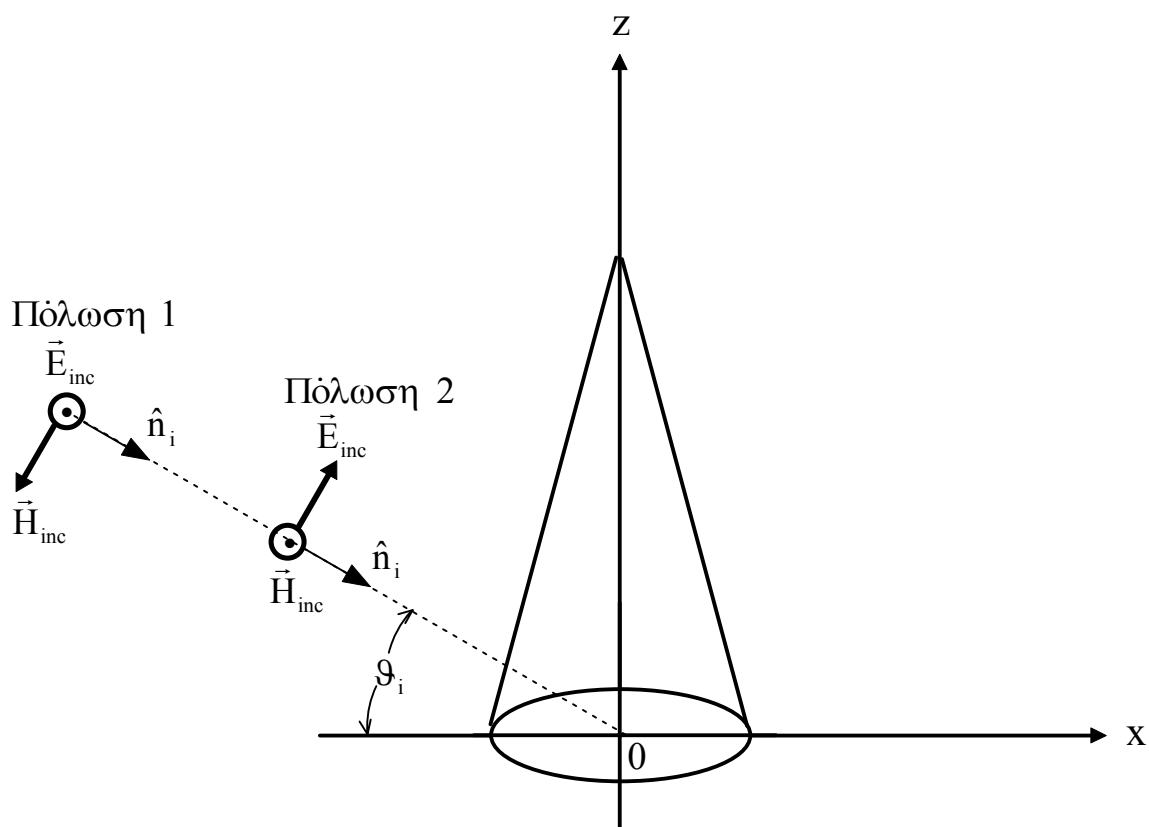
$$\rho(\ell) = r_2 \sin(\omega_1 - \gamma) \quad z(\ell) = r_1 + r_1 \cos \omega_1 + S_3 \sin \omega_1 - r_2 \cos \omega_1 + r_2 \cos(\omega_1 - \gamma)$$

όπου $\gamma = \frac{\ell - m_1\alpha - S_1 - S_2 - S_3}{r_2}$

6) Άνω μικρός κύκλος $\ell = m_1\alpha + S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + m_2\omega_1 r_2$

$$\rho(\ell) = 0 \quad z(\ell) = r_1 + r_1 \cos \omega_1 + S_3 \sin \omega_1 + r_2 - r_2 \cos \omega_1$$

B. Προσπίπτον κύμα



Σχήμα 4: Προσπίπτον κύμα.

Στο Σχήμα 4 φαίνονται οι δύο πολώσεις του προσπίπτοντος κύματος. Θεωρούμε ότι το διάνυσμα διαδόσεως \hat{n}_i βρίσκεται στο επίπεδο x-z σχηματίζει γωνία την ϑ_i με τον άξονα των x. Η πόλωση 1 είναι γνωστή και ως καθετη πόλωση ή οριζόντια πόλωση, ενώ η πόλωση 2 είναι γνωστή και ως παράλληλη πόλωση ή κατακόρυφη πόλωση.

Το διάνυσμα \hat{n}_i γράφεται: $\hat{n}_i = \hat{x} \cos \vartheta_i - \hat{z} \sin \vartheta_i$

Το προσπίπτον μαγνητικό πεδίο (αυτό μόνον εμπλέκεται στην ολοκληρωτική εξίσωση που μελετάμε) γράφεται:

$$\text{Πόλωση 1 : } \vec{H}_{\text{inc}}(\vec{r}) = H_0(-\sin \vartheta_1 \hat{x} - \cos \vartheta_1 \hat{z})e^{jk_1 \cdot \vec{r}}$$

$$\text{Πόλωση 2 : } \vec{H}_{\text{inc}}(\vec{r}) = -H_0 \hat{y} e^{jk_1 \cdot \vec{r}}$$

όπου το πλάτος H_0 λαμβάνεται για απλότητα ίσο με 1 Amp/m και $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ είναι ο κυματικός αριθμός.

Γ. Διαχωρισμός της κωνικής επιφάνειας σε πλέγμα

Για το διαχωρισμό της επιφάνειας του κώνου σε πλέγμα ακολουθείται η διαδικασία που αναφέρθηκε στην ενότητα II Β. Εδώ θα αναφερθούμε σε συγκεκριμένο παράδειγμα, για το οποίο θα παρουσιαστούν αριθμητικά αποτελέσματα.

Αρχικά, οι γωνίες ω_1 και ω_2 επιλέχθηκε να έχουν τις τιμές: $\omega_1 = 75^\circ$ άρα $\omega_2 = 15^\circ$. Για απλότητα λαμβάνουμε $\alpha = 1$. Οι ακτίνες καμπυλότητας ήταν $r_1 = 0.05\alpha$, $r_2 = 0.025\alpha$. Τέλος, οι παράμετροι m_1 και m_2 , που καθορίζουν τις ακτίνες των μικρών κυκλικών στοιχείων, πήραν τις τιμές $m_1 = 0.05$, $m_2 = 0.2$. Το ύψος του κώνου με βάση τα προηγούμενα δεδομένα είναι $h = 3.717$.

Η γενέτειρα καμπύλη του κώνου διαχωρίστηκε σε $N_\ell = 59$ τμήματα $\Delta \ell_i$, όχι όλα ίσα μεταξύ τους. Συγκεκριμένα, υπήρχε μια μείωση στο μήκος του $\Delta \ell$ στα σημεία μεγάλης καμπυλότητας (δηλαδή στη “στρογγυλευμένη” γωνία ω_1 και κοντά στην κορυφή του κώνου).

Στη συνέχεια, κάθε “δακτυλίδι” πλάτους $\Delta \ell_i$ διαχωρίστηκε σε N_{φ_i} ίσα μεταξύ τους τμήματα. Εδώ αναφέρουμε ότι κριτήριο για την επιλογή του αριθμού N_{φ_i} είναι η επίτευξη όσο το δυνατόν τετράγωνικού σχήματος στα στοιχεία ΔS_i , δηλαδή να ισχύει η σχέση $\Delta \ell_i \cong \rho(\ell_i) \Delta \varphi_i$ (όπου $\Delta \varphi_i = \frac{2\pi}{N_{\varphi_i}}$). Στην περίπτωσή μας, επιλέχθηκε να ισχύει $\Delta \ell_i = 1.5\rho(\ell_i) \Delta \varphi_i$.

Στον Πίνακα 1, φαίνονται οι τιμές των ℓ_i , $\Delta \ell_i$, $r(\ell_i)$, $z(\ell_i)$ και N_{φ_i} ($i = 1, \dots, 59$) για το συγκεκριμένο πλέγμα.

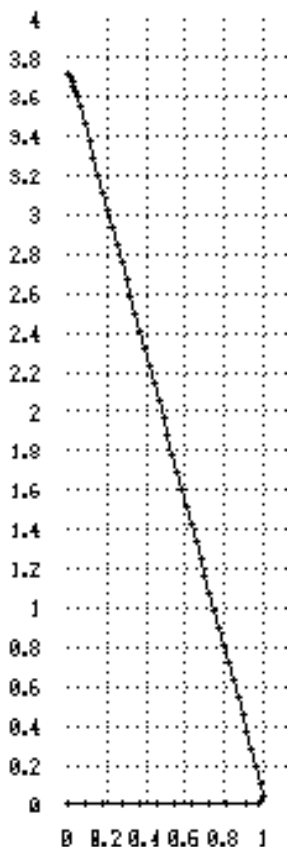
α/α	ℓ_i	$\Delta \ell_i$	$\rho(\ell_i)$	$z(\ell_i)$	N_{φ_i}
1	.00000000	.05000000	.00000000	.00000000	1
2	.09500000	.09000000	.09500000	.00000000	8
3	.18500000	.09000000	.18500000	.00000000	9
4	.27500000	.09000000	.27500000	.00000000	13
5	.36500000	.09000000	.36500000	.00000000	17
6	.45500000	.09000000	.45500000	.00000000	21
7	.54500000	.09000000	.54500000	.00000000	25
8	.63500000	.09000000	.63500000	.00000000	30
9	.72500000	.09000000	.72500000	.00000000	34
10	.81499990	.09000000	.81499990	.00000000	38
11	.90499990	.09000000	.90499990	.00000000	42

12	.97290730	.04581490	.97211430	.00515631	89
13	1.01872200	.04581490	.99903920	.04024535	91
14	1.08736800	.09147749	.98645820	.10712100	45
15	1.17884600	.09147749	.96278210	.19548150	44
16	1.27032300	.09147749	.93910600	.28384200	43
17	1.36180100	.09147749	.91542990	.37220250	42
18	1.45327800	.09147749	.89175380	.46056300	41
19	1.54475600	.09147749	.86807760	.54892350	40
20	1.63623300	.09147749	.84440150	.63728400	39
21	1.72771100	.09147749	.82072540	.72564450	38
22	1.81918800	.09147749	.79704930	.81400500	36
23	1.91066600	.09147749	.77337310	.90236540	35
24	2.00214400	.09147749	.74969700	.99072610	34
25	2.09362100	.09147749	.72602090	1.07908600	33
26	2.18509800	.09147749	.70234480	1.16744700	32
27	2.27657600	.09147749	.67866870	1.25580700	31
28	2.36805300	.09147749	.65499260	1.34416800	30
29	2.45953100	.09147749	.63131650	1.43252800	29
30	2.55100800	.09147749	.60764040	1.52088800	28
31	2.64248500	.09147749	.58396430	1.60924900	27
32	2.73396300	.09147749	.56028830	1.69760900	26
33	2.82544000	.09147749	.53661220	1.78596900	25
34	2.91691800	.09147749	.51293610	1.87433000	23
35	3.00839500	.09147749	.48926000	1.96269000	22
36	3.09987200	.09147749	.46558390	2.05105100	21
37	3.19135000	.09147749	.44190780	2.13941100	20
38	3.28282700	.09147749	.41823170	2.22777100	19
39	3.37430500	.09147749	.39455560	2.31613200	18
40	3.46578200	.09147749	.37087950	2.40449200	17
41	3.55725900	.09147749	.34720340	2.49285200	16
42	3.64873700	.09147749	.32352730	2.58121300	15
43	3.74021400	.09147749	.29985120	2.66957300	14
44	3.83169200	.09147749	.27617510	2.75793400	13
45	3.92316900	.09147749	.25249900	2.84629400	12
46	4.01464700	.09147749	.22882290	2.93465500	10
47	4.10612400	.09147749	.20514680	3.02301500	9
48	4.19760100	.09147749	.18147070	3.11137500	8
49	4.28907900	.09147749	.15779460	3.19973600	8
50	4.38055600	.09147749	.13411850	3.28809600	8
51	4.47203400	.09147749	.11044240	3.37645600	8
52	4.56351100	.09147749	.08676630	3.46481700	8
53	4.65498800	.09147749	.06309021	3.55317700	8
54	4.71381700	.02617994	.04786419	3.61000200	8
55	4.73999700	.02617994	.04108836	3.63528900	8
56	4.76617700	.02617994	.03431253	3.66057700	8
57	4.79235600	.02617994	.02753670	3.68586500	8
58	4.81853600	.02617994	.01767956	3.70971600	8
59	4.83817400	.00654498	.00000000	3.71704100	1

Πίνακας 1: Στοιχεία πλέγματος κώνου.

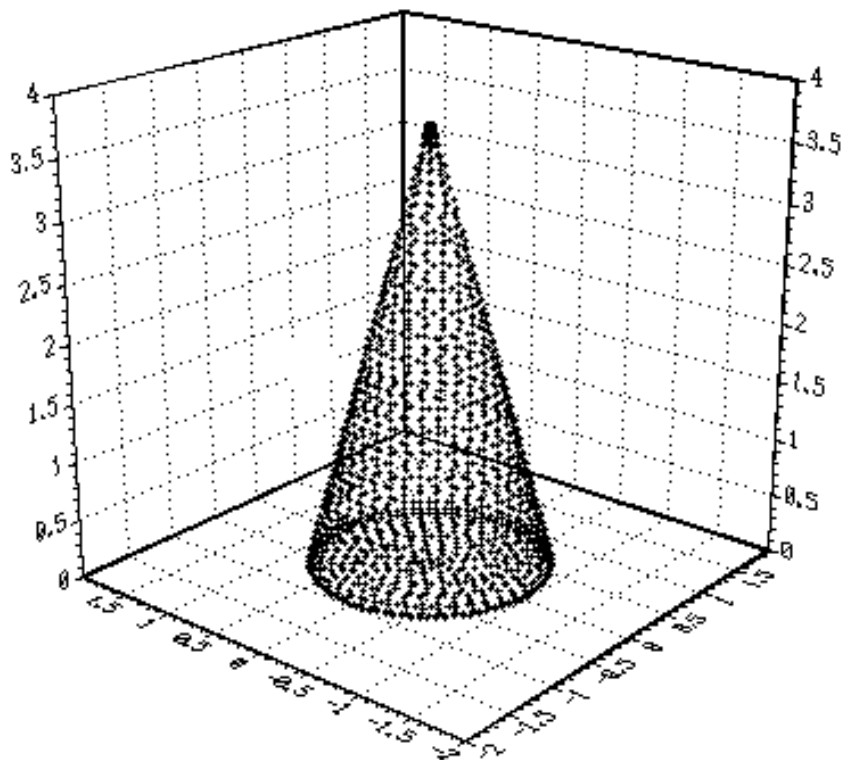
Ο συνολικός αριθμός N των στοιχείων ΔS_i στα οποία διαχωρίζεται η κωνική επιφάνεια προκύπτει, όπως αναφέρθηκε, από την πρόσθεση όλων των N_{ϕ_i} . Στο πλέγμα αυτό έχουμε συνολικό αριθμό στοιχείων $N = 1434$.

Στα επόμενα Σχήματα 5 και 6 φαίνεται η γενέτειρα καμπύλη του κώνου με σημειωμένα τα αντίστοιχα σημεία ℓ_i , καθώς και μια πλήρης τρισδιάστατη εικόνα του κώνου, όπου εδώ έχουν σημειωθεί με μαύρες τελείες όλα τα κέντρα των στοιχείων ΔS_i .



Σχήμα 5: Γενέτειρα καμπύλη κώνου (σημειώνονται 59 σημεία ℓ_i).

Αναφέρουμε στο σημείο αυτό ότι το γενικό θέμα κατασκευής πλέγματος για τυχούσα επιφάνεια S είναι πολύ ενδιαφέρον και πολλοί ερευνητές ασχολούνται με αυτό.



Σχήμα 6: Τρισδιάστατη απεικόνιση πλέγματος κώνου (συνολικά $N=1434$ σημεία).

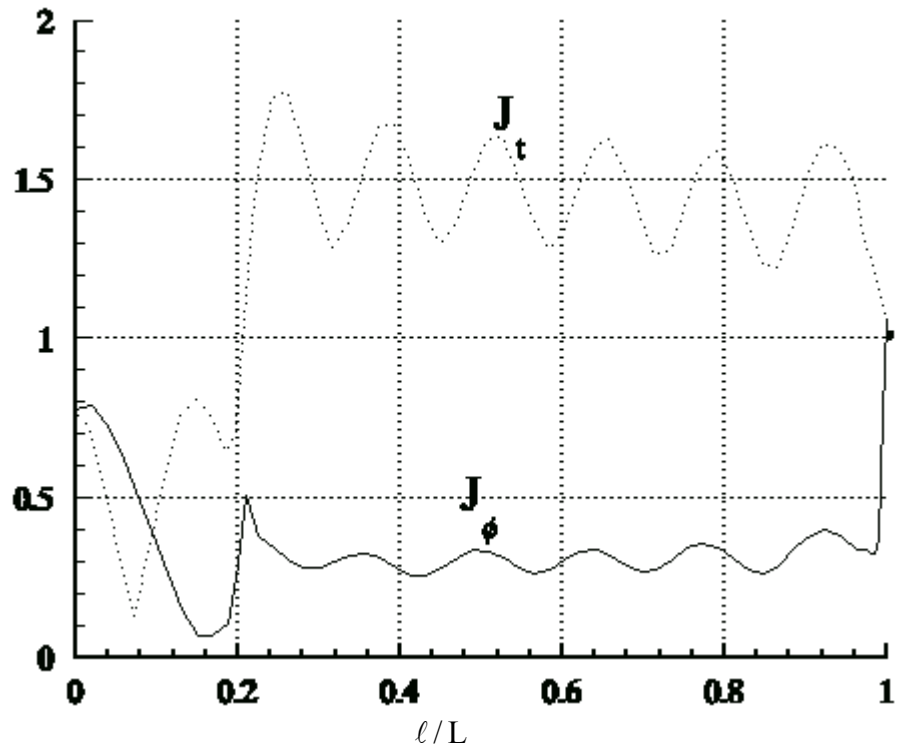
IV. Παρουσίαση αριθμητικών αποτελεσμάτων

Με βάση τη μαθηματική διατύπωση που προαναφέρθηκε, κατασκευάστηκε ένα υπολογιστικό πρόγραμμα σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN, την οποία ο γράφων θεωρεί πάρα πολύ ισχυρή για τέτοιους υπολογισμούς, και ελήφθησαν αποτελέσματα για διάφορες περιπτώσεις.

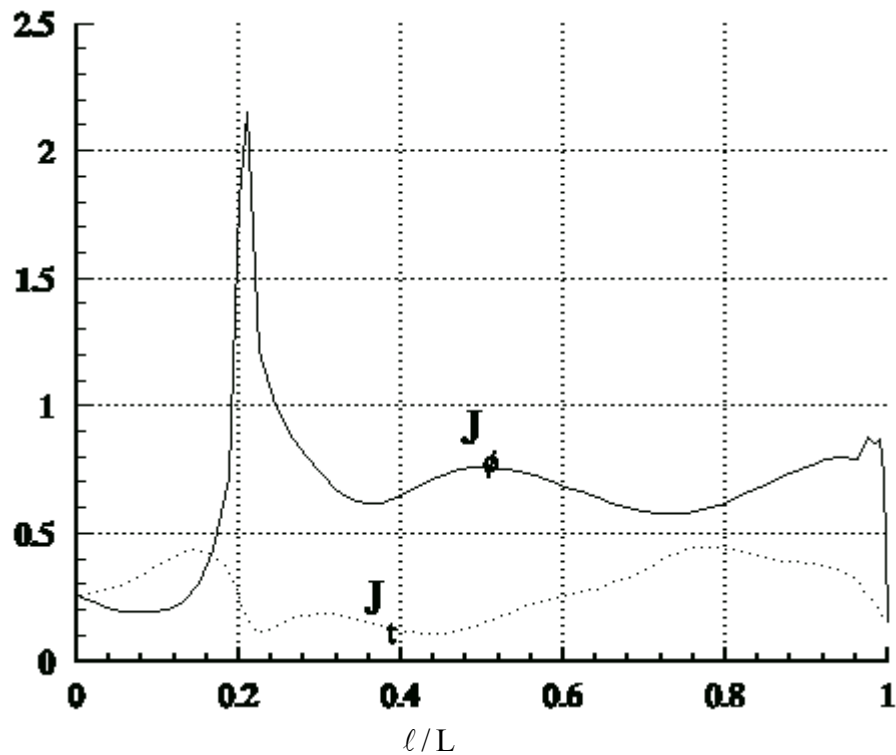
Όλοι οι υπολογισμοί έγιναν στη λεγόμενη περιοχή συντονισμού (resonance region), όπου στην περίπτωση αυτή το μήκος κύματος του προσπίπτοντος H/M κύματος έχει τιμή σχεδόν ίση με τις γεωμετρικές διαστάσεις του σκεδαστή. Η περιοχή αυτή παρουσιάζει και το μεγαλύτερο ενδιαφέρον, από πλευράς μελέτης, στη θεωρία σκεδάσεως.

Ένα καλό μέτρο της σύγκρισης του μήκους κύματος προσπίπτοντος λ , σε σχέση με τις γεωμετρικές διαστάσεις του κώνου, είναι το αδιάστατο μέγεθος $ka = (2\pi/\lambda)a$, όπου a η ακτίνα της βάσης του κώνου. Στην εργασία αυτή έγιναν υπολογισμοί για $ka = 5$ ή $a/\lambda = 0.795775$, και για $ka = 9$ ή $a/\lambda = 1.432394$.

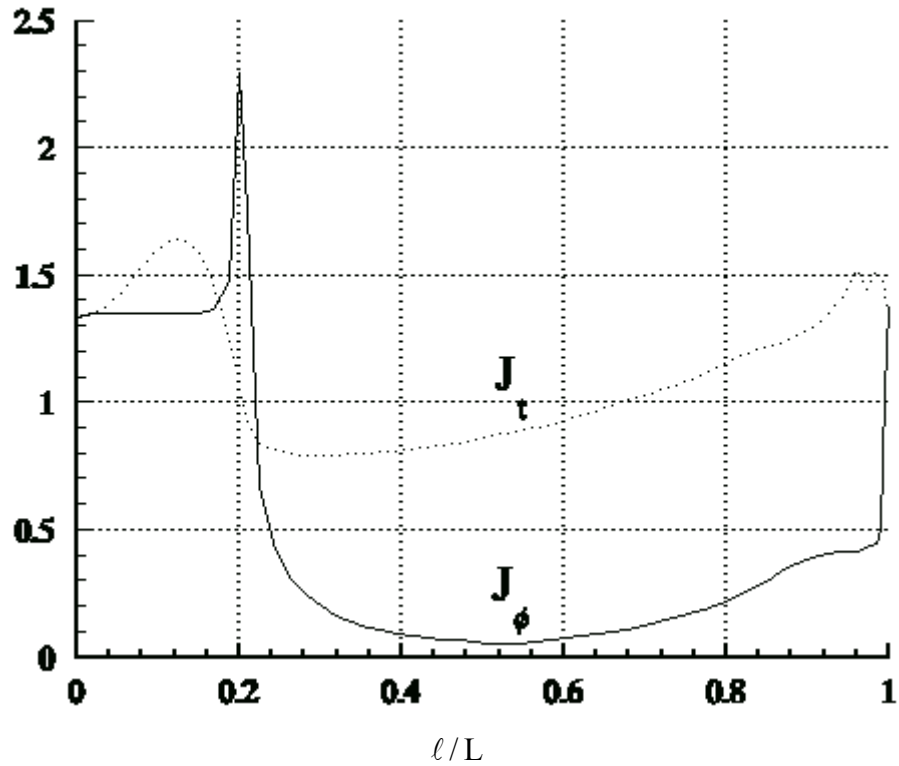
Στα Σχήματα 7, 8 και 9 φαίνονται τα μέτρα των ρευμάτων J_ϕ και J_t για $ka = 5$ και για 3 διαφορετικές γωνίες προσπτώσεως θ_1 . Οι τιμές των ρευμάτων αυτών είναι υπολογισμένες στο μεσημβρινό επίπεδο με $\phi = 45^\circ$ και στον οριζόντιο άξονα των διαγραμμάτων έχουμε το μέγεθος ℓ/L , δηλαδή το ανηγμένο μήκος τόξου της γενέτειρας καμπύλης. Η πόλωση του προσπίπτοντος είναι η Πόλωση 1 του Σχήματος 4. Το προσπίπτον έχει πλάτος $H_0 = 1 \text{ A/m}$.



Σχήμα 7: Μέτρα των ρευμάτων J_ϕ , J_t , για $H_0=1A/m$, για $ka=5$ και για πρόσπτωση στην κορυφή του κώνου ($\vartheta_i = 90^\circ$). Πόλωση 1 (κάθετη πόλωση).

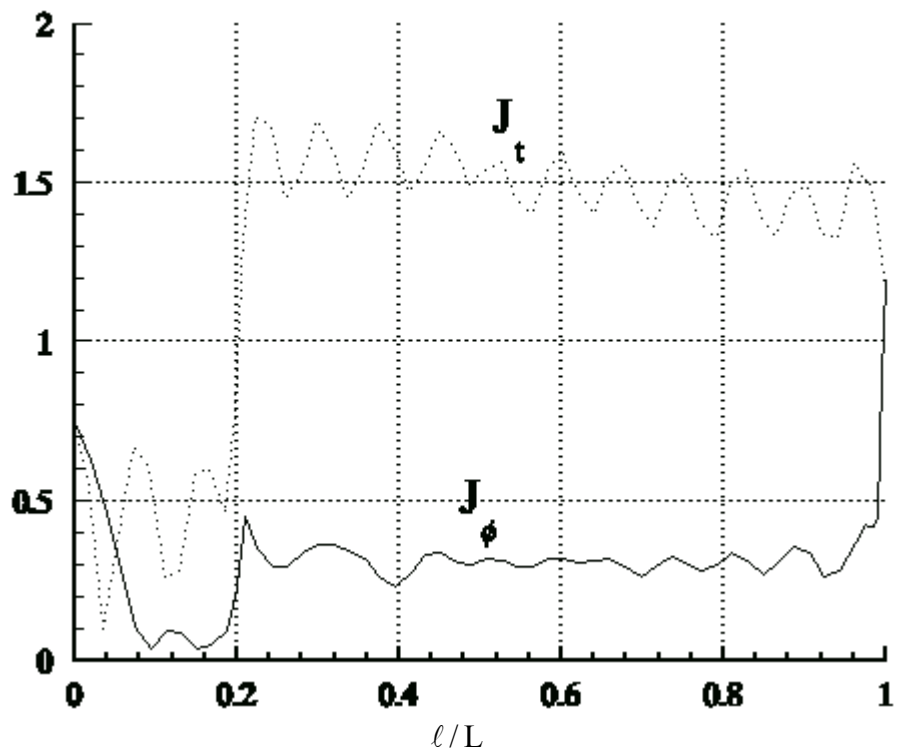


Σχήμα 8: Μέτρα των ρευμάτων J_ϕ , J_t , για $H_0=1A/m$, για $ka=5$ και για πρόσπτωση στην παράπλευρη επιφάνεια του κώνου ($\vartheta_i = 0^\circ$). Πόλωση 1 (κάθετη πόλωση).

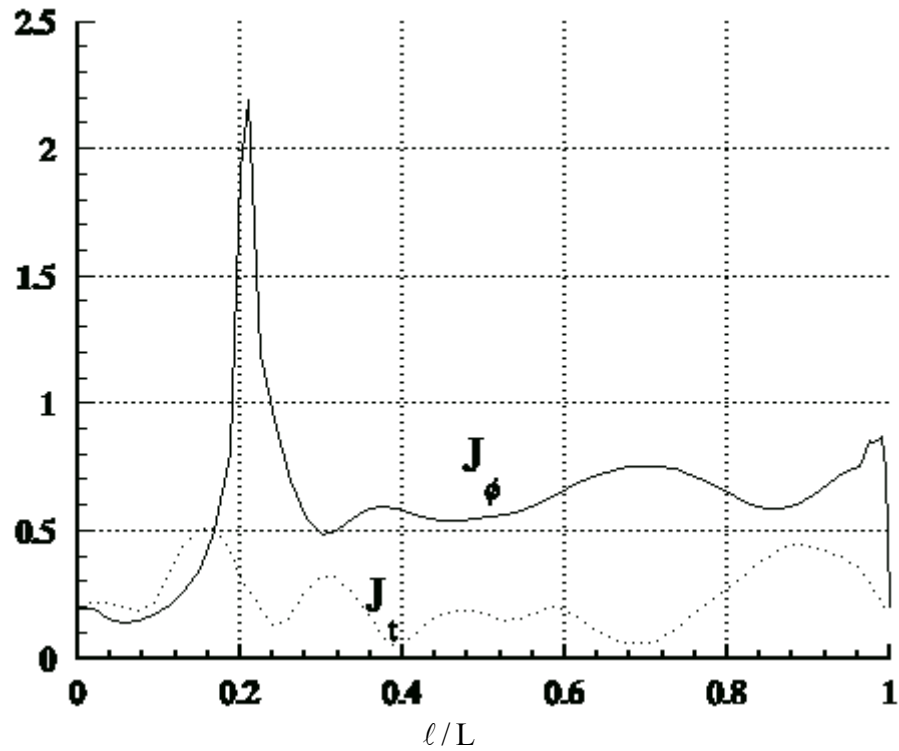


Σχήμα 9: Μέτρα των ρευμάτων J_ϕ , J_t , για $H_0=1A/m$, για $ka=5$ και για πρόσπτωση στη βάση του κώνου ($\vartheta_i = -90^\circ$). Πόλωση 1 (κάθετη πόλωση).

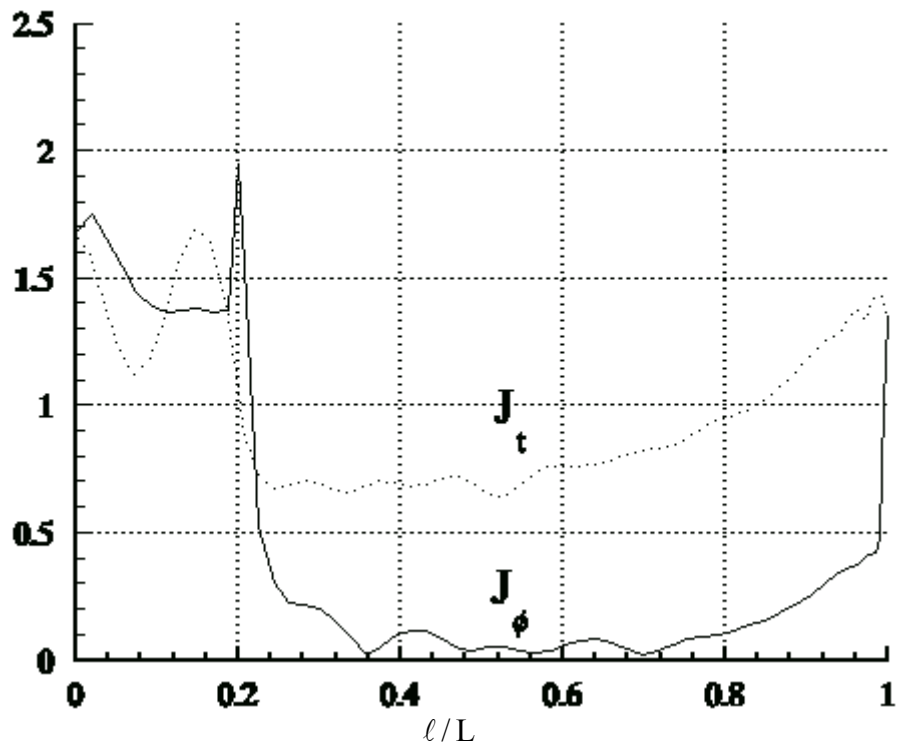
Αντίστοιχες περιπτώσεις αλλά για $ka = 9$ έχουμε στα Σχήματα 10, 11 και 12.



Σχήμα 10: Μέτρα των ρευμάτων J_ϕ , J_t , για $H_0=1A/m$, για $ka=9$ και για πρόσπτωση στην κορυφή του κώνου ($\vartheta_i = 90^\circ$). Πόλωση 1 (κάθετη πόλωση).



Σχήμα 11: Μέτρα των ρευμάτων J_ϕ , J_t , για $H_0=1A/m$, για $ka=9$ και για πρόσπτωση στην παράπλευρη επιφάνεια του κώνου ($\vartheta_i = 0^\circ$). Πόλωση 1 (κάθετη πόλωση).



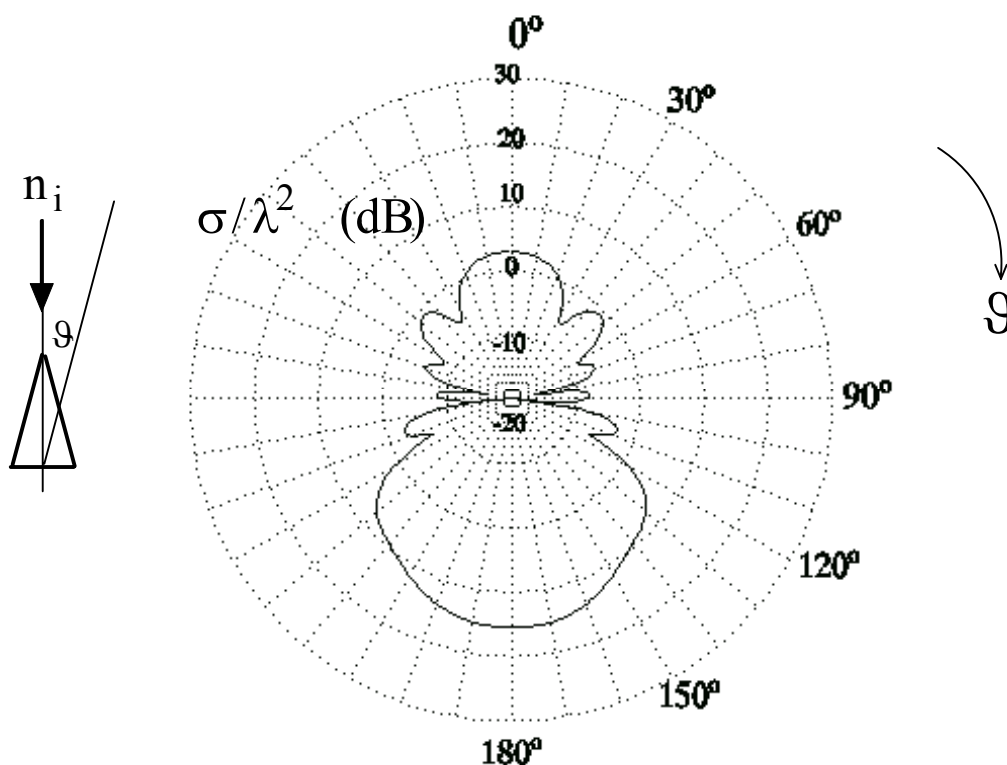
Σχήμα 12: Μέτρα των ρευμάτων J_ϕ , J_t , για $H_0=1A/m$, για $ka=9$ και για πρόσπτωση στη βάση του κώνου ($\vartheta_i = -90^\circ$). Πόλωση 1 (κάθετη πόλωση).

Παρατηρούμε ότι τα J_φ, J_t έχουν τις ίδιες τιμές για $\ell = 0$ και $\ell = L$ (δηλαδή στα μικρά κυκλικά στοιχεία). Αυτό συμβαίνει γιατί υπολογίζονται για $\varphi = 45^\circ$.

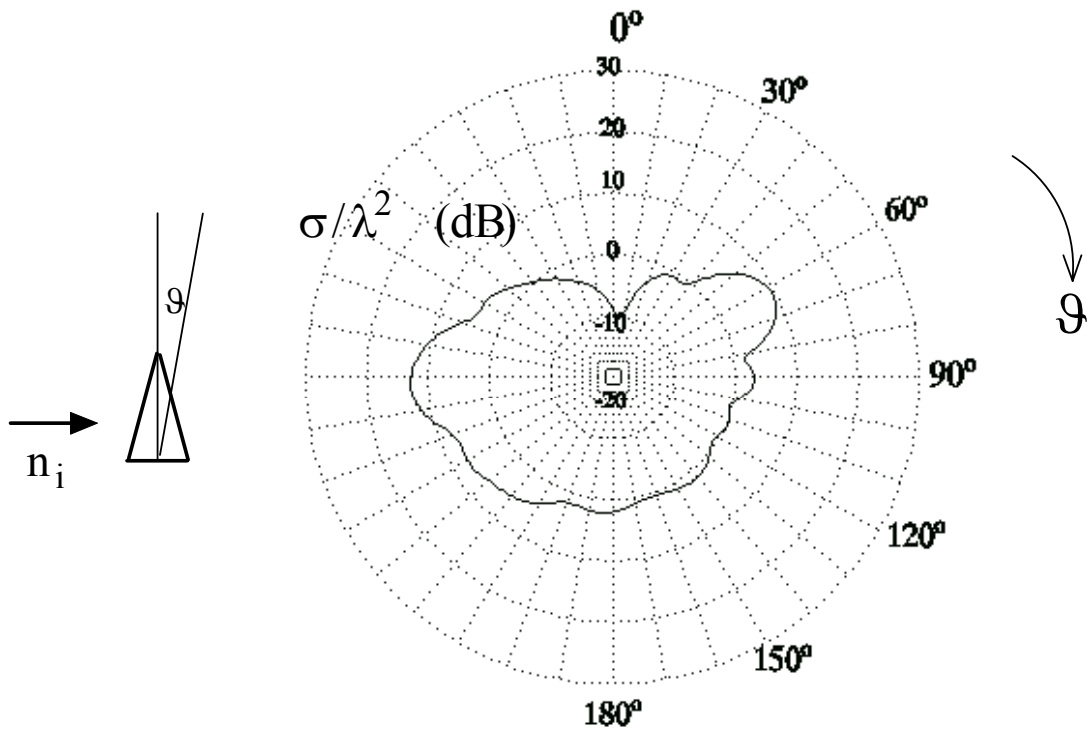
Το ρεύμα J_φ εμφανίζει απότομες αυξήσεις (peaks) για τα σημεία $\ell/L = 0.2$ (περίπου) και $\ell = L$. Τα δύο αυτά σημεία αντιπροσωπεύουν τις “στρογγυλεμένες” γωνίες της γενέτειρας του κώνου. Όταν στα σημεία αυτά έχουμε “ακμή” ή “αιχμή”, το ρεύμα J_φ τείνει στο άπειρο.

Στα Σχήματα 7 και 10 (όπου έχουμε πρόσπτωση στην κορυφή του κώνου) παρατηρείται ότι το J_t έχει μορφή στάσιμου κύματος, λόγω ανακλάσεων στην περιοχή της βάσης του κώνου.

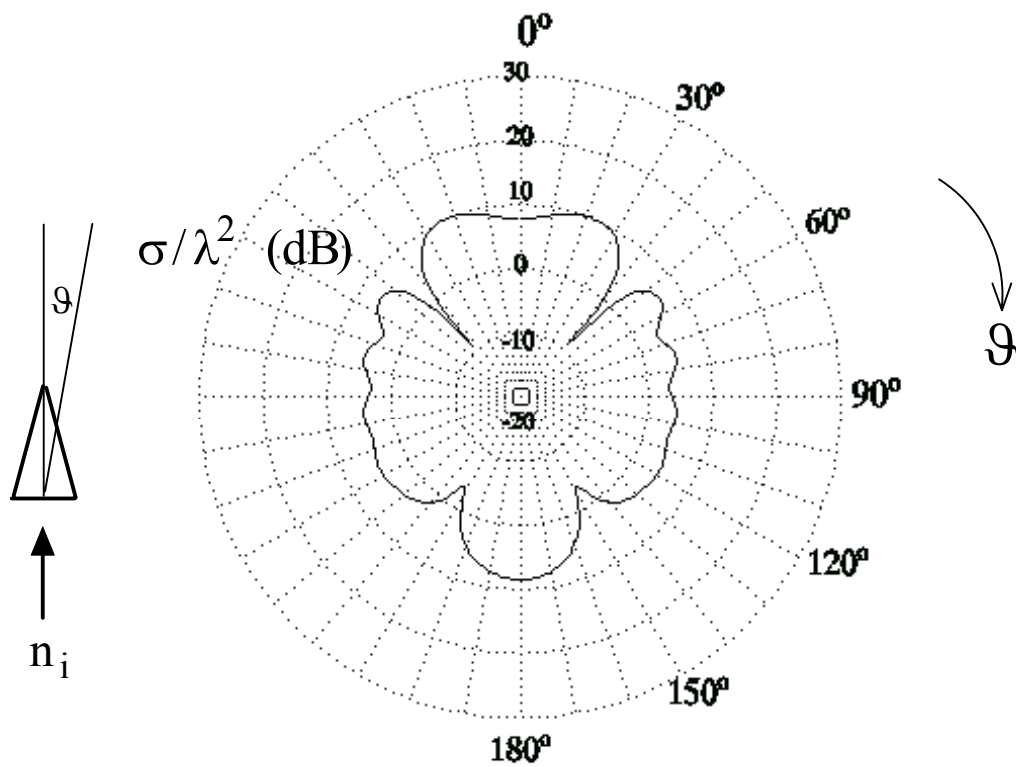
Στα επόμενα Σχήματα φαίνεται σε πολικό διάγραμμα το μέγεθος $\sigma(\vartheta, \varphi)$ (scattering cross section) σε σφαιρικές συντεταγμένες, για $\varphi = 0^\circ, 180^\circ$ (δηλαδή στο επίπεδο πρόσπτωσης x-z) και ϑ από 0° έως 180° , για τις αντίστοιχες περιπτώσεις προσπτώσεως που προαναφέρθηκαν. Ως γνωστόν, το μέγεθος αυτό είναι ένα μέτρο της ισχύος του σκεδαζομένου πεδίου. Στα Σχήματα αυτά, το σ εκφράζεται ανηγμένο στο τετράγωνο του μήκους κύματος.



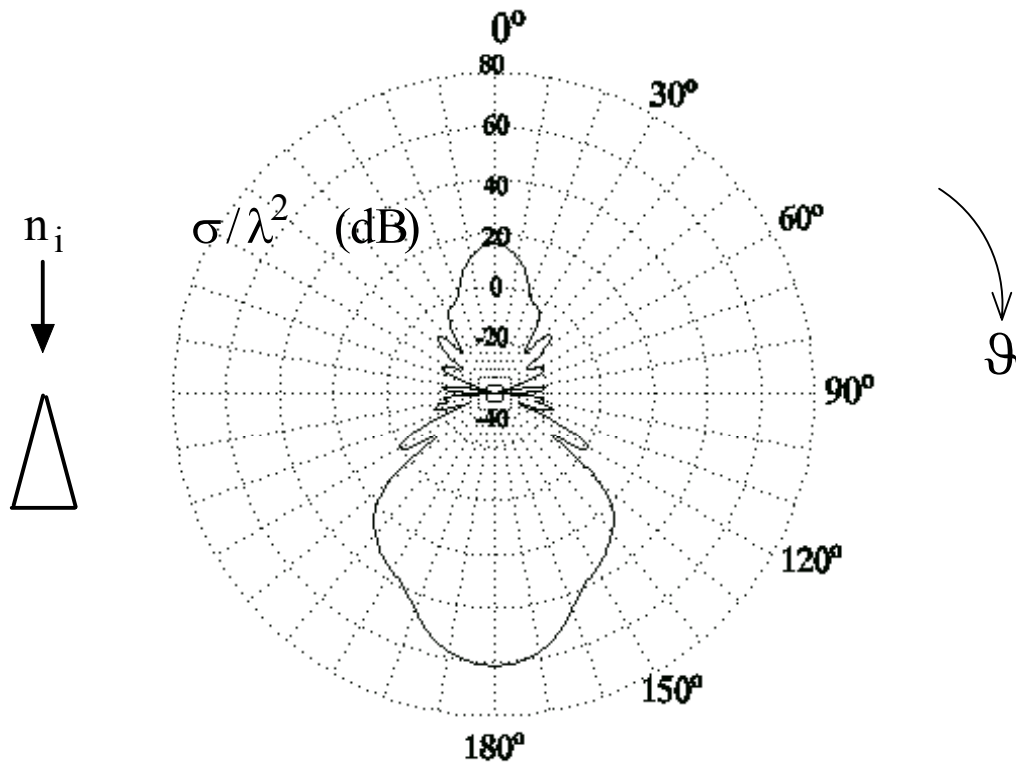
Σχήμα 13: Scattering cross section σ/λ^2 (σε dB), για $ka=5$ και για πρόσπτωση στην κορυφή του κώνου ($\varphi_1 = 90^\circ$). Πόλωση 1 (κάθετη πόλωση).



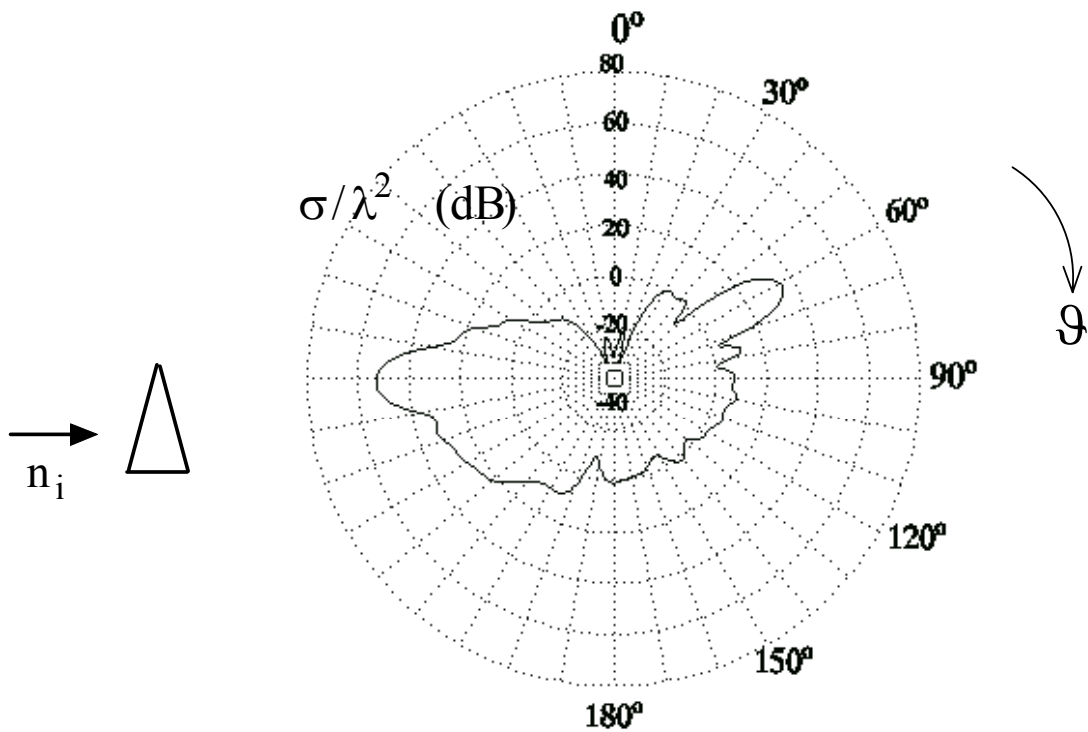
Σχήμα 14: Scattering cross section σ/λ^2 (σε dB), για $ka=5$ και για πρόσπτωση στην παράπλευρη επιφάνεια του κώνου ($\vartheta_i = 0^\circ$). Πόλωση 1 (κάθετη πόλωση).



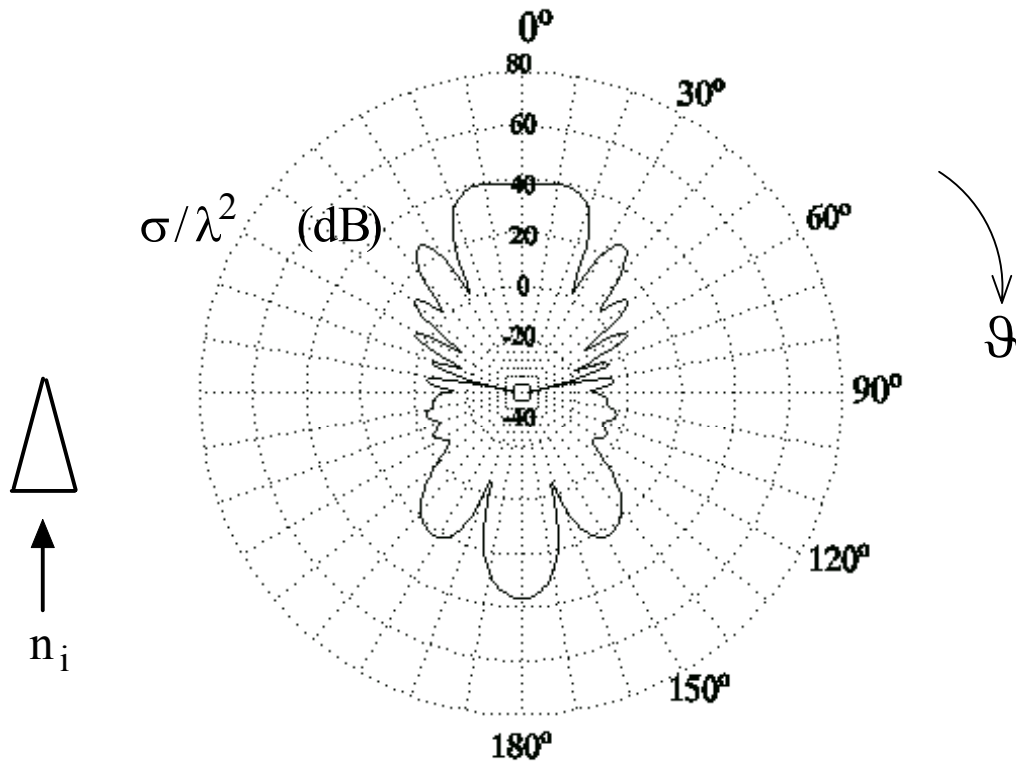
Σχήμα 15: Scattering cross section σ/λ^2 (σε dB), για $ka=5$ και για πρόσπτωση στην βάση του κώνου ($\vartheta_i = -90^\circ$). Πόλωση 1 (κάθετη πόλωση)



Σχήμα 16: Scattering cross section σ/λ^2 (σε dB), για $ka=9$ και για πρόσπτωση στην κορυφή του κώνου ($\theta_i = 90^\circ$). Πόλωση 1 (κάθετη πόλωση).



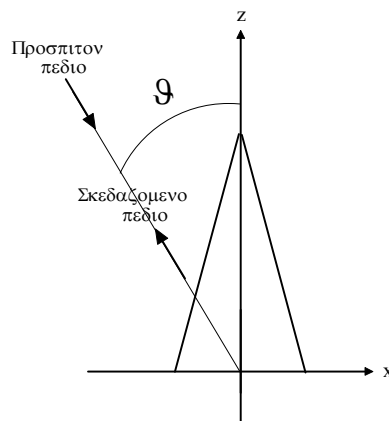
Σχήμα 17: Scattering cross section σ/λ^2 (σε dB), για $ka=9$ και για πρόσπτωση στην παράπλευρη επιφάνεια του κώνου ($\theta_i = 0^\circ$). Πόλωση 1 (κάθετη πόλωση).



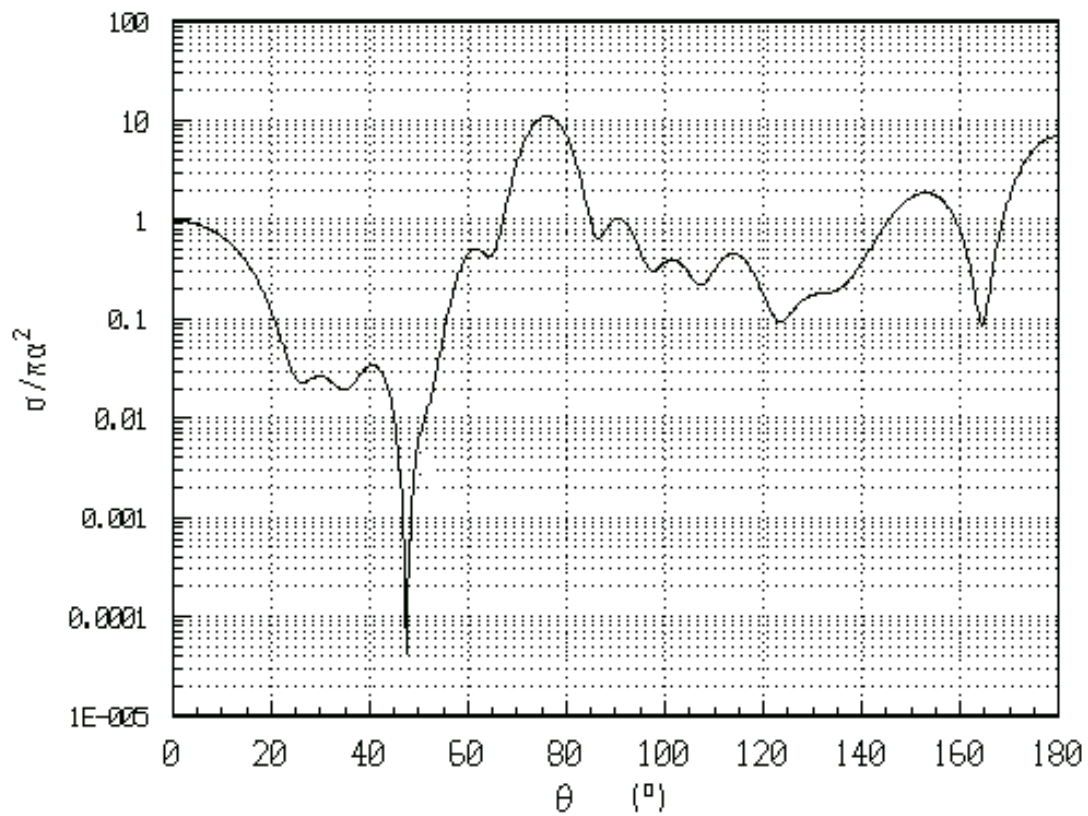
Σχήμα 18: Scattering cross section σ/λ^2 (σε dB), για $ka=9$ και για πρόσπτωση στη βάση του κώνου ($\vartheta_i = -90^\circ$). Πόλωση 1 (κάθετη πόλωση).

Στα επόμενα Σχήματα έχουμε την περίπτωση της αντίστροφης σκέδασης (backscattering). Συγκεκριμένα, υπολογίζεται και παριστάνεται γραφικά το σ , όταν η διεύθυνση πρόσπτωσης και η διεύθυνση παρατήρησης του σκεδαζομένου κύματος συμπίπτουν. Είναι η περίπτωση του RADAR και για το λόγο αυτό το σ λέγεται εδώ backscattering cross section ή Radar cross section (RCS). Ο σκεδαστής έχει αξονική συμμετρία και, επομένως, δεν έχει σημασία η αζιμουθιακή γωνία ϕ . Το RCS υπολογίζεται για όλες τις τιμές της γωνίας ϑ (0° έως 180°) και είναι ανηγμένο στο εμβαδόν της βάσης του κώνου πa^2 .

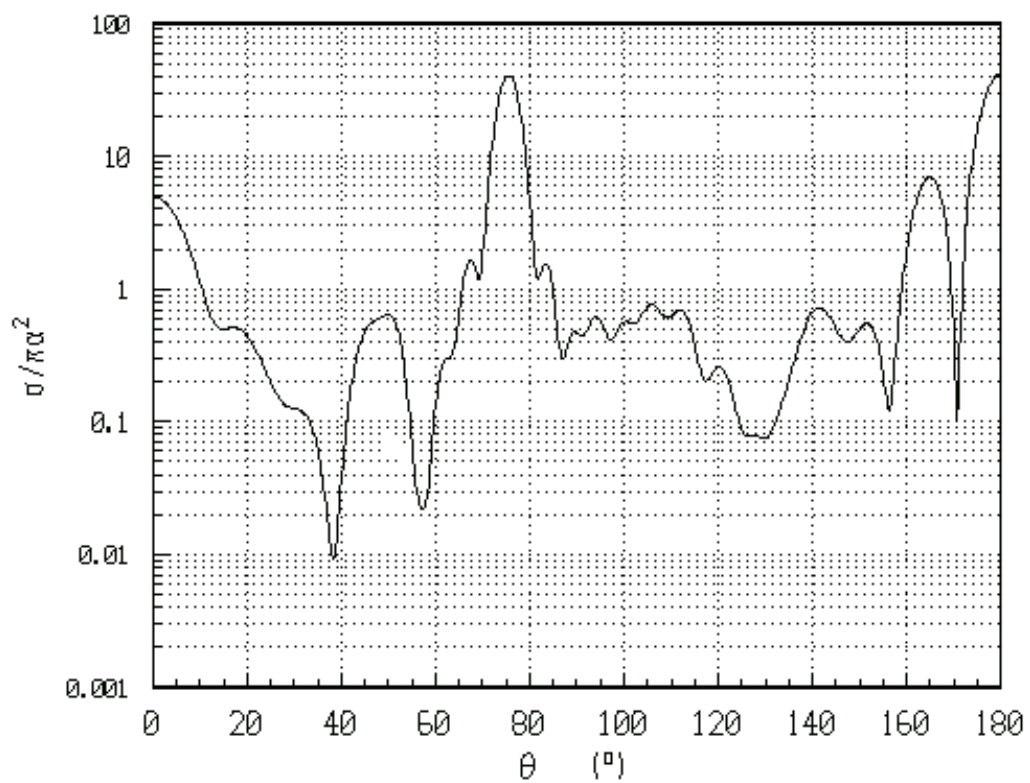
Το Σχήμα 19 δείχνει τη σχετική γεωμετρία.



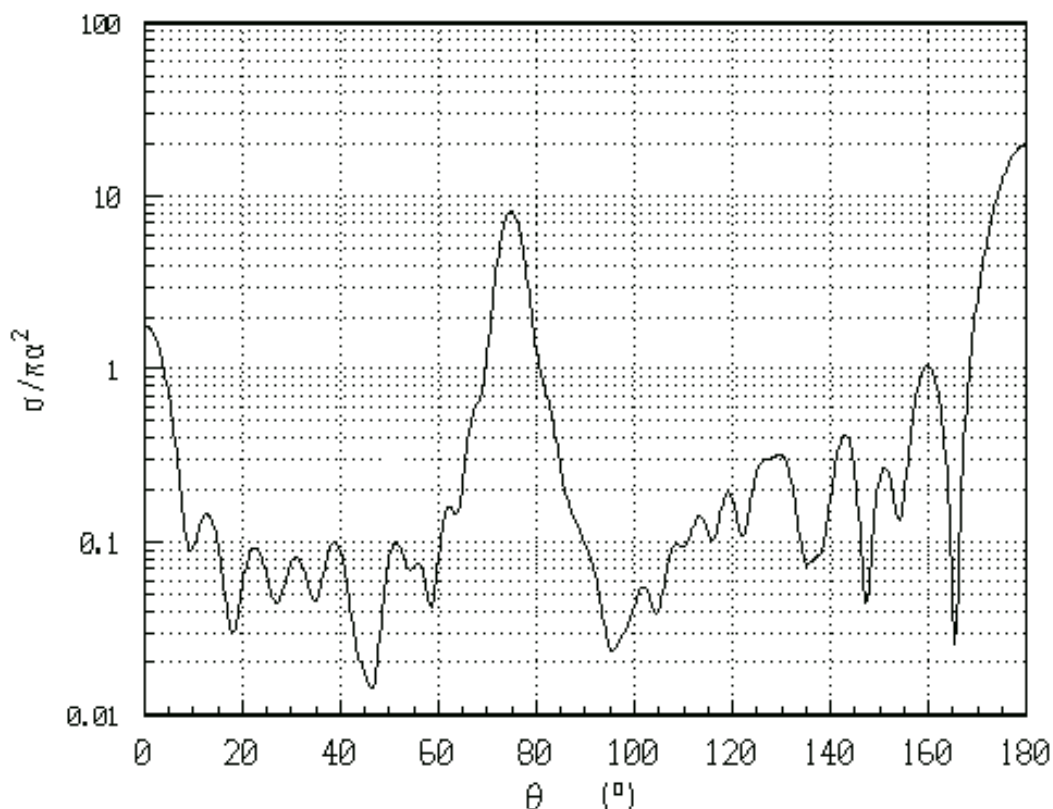
Σχήμα 19: Υπολογισμός του backscattering cross section.



Σχήμα 20: Backscattering cross section $\sigma/\pi a^2$, για $ka=5$. Πόλωση 1 (κάθετη πόλωση).



Σχήμα 21: Backscattering cross section $\sigma/\pi a^2$, για $ka=9$. Πόλωση 1 (κάθετη πόλωση).

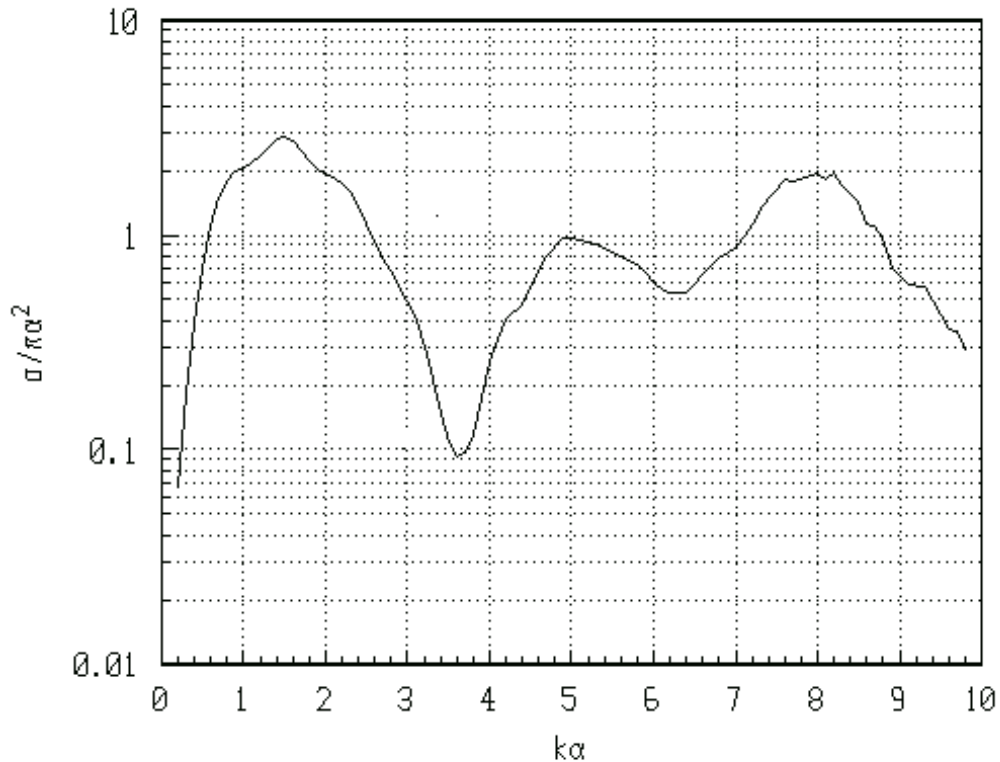


Σχήμα 22: Backscattering cross section $\sigma/\pi a^2$, για $ka=9$. Πόλωση 2 (παράλληλη πόλωση).

Στα Σχήματα 20, 21 και 22 παρατηρούμε ότι εμφανίζονται 2 ισχυροί λοβοί για $\theta = 75^\circ$ (όταν το προσπίπτον κύμα συναντά κάθετα την παράπλευρη επιφάνεια του κώνου) και για $\theta = 180^\circ$ (όταν το προσπίπτον κύμα συναντά κάθετα τη βάση του κώνου).

Τέλος, στο Σχήμα 23 παριστάνεται γραφικά η μεταβολή του backscattering cross section $\sigma/\pi a^2$ για πρόσπτωση στην κορυφή του κώνου (Πόλωση 1), συναρτήσει της συχνότητας (του ka). Με την παρούσα μέθοδο, μπορούμε να φθάσουμε χωρίς μεγάλο σφάλμα σε τιμή του ka περίπου 10 (δηλαδή $a/\lambda = 1.59$). Στο Σχήμα 23 παρατηρούνται οι διαδοχικές αυξήσεις και μειώσεις του σ καθώς το ka αυξάνει, πράγμα που συμβαίνει με όλους τους σκεδαστές.

Η τιμή στην οποία τείνει το $\sigma/\pi a^2$ για πολύ μεγάλες τιμές του ka είναι η μονάδα (φυσική οπτική). Αναφέρουμε εδώ ότι διαγράμματα όμοια με εκείνα των Σχημάτων 20, 21, 22 και 23 μπορούν να βρεθούν στην αναφορά [4] σελ. 391-442 της βιβλιογραφίας, είτε ως αποτελέσματα διαφορετικής μεθόδου είτε ως προϊόντα εργαστηριακών μετρήσεων.



Σχήμα 23: Backscattering cross section $\sigma/\pi a^2$, για πρόσπτωση στην κορυφή του κώνου συναρτήσει του ka . Πόλωση 1 (κάθετη πόλωση).

V. Συμπεράσματα

Παρουσιάστηκε μια αποτελεσματική μέθοδος επίλυσης της ολοκληρωτικής εξίσωσης Maue για τέλεια αγωγίμους σκεδαστές οι οποίοι εμφανίζουν αξονική συμμετρία. Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί μέχρι την περιοχή συντονισμού. Τονίζεται στο σημείο αυτό η μεγάλη σημασία που έχει, κατά τον υπολογισμό των ολοκληρωμάτων που εμφανίζονται, να λαμβάνεται υπόψη η συμβολή ενός στοιχείου ΔS στον εαυτό του.

Η μέθοδος εφαρμόστηκε για την περίπτωση του πεπερασμένου κώνου και τα αποτελέσματα, συγκρινόμενα και με αυτά άλλων ερευνητών (βλ. [4, 8, 9]), ήταν πολύ ικανοποιητικά. Υπενθυμίζεται ότι ακριβής αναλυτική λύση για το σχήμα του κώνου δεν υπάρχει και, επομένως, τα αποτελέσματα των προτεινόμενων μεθόδων αντιπαραβάλλονται είτε μεταξύ τους είτε με τα αποτελέσματα εργαστηριακών μετρήσεων.

Αναφέρεται ότι έχει ήδη ολοκληρωθεί πλήρως η μαθηματική μελέτη και έχουν γίνει πολλοί αριθμητικοί υπολογισμοί, για επέκταση της μεθόδου και σε διηλεκτρικούς σκεδαστές. Η σχετική εργασία βρίσκεται στο στάδιο της τελικής συγγραφής.

Αναφορές

1. A. W. Maue, "Formulation of general diffraction problems through an integral equation", *Z. Physik* 126, pp. 601-618, 1949.
2. H. Honl, A. W. Maue and K. Westpfahl, "Handbuch der Physik", Vol. 25/1, 218-573, Springer-Verlag, Berlin 1961.
3. J. Van Bladel, "Electromagnetic Fields", McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, 1964.

4. G. T. Ruck, D. E. Barrick, W. D. Stuart and C. K. Krichbaum, “*Radar Cross Section Handbook*”, Plenum Press, New York, 1970.
5. E. F. Knott, J. F. Shaeffer and M. T. Tuley, “*Radar Cross Section*”, Artech House, Inc. 1993.
6. J. G. Fikioris and A. N. Magoulas, “*Scattering from axisymmetric scatterers: a hybrid method of solving Maue’s equation*”, Progress in Electromagnetic Research, PIER 25 pp. 131-165, Jan 2000.
7. Α. Ν. Μαγουλάς, “*Σκέδαση από τέλειους αγωγούς, μια υβριδική λύση της εξίσωσης Maue*”, Διδακτορική Διατριβή Ε.Μ. Πολυτεχνείο, Φεβρουάριος 2000.
8. J. Choi, N. Wang, L. Peters and P. Levy, “*Near Axial Backscattering from Finite Cones*”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation AP-38 , no 8, pp. 1264-1272, 1990.
9. D. S. Wang and L. N. Medgyesi-Mitchang, “*Electromagnetic Scattering from Finite Circular and Elliptic Cones*”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation AP-33, no 5, pp. 488-497, 1985.

Σύντομο βιογραφικό σημείωμα

Ο Α. Ν. Μαγουλάς είναι Δρ. Ηλεκτρολόγος Μηχ/κος και Λέκτορας στη Σ.Ν.Δ.

Ιεραρχική ταξινόμηση ψηφιακά διαμορφωμένων σημάτων σε περιβάλλον πολλαπλών ανακλάσεων με χρήση νευρωνικών ταξινομητών (LVQ) για εφαρμογές σε δέκτες λογισμικού SDR

Γ. Χατζηχρήστος, Β. Καλλίας και Ι. Κούκος

Περίληψη

Η παρούσα εργασία αναφέρεται σε μία μέθοδο αυτόματης ιεραρχικής ταξινόμησης η οποία χρησιμοποιεί στατιστικές υψηλών τάξεων ως διακριτά γνωρίσματα, προκειμένου να αναγνωριστεί μια ποικιλία ψηφιακών διαμορφώσεων (2-PSK, 4-PSK, QPSK, 8-PSK και MSK). Ο ταξινομητής χρησιμοποιεί ένα νευρωνικό δίκτυο τύπου LVQ (κβαντιζόμενων αναπροσαρμοζόμενων διανυσμάτων), το οποίο εκπαιδεύεται σε προσεκτικά επιλεγμένες Ροπές και Cumulants υψηλότερων τάξεων, που δημιουργούν διακριτές συστάδες μεταξύ των πέντε ψηφιακών διαμορφώσεων σε λόγους σήματος προς θόρυβο έως και 7dB. Κανάλια διάδοσης γρήγορης απόσβεσης και πολλαπλών ανακλάσεων χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση του ταξινομητή σε ρεαλιστικές συνθήκες. Ένας δέκτης λογισμικού SDR είναι ο ιδεώδης τόπος για την εγκατάσταση του ταξινομητή LVQ, διότι αυτοματοποιεί την αναγνώριση διαμόρφωσης και καναλιού του εισερχόμενου σήματος.

I. Εισαγωγή

Η αυτόματη αναγνώριση ψηφιακών διαμορφώσεων και, ειδικότερα, η αναγνώριση του αστερισμού κάθε διαμόρφωσης κάτω από συνθήκες παραφθοράς του σήματος (λευκού θορύβου και πολλαπλών ανακλάσεων) αποκτά αυξανόμενη σημασία με τη χρήση πολυπλοκότερων αστερισμών στις ασύρματες κυψελωτές τηλεπικοινωνίες, όπως π.χ. στην περίπτωση του E.D.G.E., καθώς και σε εφαρμογές δεκτών λογισμικής βάσης. Προηγούμενες εργασίες σε αυτό το πεδίο έδειξαν ότι η ιεραρχική (δενδρωτή) ταξινόμηση μπορεί να είναι ιδιαίτερα επιτυχής, εάν τα επιλεγμένα διακριτά χαρακτηριστικά είναι σωστά επιλεγμένα. Η πρότασή μας συνίσταται στην ταυτόχρονη χρήση της πληροφορίας που φέρουν οι στατιστικές (Ροπές και Cumulants) διαφόρων τάξεων. Δυστυχώς, ο διαχωρισμός δεν καλύπτει όλες τις δυνατές περιπτώσεις διαμορφώσεων και, έτσι, η ανάγκη για δημιουργία κάποιων επιμέρους κλάδων της μεθόδου είναι αναπόφευκτη.

Σε αυτή την εργασία, ερευνούμε τη βέλτιστη επιλογή έως και τριών στατιστικών υψηλότερων τάξεων που οδηγούν από την εκπαίδευση ενός νευρωνικού δικτύου LVQ στην επιτυχή ταξινόμηση των διαμορφώσεων ενδιαφέροντός μας. Για την επιλογή του LVQ ως καταλληλότερου νευρωνικού δικτύου για τον σκοπό μας, ξεκινήσαμε την εξομοίωση χρησιμοποιώντας αρχικά δύο απλά νευρωνικά δίκτυα. Ξεκινήσαμε με τη χρήση Perceptrons και στη συνέχεια με τη χρήση ανταγωνιστικών νευρωνικών δικτύων (Competitive) με ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η εν συνεχεία επιλογή των νευρωνικού δικτύου τύπου LVQ ήταν εύλογη, καθότι αποτελεί συνδυασμό των δύο προαναφερθέντων δικτύων.

Η έρευνά μας περιορίζεται σε ένα υποσύνολο των ψηφιακών διαμορφώσεων το οποίο περιλαμβάνει τις 2-PSK, 4-PSK, QPSK, 8-PSK και MSK. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στα απαιτούμενα δείγματα για την επίτευξη επιτυχούς ταξινόμησης. Ένας σημαντικός παράγοντας για την επιτυχή ταξινόμηση των διάφορων ψηφιακών διαμορφώσεων αποτελεί ο λόγος σήματος προς θόρυβο. Ερευνήσαμε τη μεταβολή των στατιστικών υψηλότερων τάξεων με την μεταβολή του λόγου σήματος προς θόρυβο, θεωρώντας ότι το σήμα έχει οδεύσει μόνο διαμέσου ενός καναλιού διάδοσης προσθετικού λευκού

θορύβου. Επίσης, ερευνήσαμε τις δυνατότητες των στατιστικών υψηλότερων τάξεων κάτω από αλλοιώσεις καναλιών πολλαπλών οδών διάδοσης, χρησιμοποιώντας στις εξομοιώσεις μας πραγματικά κανάλια διάδοσης (επιφάνεια θαλάσσης, αστικών περιοχών κ.λπ.), τα οποία προκαλούν αλλοιώσεις στα εκπεμπόμενα σήματα, και χωρίς να έχει χρησιμοποιηθεί άλλη ψηφιακή επεξεργασία του λαμβανομένου σήματος (αφαίρεση λευκού θορύβου και εξισωτές καναλιού διάδοσης).

Τα δείγματα των σημάτων που χρησιμοποιούνται (χωρίς βλάβη της γενικότητας) είναι τα I και Q μέρη της βασικής συχνότητας (baseband), τα οποία εξάγονται με τις ακόλουθες συνθήκες. Πρώτον, υποθέτουμε ότι λειτουργούμε έχοντας συμφωνία φάσεων με σήματα τόνων και εξασφαλισμένο συντονισμό φέροντος και χρονισμό πομπού-δέκτη. Μια χονδρική εκτίμηση του φέροντος και του φάσματος του σήματος μπορεί να εκτελεστεί με εκτίμηση της φασματικής ισχύος του σήματος (ιεραρχική ταξινόμηση ψηφιακών διαμορφώσεων με τη χρήση Cumulants).

II. Στατιστικές υψηλότερων τάξεων

Οι στατιστικές υψηλότερων τάξεων χαρακτηρίζουν το σχήμα και την κατανομή της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας (pdf). Υπό τις προαναφερθείσες προϋποθέσεις, λαμβάνουμε μια ακολουθία (βασικής ζώνης) από στοιχεία I και Q ενός σήματος $S=I+jQ$, το οποίο θέλουμε να ταξινομήσουμε σύμφωνα με τα στατιστικά υψηλών τάξεων του, τα οποία έχουν αλλοιωθεί για ένα συγκεκριμένο αριθμό δειγμάτων N. Τα στοιχεία I και Q χαρακτηρίζονται από μια συγκεκριμένη κατανομή, διαφορετική για κάθε κατανομή. Η ταξινόμηση ενός σήματος θα ήταν εύκολη εάν δεν είχε αλλοιωθεί το σήμα κατά τη διάδοσή του. Επιθυμούμε να εκτελέσουμε ταξινόμηση αλλοιωμένων σημάτων, γεγονός που μπορεί να ερμηνευθεί ως αλλοίωση της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας του σήματος ή, με άλλα λόγια, του αστερισμού που απεικονίζει την κατανομή πάνω στο μιγαδικό επίπεδο. Εάν τα αλλοιωμένα σήματα μπορούσαν να κρατήσουν κάποια χαρακτηριστικά της κατανομής, τότε η ταξινόμηση θα ήταν αναπόφευκτη.

Για τον υπολογισμό των στατιστικών υψηλότερων τάξεων υποθέτουμε μια ακολουθία δειγμάτων βασικής ζώνης και μηδενικής μέσης τιμής, της μορφής $s_k=a_k+jb_k$. Στη συνέχεια προσθέτουμε γκαουσιανό θόρυβο. Ο ορισμός των στατιστικών υψηλότερων τάξεων, τον οποίο θα περιγράψουμε παρακάτω, είναι αρκετά πολυπλοκότερος από ό,τι στην περίπτωση των στατιστικών πρώτης και δεύτερης τάξεως. Όμως, προκειμένου να αποκαλυφθεί περισσότερη κρυμμένη πληροφορία του στοιχείου Q του σήματος αλλά και της σχέσης μεταξύ I και Q, χρησιμοποιούμε τον συζυγή κάθε δείγματος, που με την σειρά του δημιουργεί μια νέα μεταβλητή $s_k = a_k - jb_k$. Η χρήση τόσο της T.M. των δειγμάτων όσο και αυτής των συζυγών σε διάφορους συνδυασμούς δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού διαφόρων παραλλαγών στατιστικών υψηλότερων τάξεων είτε αυτές είναι Ροπές είτε Cumulants. Για τον υπολογισμό των στατιστικών υψηλότερης τάξεως έχουν δημιουργηθεί αλγόριθμοι, όπως αυτός του Fra di Bruno, που προσπερνούν το πρόβλημα των διαδοχικών παραγωγίσεων, εισάγουν όμως νέες προγραμματιστικές δυσκολίες για τον υπολογισμό των διαδοχικών διαμερίσεων. Από την άλλη μεριά, ο υπολογισμός στατιστικών έως και όγδοης τάξεως γίνεται αρκετά απλός.

Η μεγάλη συμβολή των ακολουθιών με μηδενική μέση τιμή είναι στην απλοποίηση των υπολογισμών κάποιων στατιστικών υψηλότερων τάξεων, επειδή κάποιες διαμερίσεις που περιλαμβάνουν Ροπές ή Cumulants πρώτης τάξεως γίνονται μηδέν (όταν η μέση τιμή είναι μηδέν) και παραλείπονται από τη διαδικασία υπολογισμού. Επίσης, η ίση πιθανότητα όλων των συμβόλων που εκπέμπονται από ένα πομπό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η υλοποίηση των T.M. “ $A = a_k$ ” και “ $B = b_k$ ”, $k=1, 2, \dots, N$ είναι ισοπίθανη διαδικασία. Έτσι και εξαιτίας της συμμετρίας των αστερισμών των ψηφιακών διαμορφώσεων που εξετάζουμε, τα στατιστικά περιττών τάξεων είναι μηδέν. Γι’ αυτό, περιοριζόμαστε στον υπολογισμό στατιστικών άρτιας τάξεως έως και την όγδοη.

A. Ροπές

Ορισμός

Περίπτωση πολλαπλών μεταβλητών: Έστω ένα διάνυσμα X με n τυχαίες μεταβλητές $X=[x_1, x_2, \dots, x_k]$. Η ροπή $n^{\text{ης}}$ τάξεως ορίζεται ως:

$$M_{X,n} \triangleq E[x_1^{i_1} \cdot x_2^{i_2} \cdot \dots \cdot x_k^{i_k}]$$

όπου $(i_1, i_2, \dots, i_k) \in \mathbb{N}^k$ και $i_1 + i_2 + \dots + i_k = n$. Οι μεταβλητές i_k ορίζουν τη συμμετοχή της Τ.Μ. στον υπολογισμό της κάθε ροπής.

Περίπτωση δύο Τ.Μ.: $X=[x_1, x_2]$, έτσι

$$M_{X,n} \triangleq E[x_1^{i_1} \cdot x_2^{i_2}]$$

Παράδειγμα: Ροπή $2^{\text{ης}}$ τάξεως της X . Σε αυτή την περίπτωση βλέπουμε ότι υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τρόποι για να υπολογίσουμε τη ροπή. Αυτοί εξαρτώνται από τις τιμές των i_1 και i_2 .

- $1^{\text{η}}$ περίπτωση : $\{i_1=2, i_2=0\}$ $M_{X,2,2} = E[x_1^2 \cdot x_2^0]$
- $2^{\text{η}}$ περίπτωση : $\{i_1=1, i_2=1\}$ $M_{X,2,1} = E[x_1^1 \cdot x_2^1]$
- $3^{\text{η}}$ περίπτωση : $\{i_1=0, i_2=2\}$ $M_{X,2,0} = E[x_1^0 \cdot x_2^2]$

B. Cumulants

Ορισμός

Περίπτωση πολλαπλών μεταβλητών: Έστω και πάλι το ίδιο διάνυσμα X και $(i_1, i_2, \dots, i_k) \in \mathbb{N}^k$. Το Cumulant $n^{\text{ης}}$ τάξεως ορίζεται ως:

$$C_{X,n} \triangleq \text{Cum}\{x_1^{i_1}, x_2^{i_2}, \dots, x_k^{i_k}\}$$

Στον ορισμό των Cumulants οι δείκτες i_k δεν αντιπροσωπεύουν κάποια δύναμη της αντίστοιχης Τ.Μ. Για να το κατανοήσουμε καλύτερα, μία ισοδύναμη έκφραση του ορισμού του Cumulant είναι:

$$C_{X,n} \equiv \text{Cum}\left\{\underbrace{x_1, \dots, x_1}_{i_1}, \underbrace{x_2, \dots, x_2}_{i_2}, \dots, \underbrace{x_k, \dots, x_k}_{i_k}\right\}$$

Περίπτωση δύο Τ.Μ.: $X=[x_1, x_2]$, έτσι

$$C_{X,n,i_1} \equiv \text{Cum}\{x_1^{i_1}, x_2^{i_2}\}$$

Γ. Σχέσεις μεταξύ Ροπών και Cumulants

Η σχέση μεταξύ αυτών των στατιστικών προέρχεται από τον ορισμό των συναρτήσεων που τα δημιουργούν. Εάν κάνουμε ανάπτυξη αυτών των συναρτήσεων σε σειρές Taylor, εξισώνοντας τους

συντελεστές των δύο πολυώνυμων, καταλήγουμε στις παρακάτω σχέσεις για κατανομές πολλών μεταβλητών:

$$Cum\{x_1, x_2, \dots, x_n\} = \sum_{\forall \nu} (-1)^{(q-1)} \cdot (q-1)! \cdot E \left[\prod_{j \in \nu_1} x_j \right] \cdot \dots \cdot E \left[\prod_{j \in \nu_q} x_j \right]$$

όπου η άθροιση εκτελείται πάνω σε όλες τις διαμερίσεις $\hat{\Pi}=(\hat{\Pi}_1, \dots, \hat{\Pi}_q)$ για τους δείκτες $(1, \dots, n)$ και q είναι το πλήθος των στοιχείων κάθε διαμέρισης. Αντίστοιχα, για τις Ροπές έχουμε:

$$C_{X, a+b, a} = Cum \left\{ \underbrace{x_1, \dots, x_1}_a, \underbrace{x_2, \dots, x_2}_b \right\} = \sum_{\forall \nu} (-1)^{(q-1)} \cdot (q-1)! \cdot E \left[\prod_{j \in \nu_1} x_j \right] \cdot \dots \cdot E \left[\prod_{j \in \nu_q} x_j \right]$$

$$E\{(x_1)^a E(x_2)^b\} = Cum[\{x_j\}_{j \in \nu_1}] E \dots E Cum[\{x_j\}_{j \in \nu_q}]$$

όπου $a+b=n$ η τάξη της Ροπές. Οι σταθερές “a” και “b” παίρνουν διακριτές μη αρνητικές τιμές έως n και δείχνουν πόσες φορές η T.M. συμμετέχει στον υπολογισμό του συγκεκριμένου Cumulant. Η μόνη δυσκολία έγκειται στην εκτίμηση όλων των πρόσθετων διαμερίσεων.

Παράδειγμα: Εξετάζοντας την περίπτωση η ζητούμενη τάξη να είναι $n=3$, μπορούμε να υπολογίσουμε όλες τις πρόσθετες διαμερίσεις για τον υπολογισμό του Cumulant 3^{ης} τάξεως για μία κατανομή δύο μεταβλητών $X=[x_1, x_2]$:

- $\nu_1=\{1,2,3\}\}q=1 : (-1)^{(1-1)}(1-1)!E[x_1E x_2E x_3]=E[x_1E x_2E x_3]$
- $\nu_2=\{1,2\}, \{3\}\}q=2 : -E[x_1E x_2]EE[x_3]$
- $\nu_3=\{1,3\}, \{2\}\}q=2 : -E[x_1E x_3]EE[x_2]$
- $\nu_4=\{2,3\}, \{1\}\}q=2 : -E[x_2E x_3]EE[x_1]$
- $\nu_5=\{1\}, \{2\}, \{3\}\}q=3 : 2EE[x_1]EE[x_2]EE[x_3]$

Έτσι, προσθέτοντας όλες τις ανωτέρω διαμερίσεις έχουμε το Cumulant 3^{ης} τάξεως, το οποίο προσλαμβάνει την ακόλουθη μορφή:

- $C_{X,3,3}=Cum\{x_1, x_1, x_1\}=E[(x_1)^3]-3EE[(x_1)^2]EE[x_1]+2EE[x_1]^3$
- $C_{X,3,2}=Cum\{x_1, x_1, x_2\}=E[(x_1)^2E x_2]-E[(x_1)^2]EE[x_2]-2EE[x_1E x_2]EE[x_1]+2EE[x_1]^2EE[x_2]$
- $C_{X,3,1}=Cum\{x_1, x_2, x_2\}=E[x_1E(x_2)^2]-2EE[x_1E x_2]EE[x_2]-[x_1]EE[(x_2)^2]+2EE[x_1]EE[(x_2)^2]$
- $C_{X,3,0}=Cum\{x_2, x_2, x_2\}=E[(x_2)^3]-3EE[(x_2)^2]EE[x_2]+2EE[x_2]^3$

Αυτή η μέθοδος υπολογισμού Cumulants και Ροπών είναι αναπόφευκτη όταν μελετούμε τυχαίες κατανομές, των οποίων η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας είναι άγνωστη.

III. Νευρωνικό Δίκτυο-Δίκτυο κβαντιζόμενων αναπροσαρμοζόμενων διανυσμάτων (LVQ)

Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιάσουμε τις βασικές αρχές λειτουργίας ενός δικτύου LVQ, το οποίο μας οδήγησε στην ιδέα δημιουργίας ενός συστήματος παράλληλης ταξινόμησης. Αυτός ο τύπος νευρωνικού δικτύου συνδυάζει δύο διαφορετικά είδη νευρωνικών δικτύων, ενός γραμμικού (perceptron) με τις δυνατότητες ενός δικτύου αυτο-οργανούμενου χάρτη χαρακτηριστικών (SOFM), το οποίο βασίζεται σε ανταγωνιστικές στοιβάδες.

Ο κβαντισμός αναπροσαρμοζόμενων διανυσμάτων (LVQ) είναι μια μέθοδος εκπαίδευσης ανταγωνιστικών στοιβάδων υπό επίβλεψη. Μία ανταγωνιστική στοιβάδα αυτόματα μαθαίνει να ταξινομεί εισερχόμενα διανύσματα. Παρόλα αυτά, οι κατηγορίες που βρίσκει μια ανταγωνιστική στοιβάδα εξαρτώνται μόνο από την απόσταση που έχουν μεταξύ τους τα εισερχόμενα διανύσματα. Εάν δύο εισερχόμενα διανύσματα είναι παρόμοια, η ανταγωνιστική στοιβάδα θα τα κατατάξει μάλλον στην ίδια κατηγορία. Δεν υπάρχει μηχανισμός σε ένα δίκτυο αυστηρά ανταγωνιστικών στοιβάδων που να διακρίνει εάν δύο εισερχόμενα διανύσματα ανήκουν στην ίδια κατηγορία ή σε άλλη. Τα δίκτυα LVQ από την άλλη μεριά μαθαίνουν να ταξινομήσουν εισερχόμενα διανύσματα σε κατηγορίες που υποδεικνύονται από τον χρήστη.

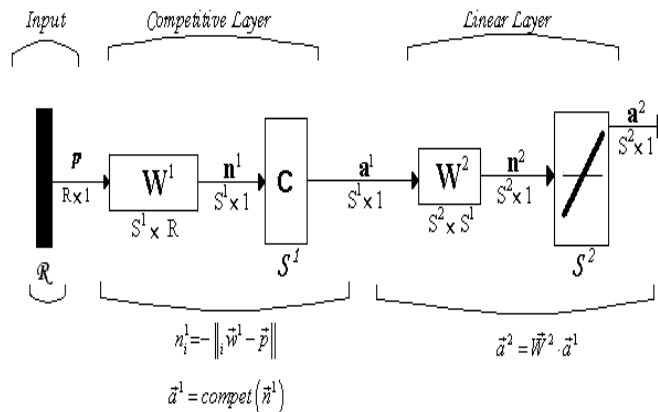
Στο Σχήμα 1 μπορούμε εύκολα να διακρίνουμε τις δύο στοιβάδες, την ανταγωνιστική και τη γραμμική. Με το ανταγωνιστικό LVQ δίκτυο κάθε νευρώνας στις πρώτες στοιβάδες μαθαίνει ένα πρωτότυπο διάνυσμα που του επιτρέπει να ταξινομεί και να οριοθετεί περιοχές στον χώρο εισόδου. Αντί όμως να υπολογίσουμε την εγγύτητα των διανυσμάτων εισόδου και των διανυσμάτων βάρων χρησιμοποιώντας το εσωτερικό τους γινόμενο, θα μιμηθούμε το δίκτυο LVQ υπολογίζοντας απ' ευθείας την απόσταση. Ένα πλεονέκτημα του υπολογισμού της απόστασης απ' ευθείας είναι ότι τα διανύσματα δεν χρειάζονται κανονικοποίηση. Όταν τα διανύσματα είναι κανονικοποιημένα, η απόκριση του δικτύου θα είναι η ίδια, είτε χρησιμοποιηθεί το εσωτερικό γινόμενο είτε η απόσταση. Η καθαρή είσοδος στην πρώτη στοιβάδα του LVQ θα είναι:

$$n_i^1 = -\tau_i \mathbf{w}^1 - \mathbf{p} \tau$$

ή, σε διανυσματική μορφή,

$$\mathbf{n}^1 = -[\tau_1 \mathbf{w}^1 - \mathbf{p} \tau \quad \tau_2 \mathbf{w}^1 - \mathbf{p} \tau \quad \dots \quad \tau_{S^1} \mathbf{w}^1 - \mathbf{p} \tau]^T$$

Η έξοδος της πρώτης στοιβάδας του LVQ είναι $\mathbf{a}^1 = \mathbf{compet}(\mathbf{n}^1)$. Επομένως, ο νευρώνας, του οποίου το διάνυσμα βάρους είναι εγγύτερα στο διάνυσμα εισόδου, θα έχει σαν έξοδο 1, και όλοι οι άλλοι νευρώνες 0.



Σχήμα 1: Δίκτυο LVQ.

Έως τώρα, το δίκτυο LVQ συμπεριφέρεται ακριβώς σαν ένα ανταγωνιστικό δίκτυο (τουλάχιστον για κανονικοποιημένα διανύσματα). Υπάρχει όμως μια διαφορά στην ερμηνεία. Στο ανταγωνιστικό δίκτυο ο νευρώνας που δεν εξάγει μηδενικές τιμές δείχνει σε ποια κατηγορία ανήκει το εισερχόμενο διάνυσμα. Για το δίκτυο LVQ, ο νευρώνας που επικρατεί δείχνει μάλλον μια υποκατηγορία παρά μία κατηγορία. Υπάρχουν αρκετοί νευρώνες (υποκατηγορίες), οι οποίοι δημιουργούν κάθε κατηγορία.

Η δεύτερη στοιβάδα του δικτύου LVQ χρησιμοποιείται για να ενοποιήσει όλες αυτές τις υποκατηγορίες σε μία κατηγορία. Αυτό επιτυγχάνεται με τον πίνακα \mathbf{W}^2 . Οι στήλες αυτού του πίνακα αντιπροσωπεύουν τις υποκατηγορίες και οι γραμμές τις κατηγορίες. Ο \mathbf{W}^2 έχει ένα 1 σε κάθε στήλη με όλα τα άλλα στοιχεία 0. Η γραμμή στην οποία υπάρχει 1 δείχνει σε ποια κατηγορία ανήκει

κάθε υποκατηγορία, π.χ. ($w_{ki}^2 = 1$). Η υποκατηγορία i είναι μέρος της κατηγορίας k . Η διαδικασία ενοποίησης υποκατηγοριών για τη δημιουργία μιας κατηγορίας επιτρέπει στο δίκτυο LVQ να δημιουργεί πολύπλοκα σύνορα μεταξύ των κατηγοριών. Ένα τυπικό ανταγωνιστικό δίκτυο υφίσταται τον περιορισμό να διακρίνει το χώρο εισόδου μόνο σε μη κυρτές περιοχές. Το δίκτυο LVQ ξεπερνά αυτόν τον περιορισμό.

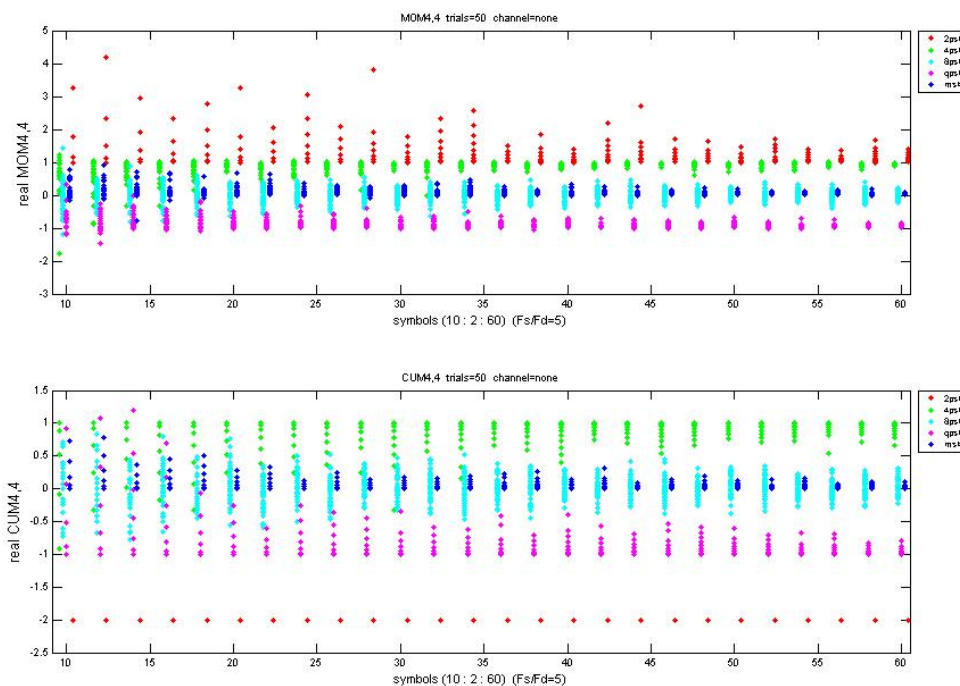
IV. Ταξινομητής ψηφιακών διαμορφώσεων

Τα χαρακτηριστικά που επιλέγονται για να διαφοροποιήσουν τις διάφορες ψηφιακές διαμορφώσεις είναι συνδυασμοί Ροπών και Cumulants υψηλών τάξεων. Η εκτίμηση αυτών των στατιστικών μεγεθών βασίζεται στην εργασία του Pierre Marchand. Έτσι επαληθεύσαμε τις σχέσεις Ροπών και Cumulants 8^{ης} τάξεως και, για να βελτιώσουμε την εκτίμηση, προσθέσαμε και Ροπές 6^{ης} τάξεως. Επιπρόσθετα, τροποποιήσαμε τις σχέσεις, έτσι ώστε να υπολογίσουμε και το φανταστικό μέρος κάθε στατιστικού μεγέθους, εκτός του πραγματικού. Τέλος, υπολογίσαμε όλους τους δυνατούς συνδυασμούς σε μια δεδομένη τάξη λαμβάνοντας υπόψη τους συζυγείς όρους.

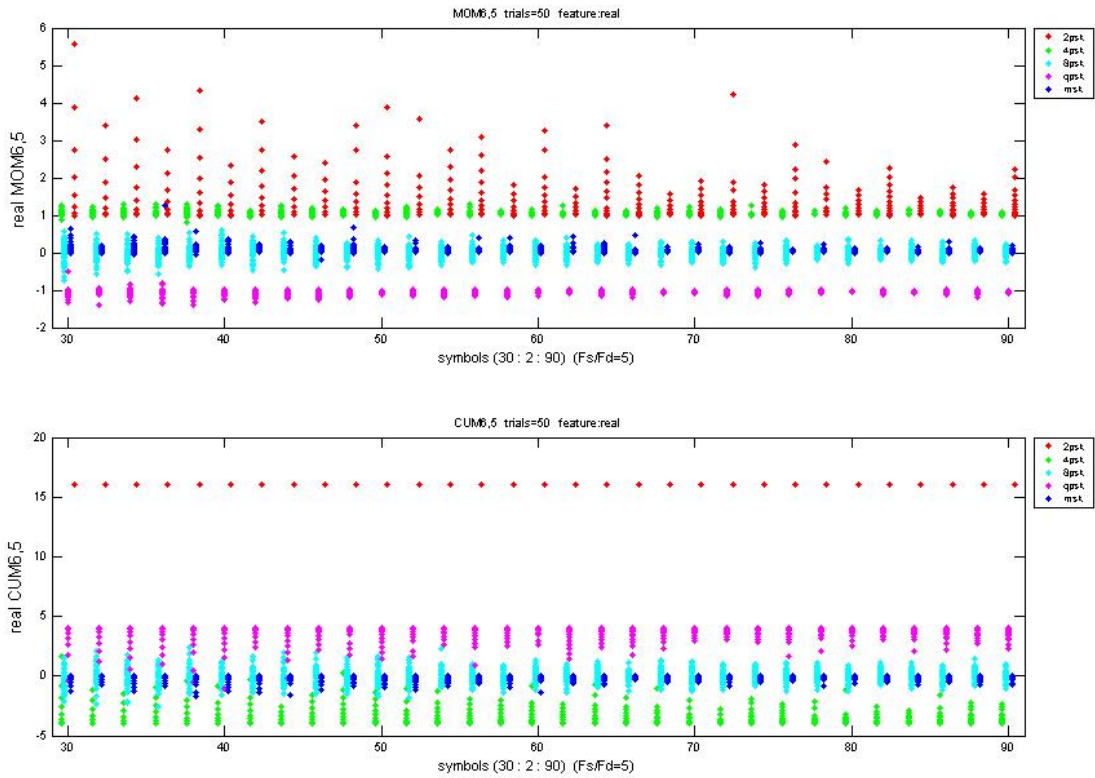
Δοκιμάζοντας όλους τους δυνατούς συνδυασμούς, καταλήξαμε σε 3 χαρακτηριστικά που μας επιτρέπουν να ξεχωρίσουμε μία ψηφιακή διαμόρφωση ανάμεσα σε συνολικά 5 που χρησιμοποιήσαμε. Έτσι, παρατηρήσαμε ότι το πραγματικό μέρος της Ροπής 8^{ης} τάξεως $\{8,8\}$ & $\{8,0\}$ είναι μοναδικό για τη διαμόρφωση MSK. Έτσι, το χρησιμοποιήσαμε για την αναγνώριση της MSK.

A. Αθόρυβο κανάλι διάδοσης

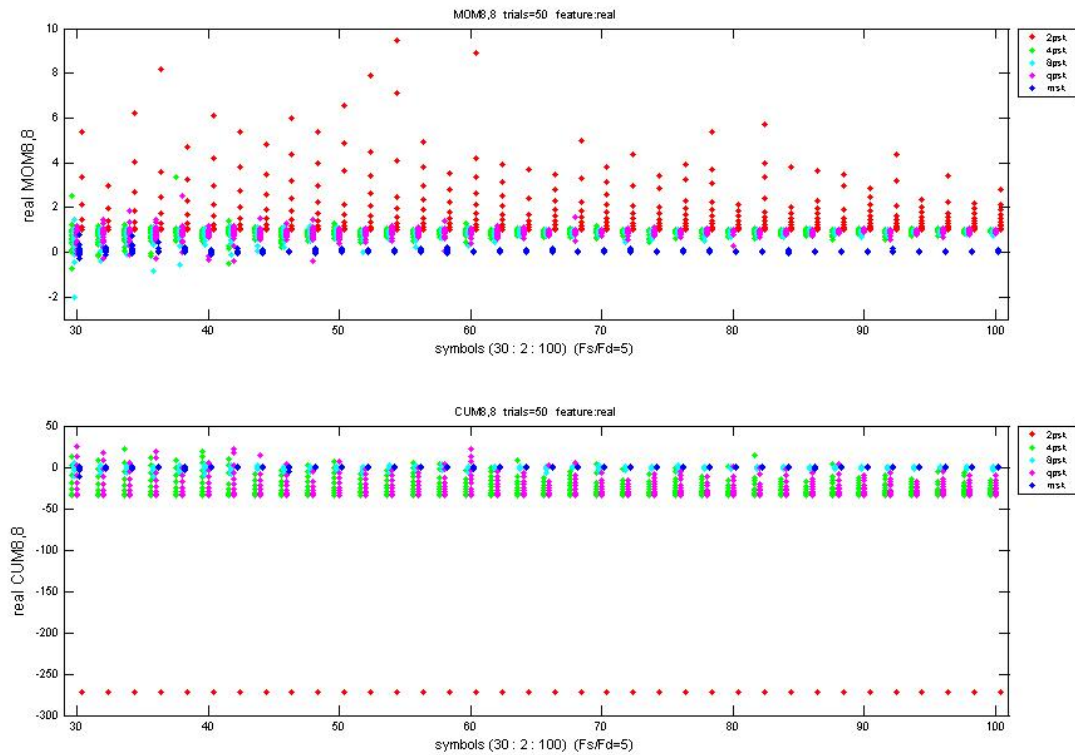
Στα στατιστικά 6^{ης} τάξεως ξεχωρίσαμε το Cumulant $\{6,5\}$ & $\{6,1\}$, το οποίο ταξινομεί κατά μοναδικό τρόπο τις 5 διαμορφώσεις σε 4 κατηγορίες, αναγνωρίζοντας τις 3 από αυτές, δηλαδή τις 2-PSK, 4-PSK και QPSK, ενώ αδυνατεί να αναγνωρίσει τις MSK και 8-PSK. Στα στατιστικά 4^{ης} τάξεως το Cumulant $\{4,4\}$ & $\{4,0\}$ διαχωρίζει επιτυχώς την BPSK και 4-PSK ενώ αναγνωρίζει δύσκολα την MSK και αδυνατεί να αναγνωρίσει την QPSK με την 8-PSK.



Σχήμα 2: Πραγματικό μέρος της Ροπής (Άνω) και Cumulant (Κάτω) τάξεως $\{4,4\}$ για αθόρυβα ψηφιακά διαμορφωμένα σήματα (2-PSK, 4-PSK, QPSK, 8-PSK και MSK) προς τον αριθμό των συμβόλων ($F_s/F_d=5$, Δοκιμές=50).



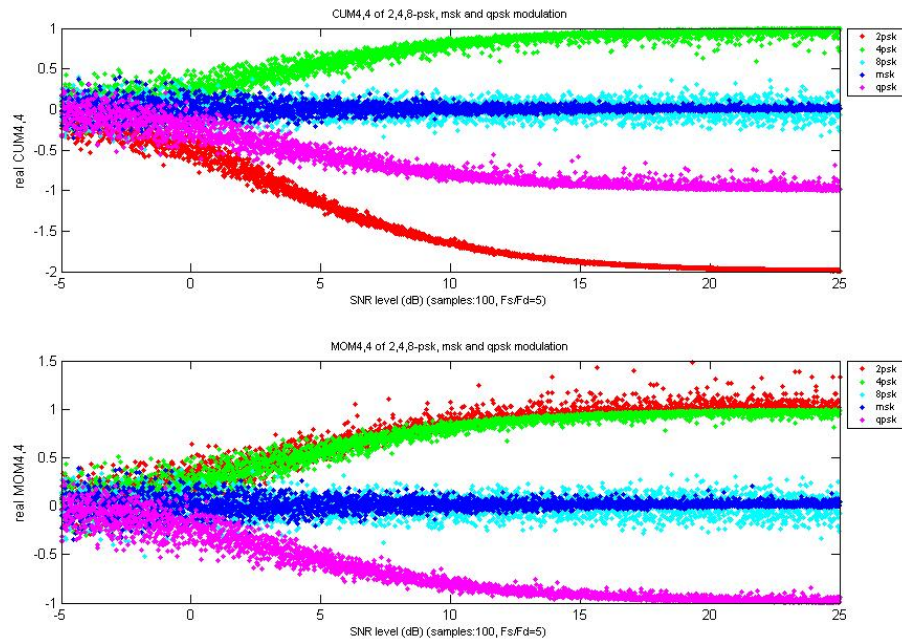
Σχήμα 3: Πραγματικό μέρος της Ροπής (Άνω) και Cumulant (Κάτω) τάξεως {6,5} για αθόρυβα ψηφιακά διαμορφωμένα σήματα (2-PSK, 4-PSK, QPSK, 8-PSK και MSK) προς τον αριθμό των συμβόλων ($F_s/F_d=5$, Δοκιμές=50).



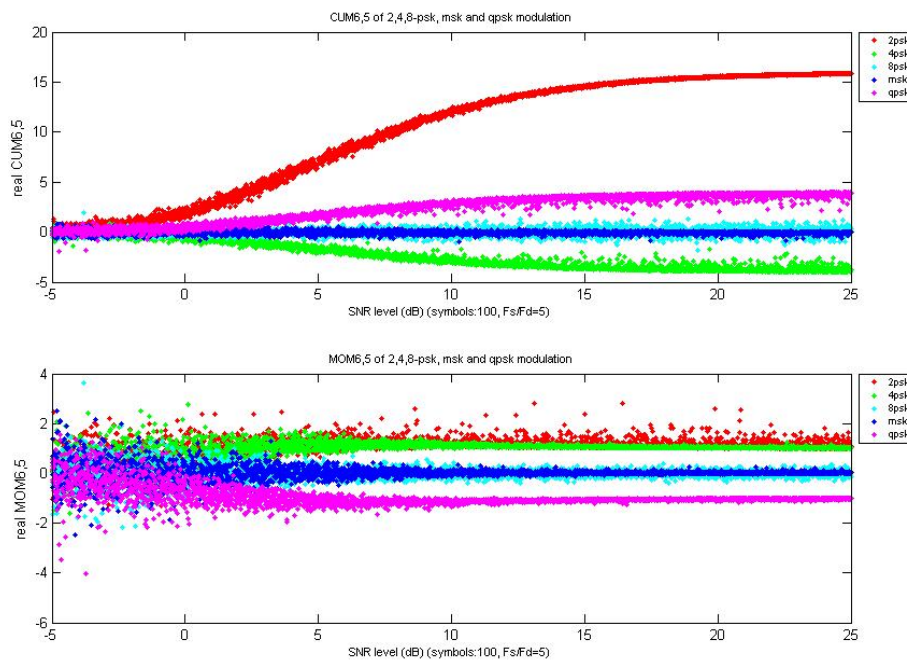
Σχήμα 4: Πραγματικό μέρος της Ροπής (Άνω) και Cumulant (Κάτω) τάξεως {8,8} για αθόρυβα ψηφιακά διαμορφωμένα σήματα (2-PSK, 4-PSK, QPSK, 8-PSK και MSK) προς το αριθμό των συμβόλων ($F_s/F_d=5$, Δοκιμές=50).

B. Κανάλια με Αθροιστικό Λευκό Θόρυβο

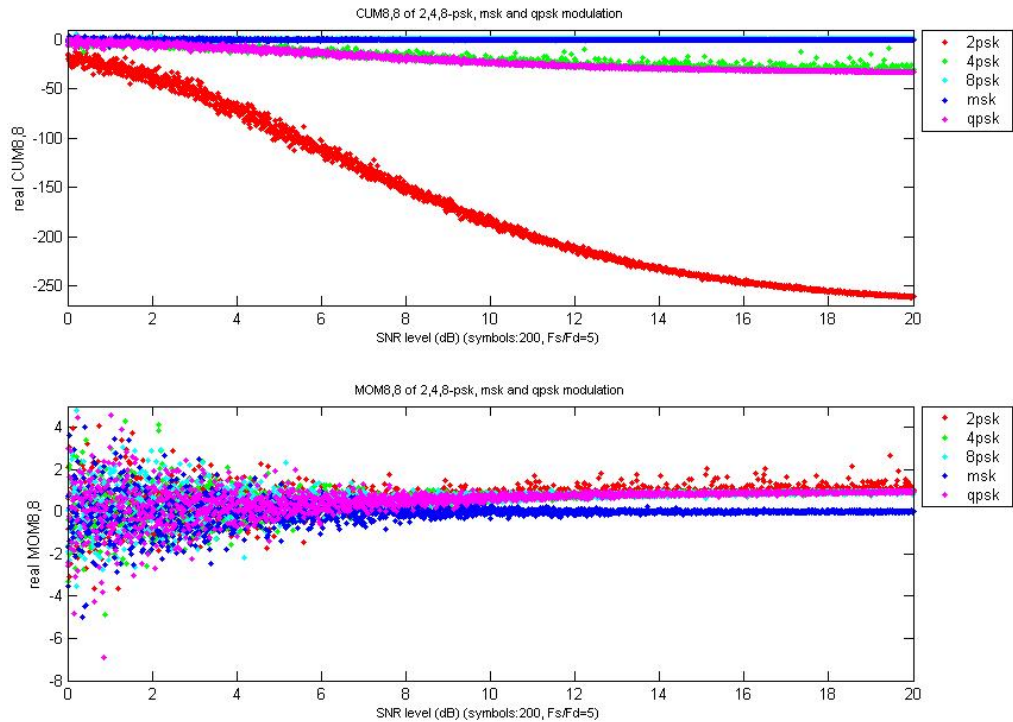
Τα στατιστικά μεγέθη που έχουμε επιλέξει ως τα καταλληλότερα για αθόρυβα κανάλια ισχύουν στην περίπτωση ύπαρξης λευκού θορύβου, κρατώντας τις διαχωριστικές τους δυνατότητες, με μόνη επιπρόσθετη απαίτηση την ποσότητα της απαιτούμενης πληροφορίας, δηλαδή μεγαλύτερο αριθμό συμβόλων.



Σχήμα 5: Πραγματικό μέρος του Cumulant (Άνω) και Ροπής (Κάτω) τάξεως {4,4} για διαμορφώσεις 2-PSK, 4-PSK, QPSK, 8-PSK και MSK προς το λόγο σήματος προς θόρυβο. Αριθμός συμβόλων=100 ($F_s/F_d=5$).



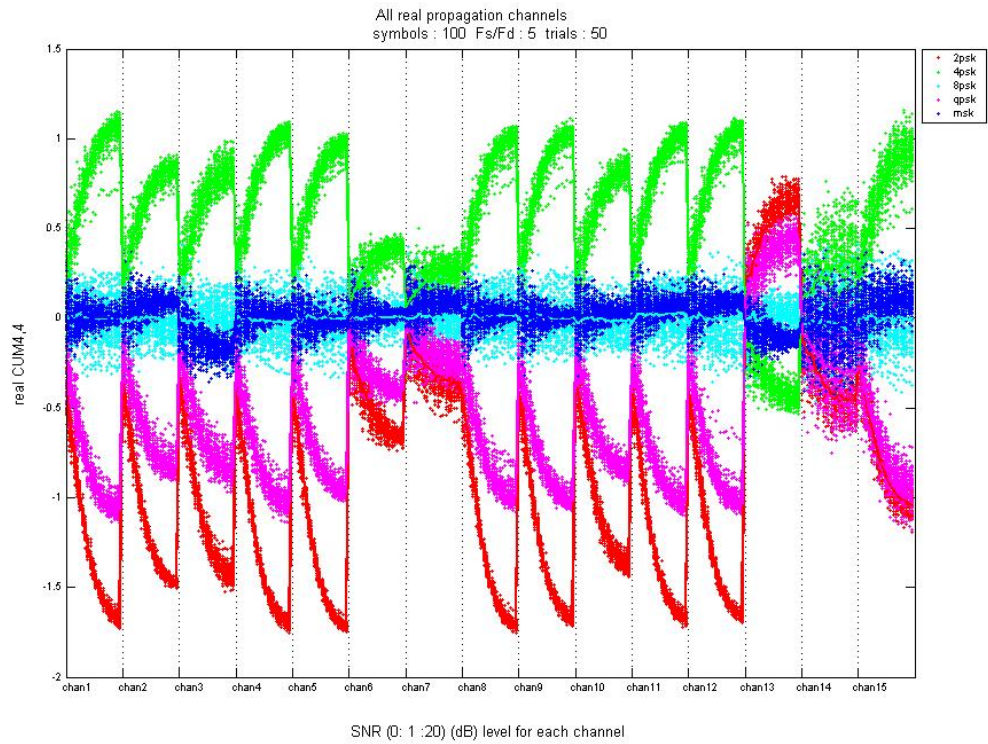
Σχήμα 6: Πραγματικό μέρος του Cumulant (Άνω) και Ροπής (Κάτω) τάξεως {6,5} για διαμορφώσεις 2-PSK, 4-PSK, QPSK, 8-PSK και MSK προς το λόγο σήματος προς θόρυβο. Αριθμός συμβόλων=100 ($F_s/F_d=5$).



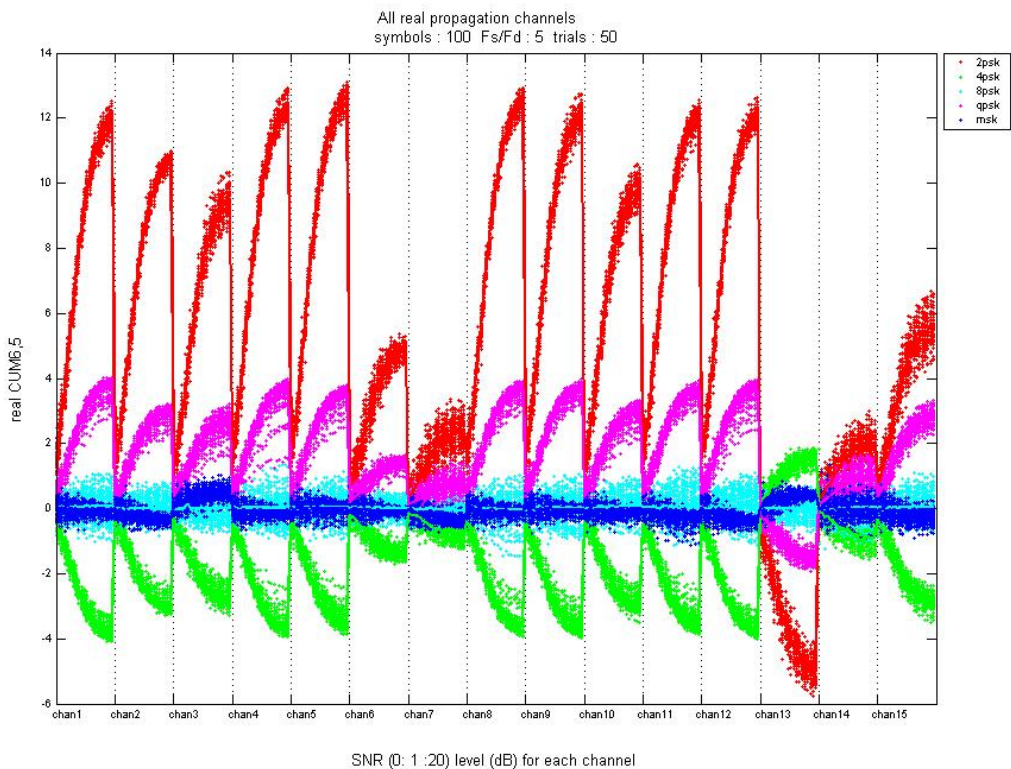
Σχήμα 7: Πραγματικό μέρος του Cumulant (Άνω) και Ροπής (Κάτω) τάξεως {8,8} για διαμορφώσεις 2-PSK, 4-PSK, QPSK, 8-PSK και MSK προς το λόγο σήματος προς θόρυβο. Αριθμός συμβόλων=100 ($F_s/F_d=5$).

Γ. Κανάλια με πολυόδευση και απόσβεση μικρής κλίμακας

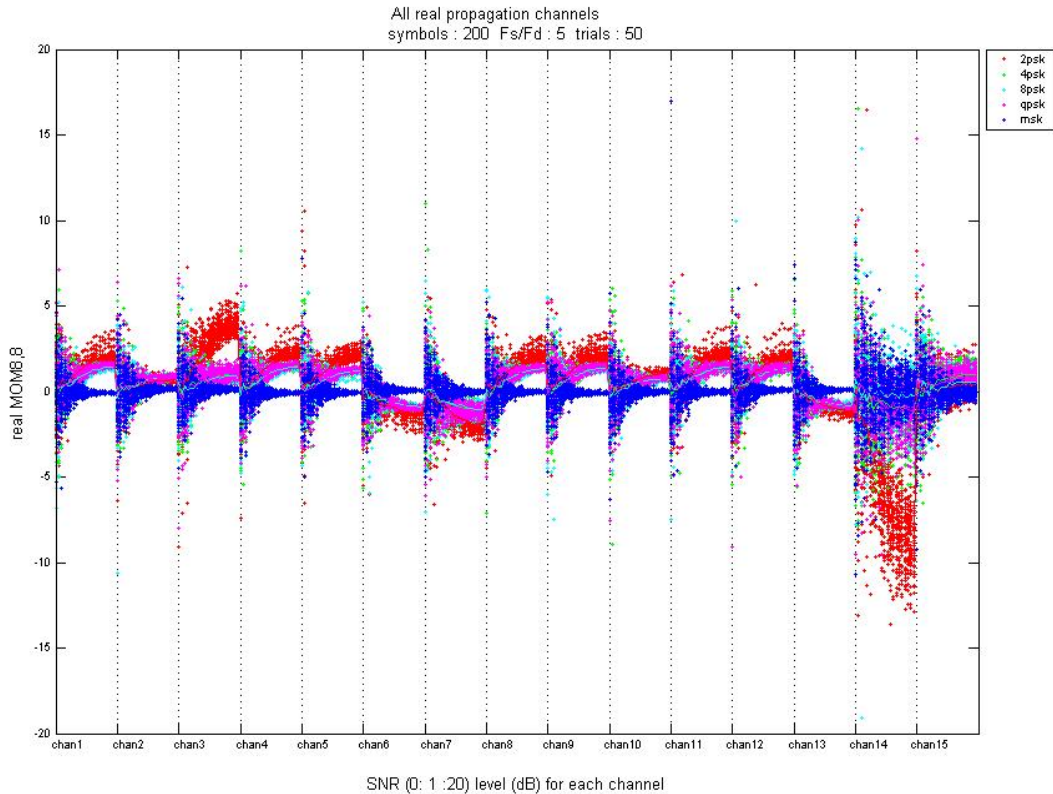
Εξετάσαμε την περίπτωση 15 διαφορετικών αποκρίσεων καναλιών, παρμένων από πειραματικές μετρήσεις, π.χ. επιφάνειας θαλάσσης και αστικής περιοχής. Για πρακτικούς λόγους δεν παρουσιάζουμε τις αποκρίσεις αυτών των καναλιών. Θα δείξουμε έτσι την επίδραση των υπολογισμένων στατιστικών χαρακτηριστικών που παρουσιάσαμε νωρίτερα.



Σχήμα 8: Πραγματικό μέρος του Cumulant τάξεως {4,4} για διαμορφώσεις 2-PSK, 4-PSK, QPSK, 8-PSK και MSK προς 15 διαφορετικά κανάλια διάδοσης, παρουσία θορύβου, με μεγέθη SNR 0,1,2,...,20 dB. Αριθμός συμβόλων=100 (Δοκιμές=50).



Σχήμα 9: Πραγματικό μέρος του Cumulant τάξεως {6,5} για διαμορφώσεις 2-PSK, 4-PSK, QPSK, 8-PSK και MSK προς 15 διαφορετικά κανάλια διάδοσης, παρουσία θορύβου, με μεγέθη SNR 0,1,2,...,20 dB. Αριθμός συμβόλων=100 (Δοκιμές=50).



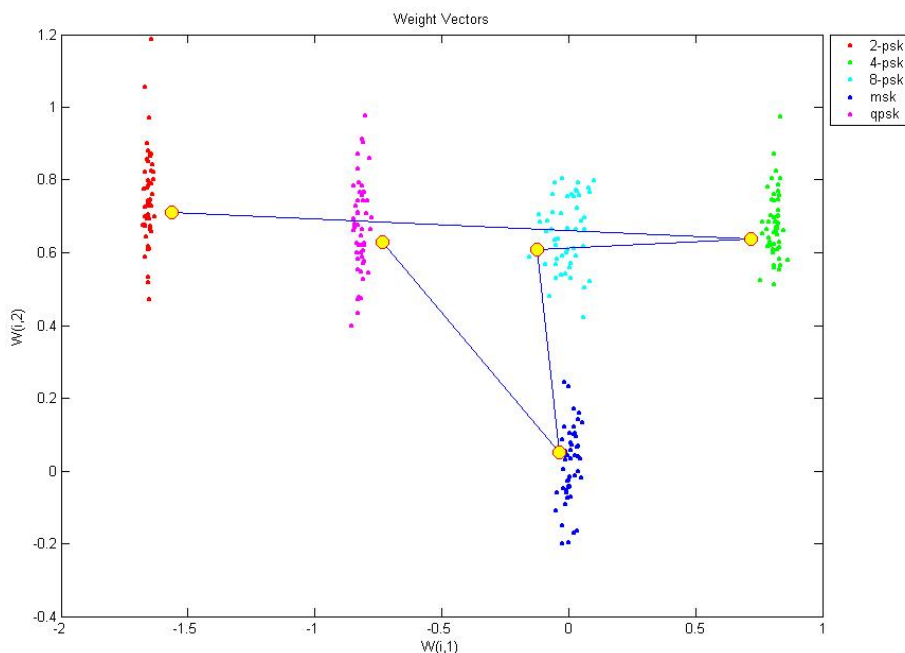
Σχήμα 10: Πραγματικό μέρος του Cumulant τάξεως $\{8,8\}$ για διαμορφώσεις 2-PSK, 4-PSK, QPSK, 8-PSK και MSK προς 15 διαφορετικά κανάλια διάδοσης, παρουσία θορύβου, με μεγέθη SNR 0,1,2,...,20 dB. Αριθμός συμβόλων=100 (Δοκιμές=50).

Παρατηρώντας τα τρία ανωτέρω Σχήματα, διαπιστώνουμε ότι τα τρία αυτά στατιστικά χαρακτηριστικά, που επέδειξαν μια ικανοποιητική ικανότητα ταξινόμησης των υπό εξέταση διαμορφώσεων, φαίνονται ανεπαρκή να εκπληρώσουν το στόχο τους στην περίπτωση των πραγματικών καναλιών διάδοσης. Η “συμπεριφορά” τους δεν παραμένει σταθερή. Η πολυδυσία και η απόσβεση μικρής κλίμακας προσθέτουν στα σήματα νέες στατιστικές αλλοιώσεις και δεν μπορούν να διακριθούν από τα ανωτέρω χαρακτηριστικά. Προκειμένου να βρούμε λύση στο πρόβλημα, αναζητήσαμε άλλα στατιστικά χαρακτηριστικά υψηλών τάξεων, που θα μας βοηθούσαν να ταξινομήσουμε τις 5 διαμορφώσεις που εξετάζουμε. Επίσης, υπολογίσαμε το φανταστικό μέρος, την απόλυτη τιμή και τη φάση αυτών των στατιστικών μεγεθών (θεωρώντας κάθε στατιστικό χαρακτηριστικό της μορφής $s_k = a_k + jb_k$) έως την 8^η τάξη, ώστε να βρούμε νέα διακριτά χαρακτηριστικά. Με αυτή την έρευνα καταλήξαμε στη χρήση παραδείγματος χάρις στην απόλυτη τιμή του Cumulant τάξεως $\{4,2\}$ ή του φανταστικού μέρους του Cumulant τάξεως $\{4,4\}$.

Παρουσιάσαμε εδώ, για κάθε κανάλι, τα πιο κατάλληλα στατιστικά χαρακτηριστικά για την ταξινόμηση των 5 ψηφιακών διαμορφώσεων. Στην παρουσίασή μας αυτή δεν δείξαμε εκείνα τα σχήματα που φανερώουν τη συμπεριφορά των στατιστικών υψηλών τάξεων συναρτήσει του διατιθέμενου αριθμού συμβόλων για κάθε κανάλι και για SNR=10dB, αλλά παρουσιάσαμε τα πιο σημαντικά.

V. Νευρωνικό δίκτυο LVQ εκπαιδευόμενο με στατιστικές υψηλών τάξεων

Στην περίπτωση του καναλιού προστιθέμενου λευκού θορύβου, εκπαιδεύσαμε το LVQ νευρωνικό δίκτυο με νευρώνες που έχουν δύο εισόδους και πέντε εξόδους, ώστε να παρέχουμε σωστή ταξινόμηση για τις 5 ψηφιακές διαμορφώσεις.

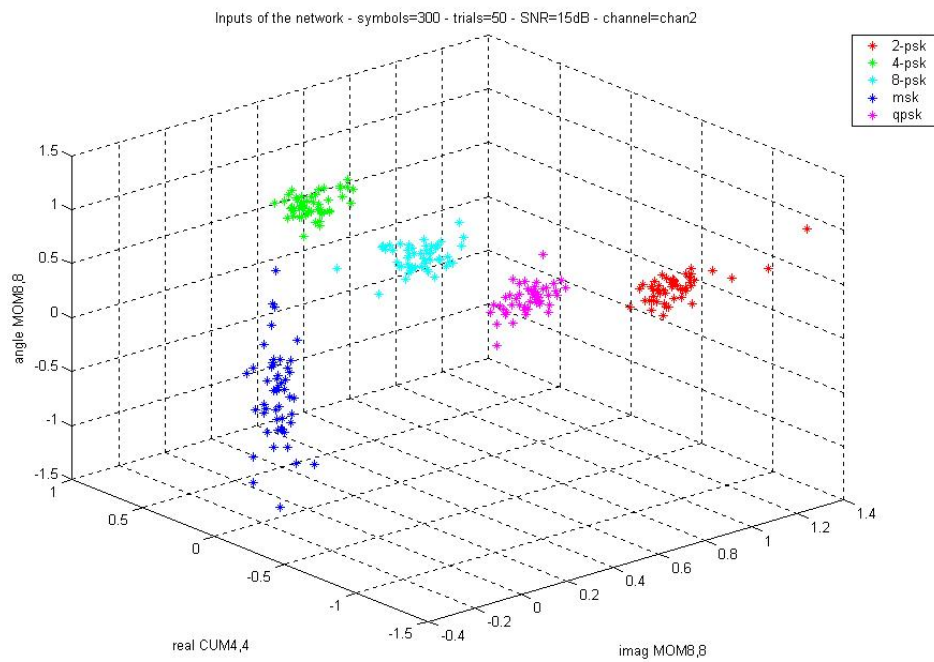


Σχήμα 11: Απεικόνιση των βαρών των νευρώνων (κίτρινες κουκίδες), που δείχνουν τις πέντε κατηγορίες της πρώτης στοιβάδας του εκπαιδευμένου δικτύου LVQ για τα εισερχόμενα σήματα (Πολύχρωμες τελείες). Το $W(i,1)$ αντιπροσωπεύει το πραγματικό μέρος του Cumulant $\{4,4\}$ και το $W(i,2)$ αντιπροσωπεύει το πραγματικό μέρος της Ροπής $\{8,8\}$. Η διασπορά των έγχρωμων τελειών οφείλεται στην ύπαρξη θορύβου.

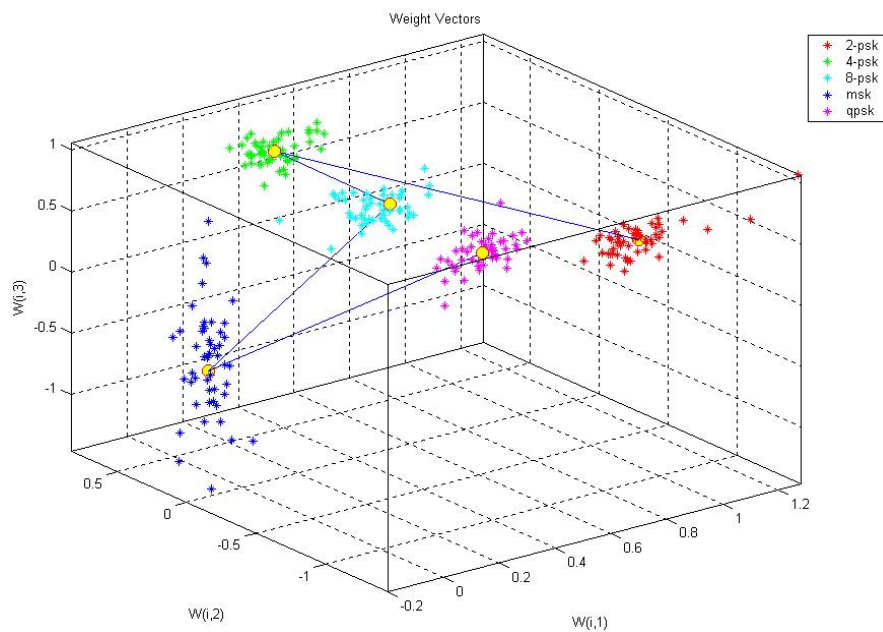
Σύμβολα SNR (dB)		50	100	150	200	250	300
0	BPSK	1.2%	0%	0%	0%	0%	0%
	4-PSK	19.6%	21.8%	21%	22.6%	12.4%	12%
	QPSK	8%	5.2%	2%	1.4%	2.8%	2.8%
	8-PSK	45%	44.8%	41.8%	39.2%	37.6%	40.8%
	MSK	57.2%	55.4%	61.4%	59%	57.4%	59.8%
5	BPSK	76.2%	81.6%	86%	35.8%	32.2%	31.4%
	4-PSK	60.8%	67.6%	77.4%	70.4%	76%	76.6%
	QPSK	53.6%	61%	61.6%	68.8%	69%	68.4%
	8-PSK	42.6%	38%	40.8%	49.4%	52.4%	48%
	MSK	68%	73.6%	76.4%	75.2%	80%	80.8%
10	BPSK	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	4-PSK	90.2%	100%	100%	100%	100%	100%
	QPSK	97.8%	90.8%	100%	100%	100%	100%
	8-PSK	77.2%	91.8%	97%	99.6%	100%	100%
	MSK	90.6%	97.4%	99.8%	99.4%	100%	100%
15	BPSK	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	4-PSK	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	QPSK	90.4%	100%	100%	100%	100%	100%
	8-PSK	93%	99.2%	99.8%	100%	100%	100%
	MSK	98.6%	99.8%	100%	100%	100%	100%

Πίνακας 1: Πιθανότητα επιτυχούς ταξινόμησης του εκπαιδευμένου νευρωνικού δικτύου LVQ (βλέπε Σχήμα 11) έναντι του αριθμού των συμβόλων-δειγμάτων και του θορύβου SNR (dB) για όλες τις ψηφιακές διαμορφώσεις που εξετάστηκαν (Αριθμός δοκιμών=500), παρουσία προσθετικού λευκού θορύβου.

Για την περίπτωση των 15 πραγματικών καναλιών διάδοσης, θα παρουσιάσουμε εδώ μόνο ένα κανάλι, στο οποίο χρησιμοποιήσαμε τρεις εισόδους για την εκπαίδευση του δικτύου LVQ. Η ταξινόμηση απεικονίζεται τρισδιάστατα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 12.



Σχήμα 12: Ομαδοποίηση των ψηφιακών διαμορφώσεων με τη χρησιμοποίηση 3 στατιστικών χαρακτηριστικών: φάση Ρολής {8,8}, πραγματικό μέρος Cumulant {4,4} και φανταστικό μέρος Cumulant {8,8}.



Σχήμα 13: Αναγνώριση των διαμορφώσεων από το εκπαιδευμένο δίκτυο LVQ των δημιουργημένων ομάδων του προηγούμενου Σχήματος.

Σύμβολα		100	200	300	400
SNR (dB)					
0	BPSK	30%	29%	23%	20.5%
	4-PSK	4.5%	0.5%	0%	0%
	QPSK	1%	0.5%	0%	0%
	8-PSK	36.5%	44.5%	47%	50%
	MSK	50%	52.5%	52%	49.5%
5	BPSK	38%	38%	30.5%	34%
	4-PSK	55%	50.5%	63%	62%
	QPSK	36.5%	54.5%	54.5%	63%
	8-PSK	52.5%	62.5%	61%	62%
	MSK	51%	52.5%	60%	60%
10	BPSK	79.5%	82.5%	93%	89.5%
	4-PSK	90%	98%	99.5%	100%
	QPSK	90.5%	99%	99.5%	99%
	8-PSK	85%	92%	95.5%	98%
	MSK	60.5%	61%	68%	69.5%
15	BPSK	100%	100%	100%	100%
	4-PSK	100%	100%	100%	100%
	QPSK	100%	100%	100%	100%
	8-PSK	98.5%	100%	100%	100%
	MSK	77.5%	83.5%	95%	94%

Πίνακας 2: Πιθανότητες επιτυχίας του εκπαιδευμένου νευρωνικού δικτύου LVQ (βλέπε Σχήμα 13) έναντι του αριθμού των συμβόλων-δειγμάτων και του SNR (dB) για όλες τις ψηφιακές διαμορφώσεις που εξετάστηκαν (Αριθμός δοκιμών=500), παρουσία προσθετικού λευκού θορύβου, πολυδευσης και απόσβεσης μικρής κλίμακας.

VI. Συμπεράσματα

Ερευνήσαμε την ικανότητα ταξινόμησης των στατιστικών υψηλών τάξεων σε πέντε διαφορετικές ψηφιακές διαμορφώσεις, πρώτα αλλοιωμένες από ένα ιδανικό κανάλι προσθετικού λευκού θορύβου και, στη συνέχεια, από κανάλια πολυδευσεων και απόσβεσης μικρής κλίμακας που υπάρχουν σε πραγματικά κανάλια. Εκτελέσαμε εξαντλητικές εξομοιώσεις σε όλους τους δυνατούς συνδυασμούς χαρακτηριστικών, όπως Ροπές και Cumulants διαφορετικών τάξεων, και εξετάσαμε τις περιπτώσεις καναλιών που αλλοιώνονται με/ή από λευκό προσθετικό θόρυβο, πολυδευσεις και αποσβέσεις μικρής κλίμακας. Ανακαλύψαμε ότι ορισμένοι συνδυασμοί στατιστικών υψηλών τάξεων αποκαλύπτουν μοναδικά τις ψηφιακές διαμορφώσεις και, επομένως, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πραγματικό χρόνο ως ταξινομητές σημάτων, με τη βοήθεια εκπαιδευμένων νευρωνικών δικτύων LVQ. Υπολογίσαμε τα ποσοστά επιτυχίας αυτών των σχημάτων, τα οποία συγκλίνουν κοντά στο 100% στις περισσότερες περιπτώσεις, δείχνοντας επίσης σταθερότητα ανεξαρτήτως των συμβόλων που χρησιμοποιήθηκαν (μετά από κάποιο ελάχιστο κατώφλι). Έγινε εμφανές ότι η χρήση μιγαδικών στατιστικών υψηλών τάξεων προσφέρει μεγαλύτερη διακρίσιμότητα σε πραγματικά κανάλια διάδοσης που μας απασχόλησαν, και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αυτοματοποίηση της λήψης ψηφιακών σημάτων στο SDR.

Αναφορές

1. "EDGE Enhanced Data rates for GSM Evolution", http://www.mobileinfo.com/3G/3G_Wireless.htm
2. [BFR]: "Automatic Signal Classification" / Bart F. Rice / Lockheed Martin Space Systems / Denver, Colorado 80201-0179.
3. [FH01]: "A hierarchical approach to the classification of digital modulation types in multipath environments" / M. P. Fargues, G. Hatzichristos / Naval Postgraduate School, Monterey, California / May 1, 2001.

4. [HDB96]: “*Neural Network Design*” / M. T. Hagan, H. B. Demuth, M. Beale / Copyright 1996 by PWS Publishing Co.

Σύντομα βιογραφικά σημειώματα

Γ. Χατζηχρήστος, Υποπλοίαρχος (Μ) ΠΝ

Β. Καλλίας, Ανθυποσμηναγός (ΤΑΤ) ΠΑ

Ιωάννης Κούκος (Καθηγητής Σχολής Ναυτικών Δοκίμων). Είναι Διευθυντής του Εργαστηρίου Τηλεπικοινωνιών της Σχολής Ναυτικών Δοκίμων από το 1998. Διδάσκει στη Σχολή Ικάρων / Σχολή Μηχανικών Αεροπορίας (ΣΜΑ) από το 1995 και στη Σχολή Τηλεπικοινωνιών Ηλεκτρονικών Αξιοματικών Διαβιβάσεων (ΣΤΗΑΔ) από το 1997. Κατέχει Δίπλωμα Ηλεκτρολόγου Μηχανικού από το Πανεπιστήμιο Πατρών (1977), Μάστερ Ηλεκτρολόγου Μηχανικού από το University of Southern California στο Λος Άντζελες (1978), Μάστερ Εφηρμοσμένων Μαθηματικών (1983), και PhD Ηλεκτρολόγου Μηχανικού Τηλεπικοινωνιών (1984) από το ίδιο Πανεπιστήμιο. Έχει διατελέσει: Senior Engineer στην Αεροδιαστημική Βιομηχανία της Νότιας Καλιφόρνιας (1984-88), επιβλέπων Μηχανικός Τηλεπικοινωνιακών Ζεύξεων Μη Επανδρωμένων Διαστημοπλοίων προς τους πλανήτες Αφροδίτη, Άρη, Δία και Κρόνο (Deep Space Network), Jet Propulsion Laboratory της ΝΑΣΑ (1988-91), τεχνικός εκπρόσωπος της NASA στη Διεθνή Επιτροπή Διαστημικών Τηλεπικοινωνιών CCSDS (1991-94), ερευνητής του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, Ινστιτούτο Διαστημικής και Ιονόσφαιρας (1995-98). Επίσης έχει διδάξει σε 10 έγκριτα Πανεπιστήμια της Νότιας Καλιφόρνιας (UCLA, USC, UCSD, Cal State University κ.λπ.). Τα ερευνητικά του ενδιαφέροντα είναι: Δορυφορικές και Ασύρματες Τηλεπικοινωνίες, Συστήματα C4ISR, Ραντάρ, Ηλεκτρονικού Πολέμου, Ψηφιακής Επεξεργασίας Σήματος, Software Defined Radio, Avionics και Εξομοίωση Πολεμικών Παιγνίων. Επικοινωνία: τηλ.: 210-4581607, e-mail: koukos@hna.gr.

Τεχνολογίες αιχμής που υλοποιούν τον Δικτυοκεντρικό Πόλεμο

I. Κούκος

Περίληψη

Ο Δικτυοκεντρικός Πόλεμος (ΔΚΠ) είναι, σαφώς, μια στρατιωτική υπόθεση του 21^{ου} αιώνα. Πολλές νέες τεχνολογίες -που προέρχονται όχι μόνο από τη στρατιωτική βιομηχανία υψηλής τεχνολογίας αλλά και από την ανθούσα πολιτική βιομηχανία τηλεπικοινωνιών και υπολογιστών- θα καταστήσουν τον ΔΚΠ εφικτό πιθανόν στις αρχές της δεκαετίας του 2010. Ως νέες τεχνολογίες τέτοιου είδους θεωρούμε τα αναδυόμενα πρωτόκολλα IEEE 802 για ασύρματα ευρυζωνικά δίκτυα, τους στηριγμένους σε λογισμικό (SDR) ασύρματους πομποδέκτες, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και τα εμπλουτισμένα με επιπρόσθετα στρατιωτικά στρώματα (AML) γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών (GIS). Το άρθρο αυτό επισκοπεί τις ανωτέρω τεχνολογίες, οι οποίες καθιστούν εφικτές την κινητικότητα και την διαλειτουργικότητα για εμπόλεμες δυνάμεις υπό ένα δικτυοκεντρικό δόγμα. Σε ένα τέτοιο εντελώς νέο δογματικό πλαίσιο, μπορεί να επιτευχθεί ριζικός μετασχηματισμός όλων των κλάδων των ενόπλων δυνάμεων, ώστε αυτές να εκμεταλλευθούν πλήρως τις νέες ικανότητες C4ISR, όπου αισθητήρες, όπλα και διοικητές δεν πολεμούν πλέον από τις ίδιες πλατφόρμες αλλά από γεωγραφικώς διεσπαρμένα μετερίζια, συνδεδεμένα με ένα πυκνό πλέγμα τηλεπικοινωνιακών ζευξέων.

I. Εισαγωγή. Πώς έγιναν τα ασύρματα δίκτυα εφικτά

Ο καθηγητής Andrew Viterbi, ένας από τους “πατέρες” της σύγχρονης εποχής των ψηφιακών τηλεπικοινωνιών, αποδίδει τη θεαματική ανάπτυξη των ψηφιακών ασύρματων δικτύων επικοινωνίας σε τέσσερις βασικούς νόμους, δύο από τις φυσικές επιστήμες και δύο από τις κοινωνικές επιστήμες [1]:

1. Maxwell και Hertz για την ασύρματη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών σημάτων.
2. Θεώρημα Shannon για τα όρια χωρητικότητας καναλιών.
3. Κοινωνικοοικονομικός νόμος Moore για την εκθετική αύξηση της πολυπλοκότητας ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και της ισόμετρης μείωσης κόστους.
4. Νόμος Metcalfe για την αξία ενός δικτύου επικοινωνίας, που αυξάνεται αναλόγως προς το τετράγωνο των χρηστών σε ένα δίκτυο.

Ο Maxwell διατύπωσε **πρώτος** τους θεμελιώδεις νόμους της διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, που αποδείχθηκαν από την πειραματική εργασία του Hertz, με αποτέλεσμα τις ασύρματες τηλεπικοινωνίες του 20^{ου} αιώνα, αρχίζοντας από τον Μαρκόνιο τηλεγράφο και φθάνοντας σήμερα σε μια πληθώρα δικτύων σε όλα τα μήκη και πλάτη του πλανήτη.

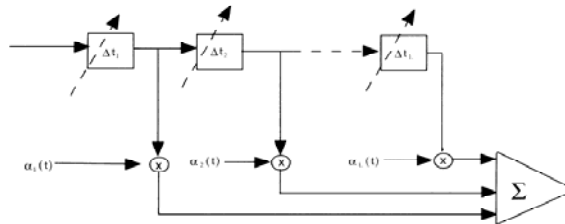
Η ηλεκτρομαγνητική διάδοση στα επίγεια δίκτυα παρακαλύεται από το πολυοδικό φαινόμενο, όπου ένα εκπεμπόμενο σήμα της μορφής:

$$x(t)=A(t)\sin[2\pi f_0 t+\theta(t)] \quad (1)$$

-όπου f_0 είναι η φέρουσα συχνότητα και $A(t)$ και $\theta(t)$ είναι, αντιστοίχως, το διαμορφωμένο πλάτος και η φάση τα οποία μεταφέρουν τη μεταδιδόμενη πληροφορία- αφικνείται στην κεραία του δέκτη υπό τη μορφή:

$$y(t) = \sum_{i=1} B_i(t-t_i)\sin[2\pi(f-f_d)(t-t_i)+\theta_i(t-t_i)]+n(t) \quad (2)$$

$i=1,\dots,L$, όπου t_i είναι η καθυστέρηση διάδοσης του σήματος σε μια ευθεία πορεία μεταξύ των κεραιών εκπομπής και λήψεως, t_2, \dots, t_L είναι καθυστερήσεις διάδοσης σε άλλες έμμεσες πορείες που δημιουργούνται από την αντανάκλαση από το έδαφος ή τα κτίρια, f_d είναι η προκληθείσα μετατόπιση Doppler, λόγω της σχετικής κίνησης του δέκτη ως προς τον πομπό, και το $n(t)$ παριστά προσθετικό θόρυβο στο δέκτη, μερικώς θερμικής προέλευσης, που μπορεί να περιλάβει παρεμβολές που προκαλούνται από άλλες παρασιτικές εκπομπές. Μπορούμε να παραστήσουμε το σύνθετο σήμα (2) ως δημιουργούμενο από μια χρονικά μεταβαλλόμενη γραμμή καθυστέρησης με καθυστερήσεις $\Delta t_k \equiv t_{k+1} - t_k$ μεταξύ των διακλαδώσεων και μιγαδικούς πολλαπλασιαστές της μορφής $a_k(t) = B_k(t)e^{j\theta_k(t)}$ που υπεισέρχονται στις διακλαδώσεις και είναι χρονικά μεταβαλλόμενες συναρτήσεις. Ο βέλτιστος -υπό την έννοια του ελαχίστου μέσου τετραγωνικού σφάλματος- δέκτης, παρουσία γκαουσιανών παρεμβολών, είναι ένα προσαρμοσμένο φίλτρο που μπορεί να υλοποιηθεί ως χρονικά αντίστροφη διακλαδωμένη γραμμή καθυστέρησης, με τους πολλαπλασιαστές διακλαδώσεων να αντικαθίστανται από τους συζυγείς των $a_k^*(t) = B_k(t)e^{-j\theta_k(t)}$, αποκαλούμενος και δέκτης RAKE.



Σχήμα 1: Μοντέλο Καναλιού Πολυοδικής Διάδοσης.

Αδυναμία του δέκτη RAKE να διακρίνει δύο πορείες με διαφορά καθυστέρησης Δt θα προκαλέσει βαθιές διαλείψεις, όπου οι ποικίλες συνιστώσες του πολυοδικού συνθέτου σήματος αλληλοακυρώνονται. Η τυπική διασπορά της αβεβαιότητας Δt δίδεται από το όριο Cramer-Rao

$$\sigma_{\Delta t} \geq \frac{k}{W\sqrt{E/N_0}} \quad (3)$$

όπου W είναι το εύρος ζώνης σημάτων, N_0 είναι η φασματική πυκνότητα ευρυζωνικού θορύβου ή παρεμβολής, E είναι η ενέργεια ανά bit της μετρούμενης συνιστώσας σήματος και K είναι μια σταθερά αναλογίας πλησίον του 1.

Ο δεύτερος νόμος αναφέρεται στη θεμελιώδη εργασία του Claude Shannon (1948) και εκφράζεται ως ανταγωνισμός μεταξύ ενός τηλεπικοινωνιακού καναλιού και μιας πηγής θορύβου (ή ενός παρεμβολέα). Ο Shannon έθεσε θεωρητικά όρια στην χωρητικότητα C του τηλεπικοινωνιακού καναλιού

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \log[2\pi e(S + J)] - H(J) &\geq C \\ &\geq \frac{1}{2} \log(1 + S/J) \end{aligned} \quad (4)$$

στα bits / σύμβολο καναλιού που μετατρέπονται σε bit/sec εάν πολλαπλασιασθούν με το εύρος ζώνης τηλεπικοινωνιακού συστήματος $2W$ Hz, υποθέτοντας παλμοκωδική διαμόρφωση καναλιών Nyquist. Όλοι οι λογάριθμοι έχουν βάση 2, S και J παριστούν τα επίπεδα ισχύος του δέκτη και του παρεμβολέα, και $H(J) = (1/2)\log(2\pi eJ)$ είναι η εντροπία του παρεμβολικού σήματος. Συνεπώς, η επιτυγχανόμενη χωρητικότητα καναλιών είναι $C = W \cdot \log_2(1 + S/J)$ bits/sec. Οι περισσότερες απλές τεχνικές κωδικοποίησης για τουλάχιστον 30 έτη μετά από τη δημοσίευση της περιφημής εργασίας Shannon δεν έχουν φθάσει παρά στο περίπου 1/3 έως 1/2 της χωρητικότητας του καναλιού (για ένα ευρυζωνικό γκαουσιανό κανάλι), μέχρι την εφεύρεση των τουρμπο-κωδίκων που φθάνουν στις

αποδόσεις επάνω από 80% της χωρητικότητας καναλιών. Ο ρυθμός μετάδοσης R_b bits/sec φράσσεται από τη χωρητικότητα: $R_b \leq C$, με συνέπεια την ανισότητα:

$$\frac{R_b}{W} \leq \log \left(1 + \frac{E_b/N_0}{W/R_b} \right) \quad (5)$$

όπου $E_b = S/R_b$ είναι η ενέργεια του σήματος πληροφορίας ανά bit, $N_0 = J/W$ φασματική πυκνότητα του παρεμβολέα με προκύπτοντα λόγο ισχύων παρεμβολής προς σήμα:

$$\frac{J}{S} = \frac{W/R_b}{E_b/N_0} \quad (6)$$

Η ανισότητα (5) δημιουργεί το κατώτατο φράγμα του $\ln 2$ για το λόγο E_b/N_0 :

$$\frac{E_b}{N_0} \geq \frac{W}{R_b} \left[\exp \left(\frac{R_b}{W} \ln 2 \right) - 1 \right] > \ln 2 \quad (7)$$

Για ένα κυψελωτό δίκτυο CDMA, θεωρώντας ότι M πομποδέκτες χρησιμοποιούν διαμόρφωση διασποράς φάσματος που καταλαμβάνει ταυτόχρονα ολόκληρο το εύρος ζώνης του καναλιού, η παρεμβολή στον $i^{\text{στο}}$ χρήστη είναι οι ισχύεις των άλλων $M-1$ χρηστών δηλαδή $J = (M-1)S$, όταν η ως άνω ανισότητα (6) αναδεικνύει τον ανεκτό μέγιστο αριθμό των υπολοίπων χρηστών:

$$M - 1 = \frac{W/R_b}{E_b/N_0} < \frac{W/R_b}{\ln 2} \quad (8)$$

Η ολική διελευσιμότητα του δικτύου (overall network throughput), περιλαμβάνουσα όλους τους χρήστες, κανονικοποιημένη από το συνολικό κοινό εύρος ζώνης, φράσσεται από:

$$\frac{MR_b}{W} < \frac{1}{\ln 2} + \frac{R_b}{W} \approx \frac{1}{\ln 2} = 1.4 \text{ bits / sec / Hz} \quad (9)$$

Πρακτικώς, παρουσία θερμικού θορύβου, μπορούν να επιτευχθούν διελευσιμότητες δικτύων από $\frac{1}{4}$ έως $\frac{1}{2}$ αυτού του άνω φράγματος, εάν χρησιμοποιηθούν κώδικες διόρθωσης σφαλμάτων υλοποιήσιμης ποιότητας. Ως συμπέρασμα, ασύρματα ψηφιακά δίκτυα που επιτυγχάνουν πολλαπλή πρόσβαση μέσω προχωρημένων τεχνικών επεξεργασίας σήματος, εμπνεομένων από τους νόμους Shannon, βελτιώνουν την αποδοτικότητα ενός απλού καναλιού Maxwell κατά περισσότερες από μία τάξεις μεγέθους.

Το γεγονός αυτό αυξάνει τη σημασία του τρίτου νόμου, ο οποίος αποδίδεται στον Gordon Moore, έναν εκ των ιδρυτών της εταιρίας Intel. Ο Moore παρατήρησε ότι ο αριθμός κρυσταλλολυγιών (transistors) ανά μονάδα εμβαδού, που τοποθετείται σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα (IC), διπλασιάζεται περίπου κάθε $1\frac{1}{2}$ έτος, όπως φαίνεται στον ακόλουθο τύπο:

$$v(T) = v(T_0) 2^{(T-T_0)/1.5} \quad (10)$$

όπου $v(T)$ είναι η πυκνότητα κρυσταλλολυγιών στο χρόνο $T > T_0$ ο, όπου ο χρόνος μετράται σε έτη. Αυτός δεν είναι φυσικός νόμος αλλά μάλλον κοινωνικοοικονομικός, σύμφωνα με τον οποίο η ανθρώπινη εφευρετικότητα, ανταποκρινόμενη στη ζήτηση της αγοράς, παράγει με εκθετικούς ρυθμούς προωθώντας την τεχνολογική κατάσταση προόδου. Έτσι, αρχίζοντας από τους διακριτούς ημιαγωγούς το 1965, έχουμε φθάσει σε μια πυκνότητα 10 εκατομμυρίων κρυσταλλολυγιών ανά τετραγωνικό εκατοστό μέχρι το έτος 2000, και σε μερικές δεκαετίες θα ξεπεραστούν και τα υπατομικά επίπεδα.

Ο τέταρτος νόμος, επίσης κοινωνικοοικονομικού περιεχομένου, αποδίδεται στον Robert Metcalfe, ο οποίος όρισε ότι η αξία οποιουδήποτε δικτύου επικοινωνίας αυξάνεται ως το τετράγωνο του αριθμού N χρηστών, δηλαδή Αξία Δικτύου $\sim N(N-1)$, όπου N είναι ο αριθμός αμφίδρομων συνδέσεων μεταξύ των χρηστών. Παραδείγματα τέτοιων δικτύων είναι τα κινητά κυψελοειδή τηλεφωνικά δίκτυα GSM και CDMA στον κόσμο των ασυρμάτων τηλεπικοινωνιών, και το World Wide Web, ως δίκτυο προστιθέμενης αξίας ψηφιακών δεδομένων που αξιοποιεί την παγκόσμια ενσύρματη υποδομή της φωνητικής τηλεφωνίας. Τα κυψελοειδή δίκτυα, αν και ψηφιακά στην υλοποίησή τους, πρώτιστα προσφέρουν ακόμη φωνητική τηλεφωνία με μόνο ένα μικρό ποσοστό απασχολούμενο σε ανταλλαγή δεδομένων, μια κατάσταση που πρόκειται να αλλάξει στα αμέσως επόμενα έτη.

II. Ασύρματα Επίγεια Δίκτυα Δεδομένων IEEE 802.11

Νέες φασματικές περιοχές έχουν διατεθεί στη δεκαετία του '90 για νέα συναρπαστικά επίγεια δίκτυα δεδομένων μικροκυμάτων, που είναι γνωστά σήμερα ως Wi-Fi, και πραγματοποιούν ένα γενναίο άλμα προς τα εμπρός, στον ακόρεστο για ταχύ φάσμα κόσμο του Διαδικτύου. Τα γνωστά επίσης από τον κωδικό πρωτοκόλλου ως IEEE 802.11 δίκτυα προήλθαν από συντονισμένη δράση βιομηχανίας και επιτροπών προτύπων, που είχε ως αποτέλεσμα ένα σαφές προβάδισμα της εμπορικής τεχνολογίας δικτύων έναντι της αντίστοιχης στρατιωτικής. Η στρατιωτική πλευρά αναγκάζεται τώρα να εκμεταλλευθεί τα νέα πρότυπα και τις παραγόμενες συσκευές COTS, που υλοποιούνται με τις αρχιτεκτονικές λογισμικού ραδιοεπικοινωνιών, γνωστές ως SDR. Το SDR είναι η άλλη μεγάλη τεχνολογική εξέλιξη της τελευταίας δεκαετίας, όπου οι αλγόριθμοι και η επεξεργασία σήματος παύουν πλέον να γίνονται με κυκλώματα και τρέχουν σε λογισμικό ενσωματωμένο σε ένα γρήγορο ψηφιακό επεξεργαστή. Το περιοδικό Signal της AFCEA γράφει σχετικά [2]: *“Ο τομέας των ασύρματων σειρών πρωτοκόλλων 802 που αναπτύσσεται τώρα από το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (IEEE) —την επαγγελματική οργάνωση που στοχεύει στην προώθηση νέων προτύπων συστημάτων τηλεπικοινωνιών— θα μπορούσε να έχει ευεργετικές επιπτώσεις στον τρόπο με τον οποίο επικοινωνεί ο στρατός. Τα υποψήφια προς έγκριση πρωτόκολλα προσφέρουν νέες δυνατότητες που περιλαμβάνουν μακρύτερο βελιγμένες και ευρύτερη περιαγωγή, και επιτρέπουν την ειδική δικτύωση ασυρμάτων συσκευών.”*

Ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο (WLAN) είναι ένα ασύρματο σύστημα επικοινωνιών που επιτρέπει σε υπολογιστές και σε σταθμούς εργασίας (workstations) να ανταλλάσσουν δεδομένα, χρησιμοποιώντας ως μέσο μετάδοσης τα ραδιοκύματα. Τα βιομηχανικά πρότυπα 802.11 (βλέπε Πίνακα 1) και οι ποικίλες αναθεωρήσεις τους είναι ιδιαίτερες εκδοχές του ασύρματου τοπικού LAN 802.11. Το WLAN αναφέρεται συνήθως ως Wi-Fi (ασύρματη πιστότητα). Για να εξασφαλισθούν η σωστή λειτουργία κάθε προϊόντος Wi-Fi ξεχωριστά καθώς και η μεταξύ τους διαλειτουργικότητα, ιδρύθηκε το 1999 η κοινοπραξία Wi-Fi Alliance. Η Wi-Fi Alliance είναι μία μη κερδοσκοπική οργάνωση που πιστοποιεί ότι τα προϊόντα ακολουθούν τις βιομηχανικές προδιαγραφές και επικοινωνούν μεταξύ τους. Wi-Fi® είναι ένα καταχωρημένο εμπορικό σήμα της Wi-Fi Alliance και η ένδειξη Wi-Fi Certified™ πάνω στα προϊόντα σημαίνει ότι αυτά έχουν υποβληθεί σε προδιαγεγραμμένη δοκιμασία που απέδειξε ότι είναι διαλειτουργικά με όμοια προϊόντα ανεξαρτήτως κατασκευαστή. Τα ασύρματα LANs μπορεί να συνδεθούν με ενσύρματα τοπικά LAN, ως επέκταση στο σύστημα, ή μπορεί να χρησιμοποιηθούν αυτόνομα για να διασυνδέουν υπολογιστές μέσα σε ένα προσωρινό ad hoc δίκτυο. Τα WLANs μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ενδοκτιριακά ή/και σε υπαίθρια περιβάλλοντα.

EMERGING WIRELESS STANDARDS

Standard	Capability	Ratification Date
802.11	2 Mbps (2.4 Ghz)	Approved
802.11b	11 Mbps (2.4 Ghz)	Approved
802.11a	54 Mbps (5 Ghz)	Approved
802.11g	54 Mbps (2.4 Ghz)	Approved
802.11e	Quality of Service	Late 2005
802.11r	Fast Roaming	Late 2006/Early 2007
802.11n	Extended Range Increased Bandwidth	Late 2005
802.11k	Load Balancing/Distribution	Late 2005
802.11i	WiFi Security	Approved
802.11h	Dynamic Frequency Selection & Transmit Power Management for 5 Ghz WiFi	TBA
802.16e	Metropolitan Area Wireless Networks/ Mobility (2.6 Ghz)	Late 2005
802.2	Metropolitan Area Wireless Networks/ Mobility (3.5 Ghz)	TBA
802.21	Media Independent Handover	TBA

Πίνακας 1: Αναδυόμενα Ασύρματα Πρότυπα.

Τα συστήματα WLAN IEEE 802.11 έχουν εξελιχθεί με την πάροδο του χρόνου. Η αρχική 802.11 προδιαγραφή προσέφερε ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων 1 ή 2 Mbps και λειτουργούσε στα 2,4 GHz. Αυτά τα πρότυπα εξελίχθηκαν μέσω της νέας διαμόρφωσης για να παραγάγουν το 802.11b, που ενεργοποιήθηκε πάλι στα 2,4 GHz και παρείχε ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων μέχρι 11 Mbps. Ταυτόχρονα, αναπτύχθηκε ένα νέο πρότυπο 802.11a, που παρείχε ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων μέχρι 54 Mbps στα 5,7 GHz. Για να διευκολυνθεί η παροχή υψηλών ρυθμών μετάδοσης δεδομένων με αντίστροφη συμβατότητα προς τα πρότυπα 802.11a και 802.11b, αναπτύχθηκε το πρότυπο 802.11g, που επιτρέπει μετάδοση 54 Mbps στην περιοχή των 2,4 GHz.

Έτσι, τα 802.11 ασύρματα συστήματα του τοπικού LAN (WLAN) μπορούν να λειτουργήσουν στα 2,4 GHz, ή στα 5,7 GHz για βιομηχανικές, επιστημονικές και ιατρικές (ISM) ζώνες χωρίς άδεια. Οι άνευ αδειας ζώνες συχνότητας δεν απαιτούν την κρατική χορήγηση αδειών (από την FCC στις Η.Π.Α. ή τις εθνικές επιτροπές τηλεπικοινωνιών στις χώρες της Ε.Ε.). Τέτοιες άνευ αδειας ζώνες είναι στην περιοχή [2.400-2.483] GHz με εύρος 83 MHz και τρεις ζώνες εύρους 100 MHz στις περιοχές [5.150-5.250-5.350] GHz και [5.725-5.825] GHz.

Τα 802.11 συστήματα χρησιμοποιούν διάφορους τύπους ψηφιακών διαμορφώσεων, από την απλή γκαουσιανή διαμόρφωση διακριτής μετατόπισης συχνότητας (GFSK), που χρησιμοποιείται στο αρχικό 802.11 σύστημα, μέχρι την πολυπλεξία ορθογώνιας διαίρεσης συχνότητας (OFDM), που χρησιμοποιείται στο σύστημα 802.11g.

Οι πομποδέκτες WLAN μπορούν να εκπέμψουν μέχρι 1 Watt, αν και οι εμπορικές συσκευές έχουν χαμηλότερη μέγιστη ισχύ αποστολής σημάτων. Έτσι, επιτυγχάνονται τυπικά βεληνεκή μέχρι 50 μέτρων μέσα στα κτίρια και άνω των 300 μέτρων εκτός αλλά χωρίς φυσικά εμπόδια. Ένα

στενοζωνικό ραδιο-σύστημα απαιτεί διευθέτηση (coordination) των διαφορετικών συχνοτήτων, για να αποφευχθεί η πιθανότητα παρεμβολών μεταξύ ομόρων συχνοτήτων. Ένα ευρυζωνικό ραδιοσύστημα χρησιμοποιεί σήματα διασποράς φάσματος, έτσι ώστε πολλαπλά κανάλια να αλληλοεπικαλύπτονται με ελάχιστες παρεμβολές.

Στην υπέρυθρη τεχνολογία γίνεται μεταφορά δεδομένων υπό μορφή παλμών υπέρυθρου φωτός (IR). Τα 802.11 συστήματα που χρησιμοποιούν το IR έχουν ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων 1 ή 2 Mbps. Εντούτοις, μερικά συστήματα IR WLAN μικρού βεληνεκούς έχουν παρουσιάσει ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων άνω από 20 Mbps.

Η ασφάλεια πρόσβασης είναι η διαδικασία περιορισμού στα δικαιώματα πρόσβασης και στη μεταφορά πληροφορίας από αναρμόδιους χρήστες. Η ασφάλεια των πληροφοριών μπορεί να διαιρεθεί σε τρία βασικά επίπεδα: φυσική πρόσβαση, έγκριση λογαριασμού και κρυπτογράφηση. Η δυνατότητα ασφάλισης δεδομένων στα συστήματα WLAN είναι κρίσιμη, επειδή είναι μάλλον εύκολο σε οιονδήποτε να επιτύχει φυσική πρόσβαση στις μεταδιδόμενες πληροφορίες σε ένα τέτοιο σύστημα. Αν και ενδεχομένως είναι εύκολο σε αναρμόδιους χρήστες να κατορθώσουν την φυσική πρόσβαση στο διαβιβαζόμενο σήμα, εντούτοις είναι πολύ πιθανό να μην είναι σε θέση να ανιχνεύσουν την πραγματική πληροφορία (ιδίως για τις κινητές συσκευές χαμηλής ισχύος). Εάν πάλι είναι σε θέση να ανιχνεύσουν και να αποκωδικοποιήσουν το σήμα, θα πρέπει στη συνέχεια να διέλθουν μέσω ενός επιπέδου επικύρωσης για να αποκτήσουν πρόσβαση στα μενού του συστήματος. Εάν δυνηθούν να αποσπάσουν εξουσιοδότηση υπηρεσιών (μπορεί μερικά συστήματα να μην θέτουν οποιαδήποτε ασφάλεια), τα αποκτώμενα δεδομένα μπορεί να είναι κρυπτογραφημένα και, άρα, άχρηστα στους περισσότερους υποκλοπείς.

Υπάρχουν δύο μορφές κρυπτογράφησης που χρησιμοποιούνται στο σύστημα 802.11: η Ενσύρματη Ισοδύναμη Μυστικότητα (Wired Equivalent Privacy, WEP) και η Wi-Fi Προστατευόμενη Πρόσβαση (Wi-Fi Protected Access, WPA). Η WEP χρησιμοποιεί 40-μπιτο, 64-μπιτο ή 128-μπιτο κλειδί κρυπτογράφησης για να κωδικοποιήσει τα δεδομένα μεταξύ της συσκευής τελικού χρήστη (σταθμού) και του σημείου πρόσβασης (AP). Έχει καταδειχθεί ότι η ασφάλεια WEP δεν είναι ικανοποιητική για όλους τους χρήστες. Για να αυξηθεί η ασφάλεια πληροφοριών ο αλγόριθμος WEP αντικαθίσταται με WPA. WPA είναι μια πρόωρη εφαρμογή των βιομηχανικών προτύπων 802.11i. Η WPA χρησιμοποιεί το Πρωτόκολλο Ακεραιότητας Προσωρινού Κλειδιού (Temporal Key Integrity Protocol, TKIP) για την κρυπτογράφηση. Η πρόσβαση στο δίκτυο αρχίζει με τοπική εξουσιοδότηση του αιτούντος χρήστη πριν του επιτραπεί η σύνδεση στο ενσύρματο δίκτυο. Η διαδικασία WPA αρχίζει με ένα εκ των προτέρων κοινό κλειδί και είναι παρόμοια με το κλειδί διέλευσης φράσεων που χρησιμοποιείται στην WEP. Εντούτοις, αντίθετα από την WEP, ένα νέο κλειδί παράγεται κάθε φορά που συνδέει η συσκευή με το AP.

Ο κατάλογος διευθύνσεων σε ένα σύστημα WLAN αποτελείται από τις διευθύνσεις των συσκευών που είναι μέρος του συστήματος WLAN. Αυτές καλούνται διευθύνσεις Ελέγχου Πρόσβασης Μέσου (Medium Access Control, MAC). Κάθε συσκευή στο σύστημα WLAN, συμπεριλαμβανομένων των σταθμών, των σημείων πρόσβασης και των δρομολογητών, έχει ιδίαν μοναδική διεύθυνση 48-bit Ελέγχου Πρόσβασης Μέσου (MAC), γνωστή επίσης ως διεύθυνση συνδέσεως (link address). Κάθε πακέτο δεδομένων που διαβιβάζεται στο ασύρματο τοπικό LAN περιέχει πολλαπλάσιες προσβάσεις MAC. Αυτές περιλαμβάνουν τη διεύθυνση προέλευσης (SA), τη διεύθυνση προορισμού (DA), τη διεύθυνση πομπών (TA) και τη διεύθυνση δεκτών (RA). Η διεύθυνση προέλευσης είναι η διεύθυνση MAC της συσκευής όπου δημιουργήθηκε το πακέτο. Η διεύθυνση πομπών είναι η διεύθυνση της συσκευής που στέλνει το πακέτο στο ασύρματο μέσο. Η διεύθυνση δεκτών είναι η διεύθυνση MAC της συσκευής που λαμβάνει το ασύρματο πακέτο. Η διεύθυνση προορισμού είναι η διεύθυνση MAC της τελευταίας συσκευής στο σύστημα, η οποία λαμβάνει το πακέτο.

Ο έλεγχος πρόσβασης (ραδιο)μέσου περιλαμβάνει τη λειτουργία ανίχνευσης, χρονισμού, εκθετικού backoff και επαναδοκιμασμού ορίων. Προτού μεταδώσουν οι συσκευές WLAN πρέπει να ακούσουν τη ραδιο-δραστηριότητα γύρω τους, για να καθορίσουν εάν επιτρέπεται να μεταδώσουν. Μέρος της ραδιο-δραστηριότητας περιλαμβάνει τα μηνύματα ελέγχου που καθορίζουν τις χρονικές περιόδους

(interframe spaces), κατά τις οποίες οι συσκευές δεν επιτρέπεται να μεταδώσουν επειδή άλλες συσκευές μεταδίδουν ή πρόκειται να μεταδίδουν κατά τη διάρκεια των συγκεκριμένων περιόδων. Εάν μια συσκευή ακροάται και δεν ακούει καμία ραδιο-δραστηριότητα στις reserved interframe περιόδους, μπορεί να αποπειραθεί να μεταδώσει. Εάν η συσκευή δεν ακούει μια απάντηση στην αρχική μετάδοσή της, θα καθυστερήσει την επόμενη μετάδοσή της ένα χρονικό διάστημα κάθε φορά που προσπαθεί να μεταδώσει (εκθετικά). Οι συσκευές έχουν επίσης όρια στο μέγιστο αριθμό φορών που μπορούν να προσπαθήσουν να έχουν πρόσβαση σε άλλες συσκευές (περιορισμένος αριθμός επανα-δοκιμών). Αυτή η διαδικασία της MAC μειώνει την πιθανότητα όλων των συσκευών να προσπαθούν να έχουν πρόσβαση σε όλες τις άλλες συσκευές ταυτόχρονα.

Οι μέθοδοι για έλεγχο πρόσβασης στα συστήματα WLAN μπορούν να είναι τυχαίες (βασισμένες στον ανταγωνισμό) ή προκαθορισμένες (βασισμένες στον μη-ανταγωνισμό). Η λειτουργία ενός συστήματος WLAN μπορεί να είναι επικεντρωμένη, κατανεμημένη ή ένας συνδυασμός των δύο. Όταν η λειτουργία του δικτύου είναι τυχαία καλείται κατανεμημένη συντονισμένη λειτουργία (distributed coordinated function, DCF). Όταν η λειτουργία του δικτύου συντονίζεται καλείται λειτουργία συντονισμού σημείου (point coordination function, PCF).

Η DCF επιτρέπει την ανεξάρτητη λειτουργία (κατανεμημένος έλεγχος πρόσβασης) των ασύρματων συσκευών δεδομένων (σταθμών). Σε σύστημα, βασισμένο σε ανταγωνιστικό DCF, οι συσκευές επικοινωνίας αιτούν τυχαία πρόσβαση στα κανάλια μέσα σε ένα δίκτυο επικοινωνιών. Επειδή τα αιτήματα επικοινωνίας εμφανίζονται τυχαία, μπορεί να ζητήσουν πρόσβαση ταυτόχρονα δύο ή περισσότερες συσκευές επικοινωνίας. Η μερίδα ελέγχου πρόσβασης μιας συνδιάλεξης DCF συνήθως απαιτεί από τη συσκευή επικοινωνίας να ακροασθεί το κανάλι για ραδιο-δραστηριότητα πριν μεταδώσει ένα μήνυμα και αφογκράζεται τις συγκρούσεις μηνυμάτων μετά από το αίτημα πρόσβασης του καναλιού. Εάν η αιτούσα συσκευή δεν ακούει μια απάντηση στο αίτημά της, θα περιμένει ένα τυχαίο χρονικό διάστημα πριν επαναλάβει την προσπάθεια πρόσβασης. Η διάρκεια τυχαίου χρόνου αναμονής μεταξύ αιτημάτων αναμετάδοσης αυξάνεται κάθε φορά που συμβαίνει μια σύγκρουση.

Η διαμόρφωση DCF λειτουργεί ως δίκτυο peer-to-peer που δεν έχει κανένα κεντρικό υπολογιστή ή κεντρικό σημείο πρόσβασης, διαμεσολαβητή (hub) ή δρομολογητή. Δεδομένου ότι δεν υπάρχει κανένας κεντρικός σταθμός βάσης για να ελέγξει την κυκλοφορία ή να παράσχει πρόσβαση στο διαδίκτυο, τα διάφορα σήματα μπορεί να συγκρουστούν το ένα με το άλλο.

III. Προτεινόμενα πρότυπα IEEE 802.11 και στρατός

Η πλημμυρίδα των προτύπων 802 που εισάγονται στην αγορά αντιπροσωπεύει μια σημαντική αλλαγή από την έλλειψη ασυρμάτων πρωτοκόλλων πριν μία εξαετία. Τώρα η τεχνολογία εξελίσσεται τάχιστα και οι προηγμένοι στρατοί ετοιμάζονται να επωφεληθούν. Η πρώτη υιοθέτηση από τον αμερικανικό στρατό των αναδυομένων νέων ασυρμάτων τεχνολογιών θα εμφανισθεί πιθανώς πρώτα στα πολυχρηστικά μικροτηλέφωνα, ως μέρος του προγράμματος Warfighter Information Network–Tactical (WIN-T). Το WIN-T είναι η προσπάθεια του στρατού να φέρει την κινητή επικοινωνία στους στρατιώτες μέσω αισθητήρων και πλατφορμών επιφανείας, αέρος και διαστήματος. Οι ασύρματες εφαρμογές θα ενσωματωθούν γρήγορα στο πρόγραμμα Land Warrior (Πολεμιστής Εδάφους), το οποίο επιδιώκει να καταστήσει κάθε στρατιώτη μια ατομική πλατφόρμα όπλων. Τα κέντρα διοίκησης, μάλιστα, άρχισαν ήδη να υιοθετούν τις ασύρματες τεχνολογίες.

Προκειμένου να υποστηρίξει την ποιότητα υπηρεσιών, το 802.11e δοκιμαστικό πρότυπο προτείνει τη χρήση δύο λειτουργικών τρόπων για κάθε ασύρματο σημείο πρόσβασης. Ο πρώτος τρόπος δίνει προτεραιότητα VoIP στις φωνητικές συνδιαλέξεις παρά στη μετάδοση δεδομένων. Τα δεδομένα μπορούν να απορροφήσουν τις μικρές αποτυχίες μετάδοσης καλύτερα από τις ευαίσθητες στην χρόνο-καθυστερήση μεταδόσεις φωνής. Ο άλλος τρόπος 802.11e δημοσκοπεί σταθμούς βάσεως κατά τη διάρκεια του χρόνου μη λειτουργίας, για να προγραμματισθεί η παράδοση πακέτων, δίνοντας πάλι προτεραιότητα στη φωνή και τα σήματα βίντεο. Το πρωτόκολλο 802.11e είναι υποψήφιο προς

επικύρωση εντός του τρέχοντος έτους (2005), αλλά τα προϊόντα για την υλοποίηση του προτύπου είναι ήδη διαθέσιμα.

Δύο πρότυπα IEEE που εξετάζονται τώρα για επικύρωση -802.16e και 802.20- κερδίζουν την προτίμηση του στρατού στην ειλημμένη απόφασή του να συνδυάσει τις ασύρματες τηλεπικοινωνίες μεγάλου βεληνεκούς με τις κινητές ασύρματες επικοινωνίες. Και τα δύο πρότυπα εστιάζουν στην ικανότητα δικτύων μητροπολιτικής περιοχής (MAN) να παρέχουν υπηρεσίες παρόμοιες με εκείνες του καλωδιακού μόντεμ ή της ψηφιακής γραμμής συνδρομητών (DSL) στους πελάτες ασύρματων δικτύων που επικοινωνούν εν κινήσει.

Τα πρότυπα 802.16e συμπληρώνουν τα ήδη εγκεκριμένα 802.16 πρότυπα, τα οποία ειδικεύονται στην point-to-multipoint ευρυζωνική ασύρματη πρόσβαση στην περιοχή 2-11 GHz. Πρωτοπόροι χρήστες της ήδη επικυρωμένης τεχνολογίας 802.16 γνωστής και ως WiMAX -για παγκόσμια διαλειτουργικότητα στην μικροκυματική πρόσβαση- διαβεβαιώνουν ότι οι σταθμοί βάσεως που λειτουργούν σύμφωνα με τα πρότυπα αυτά μπορούν να μεταδώσουν υπηρεσίες διαδικτύου μέχρι ακτίνα 50 Km και, τελικά, θα μπορούν να καλύψουν μια ολόκληρη μητροπολιτική περιοχή. Μερικές μεγάλες πόλεις, όπως η Βοστώνη και το Σικάγο, έχουν αρχίσει, σύμφωνα με τις υπάρχουσες πληροφορίες, να υλοποιούν αναβαθμίσιμα δίκτυα προ-WiMAX, που παρέχουν ένα παράδειγμα για το πώς οι στρατιωτικές βάσεις μπορούν να χρησιμοποιήσουν την ασύρματη τεχνολογία MAN στο μέλλον.

Ενώ το πρότυπο 802.16 αναφέρεται μόνο σε σταθερά δίκτυα, η κινητή συνιστώσα της τροποποίησης 802.16e καταγράφεται ως μεγάλο πλεονέκτημα για τις στρατιωτικές μονάδες που επιδιώκουν αυξανόμενη ρευστότητα και ευελιξία. Η τροποποίηση θα έδινε σε μια στρατιωτική φάλαγγα, παραδείγματος χάριν, ασύρματη κινητικότητα διαβιβάσεων φωνής και δεδομένων μέσα σε μια ακτίνα 50-Km και, σύμφωνα με μια έκθεση, ευρυζωνική συνδετικότητα ακόμα και όταν αυτή κινείται με ταχύτητες κατά προσέγγιση 145 Km/ώρα.

Τέτοια ευρεία κάλυψη μετάδοσης ικανοποιεί την πάγια στρατιωτική επιδίωξη για εκμετάλλευση των ειδικών κινητών δικτύων. Τα πρότυπα 802.16e επιτρέπουν σε στρατιωτικές μονάδες μακράν ενός σταθμού βάσης να επεκτείνουν τα αποκεντρωμένα, διανεμητικά ειδικά δίκτυα που μπορούν να έχουν προσβασιμότητα στο Παγκόσμιο Πλέγμα Πληροφοριών (GIG, Global Information Grid). Εκτιμάται ότι όταν εφαρμοσθεί η τεχνολογία που χρησιμοποιεί τα πρότυπα 802.16e, ένα άτομο, ένα όχημα και ακόμη και ένα τηλεκατευθυνόμενο εναέριο όχημα μπορεί να λειτουργήσει ως αναμεταδότης ή σημείο πρόσβασης προς ένα κεντρικό υπολογιστή. Επικύρωση από την IEEE του πρωτοκόλλου 802.16e, που περιλαμβάνει τις συσκευές που λειτουργούν στη ζώνη 2 ως 6 GHz, αναμένεται στο τέλος του 2005.

Εάν επικυρωθεί, το 802.20 πρωτόκολλο MAN θα βελτιώσει επίσης τις τρέχουσες ικανότητες εμβέλειας και κινητικότητας του IEEE 802.11. Το επικεντρωμένο στην κινητικότητα πρωτόκολλο 802.20 θα επέκτεινε την ασύρματη κάλυψη στα 15 Km, επιτρέποντας ρυθμούς μετάδοσης ≥ 1 Mbyte/sec, ισοδύναμους με τις ταχύτητες DSL και καλωδιακών μόντεμ. Τα πρότυπα εστιάζουν στην παροχή της ικανότητας κυψελωτής ασύρματης ευρυζωνικής περιαγωγής στη ζώνη 3,5 GHz σε χρήστες που ταξιδεύουν με υψηλές ταχύτητες, στην περιοχή των 160-240 Km/ώρα.

Είτε με το πρότυπο 802.16e είτε με το 802.20, οι στρατιωτικοί διαβιβαστές θα μπορούν πλέον να φέρουν λιγότερο εξοπλισμό, να εγκαθιστούν λιγότερα σημεία πρόσβασης και να παρέχουν ακόμα και υπηρεσίες περιαγωγής. Αυτά είναι τα νέα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από τα συγκεκριμένα πρότυπα. Εντούτοις, τα σχέδια προτύπων 802.20 δεν έχουν υποβληθεί ακόμα και πιθανόν να μην επικυρωθούν έως το τέλος του 2006. Όραμα των υποστηρικτών του 802.16e είναι οι κινητοί χρήστες να έχουν πρόσβαση σε ασύρματα δίκτυα μέσω laptop υπολογιστών, ενώ η διεπαφή του 802.20 επιδιώκει να υλοποιήσει δυνατότητες μεγάλης κινητικότητας.

Ο στρατός, επίσης, θα ωφεληθεί από ένα ασύρματο πρωτόκολλο που επιτρέπει τη μεταφορά μιας τρέχουσας συνδιάλεξης ή δεδομένων προς και από ένα δίκτυο σε διαφορετικούς τύπους δικτύων.

Ενώ τα τρέχοντα 802.11 πρότυπα δεν υποστηρίζουν τη μεταβίβαση υπηρεσιών μεταξύ ανόμοιων δικτύων, τα πρότυπα IEEE 802.21 ανεξάρτητης μεταβίβασης πολυμέσων θα παρείχαν την αδιατάρακτη μεταβίβαση προς και από: το παγκόσμιο σύστημα κινητής κυψελωτής τηλεφωνίας, το Bluetooth, τα δίκτυα Wi-Fi, το δίκτυο 802 και τις ραδιοεπικοινωνίες γενικών υπηρεσιών πακέτων.

Τα πρότυπα 802.21 επιτρέπουν σε ένα χρήστη να συνομιλεί μέσα σε ένα ενσύρματο τοπικό δίκτυο με ένα τηλέφωνο πρωτοκόλλου διαδικτύου ή να επικοινωνεί μέσα σε οποιοδήποτε ασύρματο δίκτυο. Επιτρέπει τη χρήση ενός ασύρματου δικτύου στο σπίτι, αλλά όταν ο χρήστης μετακινηθεί εκτός εμβέλειας, το κινητό αυτόματα συνδέεται στον προμηθευτή κυψελωτού δικτύου του και έπειτα πίσω πάλι στο οικιακό ασύρματο δίκτυο. Το πρωτόκολλο 802.21 επιτρέπει τη χρήση σε πολλαπλούς προμηθευτές και πελάτες. Οι χρήστες μπορούν επίσης να συμμετέχουν σε ad-hoc τηλεσυνεδριάσεις.

Από μία επιχειρησιακή προοπτική, το 802.21 υπόσχεται να παράσχει αξιόπιστες και ευέλικτες τηλεπικοινωνίες μέσω της εκμετάλλευσης των υπάρχοντων δικτύων σε ένα πεδίο μάχης, λειτουργώντας όμως σε μυστικό ή άκρως μυστικό επίπεδο.

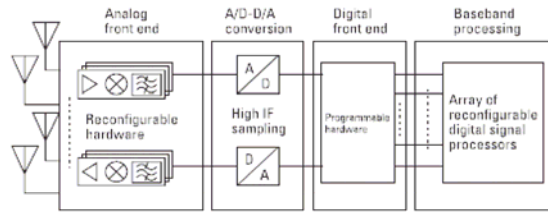
Ομάδες εργασίας της IEEE, επίσης, αναπτύσσουν πρότυπα 802.11 που θα επιτρέπουν ταχεία περιαγωγή από σημείο πρόσβασης σε σημείο πρόσβασης. Το 802.11r ρυθμίζει τις απαραίτητα μακρόχρονες καθυστερήσεις για τις -ευαίσθητες σε καθυστέρηση - φωνητικές συνδιαλέξεις επάνω σε ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο περιοχής (VoWLAN). Το πρότυπο αυτό θα επιτρέπει στις ασύρματες συσκευές που απομακρύνονται από ένα σημείο πρόσβασης να επανασυνδεθούν γρήγορα με ένα νέο σημείο πρόσβασης. Το σχεδιαζόμενο πρότυπο 802.11k θα δίδει στους χρήστες πληροφορίες για το φόρτο των διαθέσιμων σημείων πρόσβασης πριν συνδεθούν με ένα νέο σημείο πρόσβασης. Το πρότυπο αυτό μπορεί να επικυρωθεί στα τέλη του 2005, σύμφωνα με αρμόδιους του αμερικανικού στρατού.

Δύο ακόμη πρότυπα 802.11 υπόσχονται να επεκτείνουν την απόδοση του εύρους ζώνης του δικτύου στα σημεία πρόσβασης και να ελαχιστοποιήσουν την παρεμβολή από γειτονικές συσκευές. Προορισμένο για επικύρωση το 2006, το πρότυπο της IEEE 802.11n περί εκτεταμένης εμβέλειας και αυξημένου εύρους ζώνης ρυθμίζει το χαμηλό αριθμό συνδιαλέξεων VoWLAN που υποστηρίζονται ανά ασύρματο σημείο πρόσβασης, επιδιώκοντας να βελτιώσει το εύρος ζώνης σε 100 Mbyte/sec ή/και ταχύτερα. Η βελτίωση θα επέτρεπε περισσότερες συνδιαλέξεις VoWLAN ενώ θα υποστήριζε ταυτόχρονα άλλες ασύρματες υπηρεσίες πελατών δικτύων τοπικής περιοχής. Επίσης, θα ήταν συμβατό με τα τρέχοντα 802.11 δίκτυα.

Μια άλλη ομάδα εργασίας της IEEE εξετάζει το ζήτημα των παρεμβολών από παρακείμενες συσκευές. Το πρότυπο 802.11h θα προσπαθήσει να επιτρέψει στις ασύρματες συσκευές να αλλάζουν κανάλι όταν ανιχνεύουν παρεμβολή από μια άλλη συσκευή και να μειώνουν τη δική τους εκπεμπόμενη ισχύ ραδιοσημάτων, για να μειωθεί αντίστοιχα ο κίνδυνος παρεμβολών. Τα χαρακτηριστικά δυναμικής επιλογής συχνότητας (DFS) και ελέγχου εκπεμπόμενης ισχύος λειτουργούν μόνο στην 5 GHz ζώνη που χρησιμοποιείται από το πρότυπο 802.11a, αλλά όχι από τα δημοφιλέστερα πρότυπα 802.11b και 802.11g. Τα δύο τελευταία πρότυπα λειτουργούν στη ζώνη 2,4-GHz. Χωρίς DFS τα ασύρματα δίκτυα είναι ευαίσθητα σε παρεμβολές από υπάρχοντα συστήματα ραντάρ που λειτουργούν στη ζώνη 5 GHz. Και τα δύο πρότυπα θα βελτιώσουν την αξιοπιστία και την ποιότητα των μεταδόσεων φωνής.

IV. Ασύρματος Καθορισμένος από Λογισμικό (Software Defined Radio)

Για να είναι ομαλή η μεταγωγή μεταξύ των διαφόρων δικτύων, ζωνών συχνοτήτων και φορέων παροχής υπηρεσιών, απαιτείται ένα φορητό/κινητό ραδιο-τερματικό πολλαπλών ρόλων με αυξημένη λειτουργικότητα που συσκευάζεται σε ένα συμπαγές κυτίο. Έτσι προκύπτει η ανάγκη για το SDR.



Σχήμα 2: Αρχιτεκτονική ραδιο-πομποδέκτου λογισμικού.

Στο SDR η πολλαπλή λειτουργικότητα ενσωματώνεται στο λογισμικό μάλλον παρά στα κυκλώματα της συσκευής. Το αναλογικό πρόσθιο τμήμα περιλαμβάνει το αρχικό, πριν από την κεραία, αναλογικό στάδιο πομποδέκτου με τις λειτουργίες μίξης, ενίσχυσης, επιλογής ζώνης και μεταγωγής. Έπειτα ακολουθούν τα στάδια A/D και D/A που διασυνδέουν τις ροές αναλογικών σημάτων με τις διακριτές/ψηφιακές ροές στα ταχέα ψηφιακά κυκλώματα, τα οποία υλοποιούνται συνήθως με ολοκληρωμένα κυκλώματα FPGA και πιο σπάνια με τα δαπανηρότερα ASIC. Το οπίσθιο μέρος είναι η επεξεργασία ζωνών βάσης, μέσω μιας τράπεζας ταχέων DSP, που φιλοξενούν τους αλγόριθμους οι οποίοι υλοποιούν λειτουργίες μόντεμ και υψηλότερων στρωμάτων ασύρματων δικτύων.

Το όφελος είναι η μείωση όγκου και καταναλισκόμενης ισχύος καθώς και μία κατακόρυφη αύξηση της ευελιξίας και αναβαθμισιμότητας του τηλεπικοινωνιακού τερματικού, επειδή οι πιο πολύπλοκες λειτουργίες του βασίζονται πλέον σε λογισμικό, που εύκολα μπορεί να αντικατασταθεί.

V. Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων

Ο Δικτυοκεντρικός Πόλεμος απαιτεί αυξημένη επαγρύπνηση στο πεδίο μάχης σε σχεδόν πραγματικό χρόνο και σε τέτοιο βαθμό, που υπερβαίνει κατά πολύ τη σημερινή γνώση της κατάστασης, που παρέχεται από τακτικές ραδιοζεύξεις δεδομένων και φωνής.

Οι πληροφορίες που προέρχονται από τους ανθρώπινους χειριστές δεν επαρκούν για να εκπληρώσουν αυτό το στόχο. Έτσι, εμφανίζονται τα αυτοματοποιημένα δίκτυα αισθητήρων, που συλλέγουν τις ακατέργαστες πληροφορίες άμεσα από το πεδίο της μάχης, τις χρονολογούν, τις συνδυάζουν με σχετικά γεωγραφικά δεδομένα και τις διοχετεύουν στους κεντρικούς κόμβους δικτύων. Κάθε κόμβος επικοινωνεί άμεσα με τους κεντρικούς υπολογιστές διοίκησης και ελέγχου, όπου, μετά από ταχεία επεξεργασία, εξάγεται ή αξιοποιήσιμη πληροφορία (intelligence) εντός σχεδόν πραγματικού χρόνου. Η επιτήρηση στο πεδίο της μάχης επιτυγχάνεται με δίκτυα μικροαισθητήρων που σχηματίζουν συστάδες (clusters) σε κάθε γεωγραφική περιοχή και, κατόπιν, με τοπολογίες συνάθροισης φθάνουν μέχρι τον κεντρικό κορμό του δικτύου διοίκησης. Οι ακατέργαστες πληροφορίες συγκεντρώνονται στην κεφαλή κάθε συστάδας, η οποία, αφού εκτελέσει πρώτα συγκερασμό δεδομένων, κατόπιν εκπέμπει με ραδιοσήμα ή ακτινοβολεί τα προκύπτοντα συμπιεσμένα δεδομένα στο σταθμό βάσεως [4].

Για παράδειγμα, πρόσφατα ο όμιλος εταιριών Harris, Τομέας Τηλεπικοινωνιών RF, παρουσίασε τον “Silent Watch”, μια σειρά τηλεκατευθυνόμενων αισθητήρων σε μια εξελίξιμη και ευλύγιστη αρχιτεκτονική, με σκοπό την παροχή 24ωρης επιτήρησης για διάφορες τοποθεσίες και αντικείμενα προς φύλαξη.

Σαν ένα υπερ-κινητικό δίκτυο αισθητήρων σε περιβάλλον NCW, μπορεί να χαρακτηριστεί το δίκτυο επιτήρησης πεδίου μάχης με UAVs (το συγκεκριμένο όνομα είναι URAVs = μη-επηρεασμένα εναέρια οχήματα αναγνώρισης), που φέρουν αισθητήρες (οπτικούς, IR, βίντεο, SAR και ραδιο-συμβολομετρικούς). Το επιτηρούν URAV διαβιβάζει τα συλλεχθέντα δεδομένα στον UAV-αναμεταδότη που διοχετεύει τις πληροφορίες με ένα κέντρο διοίκησης. Το τελευταίο διαμορφώνει μια εικόνα πεδίου μάχης, προσδιορίζει τους σημαντικούς εχθρικούς στόχους και κατευθύνει αμέσως τα UCAVs (τηλεκατευθυνόμενα εναέρια οχήματα μάχης) για να πλήξουν τους επιλεγμένους στόχους. Οι πληροφορίες που συλλέγονται από ένα ευρέως διασκορπισμένο πλέγμα UAVs θα

συνδυαστούν κατάλληλα στο διοικητήριο για να παράσχουν μια ενοποιημένη σε βάθος εικόνα των εχθρικών γραμμών.

Σήμερα, μία τάχιστα εξελισσόμενη ποικιλία μεγεθών και ρόλων καθιστά το UAV το νέο προτιμητέο πολλαπλασιαστική ισχύος που μπορεί να προσφέρει πολλαπλές λειτουργίες σε οποιαδήποτε σύγκρουση. Η μικρογραφία είναι μια αξιοπρόσεκτη τάση, βάσει της οποίας το σημερινό μίνι-UAVs θα μετεξελιχθεί στα αυριανά μικρο- και νανο-UAVs. Ένα υβριδικό μικρο-UAV θα μπορεί να πετάξει το ίδιο στο πεδίο της μάχης και να προσγειωθεί σε ένα πλεονεκτικό σημείο, απ' όπου διαθέτοντας δυνατότητα αυτοσυγκάλυψης, θα παρατηρεί και θα διαβιβάζει τις πληροφορίες για τη δραστηριότητα του εχθρού. Όταν, μάλιστα, ο εχθρός κινηθεί, το μικρο-UAV θα απογειωθεί και θα τον ακολουθήσει σαν αόρατος κατάσκοπος.

VI. Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS) με Επιπρόσθετα Στρατιωτικά Στρώματα (AML)

Η χρήση των εφαρμογών GIS στις ένοπλες δυνάμεις έχει προκαλέσει επανάσταση στον τρόπο με τον οποίο οι δυνάμεις αυτές λειτουργούν και δρουν. Το σημερινό πλήθος πληροφοριών γεωγραφικού χώρου, που κωδικοποιείται με διαφορετικές φόρμες και πεδία, μπορεί να ενορχηστρωθεί σε μια κοινή γιγαντιαία βάση δεδομένων που να παρέχει μια δυναμική 3-διάστατη άποψη πεδίου μάχης τόσο στον στρατηγικό επιτελικό σχεδιαστή όσο και στον τακτικό διοικητή [4]. Οι διοικητές ξηράς, θαλάσσης και αέρος απαιτούν διαφορετικούς τύπους πληροφοριών γεωγραφικού χώρου υπό μια διαλειτουργική ψηφιακή γεωγραφική βάση δεδομένων, ώστε να είναι σε θέση να ανταποκριθούν στις ανάγκες κάθε κλάδου, όσον αφορά την διοχέτευση, το φιλτράρισμα, την ανάλυση και την παρουσίαση των πληροφοριών για τη λήψη αποφάσεων. Λόγω του GPS, το WGS-84 αναδύεται ως το κύριο datum σήμερα, και όλα τα περιφερειακά datums πρέπει να έχουν μια εύκολη μετατρεψιμότητα σε αυτό. Προκειμένου να αποφευχθούν η συσσώρευση και η συμφόρηση πληροφορίας στους χάρτες, οι επιδεικνυόμενες κατηγορίες δεδομένων είναι ταξινομημένες σε ξεχωριστές ομάδες που αντιπροσωπεύουν τα Επιπρόσθετα Στρατιωτικά Στρώματα (Additional Military Layers, AML).

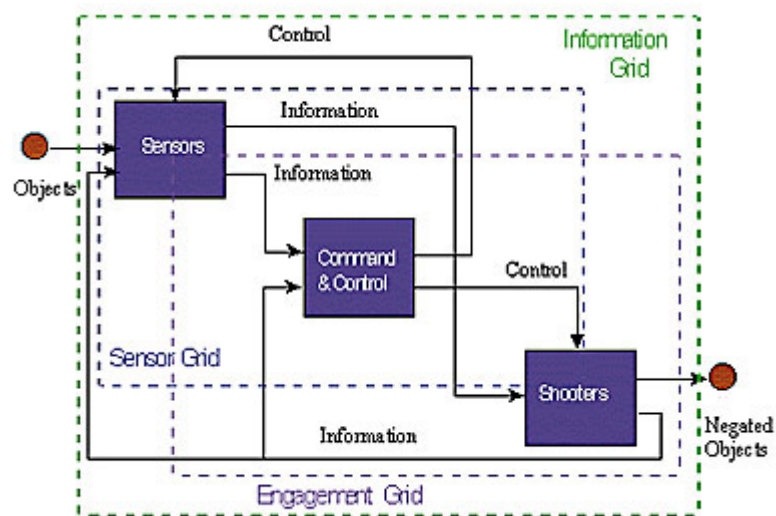
Εν πλω, η χρήση του Συστήματος Επίδειξης Ηλεκτρονικών Χαρτών και Πληροφοριών (Electronic Chart Display and Information System, ECDIS) στη γέφυρα των πλοίων βοηθά τον πλοηγό να πλοηγήσει το σκάφος ακίνδυνα σε όλες τις καιρικές συνθήκες. Ο Ηλεκτρονικός Χάρτης Ναυτιλίας (Electronic Navigation Chart, ENC) είναι μια αντικατάσταση του συμβατικού “χάρτη πάνω σε χαρτί” και χρησιμοποιείται ως εργαλείο για τη ναυτιλία, παρέχοντας λεπτομερείς πληροφορίες για το βάθος θαλάσσης, τους κινδύνους και τα ναυτιλιακά βοηθήματα μέσα στην περιοχή. Υποστηριζόμενο και από οπτικούς και από ακουστικούς συναγερούς, το ECDIS παρέχει στον πλοηγό ικανοποιητικά μέσα για την ασφαλή πλοήγηση του σκάφους. Στην οθόνη αναγράφονται ταυτόχρονα επιλεγμένες χωρικές ή έγγραφες πληροφορίες για τον πλοηγό, οι οποίες βοηθούν στην ασφαλή διάβαση επικίνδυνων υδάτων. Συνεπώς, ENC είναι η βάση δεδομένων για τις λειτουργίες GIS και ECDIS είναι η εφαρμογή GIS πραγματικού χρόνου στο θαλάσσιο περιβάλλον. Επιπλέον, το ECDIS μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε άλλες ναυτικές επιχειρήσεις με ενεργοποίηση επιπρόσθετων στρωμάτων πληροφοριών, σχετικών με τις ωκεανογραφικές και μετεωρολογικές συνθήκες, για το σχεδιασμό και τη διεξαγωγή ναυτικών επιχειρήσεων, όπως ανθυποβρυχιακές ή στρατιωτική απόβαση σε εχθρικές ακτές. Το NATO έχει τυποποιήσει τα επιπρόσθετα στρατιωτικά στρώματα που χρησιμοποιούνται για τις επιχειρήσεις, χρησιμοποιώντας τη βάση δεδομένων ENC ως βασικό υπόστρωμα πληροφοριών από κοινού με το σύστημα γέφυρας ECDIS [5].

VII. Συνεργιστική Ικανότητα Εμπλοκής (CEC)

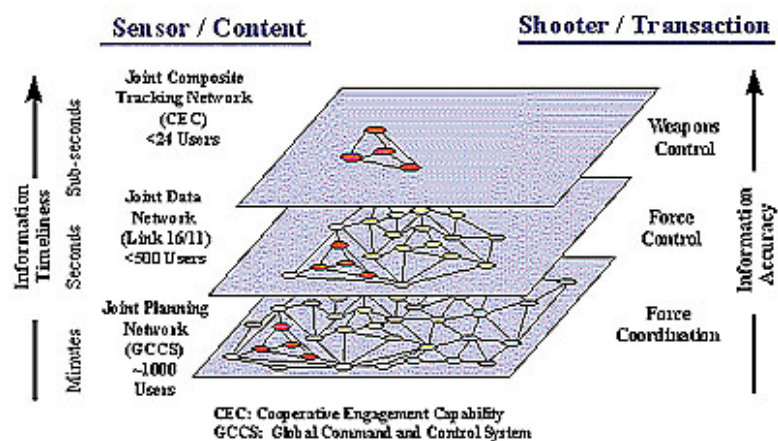
Όλες οι παραπάνω τεχνολογίες θα συμβάλουν στο να καταστεί εφικτός ο δικτυοκεντρικός πόλεμος. Η διεξαγωγή μιας μάχης σε ένα δικτυο-κεντρικό περιβάλλον δεν είναι πλέον απλώς μια εμπλοκή ενός πλήθους αυτόνομων ημετέρων μονάδων με εχθρικά στοιχεία. Κάθε μονάδα συνεισφέρει στην κοινή προσπάθεια “πληροφορίες και σφαίρες”, ενώ ο τόπος διοικήσεως όλων αυτών μπορεί να

αλλάζει δυναμικά, ανάλογα με τις περιστάσεις. Με αυτή την καινούρια δυνατότητα ενεργοποιείται το πλέγμα όλων των τεχνολογιών και δικτύων που εκτέθηκαν στις προηγούμενες ενότητες. Έτσι, η συνολική προσπάθεια στη μάχη καθίσταται συνεργιστική, εφόσον τα όπλα ενός μαχητικού σχηματισμού μπορεί να καθοδηγούνται από τους αισθητήρες ενός όμορου φίλιου σχηματισμού που συμβαίνει να βρίσκεται σε ευνοϊκότερη θέση για να εντοπίζει τις εχθρικές μονάδες, ενώ η διοίκηση και η εντολοδοσία να πραγματοποιούνται από τρίτο σημείο.

Ο ναύαρχος Chebrowski, ένας από τους πνευματικούς πατέρες του δόγματος του NCW [6], εξηγεί την CEC, θεωρώντας την: (α) ως συνεργισμό μεταξύ τριών πλεγμάτων (grids, δηλαδή πολύ πυκνών δικτύων): το πλέγμα των αισθητήρων, το πλέγμα των πληροφοριών και το πλέγμα της εμπλοκής (ή πλέγμα των όπλων) ή, εναλλακτικώς, (β) ως επαλληλία τριών επιπέδων, πηγαίνοντας από κάτω προς τα άνω, δηλαδή από το Συντονισμό Δυνάμεων (Force Coordination) στον Έλεγχο Δυνάμεων (Force Control) και παραπάνω στον Έλεγχο Όπλων (Weapons Control), όπου το κορυφαίο επίπεδο απαιτεί χρόνο μεταφοράς πληροφορίας στοχοποίησης μικρότερης του 1 sec, το μεσαίο επίπεδο απαιτεί διαλειτουργικότητα στον Link16 και το χαμηλότερο επίπεδο απαιτεί χρονισμό και λειτουργικότητα διοίκησης και ελέγχου επιπέδου αρχιστρατηγείου.



Σχήμα 3(α): Τα τρία πλέγματα της CEC: Αισθητήρες, Πληροφορία και Εμπλοκή.



Σχήμα 3(β): Τα τρία επίπεδα της Συνεργιστικής Ικανότητας Εμπλοκής στον ΔΚΠ [6].



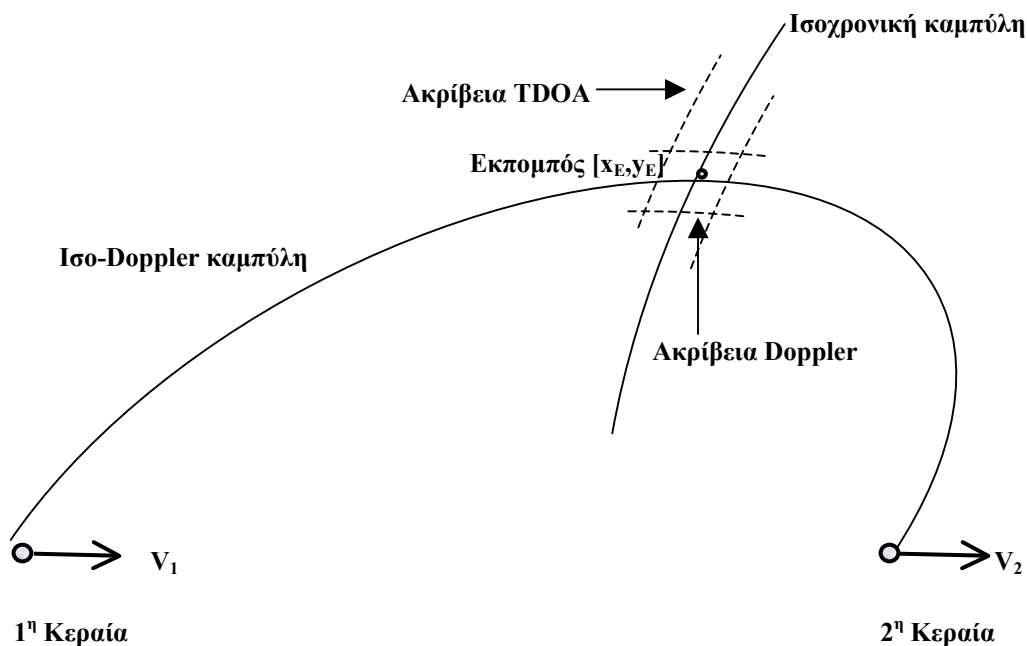
Σχήμα 4: Το Σουηδικό μαχητικό 4^{ης} Γενιάς Gripen υλοποιεί αποτελεσματικά τη Συνεργιστική Ικανότητα Εμπλοκής μεταξύ 4 α/φών.

Ένα αξιόλογο παράδειγμα για το πώς προηγμένες τεχνολογίες τηλεπικοινωνιών μπορούν να ενσωματωθούν με χρήση ενός συστήματος τακτικής πληροφορίας datalink (TIDLS), ως CEC, είναι το σουηδικό μαχητικό αεροσκάφος 4^{ης} γενιάς Gripen [7].

«Το TIDLS μπορεί να συνδέσει μέχρι τέσσερα αεροσκάφη σε μια διαρκή σύνδεση διπλής κατεύθυνσης. Έχει εμβέλεια 500 χλμ. και είναι ιδιαίτερα ανθεκτικό στις παρεμβολές: σχεδόν ο μόνος τρόπος να φραχθεί το σύστημα είναι να τοποθετηθεί ένα jammer αεροσκάφος άμεσα μεταξύ δύο επικοινωνούντων Gripen. Οι βασικοί modes του συστήματος περιλαμβάνουν τη δυνατότητα να επιδειχθεί η θέση, η διόπτευση και η ταχύτητα των τεσσάρων αεροσκαφών σε έναν σχηματισμό, συμπεριλαμβανομένων των βασικών πληροφοριών κατάστασης α/φους, όπως τα καύσιμα και ο αριθμός και το είδος των υπάρχοντων όπλων. Το TIDLS είναι τελείως διαφορετικό από τις ζεύξεις καθολικής εκπομπής (broadcast), όπως ο Link 16. Εξυπηρετεί λιγότερους χρήστες αλλά τους συνδέει πιο στενά μαζί, ανταλλάσσοντας πολύ περισσότερο στοιχεία, και λειτουργεί πολύ πλησιέστερα στον πραγματικό χρόνο...». Μια βασική χρήση του datalink είναι η “σιωπηλή επίθεση”. Ένας αντίπαλος μπορεί να γνωρίζει ότι ιχνηλατείται από ένα ραντάρ μαχητικού α/φους εκτός φακέλου βλημάτων του. Αλλά ταυτόχρονα μπορεί να μη γνωρίζει ότι άλλο πλησιέστερο μαχητικό λαμβάνει τα δεδομένα της ιχνηλάτησής του και προετοιμάζεται για βολή βλημάτων χωρίς ενεργοποίηση του ραντάρ του. Μετά από τη βολή, το βάλλον α/φος μπορεί να απομακρυνθεί άμεσα ενώ το άλλο μαχητικό συνεχίζει να καθοδηγεί το βλήμα, παρέχοντάς του στοιχεία για την πορεία του στόχου. Στις δοκιμές, οι πιλότοι των Gripen έχουν διαπιστώσει ότι αυτό καθιστά δυνατή την καθυστέρηση της έναυσης του ραντάρ της κεφαλής του AMRAAM, εωσότου είναι πολύ αργά για το στόχο να αντιδράσει (no escape zone). Ωστόσο, η χρήση της σύνδεσης είναι κάτι πολύ περισσότερο: είναι αυτό που η σουηδική Πολεμική Αεροπορία καλεί “samverkan” ή στενή-συνεργασία. Ένα παράδειγμα είναι η χρήση του PS-05/A ραντάρ Ericsson με την TIDLS. Αυτό το ραντάρ μπορεί να λειτουργήσει με παθητικό τρόπο, ως ευαίσθητος δέκτης με υψηλή κατευθυντική ακρίβεια (λόγω της μεγάλης κεραίας του). Δύο PS-05/As μπορούν να ανταλλάξουν ραδιογωνιομετρικά στοιχεία διοπτύσεων στόχου μέσω του datalink και να εντοπίσουν το στόχο παθητικά με τριγωνισμό. Επίσης, τα εκπεμπόμενα σήματα εκ του στόχου θα τον ταυτοποιήσουν στους Radar Warning Receivers των Gripen. Η ανταλλαγή των σημάτων Doppler μπορεί να οδηγήσει στον παθητικό υπερβολικό προσδιορισμό όχι μόνο της στιγμιαίας θέσης αλλά και του διανύσματος ταχύτητας του στόχου και, έτσι, τα Gripen έχουν την ευκαιρία να εγκλωβίσουν

και να κάνουν βολή κατά του στόχου, χωρίς κανένα από αυτά να χρειαστεί να ενεργοποιήσει το ραντάρ του.

Στον υπερβολικό προσδιορισμό θέσης και ταχύτητας στόχου χρησιμοποιούνται οι τεχνικές TDOA και FDOA. Η τεχνική TDOA χρησιμοποιεί δύο δέκτες σε γεωγραφική απόσταση μεταξύ τους που μετρούν τη σχετική καθυστέρηση σήματος εκπομπού, του οποίου η θέση ευρίσκεται σε μία υπερβολική καμπύλη. Η υπερβολή αυτή είναι ο γεωμετρικός τόπος των σημείων στο χώρο, όπου οι χρονικές καθυστερήσεις σήματος από τον κοινό εκπομπό σχηματίζουν μία σταθερή διαφορά. Αντίστοιχα, η τεχνική FDOA χρησιμοποιεί τους ίδιους δύο δέκτες που μετρούν τη σχετική διαφορά Doppler σήματος εκπομπού, του οποίου η θέση ευρίσκεται σε μία υπερβολική καμπύλη που είναι ο γεωμετρικός τόπος των σημείων στον χώρο, όπου οι μετατοπίσεις συχνότητας Doppler σήματος από τον κοινό εκπομπό σχηματίζουν μία σταθερή διαφορά. Στην προκειμένη περίπτωση, αυτό που απαιτείται επιπλέον είναι μία τηλεπικοινωνιακή ζεύξη μεταξύ των δύο δεκτών, η οποία θα τους επιτρέψει να ανταλλάσσουν πληροφορίες σχετικά με την θέση τους (από το GPS ή το INS), και με τη συχνότητα και τη χρονική στιγμή άφιξης των παλμών του εκπομπού (δηλαδή του ραντάρ του εχθρικού α/φους). Το εχθρικό ραντάρ θα ευρίσκεται στην τομή των δύο υπερβολών διαφοράς Doppler και χρονικής άφιξης παλμών (Σχήμα 5).



Σχήμα 5: Εύρεση θέσης εκπομπού με τη μέθοδο TDOA/FDOA.

VIII. Συμπεράσματα

Τα σύγχρονα ασύρματα ευρυζωνικά πρότυπα στον πολιτικό τομέα μπορούν να υιοθετηθούν ως τεχνολογία COTS (εμπορικών προϊόντων από το ράφι) από ένοπλες δυνάμεις που υιοθετούν τις ιδέες ή τα δόγματα του δικτυοκεντρικού πολέμου (NCW). Οι λειτουργίες του NCW απαιτούν πολύ πυκνά δίκτυα (πλέγματα). Έτσι, η αφθονία των δικτύων που μπορούν να λειτουργήσουν βάσει των IEEE 802 προτύπων είναι ιδανικά για εφαρμογές NCW σε μεγάλες γεωγραφικές περιοχές. Η πληθώρα των διαθέσιμων ζωνών και των πρωτοκόλλων μπορεί να εξυπηρετηθεί υπό συνθήκες χαμηλού κόστους από φορητά και κινητά τερματικά πολλαπλών ρόλων-πολλαπλής ζώνης, τα οποία εφαρμόζουν το ράδιο λογισμικού (SDR) που μπορεί να αναβαθμιστεί εύκολα και να εγκαταστήσει διαφορετικές

συσκευές στο ίδιο τερματικό. Ζωτικές πληροφορίες από το πεδίο της μάχης συλλέγονται από ποικίλους ευρέως διασκορπισμένους αισθητήρες που διαβιβάζουν τα ακατέργαστα δεδομένα στην κεντρική διοίκηση, όπου αυτά μεταποιούνται σε αξιοποιήσιμη δυναμική γνώση για το πεδίο της μάχης. Η δυναμική γνώση του χώρου μάχης καταγράφεται σε ένα GIS που εμπλουτίζεται με AML σε μια γεωγραφικά κατανομημένη βάση δεδομένων, που αναδημιουργεί μια πολυστρωματική άποψη πεδίου μάχης για όλη την ιεραρχία της διοίκησης, πράγμα που επιτρέπει τη σωστή και έγκαιρη λήψη αποφάσεων. Η CEC μπορεί τώρα να καταστεί εφικτή μέσω της χρήσης των ασύρματων δικτύων δεδομένων, των δικτύων αισθητήρων, των ραδιοπομποδεκτών λογισμικού και της δυναμικής απεικόνισης GIS του σημερινού σύνθετου πεδίου μάχης.

Αναφορές

1. A. J. Viterbi, *“Four Laws of Nature and Society: The Governing Principles of Digital Wireless Communication Networks”*, an Epilogue in the Book *“Wireless Communications – Signal Processing Perspectives”*, H. Vincent Poor, Gregory W. Wornell, Editors, Prentice Hall 1998.
2. J. Hawk, *“Mobility-Hungry Army Awaits Wireless Upgrades”*, Special Report in SIGNAL, AFCEA’s International Journal, September 2005.
3. A. Hac, *“Wireless Sensor Network Designs”*, Wiley 2003.
4. P. Satyanarayana and S. Yogendran, *“Military applications of GIS”*, <http://www.gisdevelopment.net/index.htm>.
5. NATO- ADDITIONAL MILITARY LAYERS CONTOUR LINE BATHYMETRY PRODUCT SPECIFICATION Version 2.0, 31 July 2004, Produced and issued by the UK Hydrographic Office under the direction of the Ad Hoc Hydrographic Working Group of the NATO Geographic Conference.
6. Vice Admiral A. K. Cebrowski, U.S. Navy, and J. J. Garstka, *“Network-Centric Warfare: Its Origin and Future”*, <http://www.usni.org/Proceedings/Articles98/PROcecbrowski.htm>.
7. B. Sweetman, *“Gripen, Lion of the Sky, Sweden takes on the World with the first Fighter of the 21st Century”*, Journal of Electronic Defence.

Συντομογραφίες

AFCEA	Armed Forces Communication & Electronics Association
AML	Additional Military Layers
AMRAAM	Advanced Medium Range Air to Air Missile
ASIC	Application Specific Integrated Circuits
C4ISR	Command, Control, Communications, Computers, Intelligence, Surveillance, Reconnaissance
CEC	Cooperative Engagement Capability
COTS	Commercial Off The Shelf
DA	Destination Address
DCF	Distributed Coordinated Function
DFS	Dynamic Frequency Selection
DSL	Digital Subscriber Line
DSP	Digital Signal Processing
ECDIS	Electronic Chart Display and Information System
ENC	Electronic Navigation Chart
FCC	Federal Communications Commission
FDOA	Frequency Difference of Arrival
FPGA	Field Programmable Gate Array
GFSK	Gaussian Frequency Shift Keying

GIG	Global Information Grid
GIS	Geographical Information System
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IR	Infrared
ISM	Industrial, Scientific and Medical
LAN	Local Area Network
MAC	Medium Access Control
MAN	Metropolitan Area Network
NCW	Network-Centric Warfare
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PCF	Point Coordination Function
RA	Receiver Address
SA	Source Address
SAR	Synthetic Aperture Radar
SDR	Software Defined Radio
TA	Transmitter Address
TDOA	Time Difference of Arrival
TIDLS	Tactical Information Data Link System
TKIP	Temporal Key Integrity Protocol
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UCAV	Unmanned Combat Aerial Vehicle
URAV	Unmanned Reconnaissance Aerial Vehicle
VoIP	Voice over Internet Protocol
VoWLAN	Voice over WLAN
WEP	Wired Equivalent Privacy
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WiMAX	Worldwide interoperability for Microwave Access
WIN-T	Warfighter Information Network–Tactical
WLAN	Wireless LAN
WPA	Wi-Fi protected access
ΔΚΠ	Δικτυο-Κεντρικός Πόλεμος
ΣΙΕ	Συνεργιστική Ικανότητα Εμπλοκής

Τεχνολογία Software Defined Radio: Βασικές αρχές, εξελίξεις και προοπτικές

Γ. Βαρδούλιας και Ι. Κούκος

Περίληψη

Σκοπός της εργασίας είναι η παρουσίαση της τεχνολογίας Software Defined Radio (SDR). Η τεχνολογία Software Defined Radio (SDR) εμφανίστηκε στις αρχές της δεκαετίας του '90 για να εξυπηρετήσει στρατιωτικές ανάγκες και, συγκεκριμένα, για να επιτρέψει την επικοινωνία μεταξύ μονάδων που χρησιμοποιούν συσκευές βασισμένες σε διαφορετικές και συχνά ασύμβατες τεχνολογίες. Η ιδέα αυτή υπερέβη σύντομα τα στενά στρατιωτικά πλαίσια καθώς το τοπίο στις εμπορικές τηλεπικοινωνίες περιλαμβάνει πλέον ένα μεγάλο αριθμό εντελώς ασύμβατων συστημάτων. Πολλά τέτοια συστήματα, από το απλό ραδιόφωνο έως τα κινητά τηλέφωνα 3^{ης} γενιάς, έχουν ως κοινό χαρακτηριστικό την αυξανόμενη επιθυμία του χρήστη να εκμεταλλευτεί τα πάντα με ενιαίο, εύκολο και οικονομικό τρόπο. Καθώς το software radio φαίνεται να μπορεί να δώσει στις συσκευές την ανάλογη ευελιξία που ζητούν οι χρήστες, η αύξηση του σχετικού ερευνητικού ενδιαφέροντος είναι τεράστια τόσο στον ακαδημαϊκό όσο και στο βιομηχανικό χώρο.

Abstract

The SDR Forum defines SDR technology as: "*radios that provide software control of a variety of modulation techniques, wide-band or narrow-band operation, communications security functions (such as hopping), and waveform requirements of current & evolving standards over a broad frequency range.*" In a nutshell, SDR refers to the technology wherein software modules running on a generic hardware platform consisting of General Purpose Processors (GPP), Digital Signal Processors (DSP) and Field Programmable Gate Arrays (FPGA) are used to implement radio functions such as modulation at the transmitter and demodulation at the receiver. These software modules replace "traditional" hardware modules. By replacing and/or adding new software (reconfiguration) the communication device can operate in a variety of networks without adding new hardware. SDR technology can be used to implement military, commercial and civilian radio applications. This paper presents, briefly, the state-of-the-art, challenges and applications of the SDR technology

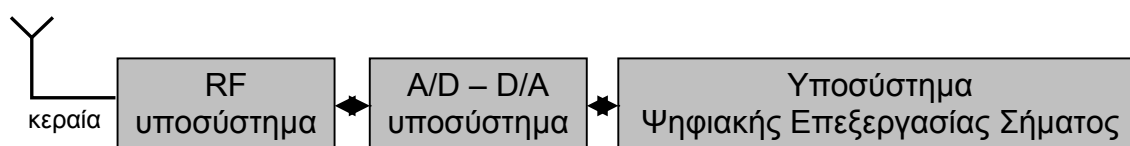
I. Εισαγωγή

Το εμπορικό πλεονέκτημα που προσφέρει μια SDR συσκευή είναι ότι μπορεί να λειτουργήσει σε μια πληθώρα από διαφορετικά τηλεπικοινωνιακά δίκτυα χωρίς προσθήκη νέων εξαρτημάτων και με την ελάχιστη δυνατή εμπλοκή του χρήστη στη διαδικασία αναβάθμισης. Από τεχνικής άποψης αυτό σημαίνει ότι η SDR συσκευή πρέπει να παραμείνει λειτουργική ακόμη και αν μεταβληθούν τα χαρακτηριστικά του φυσικού ή ανώτερων στρωμάτων του τηλεπικοινωνιακού πρωτοκόλλου (π.χ. οι συχνότητες εκπομπής και λήψης, ο τρόπος διαμόρφωσης, οι κώδικες ελέγχου και διόρθωσης σφαλμάτων, το σύστημα κρυπτογράφησης, η δομή των πακέτων δεδομένων κ.λπ.). Η ευελιξία αυτή επιτυγχάνεται σε δύο στάδια: (α) μετατρέπεται το λαμβανόμενο αναλογικό σήμα σε ψηφιακό αμέσως μετά τη κεραία και (β) λειτουργίες που παραδοσιακά εκτελούνται από κυκλωματικές διατάξεις (dedicated hardware) αποδίδονται σε κατάλληλο, εύκολα ανανεώσιμο λογισμικό (software). Έτσι, με τη προσθήκη νέου λογισμικού η συσκευή αποκτά νέες δυνατότητες, όπως ακριβώς συμβαίνει με τους υπολογιστές. Το πρώτο στάδιο απαιτεί εξελιγμένα κυκλώματα μετατροπής αναλογικού σε ψηφιακό σήμα, μεγάλου εύρους ζώνης και υψηλής ταχύτητας δειγματοληψίας. Το δεύτερο στάδιο απαιτεί προσεκτικά σχεδιασμένο λογισμικό πραγματικού χρόνου και αντίστοιχες υπολογιστικές μονάδες (DSP, FPGA, GPP).

Η εργασία αυτή είναι διαρθρωμένη ως εξής: στην πρώτη ενότητα περιγράφονται οι βασικές αρχές και τα θεμελιώδη προβλήματα της τεχνολογίας SDR, στη δεύτερη ενότητα παρουσιάζονται τα μέχρι τώρα εμπορικά αποτελέσματα τόσο για τη στρατιωτική όσο και για την πολιτική αγορά και, τέλος, περιγράφονται οι δραστηριότητες της ερευνητικής μας ομάδας, οι οποίες αποσκοπούν στην κατασκευή μιας ερευνητικής SDR πλατφόρμας.

II. Ορισμός και θεμελιώδη προβλήματα

Ο πρώτος ορισμός ενός ιδεατού SDR συστήματος δόθηκε από τον J.Mitola [1]. Το ιδεατό software radio αποτελείται από μια κεραία ευρείας ζώνης (υποσύστημα RF), συνοδευόμενη από ένα μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό σήμα (ADC). Το ψηφιακό σήμα οδηγείται για επεξεργασία στη μονάδα Ψηφιακής Επεξεργασίας Σήματος (ΨΕΣ), που μπορεί να είναι ένας κοινός υπολογιστής (General Purpose Processors-GPP) ή μια πλατφόρμα DSP/FPGA, ανάλογα με τις απαιτήσεις του συστήματος. Μια τέτοια αρχιτεκτονική εξαλείφει την ανάγκη ύπαρξης των συγκεκριμένων αφιερωμένων κυκλωμάτων που υπάρχουν σε ένα κλασικό σύστημα. Δεδομένου ότι μετά την αρχική μετατροπή έχουμε μόνο ψηφιακό σήμα, όλα τα κυκλώματα μπορούν να αντικατασταθούν από κατάλληλο λογισμικό στη μονάδα ΨΕΣ που θα εκτελεί τις απαραίτητες λειτουργίες του δέκτη (ή πομπού). Μια τέτοια ιδεατή συσκευή, χωρίς συγκεκριμένα κυκλώματα, μπορεί να λειτουργήσει σε οποιοδήποτε σύστημα, αρκεί να προσθέσουμε το αντίστοιχο λογισμικό.



Σχήμα 1: Το ιδεατό σύστημα SDR.

Η κατασκευή ενός πραγματικού συστήματος SDR, ξεκινώντας από την αρχιτεκτονική του Mitola, προϋποθέτει την επίλυση δύσκολων προβλημάτων [2, 3] σε τρεις τομείς:

- Το σύστημα RF είναι πολύ πιο πολύπλοκο από μια απλή κεραία. Περιλαμβάνει φίλτρα, ενισχυτές, μίκτες και άλλες διατάξεις, που περιορίζουν το εύρος ζώνης λειτουργίας σε σχετικά μικρές περιοχές [4-7]. Κάποια τμήματά του επίσης (όπως η κεραία) είναι αδύνατο να αντικατασταθούν από λογισμικό. Έτσι, η επικρατέστερη σχεδίαση μέχρι σήμερα είναι ο συνδυασμός πολλαπλών RF αλυσίδων, καθεμιά από τις οποίες καλύπτει μια μικρή περιοχή συχνοτήτων. Ανάλογα με τη συχνότητα του σήματος εκπομπής / λήψης, ενεργοποιείται η αντίστοιχη αλυσίδα με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού. Η προσέγγιση αυτή οδηγεί σε πολύπλοκες, ογκώδεις και ακριβές διατάξεις. Μια πιθανή λύση στο πρόβλημα αυτό είναι οι κεραίες πλάσματος (plasma antennas). Πρόκειται για μη μεταλλικές κεραίες οι οποίες χρησιμοποιούν ως αγωγίμο μέσο στήλης πλάσματος. Παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για εφαρμογές SDR, καθώς μπορούν να λειτουργήσουν σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων και πολλές παράμετροι λειτουργίας τους μπορούν να αλλάξουν χωρίς να μεταβληθούν τα φυσικά χαρακτηριστικά της κεραίας [8].
- Τα συστήματα ADC είναι ακόμη πιο περιορισμένα σε εύρος ζώνης ενώ ο συνδυασμός μεγάλης ταχύτητας δειγματοληψίας και ανάλυσης κοστίζει ακριβά [9]. Η κατασκευή ADC με συχνοτήτες δειγματοληψίας πάνω από 10 GHz αναμένεται να δώσει τεράστια ώθηση στο Software Radio, αφού θα προσφέρει τη δυνατότητα αντικατάστασης πολλών RF διατάξεων από λογισμικό. Σε εργαστηριακό επίπεδο έχουν αναφερθεί συχνότητες 13 GHz όμως τα συστήματα αυτά δεν είναι ακόμη εμπορεύσιμα.
- Η μονάδα ΨΕΣ και το αντίστοιχο λογισμικό απαιτούν προσεκτικό σχεδιασμό για να μπορούν να ανταποκριθούν στον υψηλό υπολογιστικό φόρτο των αλγορίθμων εκπομπής / λήψης. Απαιτείται η επανεξέταση αυτών των αλγορίθμων και η βελτιστοποίησή τους, όπου αυτό είναι δυνατό [7, 10, 11]. Ως βέλτιστη επιλογή για τη μονάδα ΨΕΣ θεωρείται ο προσωπικός

υπολογιστής (PC ή GPP), επειδή προσφέρει μεγάλη ταχύτητα και μνήμη, καλύτερο περιβάλλον ανάπτυξης, δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης του κώδικα και οικονομία. Σήμερα, οι εμπορικές πλατφόρμες ανάπτυξης SDR εφαρμογών αποτελούνται από ένα συνδυασμό DSP (για κάποιους αλγόριθμους φυσικού στρώματος), FPGA (για υλοποίηση φίλτρων) και GPP (για κεντρικό έλεγχο και αλληλεπίδραση με τον χρήστη). Η ερευνητική τάση, ωστόσο, είναι η χρήση ενός μοναδικού GPP, ικανού να αντεπεξέλθει σε όλες τις απαιτήσεις του συστήματος.

Σημαντικός είναι επιπλέον ο ρόλος λειτουργικών συστημάτων που θα επιτρέπουν τον εύκολο επαναπρογραμματισμό (reconfiguration) της συσκευής σε επίπεδο τηλεπικοινωνιακού λογισμικού [12]. Έτσι, η τεχνολογία SDR ωθεί (και ωθείται από) τις εξελίξεις στους τρεις αυτούς τομείς: RF διατάξεις μεγάλου εύρους ζώνης, συστήματα ADC, βελτιστοποίηση ΨΕΣ και λογισμικού για εφαρμογές SDR. Εκτός από τις τεχνικές προκλήσεις που σχετίζονται με την ίδια τη συσκευή, υπάρχουν και θέματα που αφορούν τη σχεδίαση του δικτύου που θα καλύψει τις νέες αυτές συσκευές. Συγκεκριμένα, ερευνώνται νέες δικτυακές δομές, διατάξεις και αλγόριθμοι που θα επιτρέψουν:

- τη γρήγορη διανομή λογισμικού σε μεγάλο πλήθος τερματικών [13, 14],
- τη διανομή λογισμικού over-the-air, δηλαδή μέσω ασύρματων καναλιών, όταν ο χρήστης το ζητήσει [14, 15],
- τη βέλτιστη χρήση των φασματικών πόρων [11, 16],
- τον ασφαλή επαναπρογραμματισμό των SDR συσκευών, δεδομένου ότι ένας ιός ή μια πιθανή δυσλειτουργία του λογισμικού μπορεί να επηρεάσει τα χαρακτηριστικά εκπομπής της συσκευής και, επομένως, σημαντικό μέρος του δικτύου [17, 18],
- τη χρήση νέων μεθόδων και ευέλικτων πρωτοκόλλων (adaptive protocols), τα οποία θα επιτρέπουν στη συσκευή SDR την αρχική επικοινωνία με μεγάλο αριθμό δικτύων, χωρίς να απαιτείται η αποθήκευση ολοκληρωμένων πρωτοκόλλων [19, 20].

III. SDR στρατιωτικές και εμπορικές εφαρμογές

Η τεχνολογία SDR βρίσκεται ακόμη σε ερευνητικό στάδιο και θεωρείται σήμερα η πιο προκλητική περιοχή στον τομέα των ασύρματων (και όχι μόνο) επικοινωνιών. Η βασική έρευνα ξεκίνησε στις αρχές τις δεκαετίας του '90 για λογαριασμό των ενόπλων δυνάμεων των ΗΠΑ και οι πρώτες σχετικές δημοσιεύσεις έγιναν το 1995. Από το 1998, όλες οι μεγάλες εταιρίες κατασκευής τηλεπικοινωνιακού υλικού αφιέρωσαν σημαντικούς ερευνητικούς πόρους στο SDR, αναμένοντας αξιόλογα εμπορικά οφέλη από το 2010. Οι προσπάθειες ανάπτυξης της συγκεκριμένης τεχνολογίας συντονίζονται από το SDR Forum, το οποίο απαρτίζεται από εταιρίες, κρατικούς οργανισμούς και πανεπιστήμια, με στόχο τη δημιουργία κοινών προτύπων και προδιαγραφών που θα διέπουν τις SDR τηλεπικοινωνιακές συσκευές της επόμενης δεκαετίας. Υπό ανάπτυξη βρίσκεται το Software Communications Architecture (SCA), το οποίο αποτελεί το πρότυπο ανάπτυξης του τηλεπικοινωνιακού λογισμικού και hardware για συσκευές SDR. Στο πρότυπο αυτό ορίζονται διακριτά τμήματα λογισμικού και hardware, οι λειτουργίες που αυτά θα εκτελούν, οι μεταξύ τους διεπαφές (interfaces) καθώς και η δομή των αντίστοιχων σημάτων εισόδου-εξόδου. Το SCA προωθεί τη δημιουργία open source λογισμικού, προκειμένου να εξασφαλίσει τη μέγιστη δυνατή συμβατότητα μεταξύ προϊόντων διαφορετικών κατασκευαστών.

Ο ισχυρότερος, ίσως, κρατικός φορέας που μετέχει στο SDR Forum είναι το Υπουργείο Άμυνας (MoD) των ΗΠΑ, μέσω του προγράμματος Joint Tactical Radio System (JTRS). Το JTRS είναι ένα ευρύτατο πρόγραμμα σταδιακής αντικατάστασης όλου του υπάρχοντος τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού του αμερικανικού στρατού με νέο, SDR τεχνολογίας. Υπολογίζεται ότι η εφαρμογή του συγκεκριμένου προγράμματος θα οδηγήσει στην αντικατάσταση 750.000 συσκευών, 30 διαφορετικών τύπων, από περίπου 300.000 νέες συσκευές ενιαίου SDR τύπου. Σύμφωνα με το JTRS, όλοι οι προμηθευτές τηλεπικοινωνιακού υλικού του αμερικανικού στρατού είναι υποχρεωμένοι να ακολουθούν τις προδιαγραφές του SCA, όπως αυτές αναπτύσσονται στο SDR Forum. Τα βασικά οφέλη που αναμένει ο αμερικανικός στρατός από τη μετάβαση αυτή είναι τα εξής:

1. πρωτοπορία και έλεγχος στην τεχνολογία που θα κυριαρχήσει απόλυτα τα επόμενα χρόνια,
2. αναβαθμισμένες επιχειρησιακές δυνατότητες (άμεση επικοινωνία μονάδων, δημιουργία επικοινωνιακής γέφυρας μεταξύ ασύμβατων συστημάτων, δυνατότητα μετάδοσης δεδομένων, μεγαλύτερη ανθεκτικότητα στον ηλεκτρονικό πόλεμο, εύκολη επιλογή-αλλαγή κρυπτογραφικής μεθόδου),
3. μεγαλύτερος κύκλος ζωής συσκευής και εύκολη αναβάθμιση (οικονομικό όφελος),
4. ευκολότερη συντήρηση (οικονομικό όφελος),
5. μαζικές παραγγελίες (οικονομικό όφελος),
6. ευκολότερη λογιστική διαχείριση υλικών και ανταλλακτικών.

Όλα τα εμπορικά SDR συστήματα, που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα και δοκιμάζονται ήδη, ακολουθούν τις προδιαγραφές του JTRS. Τα συστήματα που είναι ευρέως γνωστά είναι τα εξής: (α) SPEAKeasy των εταιριών Hazeltine, TRW, Lockheed-Martin, Motorola, και Rockwell- Collins, (β) Digital Modular Radio (DMR) της Motorola και (γ) Multimode Multirole Multiband Tactical Radio-M3TR της Rohde & Schwarz. Τα συστήματα αυτά ενσωματώνουν απαιτήσεις και των τριών όπλων, λειτουργούν σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων (HF, UHF, VHF), παρέχουν δυνατότητα πολλαπλών αναλογικών και ψηφιακών διαμορφώσεων, αναβαθμίζονται εύκολα και γρήγορα (software download μέσω TCP-IP), και καλύπτουν όλες τις στρατιωτικές κρυπτογραφικές απαιτήσεις. Η δυνατότητα ταχύτατης αλλαγής των αλγορίθμων κρυπτογράφησης τα καθιστά ακόμη πιο ασφαλή σε σχέση με τα κλασικά συστήματα.

Οι μη-στρατιωτικές εφαρμογές προσανατολίζονται προς το παρόν στους σταθμούς βάσης (base stations) κινητής τηλεφωνίας, αφού παρέχουν τις φυσικές διαστάσεις αλλά και την υπολογιστική ισχύ που απαιτούν οι σημερινές εφαρμογές software radio. Ενδεικτικά, αναφέρουμε την εταιρία Vanu Inc. η οποία δραστηριοποιείται στο χώρο αυτό. Το ζητούμενο, βεβαίως, είναι η παραγωγή μικρών συσκευών (μεγέθους κινητού τηλεφώνου), οι οποίες θα μπορούν να λειτουργούν σε πολλά διαφορετικά δίκτυα. Ο δυνατότητα μαζικής παραγωγής τέτοιων συσκευών τοποθετείται στο τέλος της επόμενης δεκαετίας.

IV. Ερευνητική προσπάθεια και αποτελέσματα

Στόχος μας είναι η δημιουργία μιας ολοκληρωμένης πλατφόρμας SDR, αποτελούμενης από το απαραίτητο hardware και λογισμικό, η οποία θα χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη, υλοποίηση και δοκιμή αλγορίθμων φυσικού στρώματος SDR. Σε πρώτη φάση, αναπτύσσεται ένα σύστημα ασύρματης επικοινωνίας μεταξύ δύο υπολογιστών, με τη χρήση των βασικών αρχών της τεχνολογίας SDR σε ακουστικές συχνότητες. Συγκεκριμένα, οι δυο υπολογιστές μπορούν να ανταλλάσσουν αρχεία χρησιμοποιώντας απλές αναλογικές (AM, FM) και ψηφιακές (ASK, FSK, BPSK) διαμορφώσεις φέρουσας χαμηλής συχνότητας (ακουστικής). Οι υπολογιστής-δέκτης μπορεί να αναγνωρίσει αυτόματα τη διαμόρφωση της εκπεμπόμενης φέρουσας, να χρησιμοποιήσει το αντίστοιχο λογισμικό για να αποδιαμορφώσει και να αποθηκεύσει το αρχείο χωρίς καμιά επέμβαση του χρήστη. Κατάλληλο γραφικό περιβάλλον (Graphical User Interface) διευκολύνει το χρήστη στην κατανόηση της λειτουργίας του συστήματος. Το σύστημα απαιτεί μόνο τις κάρτες ήχου των δύο υπολογιστών, απλά μικρόφωνα και ηχεία. Με τον τρόπο αυτό, επιδιώκεται η κατασκευή μιας οικονομικής και εύχρηστης πλατφόρμας SDR, η οποία θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για εκπαιδευτικούς σκοπούς. Το επόμενο στάδιο, το οποίο βρίσκεται ήδη σε εξέλιξη, είναι η μετατροπή του λογισμικού ακουστικών συχνοτήτων, ώστε να λειτουργεί σε RF συχνότητες, και η κατασκευή αντίστοιχου RF κυκλωματικού υλικού (hardware). Στόχος μας είναι το ακαδημαϊκό έτος 2006-2007 να λειτουργήσει στη Σχολή Ναυτικών Δοκίμων η εκπαιδευτική SDR πλατφόρμα ως εργαστηριακό εργαλείο. Σε θεωρητικό επίπεδο, επιδιώκεται η ανάπτυξη αλγορίθμων αυτόματης αναγνώρισης διαμόρφωσης και γρήγορης φασματικής αναζήτησης. Ο σχεδιασμός των αλγορίθμων αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση του μέσου υπολογιστικού φόρτου, ώστε να μπορούν να υλοποιηθούν σε φορητές DSP/FPGA πλατφόρμες, όπως σε αυτήν που αναπτύσσουμε.

Συμπερασματικά, αναφέρουμε ότι το Software Radio φαίνεται πως θα γίνει ο βασικός μοχλός ανάπτυξης νέων τηλεπικοινωνιακών δυνατοτήτων και υπηρεσιών. Η ερευνητική μας προσπάθεια αποσκοπεί στην απόκτηση της βασικής τεχνογνωσίας και εμπειρίας γύρω από θέματα Software Radio, τόσο κατασκευαστικά όσο και αλγοριθμικά.

Αναφορές

1. J. Mitola, “*The software radio architecture*”, IEEE Communications Magazine 33 (1), pp. 26-38, 1995.
2. “*Special issue on software radio*”, IEEE Communications Magazine 37 (2), 1999.
3. N. J. Drew, D. Williams, M. Beach, M. Dillinger, T. Farnham and P. Mangold, “*Compelling needs and technologies to support reconfigurable terminals*”, Proc. IST 2000 summit, Galway, Ireland, October, 2000.
4. J. A. Garcia, Z. Gulobicic, F. Dvaz, J. Alonso, J. Macleod, M. Beach, P. Warr and D. Jennings, “*TRUST approach to software defined radio: RF considerations*”.
5. M. Mehta and M. Wesseling, “*TRUST approach to software defined radio: Baseband subsystems*”, Proc. IST 2000 Summit, Galway, Ireland, October, 2000.
6. T. Hentschel, M. Henker and G. Fettweis, “*The digital front-end of software radio terminals*”, IEEE Personal Communications, pp. 40-46, 1999.
7. M. Mehta, N. Drew, G. Vardoulis, C. Niedermeier, and N. Greco, “*Reconfigurable terminals: An overview of architectural solutions*”, IEEE Communications Magazine 39 (8), pp. 82-89, 2001.
8. D. C. Jenn, “*Plasma Antennas: Survey of Techniques and the Current State of the Art*” M.Sc. thesis, US Naval Postgraduate School, Monterey (online), Sept. 2003.
9. R. H. Walden, “*Analog-to-digital converter survey and analysis*”, IEEE Journal of Selected Areas in Communications 17 (4), pp. 539-550, 1999.
10. J. Mitola III, “*Software radio architecture: Object oriented approaches to wireless systems engineering*”, John Wiley & Sons, 2002.
11. M. Dillinger, K. Madani and N. Alonistioti, “*Software defined radio architectures, systems and functions*”, John Wiley & Sons, 2003.
12. B. Tarver, “*Embedded real-time CORBA requirements for software defined radios*”, OMG Realtime & Embedded Workshops, Herndon, USA, June 2001 (online).
13. D. Bourse et al., “*WWRF WG3 White Paper: 'Reference model for end-to-end reconfigurable mobile communication systems'*”, 6th WWRF Meeting in London, UK, June 25-26 2002.
14. T. Farnham, G. Clemo, R. Haines, E. Seidel, A. Benamar, S. Billington, N. Greco, N. Drew, Truong Hong Le, B. Arram and P. Mangold, “*Reconfiguration of future mobile terminals using software download*”, IST mobile communications summit 2000, pp. 159-168, Galway, Ireland, Oct. 2000.
15. N. Drew, M. Dillinger, G. Vardoulis, C. Niedermeier and J. Faroughi-Esfahani, “*Requirements on mobile networks supporting terminal reconfiguration*”, 3rd Generation Infrastructure and Services conference 2001, Athens, Greece, 2001.
16. D. Calin, L. Elicegui and D. Grandblaise, “*Spectrum engineering options for SDR*”, Wireless World Research Forum, Germany, March 2001.
17. J. Faroughi-Esfahani and G. Vardoulis, “*Locating and eliminating rogue SDR terminals from networks*”, Proc. 3G2001 mobile communication technologies conference, pp. 231-234, London, Mar. 2001.
18. J. Faroughi-Esfahani, N. Greco, G. Vardoulis and N. Drew, “*Detection & Control of the Rogue SDR-terminals in future networks*”, Software Defined Radio forum contribution (Committee: Technical), Aug. 2001.
19. G. Vardoulis, J. Faroughi-Esfahani, G. Clemo and R. Haines, “*Blind radio access technology discovery and monitoring for software defined radio communication systems: problems & techniques*”, 3G Mobile Communication Technologies, Second International Conference on, London, pp. 306-310, 2001.

20. G. Vardoulis and J. Faroughi-Esfahani, chapter 12 of the book by M. Dillinger, K. Madani and N. Alonistioti, “*Software defined radio architectures, systems and functions*”, John Wiley & Sons, 2003.

Σύντομα βιογραφικά σημειώματα

Γιώργος Βαρδούλιας (Ειδικός Επιστήμονας Σχολής Ναυτικών Δοκίμων). Είναι Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Η/Υ Ε.Μ.Π (1997), και κάτοχος Διδακτορικού Διπλώματος Πανεπιστημίου Εδιμβούργου (2000). Έχει εργαστεί ως μηχανικός συστημάτων στη Motorola, Semiconductor Product Sector, U.K., ως μηχανικός ραδιοσυστημάτων στη Vodafone-Panafon, και ως ερευνητής σε αρκετά ευρωπαϊκά τηλεπικοινωνιακά ερευνητικά προγράμματα. Τα ερευνητικά του ενδιαφέροντα εστιάζονται κυρίως στις γνωστικές περιοχές Software Defined Radio, συστημάτων διευρυμένου φάσματος (spread spectrum) και modem ακουστικών συχνοτήτων. Επικοινωνία: τηλ.: 210-4581601, e-mail: vardoul@hna.gr.

Επίδραση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας: Επισκόπηση των υφιστάμενων προτύπων και τεχνικών υπολογισμού

Α. Τσιγκόπουλος, Μ. Η. Φαφαλιός και Γ. Βαρδούλιας

Περίληψη

Η εργασία αυτή αποτελεί μια επισκόπηση των βασικών αρχών και διεθνών προτύπων που διέπουν το πρόβλημα των βιολογικών επιδράσεων της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Κατ' αρχάς, δίνονται ορισμένες βασικές έννοιες ηλεκτρομαγνητισμού μαζί με την τυπική διάρθρωση του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, και ορίζεται ο ειδικός ρυθμός απορρόφησης ακτινοβολίας (SAR) από τον άνθρωπο. Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά στις κυριότερες βιολογικές επιδράσεις της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, στους σημαντικότερους διεθνείς οργανισμοί που ασχολούνται με το θέμα και εκδίδουν σχετικές οδηγίες και πρότυπα, και παρουσιάζονται κάποια από τα όρια επικινδυνότητας σε Ευρώπη και Αμερική.

Abstract

Levels of electromagnetic fields (EMF) from human-made sources have increased steadily over the past 50 years. Most EMF exposures come from increased use of electricity and new technologies. In the past decades, potential adverse effects from EMF exposure on human health have been an important topic of research. The World Health Organization (WHO) is addressing this issue through the International EMF Project. One of the Project's objectives is to provide advice to national authorities and others on EMF health and environmental effects and protective measures or actions if needed. In this paper the authors review the basic principles of the electromagnetic theory and the international standards that govern the important issue of the electromagnetic radiation biological effects.

I. Εισαγωγή

Τα τελευταία 25 χρόνια περίπου, παρατηρείται ένα συνεχώς αυξανόμενο ενδιαφέρον τόσο της επιστημονικής κοινότητας όσο και της κοινής γνώμης σχετικά με τις βιολογικές επιδράσεις και ιδιαίτερα με τις πιθανές βλαπτικές συνέπειες που μπορεί να επιφέρει στον ανθρώπινο οργανισμό η έκθεσή του σε υψηλά επίπεδα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η συστηματικότερη μελέτη του προβλήματος αυτού έδειξε κυρίως δύο πράγματα: Πρώτον, ότι οι πηγές Η/Μ ακτινοβολίας είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με το σύγχρονο τρόπο ζωής, εφόσον εκτός από τις προφανείς πηγές (κινητή τηλεφωνία, ραντάρ, ραδιοφωνικούς-τηλεοπτικούς πομπούς και αναμεταδότες, φούρνους μικροκυμάτων κ.α.) περιλαμβάνουν το σύνολο των ηλεκτρικών / ηλεκτρονικών συσκευών και εφαρμογών, και δεύτερον, ότι είναι απαραίτητη η συστηματική και επιστημονικά τεκμηριωμένη μελέτη των επιδράσεων τέτοιων πεδίων σε ανθρώπινους και γενικότερα βιολογικούς οργανισμούς. Πρόκειται για ένα θέμα με τεράστιες κοινωνικές αλλά και οικονομικές προεκτάσεις, το οποίο προκαλεί σύγχυση ακόμα και σε εξειδικευμένους τεχνικούς και επιστήμονες και ανησυχία στο ευρύ κοινό.

Οι μέχρι τώρα έρευνες έχουν δείξει ότι η μακροχρόνια έκθεση σε ισχυρά Η/Μ πεδία εγκυμονεί κινδύνους για την υγεία. Το πρόβλημα είναι ότι ο ποσοτικός προσδιορισμός των εννοιών «ισχυρό πεδίο» και «μακροχρόνια έκθεση» είναι δύσκολος αλλά και συχνά ενοχλητικός, αφού κάθε νομοθετική ρύθμιση των αποδεκτών ορίων μπορεί να έχει τεράστιες οικονομικές επιπτώσεις. Σε κάθε

περίπτωση, απώτερος στόχος των σχετικών μελετών πρέπει να είναι ο καθορισμός ασφαλών ορίων έκθεσης τόσο των εργαζομένων όσο και του γενικού πληθυσμού, σε συνάρτηση προς τη συχνότητα και την ένταση του Η/Μ πεδίου αλλά και του χρόνου έκθεσης. Προς την κατεύθυνση αυτή κινούνται οι αρμόδιοι εθνικοί και διεθνείς φορείς (WHO, ICNIRP, ANSI, IEEE, IRPA, CENELEC, NATO κ.ά.). Χαρακτηριστικό είναι ότι μέχρι στιγμής δεν υπάρχει πλήρης συμφωνία των επιστημόνων τόσο ως προς τις βιολογικές επιδράσεις των Η/Μ πεδίων, όσο και ως προς τα όρια επικινδυνότητας που θέτουν οι αρμόδιοι φορείς. Πάντως, η γενική πολιτική και ταυτόχρονα κατευθυντήρια γραμμή που υιοθέτησε το Αμερικανικό Συμβούλιο Προστασίας από τις Ακτινοβολίες (NRC), δηλαδή ο πλέον αρμόδιος φορέας σήμερα επί του θέματος, συνοψίζεται στο κωδικοποιημένο σύνθημα ALARA (As Low As Reasonably Achievable), δηλαδή στην προσπάθεια για όσο το δυνατόν χαμηλότερη ένταση της ακτινοβολίας των πεδίων, στα πλαίσια της εκάστοτε εφαρμογής.

Τα πλοία και ιδιαίτερα τα πολεμικά αποτελούν χώρους με ιδιαίζοντως “βεβαρημένο” Η/Μ περιβάλλον, λόγω της μεγάλης συγκέντρωσης ηλεκτρονικών συσκευών σε περιορισμένο χώρο. Για το λόγο αυτό, κρίνεται επιβεβλημένη η σχετική ενημέρωση του προσωπικού που ζει και εργάζεται στα πλοία, μολονότι την ασφάλειά του εγγυώνται πρωτίστως η προσεγμένη κατασκευή, η σωστή λειτουργία και συντήρηση κάθε συσκευής ξεχωριστά, καθώς και η τήρηση των διατάξεων ασφαλείας.

II. Βασικές έννοιες ηλεκτρομαγνητισμού

Κρίνεται σκόπιμο στο σημείο αυτό να αναφερθούν οι ορισμοί των εμπλεκόμενων μεγεθών και να δοθούν κάποιοι μαθηματικοί τύποι, χρήσιμοι για την περαιτέρω ανάπτυξη του θέματός μας. Έτσι, ηλεκτρικό πεδίο ονομάζεται ο χώρος μέσα στον οποίο ασκούνται δυνάμεις σε ακίνητα ηλεκτρικά φορτία. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου (E) εκφράζεται σε Volts ανά μέτρο (V/m). Αντίστοιχα, μαγνητικό πεδίο ονομάζεται ο χώρος μέσα στον οποίο ασκούνται δυνάμεις είτε σε μαγνητικά φορτία (πόλους μαγνητών) είτε σε ηλεκτρικά ρεύματα (κινούμενα ηλεκτρικά φορτία). Η ένταση του μαγνητικού πεδίου (H) εκφράζεται σε Amperes ανά μέτρο (A/m). Αντί του (H), χρησιμοποιείται συνήθως η μαγνητική επαγωγή ή πυκνότητα της μαγνητικής ροής (B), που ορίζεται από τη σχέση

$$B = \mu \cdot H, \quad (1)$$

όπου (μ) είναι η μαγνητική διαπερατότητα του μέσου. Για το κενό και τον αέρα, $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ (H/m). Το (B) μετράται σε Tesla (T) ή Gauss (G) με σχέση μετατροπής, 1T=10000G.

Τα πεδία αυτά ονομάζονται στατικά, όταν τα χαρακτηριστικά τους (εντάσεις) δεν μεταβάλλονται με το χρόνο. Στην κατάσταση αυτή τα πεδία είναι ασύνδετα (ανεξάρτητα) και η παρουσία του ενός δεν επηρεάζει την παρουσία ή την τιμή του άλλου. Στην περίπτωση που υπάρχει χρονική μεταβολή του ενός πεδίου, αυτομάτως εμπλέκεται η παρουσία και η τιμή του άλλου, και τότε μιλάμε πλέον για ηλεκτρομαγνητικά κύματα που μπορούν να διαδοθούν και να μεταφέρουν ενέργεια. Τέλος, στην ειδική αλλά πλέον συνηθισμένη περίπτωση της ημιτονοειδούς μεταβολής της “διέγερσης” των Η/Μ κυμάτων, δημιουργούνται “αρμονικά” Η/Μ κύματα. Βέβαια, για τις πολύ χαμηλές συχνότητες, π.χ. 50/60 Hz, μπορούμε χωρίς σημαντικό σφάλμα να θεωρήσουμε ότι τόσο το ηλεκτρικό όσο και το μαγνητικό πεδίο είναι στατικά πεδία και κατά συνέπεια ασύνδετα μεταξύ τους.

Είναι γνωστό ότι όλες οι ακτινοβολούσες πηγές εκπέμπουν σφαιρικά Η/Μ κύματα, λόγω των πεπερασμένων διαστάσεών τους. Εντούτοις, “αρκετά μακριά” [περιοχή μακρινού πεδίου, βλ. εξ. (6)], ένα τμήμα του μετώπου του κύματος μπορεί να θεωρηθεί κατά προσέγγιση επίπεδο (plane wave). Στην περίπτωση αυτή οι σχέσεις που περιγράφουν τα Η/Μ κύματα απλοποιούνται σημαντικά και γι’ αυτό στην πράξη καταφεύγουμε συχνά σε αυτή την προσέγγιση.

Στην περίπτωση των επιπέδων κυμάτων οι σχέσεις που συνδέουν το ηλεκτρικό πεδίο (E) και το μαγνητικό πεδίο (H) είναι:

$$\frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad (2)$$

όπου (μ) είναι η μαγνητική διαπερατότητα, και (ε) η διηλεκτρική σταθερά του μέσου διάδοσης. Για το κενό ισχύει:

$$\frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 377\Omega \quad (3)$$

Χρησιμοποιείται επίσης ευρύτητα η “πυκνότητα ισχύος” (S) του H/M κύματος, εκφρασμένη σε W/m^2 (αν και στην πράξη χρησιμοποιούμε τις τιμές εκφρασμένες σε mW/cm^2), που ορίζεται ως εξής:

$$S = E \cdot H = \frac{E^2}{377} = 377 \cdot H^2 \quad (4)$$

Προφανώς, στην περίπτωση H/M κυμάτων αρκεί να υπολογιστεί ή να μετρηθεί το ένα από τα δύο πεδία, οπότε το άλλο μπορεί να ευρεθεί μέσω των εξ. (2) ή (3). Στην περίπτωση όμως των “στατικών” πεδίων, π.χ. 50/60 Hz, καθένα απ’ αυτά θα πρέπει να μετρηθεί και να υπολογιστεί ξεχωριστά. Έτσι, η μετάδοση ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας (ακτινοβολίας) γίνεται μέσω τέτοιων ηλεκτρομαγνητικών (H/M) κυμάτων που διαδίδονται με την ταχύτητα του φωτός και βασική παράμετρος των οποίων είναι η συχνότητα. Θεωρητικά, δεν υπάρχει άνω όριο στην συχνότητα ενός H/M κύματος, εφόσον αυτή μπορεί να βρίσκεται οπουδήποτε στο διάστημα (0, $+\infty$). Το **H/M φάσμα** συνιστά το χαρακτηρισμό των H/M κυμάτων, με βάση τη συχνότητα τους.

Μια πρώτη ταξινόμηση του φάσματος μπορεί να γίνει με βάση την ικανότητα ή όχι της ακτινοβολίας να προκαλέσει **ιονισμό** ενός ατόμου, δηλαδή απόσπαση ηλεκτρονίων από αυτό. Για να συμβεί κάτι τέτοιο, η ακτινοβολία θα πρέπει να έχει επαρκή ενέργεια. Είναι γνωστό ότι η H/M ακτινοβολία είναι κβαντισμένη κατά φωτόνια, η δε ενέργεια κάθε φωτονίου δίνεται από τον γνωστό τύπο:

$$E = h \cdot f \quad (5)$$

όπου, (f) είναι η συχνότητα της ακτινοβολίας σε Hertz, και (h) είναι η σταθερά του Planck ($h = 6.63 \times 10^{-34}$ J.s). Όπως φαίνεται από τον τύπο, η ενέργεια του φωτονίου αυξάνεται γραμμικά με την συχνότητα και, λόγω της πολύ μικρής τιμής της σταθεράς του Planck, γίνεται επαρκής για ιονισμό σε συχνότητες πάνω από το ορατό φάσμα. Πρακτικά, ο ιονισμός είναι ικανός να μεταβάλλει τη μοριακή δομή ενός υλικού, καθώς η απόσπαση ηλεκτρονίων μπορεί να «σπάσει» κάποιους μοριακούς δεσμούς. Αυτό είναι **ιδιαίτερα επικίνδυνο** για τους ζωντανούς οργανισμούς, καθώς τέτοιες αλλαγές μπορούν να προκαλέσουν σ’ αυτούς σοβαρές και μη αναστρέψιμες βλάβες. Για το λόγο αυτό, η ακτινοβολία διακρίνεται σε **Ιονίζουσα** και **μη Ιονίζουσα**. Γενικά, η ιονίζουσα ακτινοβολία μπορεί να είναι είτε ηλεκτρομαγνητικής φύσεως (π.χ. ακτίνες -X ή -γ), είτε σωματιδιακή (π.χ. σωματίδια -α, δηλαδή πυρήνες ηλίου, ή σωματίδια -β, δηλαδή ηλεκτρόνια). Στο περιβάλλον ενός πλοίου βρίσκονται κατά βάση πηγές μη ιονίζουσας ακτινοβολίας (π.χ. κεραίες). Όμως, υπάρχουν και συσκευές, κυρίως radar, που χρησιμοποιούν λυχνίες με ραδιενεργά υλικά, τα οποία αποτελούν πηγή ιονίζουσας ακτινοβολίας. Τέτοιες είναι οι TR, ATR, spark-gap, οι λυχνίες αερίου ψυχρής καθόδου κ.ά. Οι λυχνίες αυτές, όπως αναφέρουν τα σχετικά εγχειρίδια, δεν είναι βλαβερές, εφόσον δεν σπάσουν και δεν διασκορπιστεί το περιεχόμενό τους στο περιβάλλον. Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι μερικές λυχνίες παραγωγής μικροκυμάτων είναι δυνατόν να παράγουν και ως “παραπροϊόν” (αρμονικές) συχνότητες στην περιοχή των “μαλακών -X”.

Μια τυπική διάρθρωση του φάσματος, με βάση την ικανότητα ιονισμού, φαίνεται στον Πίνακα 1.

Η/Μ ΦΑΣΜΑ					
Μη Ιονίζουσα ακτινοβολία		Ορατό Φάσμα	Ιονίζουσα ακτινοβολία		
Ραδιοκύματα (RF)	Υπέρυθρη ακτινοβολία (IR)	κόκκινο πορτοκαλί κίτρινο πράσινο μπλε ιώδες	Υπεριώδης ακτινοβολία (UV)	Ακτίνες -X	Ακτίνες -γ

Πίνακας 1: Το Η/Μ φάσμα με βάση την ικανότητα ιονισμού.

Από όλη την περιοχή του Η/Μ φάσματος, χρησιμοποιείται (και στα πλοία) κυρίως η ζώνη των ραδιοκυμάτων. Στην περιοχή αυτή έχουν αναπτυχθεί οι πιο γνωστές εφαρμογές, όπως ραδιόφωνο, TV, κινητή τηλεφωνία, ραντάρ, δορυφορικές τηλεπικοινωνίες, συστήματα ραδιοαντιλίας κ.ά. Για πρακτικούς πλέον λόγους, η ζώνη των ραδιοκυμάτων, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2, έχει χωριστεί σε οκτώ (8) υποπεριοχές, εκ των οποίων οι τρεις τελευταίες αποτελούν τα μικροκύματα (microwaves).

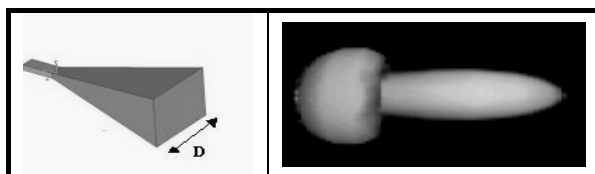
Ραδιοκύματα (RF)							
					Μικροκύματα (MW)		
VLF	LF	MF	HF	VHF	UHF	SHF	EHF
3-30 kHz	30-300 kHz	300-3000 kHz	3-30 MHz	30-300 MHz	300-3000 MHz	3-30 GHz	30-300 GHz

Πίνακας 2: Οι βασικές περιοχές του Η/Μ φάσματος.

Η φασματική περιοχή 0-3KHz, που δεν περιλαμβάνεται στον προηγούμενο Πίνακα, αφορά κυρίως τις συχνότητες στις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας 50/60 Hz. Σε τόσο χαμηλές συχνότητες, βέβαια, το μήκος κύματος είναι τόσο μεγάλο που καθιστά πρακτικά αδύνατη τη χρήση ασύρματων μέσων.

Αναφέρουμε, τέλος, τρεις ακόμα βασικές έννοιες από τη θεωρία κεραιών, η γνώση των οποίων είναι σημαντική, προκειμένου οι εργαζόμενοι σε αντίστοιχους χώρους να κατανοήσουν τους πιθανούς κινδύνους που διατρέχουν. Αυτές είναι:

Διάγραμμα ακτινοβολίας. Οι κεραιές και όλες γενικά οι πηγές Η/Μ ακτινοβολίας δεν εκπέμπουν την ισχύ τους ομοιόμορφα στο χώρο. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχουν κατευθύνσεις μέγιστης και ελάχιστης εκπομπής ισχύος. Πληροφορίες για τη χωρική κατανομή της εκπεμπόμενης ισχύος των κεραιών (λοβών ακτινοβολίας) δίνουν τα διαγράμματα ακτινοβολίας, τα οποία οι εργαζόμενοι στο πλοίο πρέπει να τα λαμβάνουν υπόψη, ώστε να αποφεύγουν τις περιοχές μέγιστης εκπομπής. Στο Σχήμα 1 φαίνεται χαρακτηριστικός τύπος κεραιάς (χοανοκεραία) και το αντίστοιχο τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας. Παρατηρούμε ότι η κεραία εκπέμπει το μεγαλύτερο μέρος της ισχύος της ακριβώς μπροστά από τη χοάνη και, επομένως, πρέπει να αποφεύγεται κάθε δραστηριότητα στην περιοχή αυτή, ενόσω η συσκευή λειτουργεί.



Σχήμα 1: Απλοποιημένο τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας χοανοκεραίας.

Περιοχή του εγγύς πεδίου (near field region ή περιοχή Fresnel). Τα κύρια χαρακτηριστικά της περιοχής αυτής είναι πρώτον, ότι η ενέργεια παλινδρομεί ακτινικά και δεύτερον, ότι ο λοβός ακτινοβολίας μεταβάλλεται ανάλογα με την απόσταση από την πηγή. Τα διαγράμματα ακτινοβολίας δεν ισχύουν για τη περιοχή αυτή και, επομένως, απαιτείται προσεκτική μελέτη, προκειμένου να μην τεθεί σε κίνδυνο η ασφάλεια των εργαζομένων. Οι μαθηματικές σχέσεις που περιγράφουν τα Η/Μ μεγέθη είναι αρκετά πολύπλοκες.

Περιοχή του μακρινού πεδίου (far field region ή περιοχή Fraunhofer). Στην περιοχή αυτή οι μαθηματικές σχέσεις είναι αρκετά πιο απλές, ο λοβός ακτινοβολίας είναι ανεξάρτητος της απόστασης από την πηγή, και η προσέγγιση του επίπεδου κύματος είναι αρκετά ρεαλιστική. Έτσι, αν ονομάσουμε (D) τη μεγαλύτερη διάσταση της κεραίας και (λ) το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, η απόσταση που δίνεται από τον πιο κάτω τύπο αποτελεί το όριο μεταξύ των δύο περιοχών:

$$R_0 = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (6)$$

Υπενθυμίζουμε ότι το μήκος κύματος (λ) συνδέεται με τη συχνότητα (f) με τη θεμελιώδη σχέση $c = \lambda \cdot f$, όπου $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/sec}$ η ταχύτητα του φωτός στον κενό χώρο. Αξίζει εδώ να σημειωθεί ότι η μετάβαση από την μία περιοχή στην άλλη είναι ομαλή, και η παραπάνω σχέση αποτελεί απλώς το κοινώς παραδεκτό όριο.

Τέλος, ο Πίνακας 3 συνοψίζει κάποια βασικά χαρακτηριστικά των Ηλεκτρικών και Μαγνητικών πεδίων.

Ηλεκτρικά πεδία	Μαγνητικά πεδία
<ol style="list-style-type: none"> 1. Τα ηλεκτρικά πεδία δημιουργούνται από διαφορές δυναμικού (τάσεις). 2. Η έντασή τους μετριέται σε μονάδες Volts ανά μέτρο (V/m). 3. Ηλεκτρικά πεδία υφίστανται ακόμα και όταν μια συσκευή είναι κλειστή αρκεί να είναι στην πρίζα. 4. Η έντασή τους μειώνεται γρήγορα καθώς αυξάνει η απόσταση από την πηγή. 5. Τα περισσότερα οικοδομικά υλικά εξασθενούν τα ηλεκτρικά πεδία σε κάποιο βαθμό. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Τα μαγνητικά πεδία δημιουργούνται είτε από τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος είτε από την ύπαρξη μόνιμων μαγνητών. 2. Η έντασή τους μετριέται σε μονάδες Ampere ανά μέτρο (A/m). Για τη μέτρησή τους συχνά χρησιμοποιείται η πυκνότητα της μαγνητικής ροής (B) με μονάδες τα microtesla (μT) ή millitesla (mT). 3. Μαγνητικά πεδία υφίστανται μόλις ενεργοποιηθεί μία συσκευή και υπάρχει ροή ηλεκτρικού ρεύματος. 4. Η έντασή τους μειώνεται γρήγορα καθώς αυξάνει η απόσταση από την πηγή. 5. Τα περισσότερα οικοδομικά υλικά <u>δεν εξασθενούν</u> τα μαγνητικά πεδία.
Η/Μ κύμα	
<p>Όταν τα χαρακτηριστικά των δύο πεδίων (εντάσεις) δεν μεταβάλλονται με το χρόνο, τα πεδία είναι ανεξάρτητα και η παρουσία του ενός δεν επηρεάζει την παρουσία ή την τιμή του άλλου. Σε περίπτωση που υπάρχει χρονική μεταβολή του ενός πεδίου αυτομάτως εμπλέκονται η παρουσία και η τιμή του άλλου πεδίου, και τότε μιλάμε πλέον για ηλεκτρομαγνητικά “κύματα” που μπορούν να διαδοθούν και να μεταφέρουν ενέργεια. Μια μονάδα μέτρησης της μεταφερόμενης ισχύος είναι τα watts ανά τετραγωνικό μέτρο (W/m^2).</p>	

Πίνακας 3: Βασικά χαρακτηριστικά των Ηλεκτρικών και Μαγνητικών πεδίων.

III. Η βιολογική δράση των ραδιοκυμάτων

Οι βιολογικές επιδράσεις των μη ιονιζουσών ακτινοβολιών, ιδιαίτερα στην περιοχή των ραδιοκυμάτων, είναι αντικείμενο μελέτης τα τελευταία χρόνια και απ' ό,τι φαίνεται θα είναι για αρκετά ακόμα στο μέλλον. Αν και δεν έχουν πλήρως διευκρινιστεί οι μηχανισμοί επίδρασης, έχουν εξαχθεί πολύ χρήσιμα αποτελέσματα, τα οποία αποτελούν τη βάση για τη θέσπιση ορίων ασφαλείας. Έτσι, είναι σίγουρο πλέον ότι η Η/Μ ενέργεια επιδρά στους βιολογικούς οργανισμούς και ότι οι μηχανισμοί επίδρασης έχουν σχέση με την επαγωγή ηλεκτρικών ρευμάτων και την απορρόφηση ενέργειας γενικότερα. Οι επιδράσεις των Η/Μ κυμάτων μπορεί να εκδηλωθούν με τη μορφή θερμικών μεταβολών, διαταραχών της λειτουργίας ή/και αλλοίωσης της δομής των ιστών του οργανισμού. Οι βλάβες που προκαλεί η Η/Μ ακτινοβολία στον οργανισμό είναι άλλοτε αναστρέψιμες, μέσω μηχανισμών που ενεργοποιεί ο ίδιος, και άλλοτε μόνιμες. Οι βασικοί τρόποι μελέτης των επιδράσεων αυτών είναι οι ακόλουθοι τέσσερις:

- Έρευνα με πειραματόζωα. Για τις μελέτες αυτές χρησιμοποιούνται ποντίκια, κουνέλια, γάτες κ.ά., τα οποία εκτίθενται σε Η/Μ πεδία μεταβλητών συνθηκών και στη συνέχεια μετρώνται τα αποτελέσματα. Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα αυτά επεκτείνονται στον άνθρωπο, αφού βέβαια ληφθούν υπόψη η διαφορά του μεγέθους και η ιδιαιτερότητα των βιολογικών του μηχανισμών σε σχέση με τα δείγματα.
- Έρευνα σε κυτταρικό επίπεδο. Στην περίπτωση αυτή ακτινοβολούνται και μελετώνται επιλεγμένοι ιστοί. Η μεταφορά των αποτελεσμάτων σε ζώντες οργανισμούς είναι προφανής.
- Επιδημιολογικές έρευνες. Στην περίπτωση αυτή μελετώνται μεγάλες ομάδες ανθρώπων που έχουν κοινά χαρακτηριστικά, όπως π.χ. άνθρωποι που ζουν κάτω από γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης. Το πρόβλημα με τις έρευνες αυτές είναι ότι καθορίζονται σημαντικά από άσχετους περιβαλλοντικούς παράγοντες, οι οποίοι δεν είναι δυνατόν να απομονωθούν, με αποτέλεσμα να μην αποκαλύπτεται η πραγματική σχέση αιτίου-αιτιατού.
- Μοντελοποίηση ιστών και επίλυση του προβλήματος μέσω Η/Υ. Ο συγκεκριμένος τρόπος ελέγχεται μεθοδολογικά, εφόσον αδυνατεί να προσεγγίσει την πραγματική κατάσταση.

Εντούτοις, παρά τα μειονεκτήματα που παρουσιάζει καθεμιά από τις παραπάνω μεθόδους, έχουν εξαχθεί πολλά χρήσιμα συμπεράσματα, τα σπουδαιότερα των οποίων αναφέρονται συνοπτικά στη συνέχεια.

Τα βασικά μεγέθη που σχετίζονται με τα αποτελέσματα, είναι τα εξής:

- συχνότητα,
- πόλωση,
- ένταση ακτινοβολίας,
- μέγεθος και προσανατολισμός σώματος,
- βιολογικές ιδιαιτερότητες, όπως θερμορυθμιστικοί μηχανισμοί κ.λπ.,
- περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως θερμοκρασία, υγρασία κ.λπ., και
- χρονική διάρκεια έκθεσης.

Ο βιολογικός οργανισμός (π.χ. το ανθρώπινο σώμα) επηρεάζεται απορροφώντας ένα μέρος της ενέργειας του κύματος και μάλιστα όχι ομοιόμορφα. Για το λόγο αυτό, ορίζεται ένας δοσομετρικός όρος “**Specific Absorption Rate**” ή **SAR**, όπως είναι πλέον γνωστός, ο οποίος εκφράζεται σε μονάδες απορροφούμενης ισχύος ανά μονάδα βάρους του ιστού (W/kg). Ο SAR χρησιμοποιείται για συχνότητες στην περιοχή 1 MHz-10 GHz και εξαρτάται από τη συχνότητα της ακτινοβολίας, την αγωγιμότητα του ιστού, το σχετικό προσανατολισμό του ιστού σε σχέση με την πόλωση του Η/Μ κύματος κ.λπ. Ο SAR είναι διαφορετικός για κάθε επιμέρους όργανο του σώματος και γι' αυτό

γίνεται συνήθως χρήση του μέσου όρου. Στο σημείο αυτό, δίνεται μια αντιπροσωπευτική σχέση μεταξύ SAR και ηλεκτρικού πεδίου:

$$SAR = \frac{\sigma E^2}{\rho} \quad (7)$$

όπου,

σ (S/m) η ειδική αγωγιμότητα του ιστού,

ρ (kg/m³) η πυκνότητά του και

E (V/m) η rms τιμή του ηλεκτρικού πεδίου.

Θεωρητικές μελέτες αλλά και πειράματα έδειξαν ότι ο SAR (άρα και η απορρόφηση ενέργειας) για τον άνθρωπο μεγιστοποιείται, όταν το διάνυσμα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου είναι παράλληλο με το ύψος του ανθρώπου. Οι συχνότητες μέγιστης απορρόφησης είναι 70 MHz περίπου, εφόσον ο άνθρωπος είναι μετέωρος ή πατά σε απολύτως μονωμένο έδαφος, και 35 MHz περίπου, εφόσον πατά σε αγωγίμο έδαφος. Το μέγεθος του ιστού, σε σύγκριση πάντα με το μήκος κύματος, είναι εξίσου καθοριστικής σημασίας στην απορρόφηση ενέργειας. Για παράδειγμα, αναφέρεται ότι για το κεφάλι ενός ενήλικα ο SAR μεγιστοποιείται γύρω στα 400 MHz, ενώ για το κεφάλι ενός βρέφους η συχνότητα συντονισμού είναι περίπου 700 MHz. Για το σύνολο του ανθρώπινου σώματος, η μέση τιμή του SAR, δηλαδή σε ποσοστό τέτοιο ώστε να μην παρατηρηθεί αξιοσημείωτη αύξηση της θερμοκρασίας του σώματος (κατά 1 °C), είναι **4 W/kg**. Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (ΠΟΥ), η τιμή των 4 W/kg είναι το όριο πάνω από το οποίο οι **θερμικές επιδράσεις** γίνονται επικίνδυνες.

Οι βιολογικές επιδράσεις χωρίζονται στις εξής δύο κατηγορίες:

- **θερμικές και**
- **αθερμικές ή μη θερμικές.**

Θερμικές επιδράσεις. Τα πιο πολλά πειραματικά δεδομένα δείχνουν ότι οι κύριες επιδράσεις των ραδιοκυμάτων είναι θερμικές, ιδιαίτερα για συχνότητες άνω των 10 MHz, πράγμα που σημαίνει ότι σχετίζονται με την τοπικά εκλυόμενη θερμότητα και την αύξηση της θερμοκρασίας που παρατηρείται. Και αυτό με τη σειρά του οφείλεται είτε στην εξαναγκασμένη πόλωση των ατόμων και μορίων των ιστών, είτε στην εξαναγκασμένη ταλάντωση κάποιων ατόμων ή μορίων (κυρίως του νερού) στη συχνότητα του εξωτερικού πεδίου. Όταν τα παραγόμενα ποσά θερμότητας είναι σχετικά μικρά, οι θερμορρυθμιστικοί μηχανισμοί που διαθέτει το σώμα (κυρίως ροή του αίματος μέσα από αγγεία, αρτηρίες κ.λπ.) κατορθώνουν να διατηρήσουν τη θερμοκρασία σταθερή. Στην αντίθετη περίπτωση έχουμε αύξηση της θερμοκρασίας του σώματος. Είναι εύκολο να αντιληφθεί κανείς ότι η αυτή η απαγωγή της θερμότητας είναι πιο αποτελεσματική όσο πιο ευνοϊκοί είναι οι περιβαλλοντολογικοί παράγοντες (π.χ. χαμηλή θερμοκρασία και υγρασία). Κάτω από τέτοιες συνθήκες, ένα υγιές άτομο είναι σε θέση να αντιμετωπίσει απορροφούμενη ισχύ (SAR) 4 W/kg κατά μέσο όρο για όλο του το σώμα. Η αύξηση της θερμοκρασίας, όμως, αποδεικνύεται ιδιαίτερα επικίνδυνη για τη λειτουργία κάποιων συγκεκριμένων οργάνων του ανθρώπινου σώματος (κυρίως, των ματιών, του νευρικού ιστού, των γεννητικών οργάνων κ.λπ.) αλλά και για τη ζωή του εμβρύου. Γι' αυτά τα όργανα όπως και για το έμβryo, συνεπώς, πρέπει να λαμβάνονται ιδιαίτερες προφυλάξεις. Σε κάθε περίπτωση, τα θερμικά αποτελέσματα συνδέονται με την τιμή του SAR.

Μη θερμικές επιδράσεις. Αρκετές μελέτες δείχνουν ότι τα ραδιοκύματα μπορεί να προκαλέσουν διέγερση των κυττάρων του νευρικού και μυϊκού ιστού, που ανταποκρίνονται σε ηλεκτρικά ερεθίσματα, που κινούνται ακόμη και σε επίπεδα ισχύος πολύ χαμηλά για να προκληθεί θέρμανση του ιστού. Τα ερεθίσματα αυτά προέρχονται από τα επαγόμενα στο σώμα ηλεκτρικά ρεύματα. Σύμφωνα με τον ΠΟΥ, τα τελευταία 30 χρόνια έχουν δημοσιευτεί πάνω από 25.000 εργασίες σχετικά με το θέμα. Έτσι, παρά τη γενική εντύπωση ότι τα ερευνητικά δεδομένα είναι ανεπαρκή, ο ΠΟΥ θεωρεί ότι για το θέμα των μη θερμικών επιδράσεων υπάρχουν περισσότερα στοιχεία από όσα για τα περισσότερα επικίνδυνα χημικά. Σύμφωνα με αυτά τα στοιχεία, ο ΠΟΥ διαβεβαιώνει ότι η έκθεση σε H/M ακτινοβολία χαμηλής ισχύος και για μικρό χρονικό διάστημα δεν είναι επικίνδυνη για τον άνθρωπο. Επισημαίνει, ωστόσο, ότι υπάρχουν ακόμη πολλά ανοιχτά ερευνητικά πεδία και απαιτείται πολλή δουλειά. Ιδιαίτερη σημασία έχει η διερεύνηση των μη θερμικών επιδράσεων που

προκαλούνται από την έκθεση σε H/M ακτινοβολία χαμηλής ισχύος για μεγάλο χρονικό διάστημα. Το θέμα αυτό είναι πολύ σημαντικό, αφού η πλειοψηφία του γενικού πληθυσμού δέχεται κάποιας μορφής H/M ακτινοβολίας χαμηλής έντασης αλλά για σημαντικό χρονικό διάστημα (π.χ. από σταθμούς βάσης κινητής τηλεφωνίας, αναμεταδότες κ.λπ.).

Τα σημαντικότερα βιολογικά αποτελέσματα που προκαλεί η έκθεση σε ισχυρά H/M πεδία, σύμφωνα με τις σχετικές αναφορές, είναι τα εξής:

- **Εκροή ασβεστίου.** Είναι μια από τις σημαντικότερες βιολογικές επιδράσεις που έχουν εντοπιστεί και αφορούν την εκροή ιόντων ασβεστίου από εγκεφαλικούς και καρδιακούς ιστούς, όταν αυτοί εκτίθενται σε μικροκύματα διαμορφωμένα κατά παλμούς. Αξίζει να σημειωθεί ότι το φαινόμενο αυτό μεγιστοποιείται όταν η συχνότητα διαμόρφωσης πλησιάζει αυτήν της εγκεφαλικής δραστηριότητας (6-20 Hz, για συχνότητα φέροντος 147-450 MHz, και για πολύ χαμηλά επίπεδα ισχύος 0.1-1mW/cm²).
- **Καταρρακτογένεση.** Έχει παρατηρηθεί καταρρακτογένεση σε οφθαλμούς πειραματόζωων όταν ακτινοβολήθηκαν τοπικά με πυκνότητα ισχύος μεγαλύτερη από 80 mW/cm², και συχνότητα 2-10 GHz. Η καταρρακτογένεση συνδέεται με την τοπική αύξηση της θερμοκρασίας στο μάτι.
- **Ακουστικό Φαινόμενο.** Άνθρωποι, εκτεθειμένοι σε μικροκυματικούς παλμούς, αναφέρουν ότι ακούν ήχους με συχνότητα ίση με αυτήν της επανάληψης των παλμών. Το φαινόμενο αυτό έχει εξηγηθεί ως εξής: Η παλμική H/M ακτινοβολία δημιουργεί θερμοελαστική διαστολή της εγκεφαλικής ουσίας και ακουστικά κύματα εντός της κρανιακής κοιλότητας, τα οποία ανιχνεύονται από τα ακουστικά όργανα.
- **Επιδράσεις στη συμπεριφορά.** Έχει παρατηρηθεί αλλαγή της συμπεριφοράς πειραματόζωων όταν αυτά εκτέθηκαν σε H/M ακτινοβολία. Οι παρατηρούμενες αλλαγές αφορούν μεταβολές της ποσότητας της προσλαμβανόμενης τροφής καθώς και του παραγόμενου έργου.
- **Φαινόμενα συνέργειας με φάρμακα.** Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε διαφορά στην αντίδραση κάποιων φαρμάκων και στην ίδια δόση, όταν τα πειραματόζωα δέχονταν ακτινοβολία 1mW/cm².
- **Γενετικές και αναπτυξιακές ανωμαλίες, μείωση της ανδρικής γονιμότητας.** Υπάρχουν κάποιες δημοσιεύσεις που αναφέρουν ελάττωση της ανδρικής αναπαραγωγικής ικανότητας, αλλαγή στο ρυθμό ανάπτυξης εμβρύων και μικρών παιδιών, οι μητέρες των οποίων είχαν εκτεθεί για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα σε υψηλές τιμές H/M ακτινοβολίας, καθώς και αλλαγές στο ρυθμό ανάπτυξης κάποιων φυτών.
- **Καρκινογένεσεις.** Η πιθανότητα καρκινογένεσης έχει διερευνηθεί και τα αποτελέσματα είναι αντικρουόμενα. Ιδιαίτερα ύποπτα θεωρούνται τα πεδία πολύ χαμηλών συχνοτήτων (**f<300 Hz**), γνωστά ως ELF, οι κύριες πηγές των οποίων είναι οι γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας υψηλής τάσης. Υπάρχουν σοβαρές μελέτες που συσχετίζουν την παιδική λευχαιμία με τη μακροχρόνια έκθεση σε H/M ακτινοβολία ELF. Πάντως, ο ΠΟΥ, αν και προς το παρόν δεν συσχετίζει την έκθεση σε H/M ακτινοβολία με καρκινογένεση οποιασδήποτε μορφής, παρά ταύτα δέχεται ότι υπάρχουν σοβαρές ενδείξεις, οι οποίες πρέπει να διερευνηθούν περαιτέρω.
- **Διαταραχή της λειτουργίας του αιματοεγκεφαλικού φραγμού.** Ο αιματοεγκεφαλικός φραγμός δρα ως φίλτρο το οποίο επιτρέπει σε συγκεκριμένες ουσίες να περάσουν από το αίμα στον εγκέφαλο. Πρόκειται για σημαντικότερη νευρολογική λειτουργία μέσω της οποίας ελέγχεται και διατηρείται το εγκεφαλικό περιβάλλον. Μελέτες σε σουηδικά πανεπιστήμια έδειξαν ότι η έκθεση σε H/M ακτινοβολία και SAR της τάξεως των 0.016 W/Kg προκαλεί αύξηση της διαπερατότητας του αιματοεγκεφαλικού φραγμού. Οι επιπτώσεις μιας τέτοιας διαταραχής είναι υπό διερεύνηση.

IV. Διεθνείς οργανισμοί και πρότυπα ασφαλείας

Ακολουθεί ένας κατάλογος με τους σημαντικότερους διεθνείς ή παγκόσμια αναγνωρισμένους οργανισμούς που ασχολούνται με τις βιολογικές και περιβαλλοντικές επιδράσεις της Η/Μ ακτινοβολίας. Δίνεται η αγγλική τους ονομασία και οι διαδικτυακές τους διευθύνσεις για ευκολότερη αναζήτηση πληροφοριών. Σημειώνουμε ότι ο ΠΟΥ διευθύνει το διεθνές ερευνητικό πρόγραμμα EMF project, σκοπός του οποίου είναι η πληρέστερη διερεύνηση των βιολογικών και περιβαλλοντολογικών επιδράσεων των Η/Μ πεδίων και ο ορισμός κοινών προτύπων, πρακτικών και ορίων ασφαλείας. Ο σχετικός διαδικτυακός τόπος παρέχει πλήθος πληροφοριών.

- **World Health Organization (WHO):** www.who.ch/peh-emf
- **International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP):** www.icnirp.de
- **European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC):** <http://www.cenelec.org/>
- **VDE (Germany):** <http://www.vde-verlag.de/engl.html>
- **Bioelectromagnetics Society:** www.bioelectromagnetics.org
- **U.S. Dept. of Defense:** www.brooks.af.mil/AFRL/HED/hedr/
- **European Bioelectromagnetics Association:** www.ebea.org
- **Electromagnetic Energy Association:** www.elecenergy.com
- **Federal Communications Commission:** www.fcc.gov/oet/rfsafety
- **U.S. Food and Drug Administration:** www.fda.gov/cdrh/phones/index.html
- **IEEE:** www.ieee.org
- **IEEE Committee on Man & Radiation:** www.seas.upenn.edu:8080/~kfoster/comar.htm
- **Microwave News:** www.microwavenews.com
- **J.Moulder, Med.Coll.of Wisc.:** www.mcw.edu/gcrc/cop/cell-phone-health-FAQ/toc.html
- **National Council on Radiation Protection & Measurements:** www.ncrp.com
- **National Radiation Protection Board (United Kingdom):** www.nrpb.org.uk
- **NJ Dept Radiation Protection:** www.state.nj.us/dep/rpp/ber/nrs/index.htm
- **Richard Tell Associates:** www.radhaz.com
- **US OSHA:** www.osha-slc.gov/SLTC/radiofrequencyradiation/index.html
- **Wireless Industry (CTIA):** www.wow-com.com
- **Wireless Information Resource Centre (Canada):** www.wirc.org
- **National Institute for Occupational Safety and Health (USA):** <http://www.cdc.gov/niosh/homepage.html>
- **American National Standards Institute (ANSI)** <http://www.ansi.org/>

Το πλήθος των εμπλεκόμενων οργανισμών και βέβαια η επιστημονική, οικονομική και πολιτική πολυπλοκότητα του προβλήματος έχουν ως αποτέλεσμα τα προτεινόμενα μέτρα ασφαλείας και τα ανώτατα επιτρεπτά όρια να διαφοροποιούνται αισθητά από χώρα σε χώρα ή ακόμα και μέσα στην ίδια χώρα. Το γεγονός αυτό δημιουργεί ακόμη μεγαλύτερη σύγχυση και οδηγεί σε νομικά κενά ή ατέλειες.

Μια πολύ γενική μεθοδολογία προσδιορισμού του μέγιστου SAR που ακολουθείται λίγο-πολύ από όλους είναι η εξής: Κατ' αρχάς προτείνεται μία τιμή για το SAR με βάση τα μέχρι στιγμής διαθέσιμα επιστημονικά δεδομένα. Η τιμή αυτή αποτελεί τη μέση τιμή του SAR για ολόκληρο το σώμα και

χρονικό διάστημα έκθεσης **6 min**. Επί του παρόντος ισχύει: $SAR_0 = 4 \text{ W/kg}$. Στη συνέχεια, προκειμένου να εξισορροπηθούν τα πιθανά κενά γνώσης σχετικά με τις ακριβείς βιολογικές επιδράσεις της Η/Μ ακτινοβολίας, εισάγεται ένας **συντελεστής ασφαλείας**, συνήθως **10**, οπότε και προκύπτει το βασικό όριο, $SAR_{\text{οριο}} = 0.4 \text{ W/kg}$. Τέλος, μετά τον υπολογισμό της οριακής τιμής του SAR, υπολογίζονται οι μέγιστες επιτρεπτές τιμές του ηλεκτρικού ή μαγνητικού πεδίου καθώς και της πυκνότητας ισχύος, με βάση τις προαναφερθείσες σχέσεις.

Ορισμένα πρότυπα κατατάσσουν τον πληθυσμό σε δύο κατηγορίες, στους **εργαζόμενους** (workers) και στο **γενικό πληθυσμό** (general public). Για τις δύο αυτές κατηγορίες ισχύουν διαφορετικά όρια, με αυστηρότερα εκείνα που αφορούν το γενικό πληθυσμό. Ο λόγος είναι ότι οι εργαζόμενοι εκτίθενται στα Η/Μ πεδία για 8 ώρες το 24ωρο, είναι γενικά υγιείς και ενημερωμένοι για τους κινδύνους, οπότε λαμβάνουν, όπου είναι δυνατόν, τις απαραίτητες προφυλάξεις. Αντίθετα, ο γενικός πληθυσμός είναι εκτεθειμένος καθ' όλη τη διάρκεια του 24ώρου και, φυσικά, περιλαμβάνει ασθενείς, μικρά παιδιά, εγκύους κ.λπ. Συνήθως, ο συντελεστής ασφαλείας είναι **10** για τους εργαζόμενους και **50** για το γενικό πληθυσμό.

Έτσι έχουμε:

$$SAR_{\text{οριο-εργαζ.}} = 0.4 \text{ W/kg} \text{ και } SAR_{\text{οριο-γ.πληθυσμ.}} = 0.08 \text{ W/kg.}$$

Οι βασικές αδυναμίες των υπάρχοντων προτύπων είναι οι εξής:

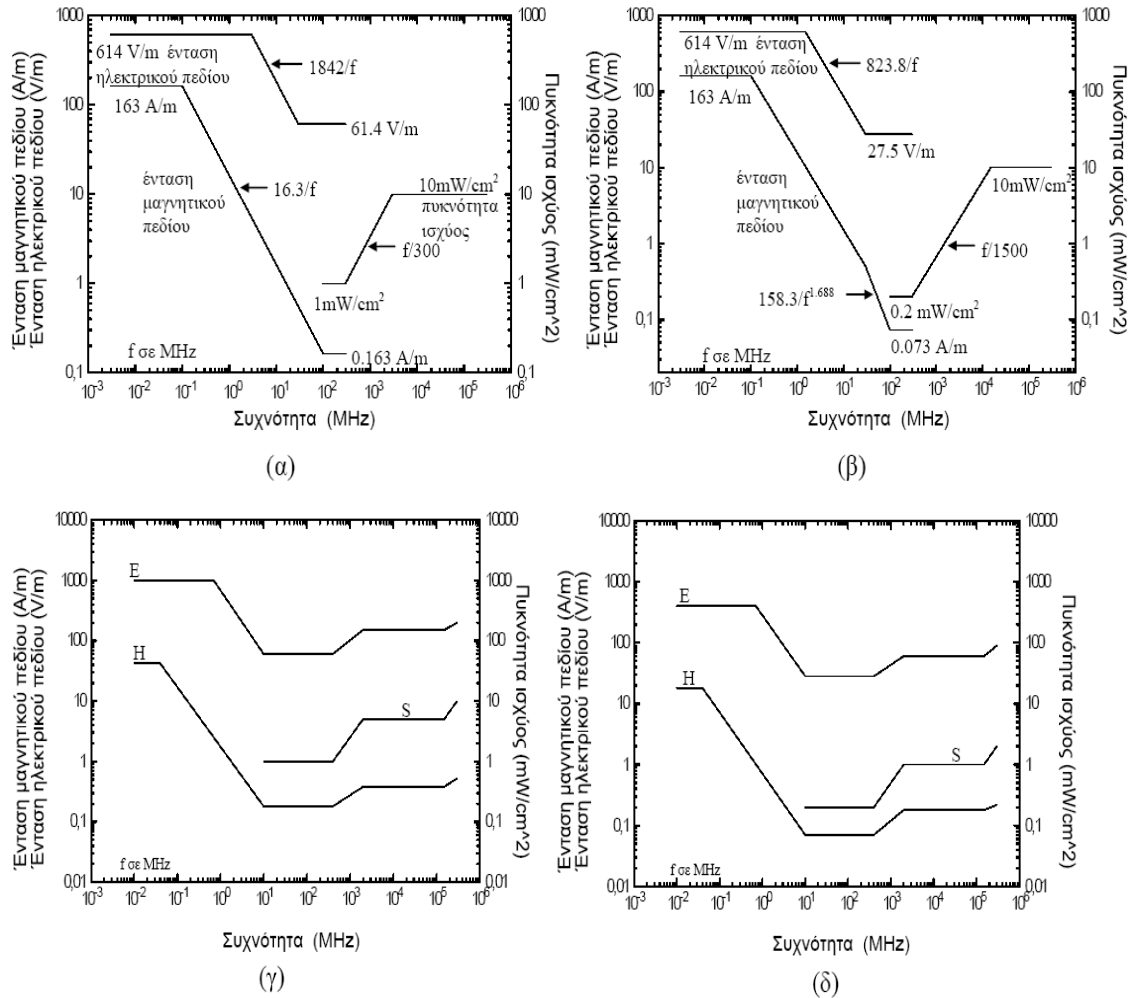
- Λαμβάνονται υπόψη μόνο τα θερμικά και όχι τα μη θερμικά φαινόμενα,
- δεν καλύπτεται επαρκώς η περίπτωση των παλμικών πεδίων, και
- λόγω της πολυπλοκότητας του προβλήματος, δεν καλύπτεται η περίπτωση του εγγύς πεδίου (near-field) των κεραιών, αφού για όλες τις περιπτώσεις λαμβάνεται υπόψη η έκθεση στο μακρινό πεδίο (far-field) των κεραιών.

Στον Πίνακα 4 δίνονται τα εθνικά όρια διαφόρων κρατών. Αξιοσημείωτη είναι η διαφορά που παρατηρείται τόσο στην τιμή του SAR όσο και στις διαφορές της πυκνότητας ισχύος για την ίδια τιμή SAR. Αυτό οφείλεται στη διαφορετική μοντελοποίηση που ακολουθεί κάθε κράτος.

Στο Σχήμα 2 δίνονται τα όρια επικινδυνότητας του Αμερικανικού Ινστιτούτου Εθνικών Προτύπων (ANSI: American National Standards Institute) και της Ευρωπαϊκής Ένωσης (CENELEC) στην περιοχή των ραδιοσυχνοτήτων, για τους εργαζόμενους και το γενικό πληθυσμό.

	VDE	NRPB	ANSI	IRPA	CENELEC	ex-USSR
SAR(W/kg)	1	0.4	0.4	0.08	0.08	-
S(mW/cm²) f = 900MHz	25	33	30	4.5	4.5	0.01

Πίνακας 4: Εθνικά όρια SAR και πυκνότητας ισχύος για διάφορα κράτη.



Σχήμα 2: Όρια επικινδυνότητας του ANSI (IEEE C 95.1-1991) στην περιοχή ραδιοσυχνοτήτων για α) τους εργαζόμενους και β) το γενικό πληθυσμό. Όρια επικινδυνότητας της Ευρωπαϊκής Ένωσης (CENELEC) στην περιοχή ραδιοσυχνοτήτων για γ) τους εργαζόμενους και δ) το γενικό πληθυσμό.

Στον Πίνακα 5 δίνονται τα προτεινόμενα όρια ασφαλείας από την ICNIRP για τρεις από τις βασικότερες πηγές Η/Μ ακτινοβολίας στις οποίες εκτίθεται το ευρύ κοινό (δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, σταθμοί κινητής τηλεφωνίας και φούρνοι μικροκυμάτων).

Στον Πίνακα 6 παρουσιάζονται τυπικές μέγιστες τιμές Η/Μ πεδίων στα οποία είναι εκτεθειμένο το ευρύ κοινό, όπως αυτές έχουν μετρηθεί από το Ευρωπαϊκό γραφείο του ΠΟΥ. Οι μέσες αναμενόμενες τιμές έκθεσης είναι αρκετά χαμηλότερες. Σύμφωνα με τους πίνακες αυτούς, ακόμα και οι μέγιστες τιμές είναι αρκετά χαμηλότερες από τα αντίστοιχα όρια

	Ευρωπαϊκά δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας		Σταθμοί βάσης κινητής τηλεφωνίας GSM		Φούρνοι μικροκυμάτων
	50 Hz	50 Hz	900 MHz	1.8 GHz	2.45 GHz
Μετρούμενη ποσότητα	Ηλεκτρικό πεδίο (V/m)	Μαγνητικό πεδίο (μT)	Πυκνότητα ισχύος (W/m ²)	Πυκνότητα ισχύος (W/m ²)	Πυκνότητα ισχύος (W/m ²)
Όρια γενικού πληθυσμού	5 000	100	4.5	9	10
Όρια εργαζομένων	10 000	500	22.5	45	

Πίνακας 5: Τα βασικά όρια ασφαλείας της ICNIRP (EMF guidelines, Health Physics 74, 494-522, 1998).

Πηγή Η/Μ ακτινοβολίας	Τυπική μέγιστη μετρημένη τιμή	
	Ηλεκτρικό πεδίο (V/m)	Μαγνητική ροή (μT)
Φυσικά πεδία	200	70 (Μαγνητικό Πεδίο της γης)
Ηλεκτρικό δίκτυο (στο σπίτι, μακριά από πυλώνες υψηλής τάσης)	100	0.2
Ηλεκτρικό δίκτυο (κάτω από πυλώνες υψηλής τάσης)	10 000	20
Ηλεκτρικά τρένα και τραμ	300	50
Οθόνες TV και Η/Υ (στη θέση του χειριστή)	10	0.7
	Τυπική μέγιστη μετρημένη τιμή (W/m ²)	
Ραδιοτηλεοπτικοί πομποί	0.1	
GSM σταθμοί βάσης κινητής τηλεφωνίας	0.1	
Radars	0.2	
Φούρνοι μικροκυμάτων	0.5	

Πίνακας 6: Μέγιστες τιμές που έχουν μετρηθεί για τις συνήθεις πηγές Η/Μ ακτινοβολίας (Πηγή: ΠΟΥ, Ευρωπαϊκό γραφείο).

Στον Πίνακα 7 παρουσιάζονται τυπικές τιμές του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου για τις πιο συνηθισμένες οικιακές. Στις περισσότερες περιπτώσεις το μαγνητικό πεδίο σε απόσταση 30 cm είναι αρκετά κάτω από το όριο των 100 μ .

Ηλεκτρική συσκευή	Απόσταση 3 cm (μ T)	Απόσταση 30 cm (μ T)	Απόσταση 1 m (μ T)
Σεσουάρ μαλλιών	6 – 2000	0.01 – 7	0.01 – 0.03
Ξυριστική μηχανή	15 – 1500	0.08 – 9	0.01 – 0.03
Ηλεκτρική σκούπα	200 – 800	2 – 20	0.13 – 2
Λάμπες φθορισμού	40 – 400	0.5 – 2	0.02 – 0.25
Φούρνος μικροκυμάτων	73 – 200	4 – 8	0.25 – 0.6
Ραδιόφωνο	16 – 56	1	< 0.01
Ηλεκτρικός φούρνος	1 – 50	0.15 – 0.5	0.01 – 0.04
Πλυντήριο	0.8 – 50	0.15 – 3	0.01 – 0.15
Σίδερο	8 – 30	0.12 – 0.3	0.01 – 0.03
Πλυντήριο πιάτων	3.5 – 20	0.6 – 3	0.07 – 0.3
Υπολογιστής	0.5 – 30	< 0.01	
Ψυγείο	0.5 – 1.7	0.01 – 0.25	<0.01
Έγχρωμη TV	2.5 - 50	0.04 – 2	0.01 – 0.15

Πίνακας 7: Ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία οικιακών συσκευών. Με έντονους χαρακτήρες δίνονται οι κανονικές αποστάσεις χειρισμού (Πηγή: Federal Office for Radiation Safety, Germany 1999).

Τέλος, δίνονται (Tables 1, 2) τα όρια ασφαλείας του Αμερικάνικου Ναυτικού. Στο Table 1 παρουσιάζονται τα όρια για περιοχές ελεγχόμενης πρόσβασης και στο Table 2 τα αντίστοιχα όρια για περιοχές μη ελεγχόμενης πρόσβασης, τα οποία είναι μικρότερα.

Table 1
RF Permissible Exposure Limits For Controlled Environments

A. Radiofrequency Fields				
Frequency Range (<i>f</i>) (MHz)	Electric Field (E) (V/m)	Magnetic Field (H) (A/m)	Power Density (S) (mW/cm ²) (E, H Fields)	Averaging Time (T _{avg}) (minutes) E ² , H ² , S
.003 - 0.1	614	163	(10 ² , 10 ⁶)	6
.1 - 3.0	614	16.3/ <i>f</i>	(10 ² , 10 ⁴ / <i>f</i> ²)	6
3 - 30	1842/ <i>f</i>	16.3/ <i>f</i>	(900/ <i>f</i> ² , 10 ⁴ / <i>f</i> ²)	6
30 - 100	61.4	16.3/ <i>f</i>	(1.0, 10 ⁴ / <i>f</i> ²)	6
100 - 300	61.4	0.163	1.0	6
300 - 3000			<i>f</i> /300	6
3000 - 15000			10	6
15000 - 300000			10	616000/ <i>f</i> ^{1.2}

B. Induced and Contact Current Restrictions			
Frequency Range (<i>f</i>) (MHz)	Maximum Current Through Both Feet (mA)	Maximum Current Through Each Foot (mA)	Contact Current (mA)
0.003 - 0.1	2000 <i>f</i>	1000 <i>f</i>	1000 <i>f</i>
0.1 - 100	200	100	100

C. Pulsed Radiofrequency Fields		
Frequency Range (<i>f</i>) (MHz)	Peak Electric Field (E) (kV/m)	Peak Power Density/Pulse for Pulse Duration < 100 msec (mW/cm ²)
0.1-300000	100	(PEL)(T _{avg})/(5)(pulse width)

D. Partial- Body Exposures		
Frequency Range (<i>f</i>) (MHz)	Peak Value of Mean Squared Field (V ² /m ² or A ² /m ²)	Equivalent Power Density (mW/cm ²)
0.1 - 300	<20 E ² or 20 H ²	-
300 - 6000	-	<20
6000-96000	-	<20(<i>f</i> /6000) ^{0.25}
96000 - 300000	-	40

Table 2
RF Permissible Exposure Limits For Uncontrolled Environments

A. Radiofrequency Fields					
Frequency Range (f) (MHz)	Electric Field (E) (V/m)	Magnetic Field (H) (A/m)	Power Density (S) (mW/cm ²) (E, H Fields)	Averaging Time (T _{avg}) (minutes)	
				E ² , S	or H ²
.003 - 0.1	614	163	(10 ² , 10 ⁶)	6	6
.1 - 1.34	614	16.3/f	(10 ² , 10 ⁴ /f ²)	6	6
1.34 - 3.0	823.8/f	16.3/f	(180/f ² , 10 ⁴ /f ²)	f ² /0.3	6
3 - 30	823.8/f	16.3/f	(180/f ² , 10 ⁴ /f ²)	30	6
30 - 100	27.5	158.3/f ^{1.668}	(.2, 9.4x10 ⁵ /f ^{3.336})	30	.0636f ^{1.337}
100 - 300	27.5	0.0729	0.2	30	30
300 - 3000			f/1500	30	-
3000 - 15000			f/1500	900000/f	-
15000 - 300000			10	616000/f ^{1.2}	-

B. Induced and Contact Current Restrictions			
Frequency Range (f) (MHz)	Maximum Current Through Both Feet (mA)	Maximum Current Through Each Foot (mA)	Contact Current (mA)
0.003 - 0.1	900f	450f	450f
0.1 - 100	90	45	45

C. Pulsed Radiofrequency Fields		
Frequency Range (f) (MHz)	Peak Electric Field (E) (kV/m)	Peak Power Density/Pulse for Pulse Duration < 100 msec (mW/cm ²)
0.1-300000	100	(PEL)(T _{avg})/(5)(pulse width)

D. Partial- Body Exposures		
Frequency Range (f) (MHz)	Peak Value of Mean Squared Field (V ² /m ² or A ² /m ²)	Equivalent Power Density (mW/cm ²)
0.1 - 300	<20 E ² or 20 H ²	4
300 - 6000		f/1500
6000-30000		20
30000 - 300000		20

Αναφορές

1. “*Biological Effects of Electromagnetic Radiation*” Special Issue, IEEE Press, 1984.
2. W. W. Mumford, “*Some Technical Aspects of Microwave Radiation Hazards*”, Proc. IRE, vol. 49, pp. 427-447, Feb. 1961.
3. “*Technical Manual for Radiofrequency Radiation Hazards*”, NAVSHIPS 0900-005-8000.
4. Κ. Λιολιούσης, “*Βιολογικές Επιδράσεις της Η/Μ Ακτινοβολίας*”, Εκδόσεις Δίαυλος, Αθήνα, 1997.
5. “*Ελληνικό Πρότυπο ENV 50166-2*”, ΕΛΟΤ, 1996.
6. “*Κινητή Τηλεφωνία*”, Ενημερωτικό Δελτίο ΤΕΕ, Τεύχος 1862, Αθήνα, 1995.
7. “*Ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία 50 Hz-Πιθανές βιολογικές επιδράσεις και κανονισμοί προστασίας*”, Τεχνικά Χρονικά ΤΕΕ, Τεύχος 1/95.
8. “*Fact Sheet N183 electromagnetic fields and public health*”, World Health Organization (WHO) 5/1998.
9. “*US Navy RF exposure limits OPNAVINST 5100.23F*”, 2002.

Σύντομα βιογραφικά σημειώματα

Ανδρέας Τσιγκόπουλος (Λέκτορας Σχολής Ναυτικών Δοκίμων). Γεννήθηκε στην Αθήνα το 1962. Έλαβε Πτυχίο Ηλεκτρολόγου Μηχανικού από το Πανεπιστήμιο Πατρών το 1985, Μεταπτυχιακό Τίτλο Εξειδίκευσης από την École Nationale Supérieure des Télécommunications, Paris το 1987, και Διδακτορικό Δίπλωμα στην Οπτικοηλεκτρονική από το Τμήμα Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Αθηνών το 1991. Εργάστηκε επί σειρά ετών ως Κύριος Ερευνητής της Ομάδας Οπτικών Επικοινωνιών του Πανεπιστημίου Αθηνών σε θέματα οπτικοηλεκτρονικών διατάξεων και εφαρμογών, και έχει επίσης εργαστεί ως Ερευνητής Μηχανικός στην Ομάδα Σχεδιασμού Οπτικοηλεκτρονικών Διατάξεων της εταιρείας ALCATEL, Paris. Εργάστηκε ως Εξειδικευμένος Μηχανικός στη Διεύθυνση Σχεδιασμού του Ο.Τ.Ε., σε θέματα σχεδιασμού και νέων τεχνολογιών του υπεραστικού δικτύου κορμού οπτικών ινών. Είναι μέλος της Ομάδας Μη Γραμμικής Δυναμικής του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Αθηνών σε θέματα διάδοσης εντός μη γραμμικών μέσων. Διετέλεσε Ωρομίσθιος Καθηγητής της Έδρας Ηλεκτρονικής ΙΙ στη Σχολή Ναυτικών Δοκίμων από το 1991 και το 1997 εξελέγη Ειδικός Επιστήμονας της ίδιας Έδρας. Από τον Ιανουάριο του 2004 είναι Λέκτορας στον Τομέα Συστημάτων Μάχης, Ναυτικών Επιχειρήσεων, Θαλασσίων Επιστημών, Ναυτιλίας, Ηλεκτρονικών & Τηλεπικοινωνιών της Σχολής Ναυτικών Δοκίμων.

Μιχάλης Η. Φαφαλιός (Καθηγητής Σχολής Ναυτικών Δοκίμων). Ο Μ. Η. Φαφαλιός είναι διδάκτωρ του Πανεπιστημίου του Manchester, Institute of Science and Technology – UMIST, Τμήμα Ηλ/γων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών, Τομέα Μετρολογίας, με εξειδίκευση σε θέματα Οργανολογίας και Μετρήσεων και θέμα διατριβής: “A Galvanomagnetic Method for the Non-Destructive testing of Metals” (12/1982). Εργάστηκε ως παρασκευαστής στα εργαστήρια Στερεάς Κατάστασης και Ηλεκτρονικής, και δίδαξε μαθήματα Ηλεκτρικής Μηχανολογίας και Ηλεκτρονικής σε προπτυχιακούς και μεταπτυχιακούς φοιτητές – UMIST. Δίδαξε επίσης ως έκτακτος Επίκουρος Καθηγητής στο Τμήμα Ηλεκτρονικής του Τ.Ε.Ι. Πειραιά το μάθημα “Ηλεκτρονική” του 4ου Εξαμήνου. Εργάστηκε ως μηχανικός έρευνας και ανάπτυξης στη Hall Effect Monitoring Equipment Ltd, Skemersdale, Lanc,s - U.K., στο σχεδιασμό συσκευών ηλεκτρονικών μετρήσεων. Εκπαιδεύτηκε στον Ο.Τ.Ε. σε συστήματα ηλεκτρονικών τηλεφωνικών κέντρων, και συμμετείχε σε εταιρείες του ιδιωτικού τομέα ως σύμβουλος μηχανικός. Τέλος, εργάστηκε στο Γραφείο Έρευνας και Τεχνολογικών Εξελίξεων του Πολεμικού Ναυτικού στο σχεδιασμό και την ανάπτυξη Ηλεκτρονικών εφαρμογών Ηλεκτρονικού Πολέμου στο αντίστοιχο τμήμα του GETEN. Τον Ιούλιο του 1986 εξελέγη Ειδικός Επιστήμονας στη Σχολή Ναυτικών Δοκίμων και τον Ιανουάριο του 1996 Τακτικός Καθηγητής στην Έδρα της Ηλεκτρονικής ΙΙ και Διευθυντής του Εργαστηρίου Ηλεκτρονικής. Σήμερα κατέχει τη θέση του Καθηγητή Ηλεκτρονικής στον Τομέα Συστημάτων Μάχης, Ναυτικών Επιχειρήσεων, Θαλασσίων Επιστημών, Ναυτιλίας, Ηλεκτρονικών και Τηλεπικοινωνιών στη Σχολή Ναυτικών Δοκίμων και είναι Διευθυντής του ίδιου Τομέα.

ΔΕΥΤΕΡΗ ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ:

ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗ

Η προσομοίωση της θερμοδυναμικής λειτουργίας των κινητήρων diesel

Ηλίας Αρ. Υφαντής

Περίληψη

Η «ιστορία» του καυσίμου, από την είσοδό του στο θάλαμο καύσεως μέχρι την πλήρη καύση του, αποτελεί καθοριστικό παράγοντα της συνολικής συμπεριφοράς των κινητήρων diesel. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό για την γενικότερη προσομοίωση της λειτουργίας των κινητήρων diesel να περιγραφεί με ακρίβεια και αξιοπιστία η παρουσία του καυσίμου στο θάλαμο καύσεως. Στην παρούσα εργασία προτείνονται ειδικές μαθηματικές σχέσεις που αφορούν στην έγχυση του καυσίμου, τη δημιουργία, τη διάσπαση και τη διείσδυση της δέσμης, τη δημιουργία, την ατμοποίηση και την καύση της σταγόνας. Οι σχέσεις αυτές ενσωματώνονται σε προτεινόμενο αλγόριθμο περιγραφής της «ιστορίας» του καυσίμου.

Abstract

The fuel “history”, from the very first moment in the combustion chamber until its entire burning, plays a significant role in the entire behavior of the diesel engines. Consequently, the precise and reliable description of the fuel presence within the combustion chamber is of major importance for the total simulation of the diesel engines behavior. In this paper specific mathematic relationships are proposed regarding the fuel injection, the fuel jet formation, the jet break-up and the jet penetration, the fuel droplet formation, vaporization and combustion. These relationships are parts of a proposed algorithm describing the fuel “history”.

I. Εισαγωγή

Το καύσιμο προσάγεται στον κύλινδρο, μέσω του συστήματος εγχύσεως, προς το τέλος της συμπίεσεως, ακριβώς πριν από την προδιαγεγραμμένη ανάφλεξη. Το υγρό καύσιμο, διερχόμενο από την ή τις μικρές οπές του προφυσίου του εγχυτήρα, εγχέεται υπό μορφή δέσμης με μεγάλη ταχύτητα, διασκορπίζεται σε μικρές σταγόνες και καταλαμβάνει το θάλαμο καύσεως [1].

Το καύσιμο ατμοποιείται και αναμειγνύεται με τον περιβάλλοντα αέρα, ο οποίος βρίσκεται σε υψηλή θερμοκρασία και υψηλή πίεση. Καθώς οι επικρατούσες συνθήκες πίεσεως και θερμοκρασίας υπερκαλύπτουν τις απαιτούμενες για την ανάφλεξη του καυσίμου, τμήματα του ήδη αναμειγμένου με τον αέρα καυσίμου αυταναφλέγονται, κατόπιν μιας καθυστερήσεως, η οποία αντιστοιχεί σε μερικές μοίρες γωνίας στροφάλου.

Με την εμφάνιση της καύσεως η πίεση εντός του κυλίνδρου καθώς και η θερμοκρασία αυξάνονται. Η συνακόλουθη συμπίεση του μη καιγομένου τμήματος έχει ως συνέπεια τη μείωση της καθυστερήσεως αναφλέξεως και την ταχύτερη καύση του. Συγχρόνως, μειώνεται η χρονική διάρκεια της ατμοποίησης του καυσίμου που απομένει σε υγρή φάση.

Η έγχυση συνεχίζεται μέχρις ότου η προγραμματισμένη ποσότητα καυσίμου εισέλθει εξ ολοκλήρου στο θάλαμο καύσεως. Ο διασκορπισμός, η ατμοποίηση, η ανάμειξη των ατμών καυσίμου με τον αέρα και η καύση συνεχίζονται μέχρι το σύνολο του καυσίμου να διέλθει από κάθε στάδιο. Επιπλέον, η ανάμειξη του αέρα, ο οποίος απομένει στον κύλινδρο, με τα καιγόμενα και τα ήδη καμμένα αέρια συνεχίζεται καθ' όλη τη διάρκεια της καύσεως και πέραν αυτής.

Τα φαινόμενα που συμβαίνουν εντός του θαλάμου καύσεως διακρίνονται από πολυπλοκότητα. Οι λεπτομέρειές τους εξαρτώνται από τις ιδιότητες του καυσίμου, τη σχηματική διαμόρφωση του θαλάμου καύσεως, το σχεδιασμό του συστήματος εγχύσεως, καθώς και τις συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα. Το φαινόμενο της καύσεως είναι μη μόνιμο, ετερογενές και τρισδιάστατο.

II. Η έγχυση του καυσίμου και η δημιουργία της δέσμης

A. Η δέσμη του καυσίμου

Όταν το υγρό καύσιμο εξέρχεται με μεγάλη ταχύτητα από το προφύσιο εισερχόμενο στο θάλαμο καύσεως, λαμβάνει τη μορφή κωνικής δέσμης, εφ' όσον ο περιβάλλον αέρας είναι ουσιαστικώς αδιατάρακτος, ή «τροποποιημένης κωνικής» δέσμης με πιο σύνθετη γεωμετρία, εφ' όσον ο περιβάλλον αέρας στροβιλίζεται. Καθώς το καύσιμο απομακρύνεται από το προφύσιο, η υγρή δέσμη αναπτύσσεται και -βαθμηδόν- διασπάται σε μικρές σταγόνες. Τα μεγέθη των σταγόνων αλλά και η πυκνότητά τους λαμβάνουν τιμές κυμαινόμενες εντός ευρέως πεδίου. Η αιχμή και η επιφάνεια της δέσμης κινούμενες με διαρκώς μειούμενη ταχύτητα καταλαμβάνουν το θάλαμο καύσεως.

B. Το μήκος διασπάσεως

Εκτεταμένες πειραματικές εργασίες έχουν δημοσιευθεί επί της διασπάσεως δέσμης χαμηλής ταχύτητας. Το μήκος διασπάσεως προσδιορίστηκε [2] με μέτρηση της ηλεκτρικής αντιστάσεως μεταξύ του προφυσίου και ενός εξαιρετικώς λεπτού συρμάτινου δικτύωματος, το οποίο είχε παρεμβληθεί στη δέσμη. Με παρόμοιο τρόπο [3] μετρήθηκε το μήκος διασπάσεως με τοποθέτηση δικτυωμάτων σε διάφορες θέσεις, αξονικά και ακτινικά της δέσμης.

Ο προσεγγιστικός υπολογισμός του μήκους διασπάσεως επιτεύχθηκε υπό τις εξής προϋποθέσεις [4]:

- Η υγρή δέσμη κινείται εντός περιβάλλοντος αέρα και η πυκνότητα του αέρα είναι πολύ μικρότερη από την πυκνότητα του υγρού καυσίμου.
- Η σχετική ταχύτητα μεταξύ υγρής δέσμης και περιβάλλοντος αέρα είναι υψηλή.
- Η ταχύτητα του εσωτερικού τμήματος της δέσμης διατηρείται ίση με την αρχική ταχύτητα της εγχύσεως.
- Η διαταραχή της επιφανείας της και η διεύρυνσή της επιταχύνονται από την κίνηση του περιβάλλοντος αέρα.
- Καθώς η επιφάνεια της δέσμης διευρύνεται, η δέσμη τείνει προς την αποσταθερο-ποίηση και τελικά διασπάται σε σταγόνες.
- Το μήκος διασπάσεως υπολογίζεται μέσω του αντιστοίχου χρόνου διασπάσεως.

Προ της διασπάσεως της δέσμης η ταχύτητά της είναι

$$v_{inj} = c \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_1}} \quad (1)$$

Για τη σταθερά c έχει προταθεί τιμή ίση με τη μονάδα ($c = 1$) [5], ενώ αντίθετα υποστηρίζεται ότι αυτή η τιμή συνεπάγεται υπερβολικώς ταχεία μετακίνηση της αιχμής της δέσμης και αντιπροτείνεται μικρότερη τιμή ($c = 0.39$).

Το μεταβατικό χρονικό διάστημα από την έγχυση έως τη διάσπαση της δέσμης είναι

$$t_{break} = \frac{\alpha \rho_1 d_o}{\sqrt{2c^2 p_a \Delta P}} \quad (2)$$

Το μήκος διασπάσεως υπολογίζεται από τη σχέση

$$L_{break} = v_{inj} \cdot t_{break} = a \sqrt{\frac{p_1}{p_a}} d_o \quad (3)$$

Για τη σταθερά a προτείνεται $a = 15.8$ [5].

Γ. Το μήκος διεισδύσεως

Το μήκος διεισδύσεως της δέσμης είναι ανάλογο της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου, με αρχή την έναρξη της εγχύσεως [6]. Όλες ανεξαιρέτως οι πειραματικές εργασίες, οι οποίες έχουν δημοσιευθεί προ του 1972, μειονεκτούν ως προς το αρχικό τμήμα της εγχύσεως με διάρκεια περίπου 1 msec. Το προκύπτον σφάλμα στην εκτίμηση του μήκους διεισδύσεως είναι σημαντικό εάν ληφθεί υπ' όψιν ότι η καθυστέρηση αναφλέξεως είναι δυνατόν να διαρκέσει 1 msec.

Εκτεταμένες και ακριβείς μελέτες [4,7] οδήγησαν στις ακόλουθες σχέσεις.

$$S = c \cdot \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_1}} \cdot t \quad \text{όταν } 0 < t < t_{break} \quad (4)$$

$$S = \beta \cdot \left[\frac{\Delta P}{\rho_a} \right]^{0.25} \sqrt{d_o} t \quad \text{όταν } t_{break} < t \quad (5)$$

Για τη σταθερά β προτείνεται τιμή ίση με 2.95 [5].

Δ. Η γωνία της δέσμης

Κατά το παρελθόν αναπτύχθηκαν διάφορες εμπειρικές συσχετίσεις για την εκτίμηση της γωνίας της δέσμης η οποία διαμορφώνεται μετά την έγχυση του καυσίμου στους κινητήρες Diesel. Η σχέση που επικράτησε είναι [4,7]:

$$\mathcal{G} = \delta \cdot \left[\frac{\Delta P \rho_a d_o^2}{\mu_a^2} \right]^{0.25} \quad (6)$$

με προτεινόμενη τιμή για τη σταθερά $\delta = 0.05$.

Ε. Η επίδραση της συστροφής

Όπως έχει ήδη υπογραμμισθεί, ο στροβιλισμός του αέρα εντός του θαλάμου καύσεως, ειδικά στους κινητήρες με μεγάλες ταχύτητες περιστροφής, επιδρά σημαντικά στη γεωμετρία της σχηματιζόμενης δέσμης. Η επίδραση λαμβάνεται υπ' όψιν κατά τους υπολογισμούς, τόσο του μήκους διεισδύσεως όσο και της γωνίας δέσμης. Εφόσον οι σχέσεις 4, 5, 6 ισχύουν υπό την προϋπόθεση ότι ο αέρας είναι αδιατάρακτος, για την περίπτωση του στροβιλιζόμενου αέρα ισχύουν οι εξής τροποποιημένες σχέσεις [4,7]:

$$S_S = C_S \cdot S \quad (7)$$

$$\theta_S = C_e \cdot \theta \quad (8)$$

$$C_S = \left[1 + \frac{\pi r_s NS}{30v_{inj}} \right]^{-1} \quad (9)$$

$$C_e = \left[1 + \frac{\pi r_s NS}{30v_{inj}} \right]^2 \quad (10)$$

ΣΤ. Το μέγεθος της σταγόνας

Η μελέτη της επιδράσεως των ιδιοτήτων του καυσίμου, των χαρακτηριστικών της εγχύσεως και της γεωμετρίας του προφυσίου, τόσο στη μέση διάμετρο όσο και στη διασπορά του μεγέθους των σταγόνων οδήγησε στα ακόλουθα συμπεράσματα [8]:

- Η κατάσταση του διασκορπισμού της δέσμης διακρίνεται σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με τους δύο διαφορετικούς φυσικούς μηχανισμούς που σχετίζονται με τη διάσπασή της.
- Η πρώτη κατηγορία αναφέρεται στον «ατελή» διασκορπισμό, κατά τον οποίο η διαμόρφωση των σταγόνων εξελίσσεται βαθμηδόν καθώς το υγρό καύσιμο απομακρύνεται από την έξοδο του προφυσίου και η δέσμη αναπτύσσεται. Η πρώτη κατηγορία συνδυάζεται με χαμηλές ταχύτητες εγχύσεως.
- Η δεύτερη κατηγορία αναφέρεται στον «τέλειο» διασκορπισμό, κατά τον οποίο η διαμόρφωση των σταγόνων είναι πλήρης. Η δεύτερη κατηγορία συνδυάζεται με υψηλές ταχύτητες εγχύσεως.
- Η μετάβαση από την πρώτη κατηγορία στη δεύτερη συμβαίνει υπό μία ορισμένη κρίσιμη συνθήκη.

Η μέση κατά Sauter διάμετρος (Sauter Mean Diameter, εφεξής S.M.D.), κατά τον «ατελή» διασκορπισμό, είναι:

$$S.M.D. = 4.12 \cdot \text{Re}_{inj}^{0.12} \cdot \text{We}_{inj}^{-0.75} \cdot \left[\frac{v_1}{v_a} \right]^{0.54} \cdot \left[\frac{\rho_1}{\rho_a} \right]^{0.18} \cdot d_o \quad (11)$$

ενώ κατά τον «τέλειο» διασκορπισμό είναι:

$$S.M.D. = 0.38 \cdot \text{Re}_{inj}^{0.25} \cdot \text{We}_{inj}^{-0.32} \cdot \left[\frac{v_1}{v_a} \right]^{0.37} \cdot \left[\frac{\rho_1}{\rho_a} \right]^{-0.47} \cdot d_o \quad (12)$$

Η κρίσιμη συνθήκη ταυτίζεται με την ικανοποίηση της σχέσεως:

$$\text{Re}_{inj}^{0.19} \cdot \text{We}_{inj}^{0.49} = 10.84 \cdot \left[\frac{v_1}{v_a} \right]^{0.17} \cdot \left[\frac{\rho_1}{\rho_a} \right]^{0.65} \quad (13)$$

$$\text{Re}_{inj} = \frac{v_{inj} \cdot d_o}{\nu_1} \quad (14)$$

$$\text{We}_{inj} = \frac{v_{inj}^2 \cdot d_o \cdot \rho_1}{\sigma} \quad (15)$$

Η S.M.D. είναι η καταλληλότερη και συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη μέση διάμετρος και ορίζεται ως εξής:

$$S.M.D. = \frac{\int D^3 \cdot dn}{\int D^2 \cdot dn} \quad (16)$$

όπου dn είναι το πλήθος των σταγόνων με διάμετρο D εντός του διαστήματος $(D - dD/2, D + dD/2)$ και το ολοκλήρωμα εφαρμόζεται σε όλες τις σταγόνες.

Κατόπιν των ανωτέρω καθίσταται εμφανής η επίδραση των χαρακτηριστικών της εγχύσεως στη διαμόρφωση και την ανάπτυξη τόσο της δέσμης του καυσίμου όσο και των σταγόνων του. Η συνακόλουθη επίδραση στους χρονικώς επόμενους μηχανισμούς (ατμοποίηση του καυσίμου, ανάμειξη των ατμών του καυσίμου με τον αέρα και καύση κατόπιν της αναφλέξεως) περιγράφεται συνοπτικώς στα επόμενα.

III. Η ατμοποίηση της σταγόνας του καυσίμου

Η υγρή σταγόνα του καυσίμου, με θερμοκρασία λίγο υψηλότερη απ' αυτή του περιβάλλοντος και με μεγάλη ταχύτητα, εισέρχεται στο θάλαμο καύσεως του κινητήρα. Οι επικρατούσες στο θάλαμο συνθήκες πίεσεως και θερμοκρασίας είναι οι τυπικές του πέρατος της συμπίεσεως. Υπ' αυτές τις συνθήκες, τρία φαινόμενα προσδιορίζουν την ιστορία της σταγόνας του καυσίμου [9]:

- Η επιβράδυνση της σταγόνας λόγω της αντιστάσεως του αέρα.
- Η μετάδοση θερμότητας από τον αέρα στη σταγόνα.
- Η μεταφορά μάζας ατμοποιημένου καυσίμου από τη σταγόνα στο περιβάλλον της.

Καθώς η θερμοκρασία της σταγόνας αυξάνεται λόγω της μεταδόσεως θερμότητας, η τάση ατμών του καυσίμου αυξάνεται όπως και ο ρυθμός ατμοποίησησεως. Καθώς ο ρυθμός απομακρύνσεως του ατμού από τη σταγόνα αυξάνεται, το τμήμα της προσδιδόμενης θερμότητας που διατίθεται για την αύξηση της θερμοκρασίας μειώνεται, ο ρυθμός προσδόσεως θερμότητας λόγω συναγωγής επίσης μειώνεται. Η συνδυασμένη δράση των τριών μηχανισμών προσδιορίζει την εξέλιξη της μάζας, της θερμοκρασίας, της ταχύτητας και του ρυθμού ατμοποίησησεως της σταγόνας συναρτήσει του χρόνου. Μελέτη σταγόνων αρχικής διαμέτρου 25 μm εντός συνθηκών που επικρατούν σε τυπικούς κινητήρες Diesel κατέδειξε ότι ο απαιτούμενος για την ατμοποίηση χρόνος είναι συνήθως μικρότερος του 1ms.

Η ανάλυση της προηγούμενης παραγράφου αναφέρεται σε σταγόνες, οι οποίες έχουν σαφώς διαχωρισθεί μεταξύ τους όπως συμβαίνει στην περιφέρεια της δέσμης. Στο εσωτερικό της δέσμης, περί τον άξονά της όπου είναι συγκεντρωμένο μεγάλο πλήθος σταγόνων, η ατμοποίηση έχει σημαντική επίδραση στη θερμοκρασία και το λόγο ισοδυναμίας αέρα καύσεως τοπικώς εντός της δέσμης. Καθώς το καύσιμο ατμοποιείται η τοπική θερμοκρασία μειώνεται και η τοπική τάση ατμών του καυσίμου αυξάνεται [10].

Συνεπώς, όταν το καύσιμο εισέρχεται στο θάλαμο καύσεως με χαρακτηριστικά (μέγεθος σταγόνας, ταχύτητα και θερμοκρασία) τα οποία καθορίζονται από τα χαρακτηριστικά της εγχύσεως, αλληλεπιδρά με τον περιβάλλοντα αέρα συναλλάσσοντας μάζα, ορμή και ενέργεια. Επιπροσθέτως, οι σταγόνες αλληλεπιδρούν μεταξύ τους αφ' ενός μέσω των συγκρούσεων και αφ' ετέρου μέσω της ατμοποίησης, η οποία τροποποιεί τη θερμοκρασία και τη σύσταση του αερίου περιβάλλοντός τους [11].

Πολλούς ερευνητές έχει απασχολήσει το πρόβλημα της μαθηματικής αποδόσεως των φυσικών μηχανισμών της ατμοποίησης. Σύμφωνα με την [12], η εγχέομενη δέσμη καυσίμου διαιρείται σε «στοιχεία». Αυτά τα «στοιχεία» ατμοποιούνται, αναμειγνύονται με τον αέρα, αναφλέγονται και καίγονται ακολουθώντας διακεκριμένες διαδρομές. Στην [13] παρουσιάζεται ειδικός κώδικας, για την περιγραφή των φυσικών μηχανισμών εντός των κινητήρων Diesel. Στη «ζωή» της σταγόνας εντοπίζονται οι εξής δύο περίοδοι [14-16]:

- Περίοδος αισθητής θερμάνσεως από την αρχική θερμοκρασία της σταγόνας ως τη θερμοκρασία κορεσμού.
- Περίοδος ατμοποίησης υπό σταθερή θερμοκρασία σταγόνας ίση με τη θερμοκρασία κορεσμού.

Η πρώτη περίοδος, σύμφωνα με νεότερες και πληρέστερες προσεγγίσεις, περιλαμβάνει το φαινόμενο της ατμοποίησης ευθύς εξαρχής με την εμφάνιση των σταγόνων στο θάλαμο καύσεως [17-18].

Για τη μαθηματική περιγραφή του φαινομένου της ατμοποίησης υιοθετούνται οι ακόλουθες παραδοχές:

- Κάθε σταγόνα θεωρείται σφαιρική. Είναι γνωστό ότι οι κινούμενες σταγόνες παραμορφώνονται και ότι οι εμπειρικές συσχετίσεις υπολογισμού της αντιστάσεως του αέρα και της μεταδόσεως θερμότητας με συναγωγή συμπεριλαμβάνουν την επίδραση αυτής της παραμορφώσεως αντιμετωπίζοντας τη σταγόνα ως ισοδύναμη σφαίρα.
- Οι συγκρούσεις μεταξύ των σταγόνων αγνοούνται καθώς και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ γειτονικών σταγόνων.
- Η ακτινοβολία από το περιβάλλον προς τη σταγόνα, συγκρινόμενη με τη συναγωγή, αμελείται.
- Οι οξειδωτικές και αποσυνθετικές (αποικοδομητικές) χημικές αντιδράσεις αγνοούνται.

Λαμβανομένων υπ' όψιν των ανωτέρω απλοποιητικών παραδοχών, καθίσταται ευχερής η κατάστρωση των βασικών εξισώσεων για τη διατήρηση της μάζας, της ορμής και της ενέργειας [13, 17, 18].

Η στιγμιαία ταχύτητα της σταγόνας προσδιορίζεται από την επίλυση της εξισώσεως διατηρήσεως της ορμής

$$m_1 \cdot \frac{dv}{dt} = -\frac{\pi}{2} \cdot c_D \cdot r^2 \cdot \rho_a \cdot v_{rel}^2 \quad (17)$$

όπου v_{rel} είναι η σχετική ταχύτητα της σταγόνας ως προς το περιβάλλον της. Ο συντελεστής αντιστάσεως παρέχεται από την έκφραση:

$$c_D = \begin{cases} \frac{24}{Re} \cdot (1 + 0.166 Re^{2/3}) & \text{όταν } Re \leq 1000 \\ 0.424 & \text{όταν } Re \geq 1000 \end{cases} \quad (18)$$

$$Re = \frac{2 \cdot r \cdot v_{rel}}{\nu_a} \quad (19)$$

Ο ρυθμός μεταβολής της ακτίνας της σταγόνας είναι

$$\frac{dr}{dt} = -\frac{\rho_a}{\rho_1} \cdot \frac{D_f}{2r} \cdot Sh \cdot \ln(1+B) \quad (20)$$

$$Sh = 2 + 0.6 \operatorname{Re}^{1/2} Sc^{1/3} \quad (21)$$

$$Sc = \frac{\nu_a}{D_f} \quad (22)$$

$$B = \frac{Y_s - Y}{1 - Y_s} \quad (23)$$

$$Y = \frac{\rho_{fv}}{\rho_a} \quad (24)$$

$$Y_s = \frac{M_f \cdot P_v}{M_f \cdot P_v + M_a (P - P_v)} \quad (25)$$

Το κλάσμα μάζας επί της επιφανείας της σταγόνας προέκυψε αφού υιοθετήθηκαν οι ακόλουθες παραδοχές:

- Η θερμοκρασία της σταγόνας είναι ενιαία.
- Η μερική πίεση του ατμού του καυσίμου στην επιφάνεια της σταγόνας ισούται με την τάση των ατμών του σε κατάσταση ισορροπίας.

Ο ισολογισμός ενεργείας έχει ως εξής:

$$m_1 \cdot c_{p1} \cdot \frac{dT_1}{dt} - 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \rho_1 \cdot H \cdot \frac{dr}{dt} = 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot q \quad (26)$$

$$q = \frac{\lambda_a \cdot (T - T_1)}{2r} \cdot Nu \cdot \frac{\ln(1+B)}{B} \quad (27)$$

$$Nu = 2 + 0.6 \cdot \operatorname{Re}^{1/2} \cdot \operatorname{Pr}^{2/3} \quad (28)$$

$$\operatorname{Pr} = \frac{\nu_a \cdot \rho_a \cdot c_{pa}}{\lambda_a} \quad (29)$$

Είναι σαφές ότι η θερμότητα που προσάγεται στη σταγόνα, αφ' ενός αυξάνει τη θερμοκρασία της και αφ' ετέρου διατίθεται για την ατμοποίηση τμήματός της.

Βάσει των ανωτέρω συντάχθηκε υπολογιστικός κώδικας «περιγραφής της ιστορίας της σταγόνας του καυσίμου» μέσα στο θάλαμο καύσεως, ο οποίος καλύπτει τη χρονική περίοδο από την εμφάνιση μέχρι την πλήρη ατμοποίησή της [18,19,20].

IV. Η ανάφλεξη και η καύση

A. Η ανάφλεξη

Ως καθυστέρηση αναφλέξεως ορίζεται το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ της αρχής της εγχύσεως και της αρχής της καύσεως. Η αρχή της εγχύσεως σηματοδοτείται από την μείωση της πίεσεως στη γραμμή του καυσίμου, ενώ η αρχή της καύσεως από την αλλαγή της κλίσεως στην καμπύλη της πίεσεως του θαλάμου καύσεως.

Η ανάφλεξη του καυσίμου έπεται της συγχρόνου εξελίξεως δύο μηχανισμών, ενός φυσικού και ενός χημικού. Ο φυσικός μηχανισμός, ο οποίος έχει ήδη περιγραφεί, περιλαμβάνει το διασκορπισμό του εγχόμενου καυσίμου, την ατμοποίηση των σχηματιζόμενων σταγόνων και την ανάμειξη των ατμών του καυσίμου με τον αέρα. Ο χημικός μηχανισμός περιλαμβάνει τις χημικές αντιδράσεις μεταξύ του καυσίμου και του αέρα, που προηγούνται της καύσεως και οδηγούν σ' αυτήν.

Αν και η ανάφλεξη εμφανίζεται σε περιοχές όπου το καύσιμο είναι ατμοποιημένο, οξειδωτικές αντιδράσεις είναι δυνατό να εξελιχθούν και μεταξύ μορίων υγρού καυσίμου και οξυγόνου διαλυμένου σ' αυτό. Εξάλλου, η πυρόλυση μεγάλων μορίων υδρογονανθράκων, που οδηγεί σε μικρότερα μόρια, ευνοείται από τις συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσεως, οι οποίες επικρατούν στον κύλινδρο. Ως εκ τούτου, σημαντικός είναι ο ρόλος της χημικής συστάσεως του καυσίμου στην εμφάνιση και εξέλιξη των χημικών αντιδράσεων. Η εκτίμηση του μεγέθους της καθυστέρησης στην ανάφλεξη του καυσίμου στηρίχθηκε σε εκτεταμένες εργαστηριακές μετρήσεις στις οποίες μελετήθηκε η επίδραση της πίεσεως, της θερμοκρασίας και της συγκεντρώσεως του οξυγόνου.

Πειραματικές έρευνες κατέληξαν στην ακόλουθη συσχέτιση [7]:

$$\tau = A \cdot P^B \cdot \varphi^C \cdot \exp\left[\frac{D}{T}\right] \quad (30)$$

$$\varphi = \frac{P_{O_2}}{0.21p} \quad (31)$$

όπου P_{O_2} είναι η μερική πίεση του οξυγόνου. Οι σταθερές A, B, C, D εξαρτώνται από το καύσιμο και για το καύσιμο Diesel είναι:

$$A = 0.845$$

$$B = -1.31$$

$$C = -2.02$$

$$D = 4350$$

Στην περίπτωση της (30) όταν η πίεση εκφράζεται σε atm και η θερμοκρασία σε K, η καθυστέρηση αναφλέξεως προκύπτει σε ms.

B. Η ανάμειξη και η καύση

Καθώς εξελίσσεται η ατμοποίηση του καυσίμου, οι παραγόμενοι ατμοί αναμειγνύονται με τον περιβάλλοντα αέρα δημιουργώντας αναφλέξιμο μείγμα. Μετά το πέρας της καθυστέρησης αναφλέξεως εκδηλώνεται η καύση, η οποία εξελίσσεται σε δύο φάσεις:

- Καύση προαναμειχθέντων συστατικών. Κατά τη φάση αυτή καίγονται τα ήδη αναφλέξιμα μείγματα με υψηλούς ρυθμούς εκλύσεως θερμότητας.
- Καύση ελεγχόμενη από την ανάμειξη. Κατά τη φάση αυτή οι ρυθμοί της καύσεως είναι χαμηλότεροι και εξαρτώνται από τους ρυθμούς αναμείξεως, δηλαδή δημιουργίας αναφλέξιμων μειγμάτων.

Το κλάσμα του καυσίμου που καίγεται κατά την πρώτη φάση εκτιμάται από τη σχέση [21]:

$$\beta = 1 - \frac{a \cdot \varphi^b}{\tau^c} \quad (32)$$

όπου φ είναι ο ολικός λόγος ισοδυναμίας αέρα καύσεως. Για τις σταθερές a, b, c προτείνονται οι τιμές

$$a = 0.90$$

$$b = 0.35$$

$$c = 0.40$$

V. Συμπεράσματα

Η υπολογιστική ισχύς των σύγχρονων συστημάτων πληροφορικής υποστηρίζει τη δημιουργία και την εκτεταμένη εφαρμογή προγραμμάτων προσομοίωσης της πραγματικής λειτουργίας των κινητήρων diesel. Θεωρητικές προτάσεις και πειραματικά δεδομένα συνεισφέρουν στην ανάπτυξη ειδικών αλγορίθμων και τη συγκρότηση «έμπειρων» και «ευφών» συστημάτων, απεικονιστικών της φυσικής πραγματικότητας, τα οποία χαρακτηρίζονται από προγνωστικές και διαγνωστικές δυνατότητες. Το σύνολο των μαθηματικών σχέσεων που περιέχονται στην παρούσα εργασία εντάσσονται σε πρόγραμμα προσομοίωσης της θερμοδυναμικής λειτουργίας των κινητήρων diesel.

Αναφορές

1. Heywood, J.B., “*Internal Combustion Engine Fundamentals*”, McGraw Hill, New York, 1988.
2. Arai, M., Tabata, M., Hiroyasu, H. and Shimizu, M., “*Disintegrating Process and Spray Characterization of Fuel Jet Injected by a Diesel Nozzle*”, SAE paper 850126, 1985.
3. Chehroudi, B., Chen, S.H., Bracco, F.V. and Onuma, Y., “*On the Intact Core of Full-Cone Sprays*”, SAE paper 850126, 1985.
4. Hiroyasu, H. and Arai, M., “*Fuel Spray Penetration and Spray Angle in Diesel Engines*”, Trans. of JSME, vol. 21, 1980.
5. Hiroyasu, H., Kadota, T. and Arai, M., “*Development and Use of a Spray Combustion Modeling to Predict Diesel Engine Efficiency and Pollutant Emissions: Part 2. Computational Procedure and Parametric Study*”, Bull. of JSME, vol. 26-214, pp. 576-583, 1983.
6. Dent, J.C., “*A Basis for the Comparison of Various Experimental Methods for Studying Penetration*”, SAE paper 710571, 1971.

7. Hiroyasu, H., Kadota, T. and Arai, M., "*Supplementary Comments: Fuel Spray Characterization in Diesel Engines*", in J.N. Mattavi and C.A. Amman (eds.) *Combustion Modeling in Reciprocating Engines*, pp. 369-408, Plenum Press, 1980.
8. Hiroyasu, H., Arai, M. and Tabata, M., "*Empirical Equation for the Sauter Mean Diameter of a Diesel Spray*", SAE paper 890464, 1989.
9. Borman, G.L. and Johnson, J.H., "*Unsteady Vaporization Histories and Trajectories of Fuel Drops Injected into Swirling Air*", SAE paper 598C, 1962.
10. El Wakil, M.M., Myers, P.S. and Uyehara, O.A., "*Fuel Vaporization and Ignition Lag in Diesel Combustion*", in *Burning a Wide Range of Fuels in Diesel Engines*, vol. 11, pp. 30-44, SAE, 1967.
11. Kamimoto, T. and Matsuoka, S., "*Prediction of Spray Evaporation in Reciprocating Engines*", SAE paper 770413, 1977.
12. Arai, M., Tabata, M., Hiroyasu, H. and Shimizu, M., "*Disintegrating Process and Spray Characterization of Fuel Jet Injected by a Diesel Nozzle*", SAE paper 840275, 1984.
13. Bracco, F.V., "*Modeling of Engine Sprays*", SAE paper 850394, 1985.
14. Kouremenos, D.A., Rakopoulos, C.D., Hountalas, D.T. and Yfantis E.A., "*Computational Determination of Jet Trajectory and Droplet Evaporation Rates Inside the Combustion Chambers of an Indirect Injection Diesel Engine*". International Conference on the "Analysis of Thermal and Energy Systems", June 3-6, 1991, Proc. pp. 475-501, Athens, 1991.
15. Rakopoulos, C.D., Hountalas, D.T. and Yfantis, E.A., "*Comparison of Fuel Droplet Evaporation Rates Obtained When Considering Single and Multiple Droplet Evaporation*". International Conference on the "Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems", Konstantinoupolis, July 11-14, 1995, Proc. Vol. 2, pp. 683-688.
16. Rakopoulos, C.D., Yfantis, E.A. and Hountalas, D.T., "*Computational Determination of the Effect of Fuel Preheating on Droplet Evaporation Rates Inside a Diesel Engine Combustion Chamber*". International Conference on the "Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems", Konstantinoupolis, July 11- 14, 1995, Proc. Vol. 2, pp. 689-694.
17. Faeth, G.M., "*Evaporation and Combustion of Sprays*", *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 9, pp. 1-76, 1983.
18. Kouremenos, D.A., Rakopoulos, C.D., and Yfantis E.A., "*A Fortran Program for Calculating the Evaporation Rates in Diesel Engine Fuel Sprays*", *Advances in Engineering Software International Journal*, Vol.15, pp.67-71, 1992.
19. Kouremenos, D.A., Rakopoulos, C.D., Hountalas, D.T. and Yfantis, E.A., "*Evaluation Results of the Application of an Engine Diagnosis- Simulation Model on Different Types of Diesel Engines*". 3rd International Conference on "Innovation and Reliability in Automotive Design and Testing", FISITA, Florence Italy, April 8-10, 1992, Proc. Vol. 1, pp. 615-627.
20. E.A.Yfantis, "*Sophisticated Diagnostic Techniques for Marine Diesel Engines*", 5th MEKO User Workshop, 17-21 September 2001, Athens, Greece.
21. Watson, N., Pilley, A.D. and Marzouk, M., "*A Combustion Correlation for Diesel Engine Simulation*", SAE paper 800029, 1980.

Σύντομο Βιογραφικό Σημείωμα

Ηλίας Αρ. Υφαντής. Ο Ηλίας Υφαντής γεννήθηκε στην Αθήνα το 1964 και είναι έγγαμος με δύο παιδιά. Είναι Διπλωματούχος Μηχανολόγος Μηχανικός του Ε.Μ.Π. (Λίαν Καλώς, 1987) και Διδάκτωρ Μηχανικός του Ε.Μ.Π. (Άριστα, 1991). Εξελέγη Καθηγητής Ναυτικών Μηχανών και Διευθυντής του Εργαστηρίου Ναυτικών Μηχανών της Σ.Ν.Δ. το 1995. Είναι μέλος του Εκπαιδευτικού Συμβουλίου της Σ.Ν.Δ. από το 1999 και το 2004 εξελέγη Κοσμήτορας της Σχολής. Διετέλεσε Πρόεδρος του Συλλόγου Δ.Ε.Π. της Σ.Ν.Δ. μεταξύ 1997 και 2004. Ο Ηλίας Υφαντής είναι μέλος των (α) American Society of Mechanical Engineers (ASME), (β) New York Academy of Science, (γ) Combustion Institute και (δ) Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος. Εκπροσωπεί την Ελλάδα σε Επιτροπές του Applied Vehicle Technology (AVT) Panel του Research & Technology Organization (RTO) του NATO από το 1997 και μετέχει στο International Advisory Board του “Centre for Gas Turbine Diagnostics and Life Cycle Cost” του Cranfield University από το 2003. Έχει μετάσχει σε Οργανωτικές και Επιστημονικές Επιτροπές Διεθνών Επιστημονικών Συνεδρίων και ως προσκεκλημένος ομιλητής. Τα ερευνητικά του ενδιαφέροντα εκτείνονται στις περιοχές (α) θερμοδυναμική και καύση, (β) προσομοίωση λειτουργίας και διαγνωστική κινητήρων και (γ) συγκρότηση εικονικών εργαστηρίων και έχει δημοσιεύσει 35 επιστημονικές εργασίες σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά και σε πρακτικά διεθνών συνεδρίων με κριτές. Συνεργάζεται με το Εργαστήριο Μηχανών Εσωτερικής Καύσεως και το Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π.

Διαθέσιμες τεχνολογίες συμπαραγωγής

Γ. Ν. Μαλαχίας, Ι. Σ. Κατσάνης

Περίληψη

Το παρόν άρθρο ασχολείται με τις διαθέσιμες τεχνολογίες συμπαραγωγής και, ειδικότερα, με τη συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Εξετάζει τους βασικούς παράγοντες, τα κριτήρια επιλογής καθώς επίσης και τις τεχνολογίες των συστημάτων συμπαραγωγής, όπως συστήματα ατμοστροβίλων και αεριοστροβίλων με λέβητα ανάκτησης θερμότητας (με ή χωρίς συμπληρωματική καύση). Περαιτέρω, εξετάζει το σύστημα αεριοστροβίλου με απευθείας χρήση των απαερίων καθώς και το σύστημα αεριοστροβίλου κλειστού κύκλου. Αναλύονται ακόμη οι μονάδες συνδυασμένου κύκλου. Επιπλέον, αντικείμενο της εργασίας αυτής αποτελούν τα συστήματα συμπαραγωγής με MEK (κινητήρες Otto και Diesel) και η ανάκτηση θερμότητας καθώς επίσης και αυτά της μικρής κλίμακας. Τέλος, επιχειρείται μια συγκριτική ανάλυση των τεχνολογιών συμπαραγωγής και αναφέρονται τα συγκριτικά χαρακτηριστικά των μονάδων αυτής, ενώ ορίζονται ο βαθμός εξοικονόμησης και ο συντελεστής εκμετάλλευσης καυσίμου για ηλεκτροπαραγωγή.

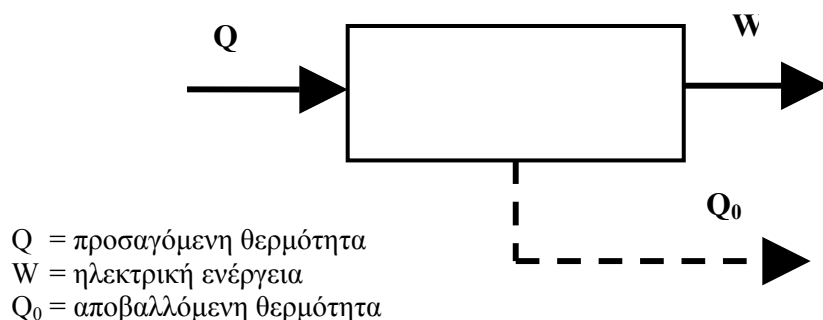
Abstract

This work is referred to available cogeneration techniques and specifically to the cogeneration of heat and power in industry. It examines the basic elements and the selection criteria for the type of cogeneration systems and the respective elements i.e. steam turbine systems or gas turbine systems (open cycle vice closed cycle gas turbine cogeneration systems). Furthermore the combined cycle, the reciprocating internal combustion engine and the small scale cogeneration systems are examined. Finally a comparison of the efficiency and the technical and operational characteristics of various cogeneration systems technologies is outlined.

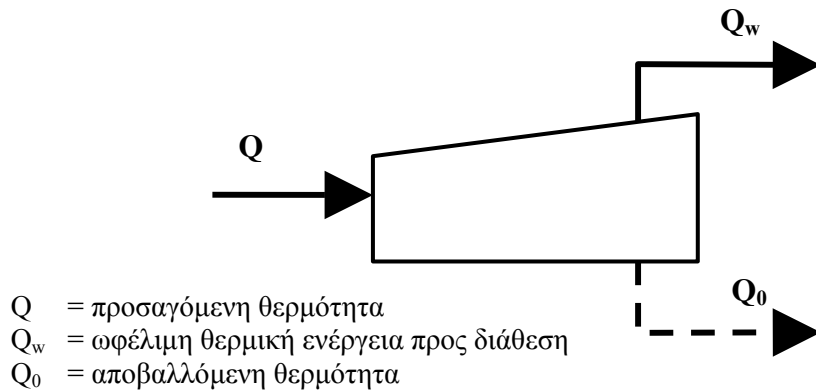
I. Εισαγωγή

Με τον όρο Συμπαραγωγή (“Cogeneration”) εννοούμε τη σύγχρονη παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας για την αντιμετώπιση των αναγκών μιας εγκατάστασης.

Στην κλασική περίπτωση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση θερμοκινητήρα, σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα, θα έχουμε βαθμό απόδοσης $\eta_e = W/Q$:



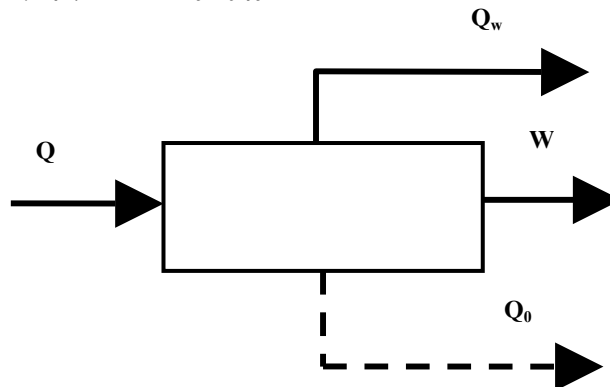
Στην περίπτωση παραγωγής θερμικής ενέργειας (π.χ. ατμού), με πρόσδοση θερμότητας (π.χ. με καύση πετρελαίου ή αερίου), σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα, θα έχουμε βαθμό απόδοσης θερμικής ενέργειας $\eta_{\theta} = Q_w/Q$:



Στην περίπτωση μονάδας συμπαραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας, θα έχουμε:

- α. Πρόσδοση θερμότητας Q (με την καύση πετρελαίου ή αερίου).
- β. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας W .
- γ. Παραγωγή ωφέλιμης θερμικής ενέργειας Q_w .
- δ. Αποβαλλόμενη θερμική ενέργεια Q_0 .

Η ενεργειακή εξίσωση διαμορφώνεται ως εξής: $Q = W + Q_w + Q_0$.



Ο βαθμός απόδοσης της συμπαραγωγής (η_c) ορίζεται ως ο λόγος της συνολικά διατιθέμενης ενέργειας (ηλεκτρικής και θερμικής) προς την προσδιδόμενη συνολικά θερμότητα Q , δηλαδή:

$$\eta_c = (W + Q_w) / Q = (Q - Q_0) / Q = 1 - Q_0 / Q$$

Από τον παραπάνω τύπο διαφαίνεται ότι ο βαθμός απόδοσης της συμπαραγωγής είναι πολύ μεγαλύτερος των επί μέρους βαθμών απόδοσης της ηλεκτρικής και της θερμικής ενέργειας. Εάν π.χ. περιορίσουμε την αποβαλλόμενη θερμική ενέργεια Q_0 στο 10% της ολικά προσδιδόμενης θερμότητας Q , θα έχουμε συνολικό βαθμό απόδοσης της συμπαραγωγής:

$$\eta_c = 1 - 0,10 = 0,90, \text{ δηλαδή } 90\%.$$

Αυτό προϋποθέτει ότι θα καταναλώνεται από τον καταναλωτή το σύνολο τόσο της ηλεκτρικής όσο και της θερμικής ενέργειας. Επομένως, μονάδες συμπαραγωγής είναι χρήσιμο να εγκατασταθούν σε εργοστάσια, νοσοκομεία, ξενοδοχεία, σχολικά συγκροτήματα κ.λπ. που έχουν τέτοια δυνατότητα /ανάγκη κατανάλωσης.

Συντελεστής συμπαραγωγής (CHF) ονομάζεται ο λόγος της ωφέλιμης θερμικής ενέργειας προς την ηλεκτρική ενέργεια, δηλαδή:

$$\text{CHF} = Q_w / W$$

Ο αντίστροφος λόγος W/Q_w , ονομάζεται “λόγος ηλεκτρικού προς θερμικό φορτίο”. Επομένως, ο βαθμός απόδοσης της συμπαραγωγής θα μπορεί να εκφραστεί από τη σχέση:

$$n_c = [W (1 + \text{CHF})] / Q = n_e (1 + \text{CHF})$$

όπου n_e ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης που θα είχαμε στην περίπτωση παραγωγής μόνο ηλεκτρικής ενέργειας.

Στις περισσότερες μονάδες συμπαραγωγής η ζητούμενη θερμική ενέργεια είναι συνήθως μεγαλύτερη της ηλεκτρικής. Δηλαδή είναι: $\text{CHF} > 1$.

Στην πράξη είναι δύσκολο να προσαρμόζεται συνεχώς η εγκατάσταση συμπαραγωγής στην παραγωγή καθορισμένων ποσοτήτων ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας, και για το λόγο αυτό θα προκύπτει μία από τις παρακάτω περιπτώσεις:

- α. Επάρκεια ηλεκτρικής ενέργειας και μη επαρκής κάλυψη της απαίτησης σε θερμική ενέργεια, οπότε θα πρέπει να καλυφθεί η υπόλοιπη ποσότητα με άλλη θερμική συσκευή.
- β. Ανεπάρκεια ηλεκτρικής ενέργειας και επάρκεια θερμικής ενέργειας, οπότε το υπόλοιπο της ηλεκτρικής ενέργειας θα καλυφθεί από τη ΔΕΗ.
- γ. Υπερέπάρκεια ηλεκτρικής ενέργειας και επάρκεια θερμικής ενέργειας, οπότε η πλεονάζουσα ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να πωληθεί στη ΔΕΗ.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι για κάθε εγκατάσταση απαιτείται ειδική μελέτη για να εξακριβωθεί η καταλληλότερη λειτουργικά και οικονομικά λύση, αφού ληφθούν υπόψη οι εκάστοτε ειδικές συνθήκες.

II. Θεωρητική ανάλυση τυπικών συστημάτων συμπαραγωγής

Θα εξετάσουμε εδώ από θερμοδυναμικής πλευράς τρεις βασικές τυπικές διατάξεις συστημάτων συμπαραγωγής.

A. Εγκατάσταση ατμοστροβίλου με απομάστευση ατμού από το στρόβιλο και διάθεση για την κάλυψη θερμικών αναγκών

Έστω ότι η απομαστευόμενη μάζα είναι m , η οποία απομαστεύεται υπό πίεση P_8 και ενθαλπία i_4 , και η οποία έρχεται τελικά στο ψυγείο με ενθαλπία i_4' , οπότε η διατιθέμενη θερμική ενέργεια θα είναι:

$$m (i_4 - i_4')$$

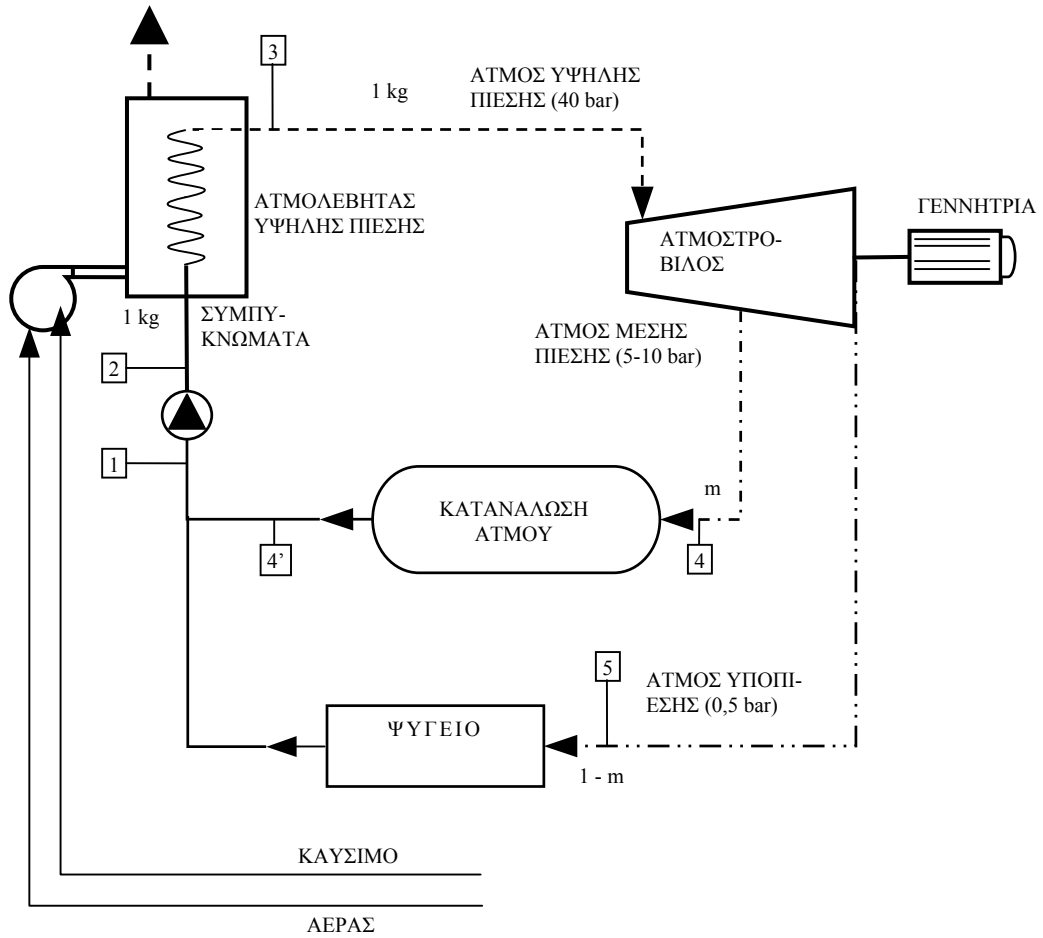
Το έργο του στροβίλου θα είναι:

$$i_3 - i_4 + (1 - m) (i_4 - i_5)$$

και η προσδιδόμενη συνολικά θερμότητα θα είναι:

$$Q = i_3 - i_2$$

Παρακάτω παρουσιάζεται σε σχηματικό διάγραμμα μία τυπική διάταξη του συστήματος αυτού.



Σχήμα 3: Σχηματικό διάγραμμα συστήματος συμπαραγωγής με αμοστρόβιλο απομάστευσης.

Η ηλεκτρική ενέργεια θα είναι το έργο του στροβίλου μείον το έργο της αντλίας, δηλαδή:

$$W = i_3 - i_4 + (1 - m) (i_4 - i_5) - (i_2 - i_1)$$

Η συνολική ενέργεια συμπαραγωγής θα είναι:

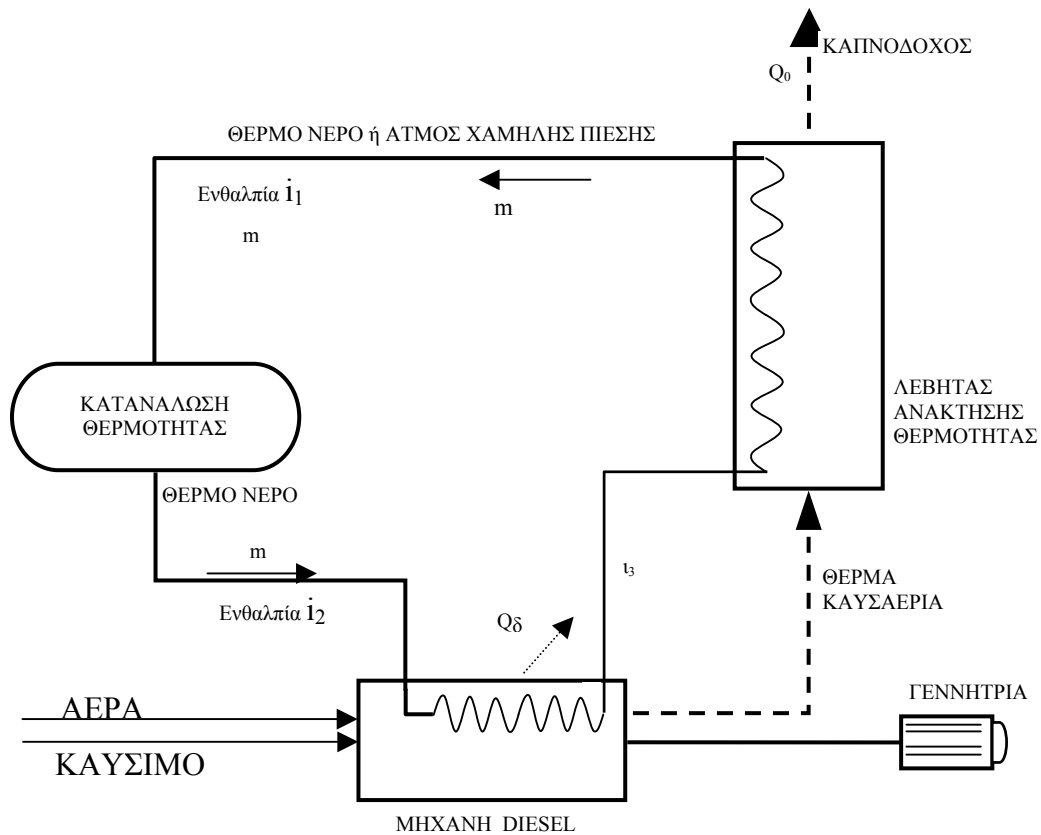
$$W + Q_w = i_3 - i_4 + (1 - m) (i_4 - i_5) - (i_2 - i_1) + m (i_4 - i_{4'})$$

Και, τέλος, βαθμός απόδοσης της συμπαραγωγής θα είναι:

$$n_c = \frac{(W + Q_w)}{Q} = \frac{[i_3 - i_4 + (1 - m) \times (i_4 - i_5) - (i_2 - i_1) + m(i_4 - i_{4'})]}{i_3 - i_2}$$

Β. Εγκατάσταση Διζελογεννήτριας με λέβητα ανάκτησης της θερμότητας των καυσαερίων και παροχή ατμού στην εγκατάσταση

Παρακάτω παρουσιάζεται σε σχηματικό διάγραμμα μία τυπική διάταξη του συστήματος αυτού.



Σχήμα 2: Σχηματικό διάγραμμα συστήματος συμπαραγωγής με μηχανή Diesel και λέβητα ανάκτησης θερμότητας.

Η ωφέλιμη θερμική ενέργεια θα είναι:

$$Q_w = (i_1 - i_2) m$$

Έστω W η συνολικά παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα.
Η συνολικά προσδιδόμενη θερμότητα θα είναι:

$$Q = m_k H_0$$

Όπου, m_k : παροχή του καυσίμου
 H_0 : κατώτερη θερμογόνο δύναμη

Θα έχουμε

$$Q_w + W = (i_1 - i_2) m + W$$

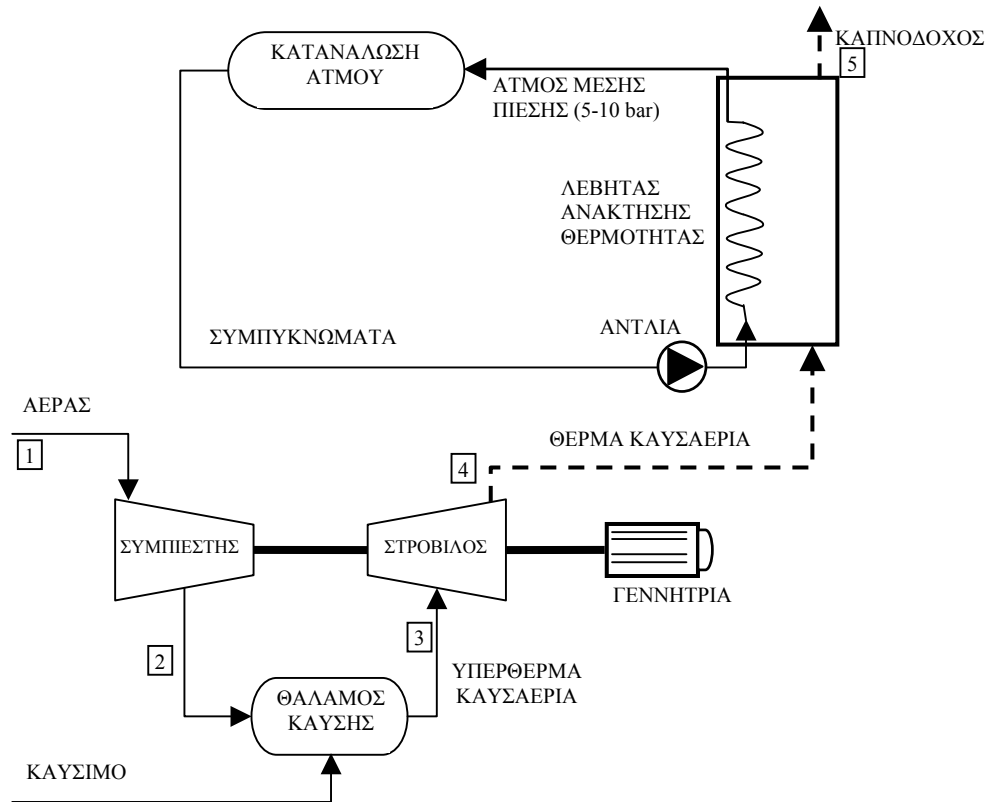
Και ο βαθμός αποδόσεως της συμπαραγωγής θα είναι:

$$n_c = \frac{Q_w + W}{Q} = \frac{[m (i_1 - i_2) + W]}{m_k H_0}$$

η θερμότητα απωλειών θα είναι συνολικά $Q_0 + Q_\delta$

Γ. Εγκατάσταση αεριοστροβίλου με λέβητα ανάκτησης της θερμότητας των καυσαερίων και παροχή ατμού στην εγκατάσταση

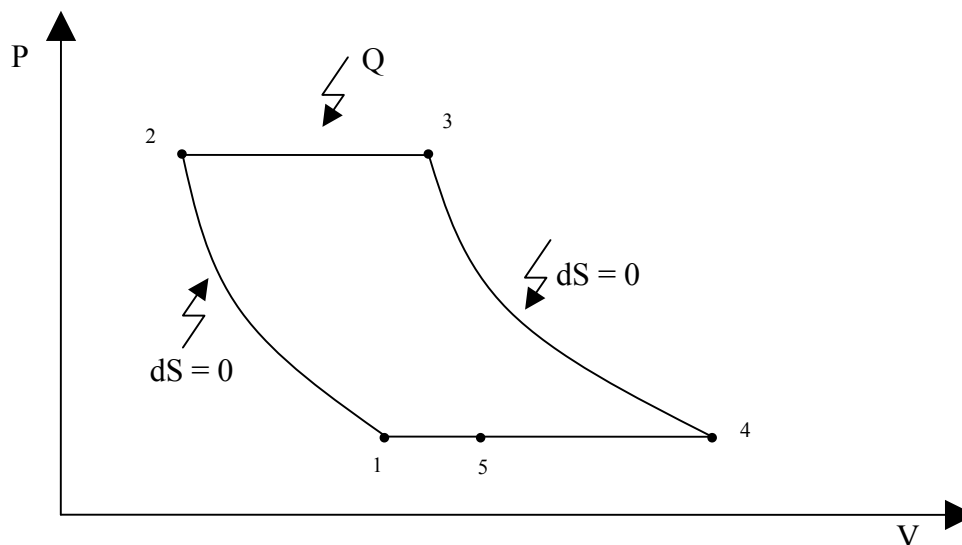
Παρακάτω παρουσιάζεται σε σχηματικό διάγραμμα μία τυπική διάταξη του συστήματος αυτού.



Σχήμα 3: Σχηματικό διάγραμμα συστήματος συμπαραγωγής με αεριοστροβίλο και λέβητα ανάκτησης θερμότητας.

Το θερμοδυναμικό διάγραμμα λειτουργίας του αεριοστροβίλου στο επίπεδο P-V φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί. Οι διαδρομές που απεικονίζονται είναι:

- 1 → 2 Αδιαβατική συμπίεση (αεροσυμπιεστής).
- 2 → 3 Θάλαμος καύσεως (ισόθλιπτη καύση).
- 2 → 4 Αδιαβατική εκτόνωση (στροβίλος).
- 4 → 5 Λέβητας (παροχή θερμότητας από καυσαέρια).
- 5 → 1 Έξοδος στην ατμόσφαιρα (ισόθλιπτη ψύξη).



Σχήμα 4: Θερμοδυναμικό διάγραμμα λειτουργίας του αεριοστροβίλου στο επίπεδο P-V.

Με βάση τα παραπάνω έχουμε:

Προσδιδόμενη θερμότητα $Q = Q_{2,3} = m_s (i_3 - i_2) = m_s c_p (T_3 - T_2)$.

Έργο συμπίεστη $|L_{12}| = m_s (i_2 - i_1) = m_s c_p (T_2 - T_1)$, όπου m_s είναι η μάζα του αέρα.

Έργο στροβίλου $L_{34} = m_s (i_3 - i_4) = m_s c_p (T_3 - T_4)$.

Έργο γεννήτριας $W = L_{34} - |L_{12}| = m_s (i_3 - i_4 - i_2 + i_1) = m_s c_p (T_3 - T_4 - T_2 + T_1)$.

Ωφέλιμη θερμική ενέργεια $Q_w = |Q_{45}| = m_s (i_4 - i_5) = m_s c_p (T_4 - T_5)$.

Συντελεστής συμπαραγωγής:

$$\text{CHF} = Q_w / W = m_s c_p (T_4 - T_5) / [m_s c_p (T_3 - T_4 - T_2 + T_1)] = (T_4 - T_5) / (T_3 - T_4 - T_2 + T_1)$$

Τέλος, ο βαθμός απόδοσης της συμπαραγωγής θα είναι:

$$n_c = (Q_w + W) / Q = (i_3 - i_2 - i_5 + i_1) / (i_3 - i_2) = 1 - [(i_5 - i_1) / (i_3 - i_2)]$$

ή και με βάση τις θερμοκρασίες θα έχουμε:

$$n_c = 1 - (T_5 - T_1) / (T_3 - T_2)$$

III. Συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας στη βιομηχανία

A. Γενικά περί συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας στη βιομηχανία

Η βιομηχανία αποτελεί ένα σημαντικό καταναλωτή ενέργειας με τη μορφή ηλεκτρικής ισχύος και θερμότητας. Η κάλυψη των θερμικών αναγκών γίνεται σχεδόν πάντοτε από εγκαταστάσεις της ίδιας της επιχείρησης είτε έμμεσα με θερμό νερό, ατμό ή θερμικό λάδι, είτε άμεσα με την καύση στερεών, υγρών ή αερίων καυσίμων. Η απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύς καλύπτεται συνήθως με τη σύνδεση της μονάδας με το τοπικό δίκτυο Μέσης Τάσης της ΔΕΗ (20KV και πιο σπάνια 6,6kV). Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι επιχειρήσεις έχουν εγκατεστημένο Η/Ζ, συνήθως πετρελαιομηχανή Diesel, για κάλυψη τυχόν έκτακτων περιπτώσεων διακοπής ρεύματος.

Η διαρκώς αυξανόμενη ανάγκη για ορθολογική χρήση ενέργειας αλλά και για μείωση του κόστους παραγωγής οδήγησε τα τελευταία χρόνια τις βιομηχανίες που παρουσιάζουν ταυτόχρονη ζήτηση

ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας να μελετήσουν και να υλοποιήσουν την εγκατάσταση μονάδων που θα παράγουν ταυτόχρονα ηλεκτρική και θερμική ενέργεια, αξιοποιώντας στο μέγιστο δυνατό βαθμό (άνω του 80%) το χρησιμοποιούμενο καύσιμο. Η συνδυασμένη αυτή παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού (Combined Heat and Power, C.H.P.), δηλαδή η συμπαραγωγή, περιλαμβάνει μονάδες **κορυφής** (topping cycle) και μονάδες **βάσης** (bottoming cycle).

Στις μονάδες κορυφής η ενέργεια του καυσίμου χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρισμού και η απορριπτόμενη θερμότητα ικανοποιεί τις ανάγκες των θερμικών διαδικασιών (συνήθως καλύπτοντας μερικώς τα θερμικά φορτία). Αντίθετα, στις μονάδες βάσης η ενέργεια χρησιμοποιείται πρώτα για την ικανοποίηση των θερμικών αναγκών μιας παραγωγικής διαδικασίας υψηλών θερμοκρασιών και η υπολειπόμενη θερμότητα χρησιμοποιείται στη συνέχεια για την παραγωγή ισχύος.

Συνήθως, οι μονάδες κορυφής προσφέρουν μεγαλύτερο περιθώριο για εξοικονόμηση ενέργειας και είναι οι πλέον διαδεδομένες, λόγω του εύρους των διαθέσιμων κατάλληλων τεχνολογιών και της υψηλής οικονομικότητας των σχετικών επενδύσεων, ενώ, προκειμένου για τη χρήση μονάδων βάσης, οι διαδικασίες υψηλών θερμοκρασιών συναντώνται σε λίγες εξειδικευμένες βιομηχανικές μονάδες.

B. Βασικοί παράγοντες και κριτήρια επιλογής

Στην επιλογή και στο σχεδιασμό ενός συστήματος συμπαραγωγής εμπλέκονται αρκετοί παράγοντες που καθορίζουν το σχεδιασμό και τη χρήση ενός τέτοιου συστήματος το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί από μία βιομηχανική μονάδα. Ακολουθεί συνοπτική περιγραφή των κυριότερων από τους παράγοντες αυτούς:

1. **Ο λόγος του ηλεκτρικού προς το θερμικό φορτίο (Η/Θ)** και η μεταβολή τους στον κύκλο λειτουργίας της μονάδας, που αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την επιλογή της πλέον κατάλληλης τεχνολογίας.
2. **Η λειτουργία της επιχείρησης**, δηλαδή το ωράριο λειτουργίας της επιχείρησης (π.χ. 24 ώρες την ημέρα, 7 ημέρες την εβδομάδα, 11 μήνες το χρόνο), στοιχείο που επηρεάζει τόσο την επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας και τον τρόπο λειτουργίας της όσο και την οικονομικότητά της.
3. **Η διακύμανση των ηλεκτρικών και θερμικών φορτίων** κατά τη διάρκεια του μήνα. Στην περίπτωση των σοβαρών διακυμάνσεων των φορτίων και ανάλογα με το μέγεθος της μονάδας, θα έχουμε είτε αναγκαστική πώληση ηλεκτρικού ρεύματος στη ΔΕΗ σε τιμές κάτω του κόστους, είτε στιγμιαία αγορά ηλεκτρικού ρεύματος από τη ΔΕΗ (και χρέωση ισχύος), με δυσμενείς επιπτώσεις στο τελικό οικονομικό όφελος από τη λειτουργία της μονάδας. Σε περιπτώσεις με σημαντικές διακυμάνσεις, που συμβαίνουν σπάνια, αντιμετωπίζεται και το πρόβλημα της εναλλασσόμενης διακοπής και επαναλειτουργίας της μονάδας.
4. **Το κόστος και η διαθεσιμότητα των καυσίμων** και των εκτιμήσεων για τα μεγέθη αυτά στα επόμενα χρόνια (π.χ. ενδεχόμενη καθυστέρηση της λειτουργίας του αγωγού ΦΑ). Σημαντικό παράγοντα αποτελεί επίσης ενδεχόμενη αύξηση των τιμών των καυσίμων για φορολογικούς ή γενικότερα για εισπρακτικούς λόγους ή ακόμα και λόγω της αύξησης των διεθνών τιμών του αργού πετρελαίου.
5. **Το θεσμικό πλαίσιο** που διέπει τις σχέσεις με τη ΔΕΗ και τη δυνατότητα ιδιοπαραγωγής. Όπως αναφέρεται αναλυτικότερα στο σχετικό κεφάλαιο, η οικονομικότητα αλλά ενδεχομένως και το μέγεθος της μονάδας θα επηρεαστούν σημαντικά εάν τροποποιηθεί το ισχύον θεσμικό πλαίσιο (αν π.χ. επιτραπεί η πώληση ηλεκτρικής ενέργειας από καταναλωτή-ιδιοπαραγωγό σε καταναλωτή).
6. **Το χρηματικό κόστος** που επικεντρώνεται στα πολύ υψηλά, για τα ευρωπαϊκά δεδομένα, επιτόκια δανεισμού των επιχειρήσεων από τις τράπεζες.
7. Τυχόν **Κοινοτικά ή Εθνικά προγράμματα επιχορήγησης σχετικών επενδύσεων**, διαθεσιμότητα των σχετικών κονδυλίων, επιλεξιμότητα των δαπανών και τυχόν τροποποίησή τους μέχρι την υλοποίηση της επένδυσης.

Ακολούθως, αναφέρονται οι τρεις βασικές **προσεγγίσεις** για την επιλογή και λειτουργία μονάδων συμπαραγωγής σε βιομηχανικές μονάδες:

Η πρώτη προσέγγιση είναι ο σχεδιασμός ενός συστήματος ικανού να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις φορτίου αιχμής και συνδεδεμένου με το δίκτυο της ΔΕΗ, προκειμένου να εμπορεύεται την πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια αλλά και να καλύπτει τυχόν στιγμιαίες αιχμές φορτίου. Η επιπλέον ηλεκτρική ενέργεια μπορεί είτε να αγοραστεί από τη ΔΕΗ, ώστε η τελευταία να την μεταπωλήσει στους πελάτες της, είτε να μεταφερθεί από το δίκτυο της ΔΕΗ σε άλλο χρήστη (πράγμα που αποκλείεται από την ισχύουσα ελληνική νομοθεσία). Ο συγκεκριμένος τρόπος λειτουργίας της μονάδας παρέχει τη μεγαλύτερη δυνατή ευελιξία και εξοικονόμηση καυσίμου έναντι των άλλων, εξαιτίας της μεγαλύτερης οικονομικότητάς του και εξαιτίας του γεγονότος ότι παρέχει –υπό προϋποθέσεις– τη δυνατότητα ανεξαρτητοποίησης της βιομηχανίας από τη ΔΕΗ.

Σύμφωνα με τη δεύτερη προσέγγιση, αυτό που επιδιώκεται από βιομηχανικές επιχειρήσεις είναι ένα σύστημα συμπαραγωγής συνδεδεμένο με το δίκτυο της ΔΕΗ για την ικανοποίηση των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια οι οποίες δεν καλύπτονται από το σύστημα συμπαραγωγής. Στην περίπτωση αυτή, η μονάδα επιλέγεται έτσι ώστε να καλύπτει το σύνθετο ηλεκτρικό φορτίο βάσης, καλύπτοντας ταυτόχρονα τις αιχμές από το δίκτυο. Επιπλέον, στην περίπτωση αυτή, μπορεί να απαιτηθεί συμπληρωματική θερμική ενέργεια με χρήση εξοπλισμού που συνήθως είναι σε κατάσταση stand-by, γεγονός που αυξάνει το κόστος επένδυσης.

Η τρίτη προσέγγιση είναι ο σχεδιασμός ενός συστήματος ανεξάρτητου από το ηλεκτρικό δίκτυο. Αν και η σχεδίαση που βασίζεται στο κριτήριο αυτό ελαχιστοποιεί τα προβλήματα που έχουν σχέση με την επίτευξη ικανοποιητικών συμφωνιών με τη ΔΕΗ, απαιτεί υπερδιαστασιολόγηση του βασικού εξοπλισμού και επιπλέον εφεδρικό εξοπλισμό για την κάλυψη των φορτίων βάσης σε περίπτωση βλάβης ή/και συντήρησης της βασικής μονάδας συμπαραγωγής. Στην περίπτωση αυτή, η επένδυση αν και περισσότερο δαπανηρή, είναι δυνατόν να αποδειχθεί συμφέρουσα υπό ορισμένες προϋποθέσεις.

IV. Τεχνολογίες συστημάτων συμπαραγωγής

Οι βασικές τεχνολογίες συμπαραγωγής χαρακτηρίζονται από τη μονάδα ηλεκτροπαραγωγής που χρησιμοποιούν, δηλαδή είναι είτε ατμοστρόβιλοι είτε μηχανές εσωτερικής καύσης (Diesel και Otto):

A. Συστήματα ατμοστρόβιλου

1. Γενική περιγραφή

Κορεσμένος ατμός υψηλής πίεσης (40-100 bar) παράγεται σε λέβητα, διέρχεται από υπερθερμαντήρα και στη συνέχεια εκτονώνεται στο στρόβιλο που κινεί τη γεννήτρια. Ο εξερχόμενος ατμός έχει πίεση κατάλληλη για τις ανάγκες της παραγωγής (συνήθως 3,5-10 bar). Θερμοδυναμικά, ο κύκλος της λειτουργίας του συστήματος είναι ο βελτιωμένος κύκλος Rankine.

Τα συστήματα συμπαραγωγής με ατμοστρόβιλο κατατάσσονται στις ακόλουθες τρεις κατηγορίες, ανάλογα με τη λειτουργία του ατμοστρόβιλου:

- α. Ατμοστρόβιλος αντίθλιψης.
- β. Ατμοστρόβιλος απομάστευσης.
- γ. Ατμοστρόβιλος σε κύκλο βάσης.

Το κυριότερο πλεονέκτημα των συστημάτων αυτών είναι ότι μπορούν να χρησιμοποιήσουν ποικίλα καύσιμα, μεταξύ των οποίων άνθρακα και καύσιμα βιομηχανικά απόβλητα (από εκκοκιστήρια, ελαιοτριβεία, μονάδες επεξεργασίας ξύλου κ.λπ.).

Μειονέκτημα των συστημάτων αυτών είναι η μειωμένη ευελιξία σε κυμαινόμενα φορτία. Το μέγεθος της μονάδας δεν μπορεί να είναι μικρότερο των 0,5 MW, ενώ για τις περισσότερες κατασκευάστριες εταιρείες το όριο αυτό είναι 1 MW.

Παρά την ευελιξία στην επιλογή και χρήση καυσίμων χαμηλού κόστους, ο σχεδιασμός της εγκατάστασης εξαρτάται από το χρησιμοποιούμενο καύσιμο σε ό,τι αφορά τις επενδύσεις περιορισμού των εκλυόμενων ρύπων. Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται φθηνό καύσιμο (άνθρακας ή καύσιμα βιομηχανικά απόβλητα), απαιτούνται δαπανηρές εγκαταστάσεις για τον περιορισμό των εκπομπών NO_x και SO_x.

Τα συστήματα αυτά παρουσιάζουν σχετικά υψηλό ολικό βαθμό απόδοσης (60-85%), που διατηρείται σχετικά σταθερός και στις περιπτώσεις μερικού φορτίου. Ενδείκνυται για μεγάλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις (π.χ. χαρτοποιίες) με μικρό λόγο Η/Θ, δεδομένου ότι ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης του συστήματος κυμαίνεται μεταξύ 15-25%. Αύξηση του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης μπορεί να επιτευχθεί με αύξηση της πίεσης και θερμοκρασίας του ατμού στην είσοδο του αμοστρόβιλου.

2. Περιοχή ισχύος και βαθμός διαθεσιμότητας

Συστήματα συμπαραγωγής με αμοστρόβιλο κατασκευάζονται από 500 kW-100 MW, ενώ για βιομηχανική χρήση η συνηθέστερη περιοχή ισχύος είναι μεταξύ 1-20 MW.

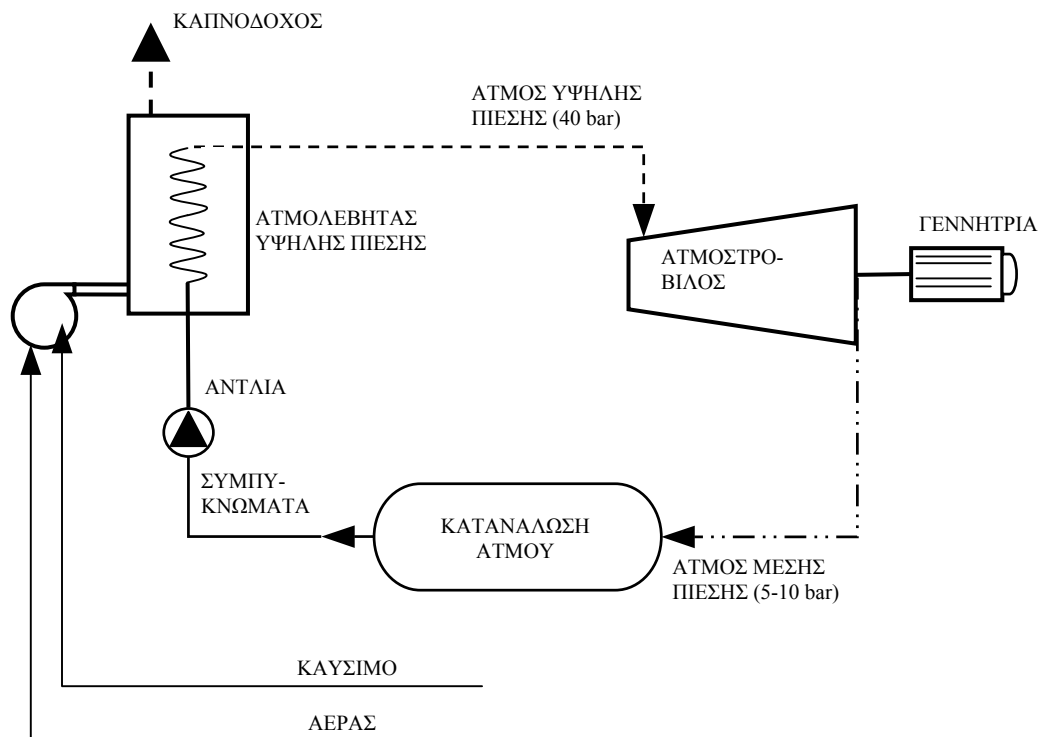
Τα συστήματα αμοστρόβιλου παρουσιάζουν υψηλό βαθμό διαθεσιμότητας που φθάνει το 95% και μεγάλη διάρκεια ζωής (25-30 χρόνια), ενώ ο απαιτούμενος χρόνος για την εγκατάσταση και λειτουργία του συστήματος είναι απαγορευτικά μεγάλος για πολλές βιομηχανικές εγκαταστάσεις (από 12 μήνες έως 3 χρόνια για μεγάλα συστήματα).

Επιπλέον, η επιλογή του καυσίμου επηρεάζει το βαθμό διαθεσιμότητας του συστήματος και τη συνολική διάρκεια ζωής του αμοστροβίλου, με τις καλύτερες επιδόσεις να επιτυγχάνονται με το φυσικό αέριο και το LPG, ενώ οι χειρότερες με τον άνθρακα.

Στη συνέχεια περιγράφονται συνοπτικά οι βασικές αρχές λειτουργίας και τα χαρακτηριστικά αντιπροσωπευτικών συστημάτων για καθεμία από τις παραπάνω κατηγορίες.

3. Συστήματα συμπαραγωγής με αμοστρόβιλο αντίθλιψης

Ατμός υψηλής πίεσης (40-100 bar) και θερμοκρασίας (480-540°C) παράγεται σε λέβητα, που καταναλίσκει το διαθέσιμο καύσιμο, και οδηγείται στον αμοστρόβιλο που κινεί τη γεννήτρια (Σχήμα 5). Ο ατμός εξέρχεται από το στρόβιλο σε πίεση και θερμοκρασία κατάλληλη για τις θερμικές διεργασίες.



Σχήμα 5: Σχηματικό διάγραμμα συστήματος συμπαραγωγής με ατμοστρόβιλο αντίθλιψης.

Ατμοστρόβιλος **αντίθλιψης** χαρακτηρίζεται ο ατμοστρόβιλος με έξοδο ατμού σε πίεση μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής (3-20 bar). Σε σύγκριση με το σύστημα απομάστευσης, που περιγράφεται στην επόμενη υποενότητα, το σύστημα αντίθλιψης έχει τα εξής πλεονεκτήματα:

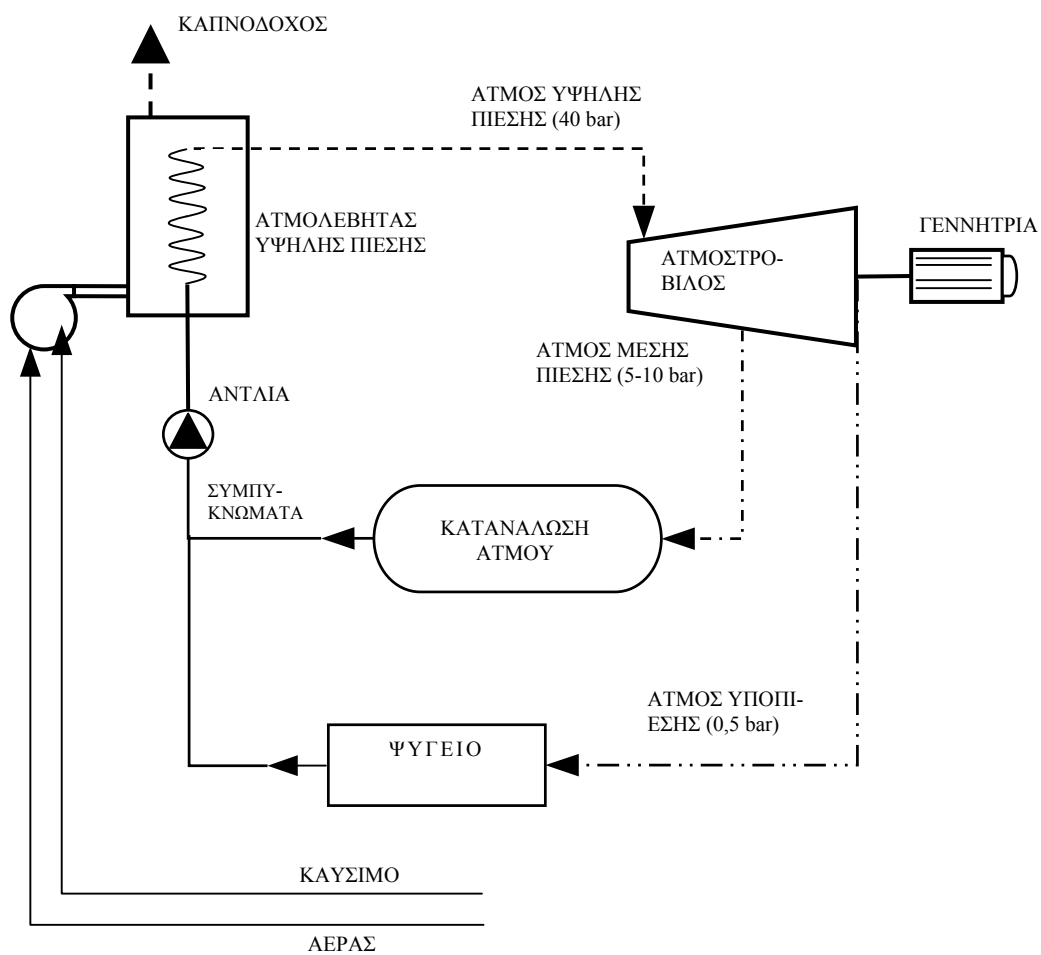
- απλή μορφή
- μικρότερο κόστος
- μειωμένη ή και καθόλου ανάγκη ψυκτικού νερού
- υψηλότερο βαθμό απόδοσης (περίπου 85 %), κυρίως διότι δεν αποβάλλεται θερμότητα στο περιβάλλον μέσω ψυγείου.

Χαρακτηριστικό του συστήματος αποτελεί ο λόγος Η/Θ που παραμένει περίπου σταθερός και σε συνθήκες μερικού φορτίου, με αποτέλεσμα το σύστημα να πρέπει να σχεδιάζεται στο μέγιστο λόγο Η/Θ που παρουσιάζει η βιομηχανική μονάδα και όχι στη μέση τιμή. Κατά συνέπεια, βρίσκει εφαρμογή σε συγκεκριμένες βιομηχανίες που παρουσιάζουν μικρό αλλά σταθερό λόγο Η/Θ (χαρακτηριστική περίπτωση βιομηχανιών χάρτου και βιομηχανιών ζάχαρης).

4. Συστήματα συμπαραγωγής με ατμοστρόβιλο απομάστευσης

Μέρος του ατμού αποτονώνεται από ενδιάμεση βαθμίδα του στροβίλου σε πίεση και θερμοκρασία κατάλληλη για τις θερμικές διεργασίες, ενώ ο υπόλοιπος αποτονώνεται μέχρι την πίεση του ψυγείου (0,05-0,10 bar), όπως φαίνεται στο Σχήμα 6 που ακολουθεί.

Τα συστήματα απομάστευσης απαιτούν υψηλότερο κόστος επένδυσης και έχουν μικρότερο ολικό βαθμό απόδοσης (περίπου 80%) από τα συστήματα αντίθλιψης, έχουν όμως τη δυνατότητα ανεξάρτητης (μέσα σε ορισμένα όρια) ρύθμισης της ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος. Ο (ηλεκτρικός) βαθμός απόδοσης περιορίζεται θεωρητικά από τον κύκλο Carnot και για την περίπτωση ενός ατμοηλεκτρικού σταθμού της ΔΕΗ κυμαίνεται στην περιοχή μεταξύ 32-35%.



Σχήμα 6: Σχηματικό διάγραμμα συστήματος συμπαραγωγής με ατμοστρόβιλο απομάστευσης.

5. Σύστημα συμπαραγωγής με ατμοστρόβιλο σε κύκλο βάσης

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα συστήματα των δύο προηγούμενων κατηγοριών που αντί για ατμολέβητα χρησιμοποιούν λέβητα ανάκτησης θερμότητας υψηλών θερμοκρασιών (χαλυβουργεία, υαλουργεία, κεραμουργεία κ.λπ.). Δηλαδή η ανάκτηση προκύπτει από την περίσσεια θερμικής ενέργειας της παραγωγικής διαδικασίας υπό υψηλή θερμοκρασία.

Το σύστημα αυτό ανήκει στην κατηγορία συστημάτων “βάσης”, δεδομένου ότι η ατμοπαραγωγή που προορίζεται για ηλεκτροπαραγωγή εξαρτάται από την παραγωγική διαδικασία.

B. Συστήματα αεριοστρόβιλου

Τα συστήματα συμπαραγωγής με αεριοστρόβιλο ποικίλουν ως προς τις ακόλουθες μονάδες:

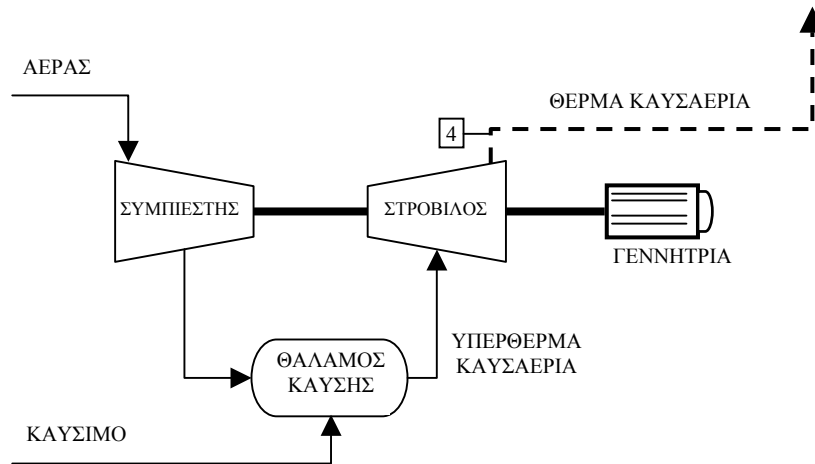
- α. Αεριοστρόβιλος.
- β. Σύστημα ανάκτησης θερμότητας.
- γ. Απλός ή συνδυασμένος κύκλος λειτουργίας.
- δ. Ανοικτός ή κλειστός κύκλος λειτουργίας.

Οι εταιρείες που κατασκευάζουν, συναρμολογούν και εγκαθιστούν συστήματα συμπαραγωγής με αεριοστρόβιλο, χρησιμοποιούν συνδυασμό των ανωτέρω στοιχείων.

1. Γενική περιγραφή

Η τυπική διάταξη περιλαμβάνει τη μονάδα αεριοστρόβιλου, τη μονάδα εκμετάλλευσης των καυσαερίων και το σύστημα μειωτήρα στροφών-γεννήτριας. Στον αεριοστρόβιλο αναρροφάται αέρας από το περιβάλλον, συμπιέζεται με αύξηση της θερμοκρασίας του στον αεροσυμπιεστή, που είναι συνήθως αξονικής ροής, οδηγείται στο θάλαμο καύσης, όπου πραγματοποιείται η έγχυση και καύση του χρησιμοποιούμενου καυσίμου, και στη συνέχεια τα θερμά καυσαέρια (περίπου 1000°C) υψηλής πίεσης εκτονώνονται στο στρόβιλο και εξέρχονται σε θερμοκρασίες μεταξύ 400-600°C. Ο στρόβιλος με τη

σειρά του μεταφέρει την παραγόμενη μηχανική ισχύ, μέσω μειωτήρα στροφών, στην ηλεκτρογεννήτρια (Σχήμα 7).



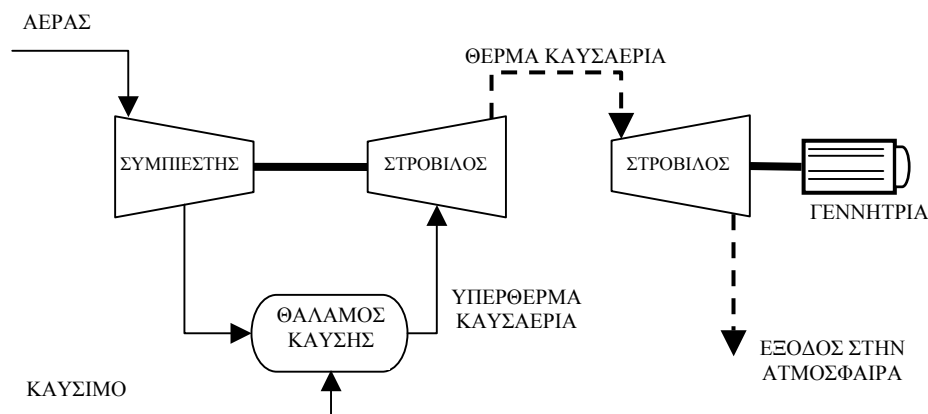
Σχήμα 7: Σχηματικό διάγραμμα συστήματος ηλεκτροπαραγωγής με αεριοστρόβιλο

Οι αεριοστρόβιλοι βιομηχανικής χρήσης διακρίνονται σε δυο κατηγορίες: τους αεριοστρόβιλους μονού άξονα και τους αεριοστρόβιλους διπλού άξονα.

2. Βασικές διατάξεις

Οι μονού άξονα αεριοστρόβιλοι, που είναι και αυτοί που στην πλειονότητά τους χρησιμοποιούνται για ηλεκτροπαραγωγή, σχεδιάζονται για τη μεταφορά της παραγόμενης μηχανικής ισχύος σε σταθερές στροφές. Στον κοινό άξονα είναι συνδεδεμένοι ο αεροσυμπιεστής, ο στρόβιλος και ο μειωτήρας στροφών ή η γεννήτρια. (Στις περιπτώσεις όπου οι στροφές λειτουργίας είναι 1450 ή 2900 RPM, ο μειωτήρας στροφών δεν υφίσταται και στη θέση του μειωτήρα συνδέεται απ' ευθείας η γεννήτρια)

Στους αεριοστρόβιλους διπλού άξονα, ο στρόβιλος αποτελείται από δύο βαθμίδες ανεξάρτητες μεταξύ τους. Η μία βαθμίδα του στρόβιλου είναι συνδεδεμένη μέσω ενός άξονα με το συμπιεστή και χρησιμεύει αποκλειστικά για την κίνησή του, ενώ η δεύτερη βαθμίδα του στρόβιλου είναι συνδεδεμένη με τη γεννήτρια και περιστρέφεται σε διαφορετικές στροφές από τον πρώτο άξονα (Σχήμα 8). Τα καυσαέρια εκτονώνονται αρχικά στην πρώτη βαθμίδα του στρόβιλου και στη συνέχεια στη δεύτερη βαθμίδα.



Σχήμα 8: Σχηματικό διάγραμμα συστήματος ηλεκτροπαραγωγής με αεριοστρόβιλο διπλού άξονα.

Βασικό πλεονέκτημα αεριοστροβίλων μονού άξονα:

Διατήρηση των στροφών του συστήματος (άρα και της γεννήτριας) και σε μερικό φορτίο, στοιχείο κρίσιμο για την απ' ευθείας σύνδεση της γεννήτριας με τις καταναλώσεις.

Βασικό μειονέκτημα αεριοστροβίλων μονού άξονα:

Σημαντική μείωση του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης σε μερικό φορτίο.

Αντίθετα, οι αεριοστροβίλοι διπλού άξονα παρουσιάζουν υψηλότερο βαθμό απόδοσης μηχανικής ισχύος, αλλά δεν διατηρούνται σταθερές οι στροφές του δεύτερου άξονα σε περίπτωση μείωσης του φορτίου.

Η σημαντική ισχύς που απαιτείται για την κίνηση του συμπιεστή και η υψηλή θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων είναι οι κύριες αιτίες του μικρού βαθμού απόδοσης (24-35%) ενός τέτοιου συστήματος ηλεκτροπαραγωγής. Ωστόσο, η υψηλή θερμοκρασία των καυσαερίων καθιστά τις μονάδες αυτές ιδανικές για συμπαραγωγή. Τα καυσαέρια περνούν μέσα από λέβητα καυσαερίων, όπου παράγεται ατμός κατάλληλος είτε για θερμικές διεργασίες είτε για την κίνηση ατμοστροβίλου, που κινεί ηλεκτρογεννήτρια ή άλλο μηχάνημα. Στη δεύτερη περίπτωση, πρόκειται για σύστημα συνδυασμένου κύκλου, που περιγράφεται εκτενέστερα σε επόμενη ενότητα. Ας σημειωθεί επίσης ότι οι λέβητες καυσαερίων είναι δυνατό να εφοδιαστούν με καυστήρα για συμπλήρωση της αποδιδόμενης θερμότητας, όταν αυτό απαιτείται.

Σε σύγκριση με τον ατμοστροβίλο, η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται ανά μονάδα θερμικής ενέργειας είναι μεγαλύτερη. Το κυριότερο μειονέκτημα του συγκεκριμένου συστήματος είναι η έλλειψη ευελιξίας της υπάρχουσας τεχνολογίας, η οποία περιορίζεται στη χρήση φυσικού αερίου ή ελαφρών κλασμάτων του πετρελαίου ως καυσίμου.

Παρακάτω περιγράφονται οι διατάξεις που συναντώνται στην πράξη και που έχουν εφαρμοστεί σε διάφορες βιομηχανίες στην Ευρώπη. Ακολουθεί λεπτομερής περιγραφή των ιδιαίτερων λειτουργικών και τεχνικών χαρακτηριστικών καθενός από τα συστήματα με αεριοστροβίλο.

3. Σύστημα αεριοστροβίλου με λέβητα ανάκτησης θερμότητας

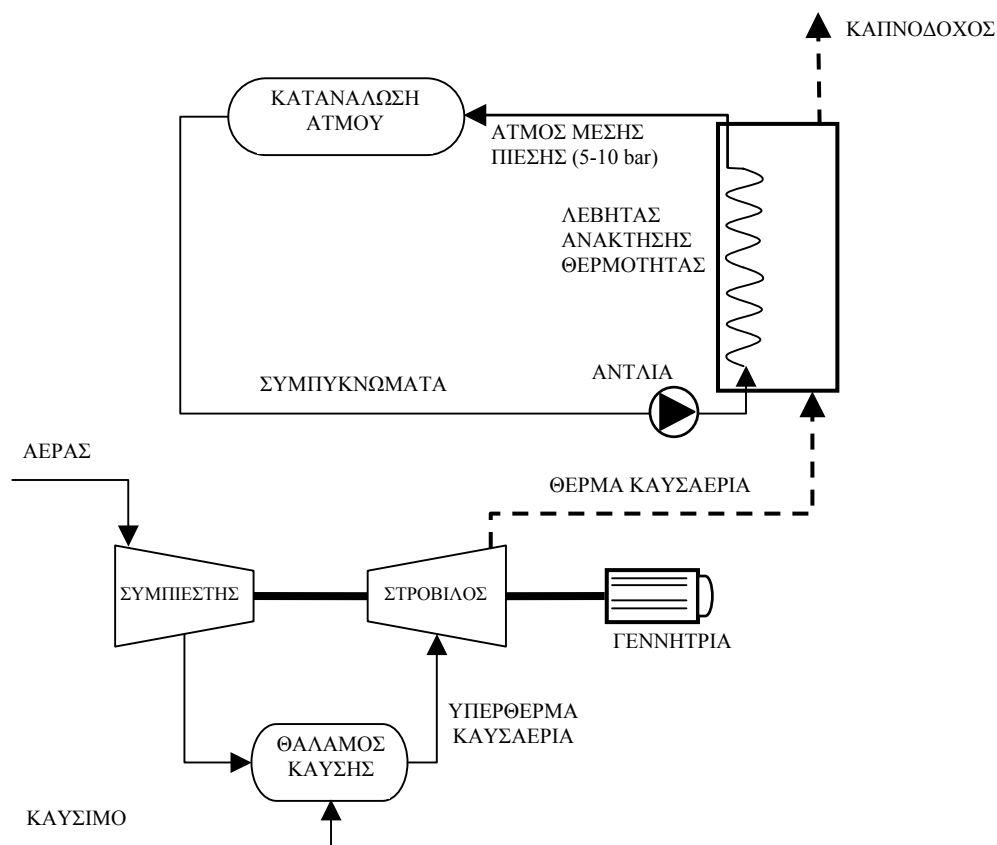
Γενική διάταξη

Η διάταξη αυτή περιλαμβάνει μία μονάδα αεριοστροβίλου, τα θερμά καυσαέρια του οποίου διοχετεύονται σε λέβητα ανάκτησης θερμότητας όπου το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας μεταφέρεται στο εργαζόμενο μέσο (θερμό νερό, ατμός), που στη συνέχεια χρησιμοποιείται στην παραγωγική διαδικασία της βιομηχανικής επιχείρησης.

Ο λέβητας αυτός περιλαμβάνει γενικά δύο τμήματα απ' όπου διέρχονται διαδοχικά τα καυσαέρια. Τα τμήματα αυτά είναι ο οικονομητήρας (economiser), όπου προθερμαίνεται το εργαζόμενο μέσο, και το κύριο σώμα του λέβητα, όπου στην περίπτωση της ατμοπαραγωγής γίνεται η ατμοποίηση του νερού τροφοδοσίας. Από το λέβητα εξέρχεται κορεσμένος ατμός (Σχήμα 9).

Η επιλογή του λέβητα ανάκτησης θερμότητας γίνεται αφού ληφθούν υπόψη η (ονομαστική) θερμοκρασία εισόδου των καυσαερίων και η σύστασή τους ειδικά σε ό,τι αφορά τα SO_x. Ο ονομαστικός βαθμός απόδοσης του λέβητα δεν ξεπερνά συνήθως το 60%, δεδομένου ότι υπάρχει ένα ελάχιστο επιτρεπτό επίπεδο θερμοκρασίας εξόδου των καυσαερίων από το λέβητα που καθορίζεται από το σημείο δρόσου των καυσαερίων (180-150°C).

Για το λόγο αυτό, το καύσιμο που χρησιμοποιείται θα πρέπει να έχει την ελάχιστη δυνατή περιεκτικότητα σε θείο. Ιδανική περίπτωση αποτελεί η χρήση φυσικού αερίου και υγραερίου ως καυσίμου, όπου είναι αποδεκτή η έξοδος των καυσαερίων και κάτω από το σημείο δρόσου (έως 50°C), δεδομένου ότι στην περίπτωση αυτή πρέπει να αντιμετωπιστεί μόνο η φυσική διάβρωση των τοιχωμάτων του λέβητα και όχι η όξινη διάβρωση που δημιουργείται από τη συμπύκνωση του θεικού οξέος.



Σχήμα 9: Σχηματικό διάγραμμα συστήματος συμπαραγωγής με αεριοστρόβιλο και λέβητα ανάκτησης θερμότητας.

Περιογή ισχύος και βαθμός διαθεσιμότητας

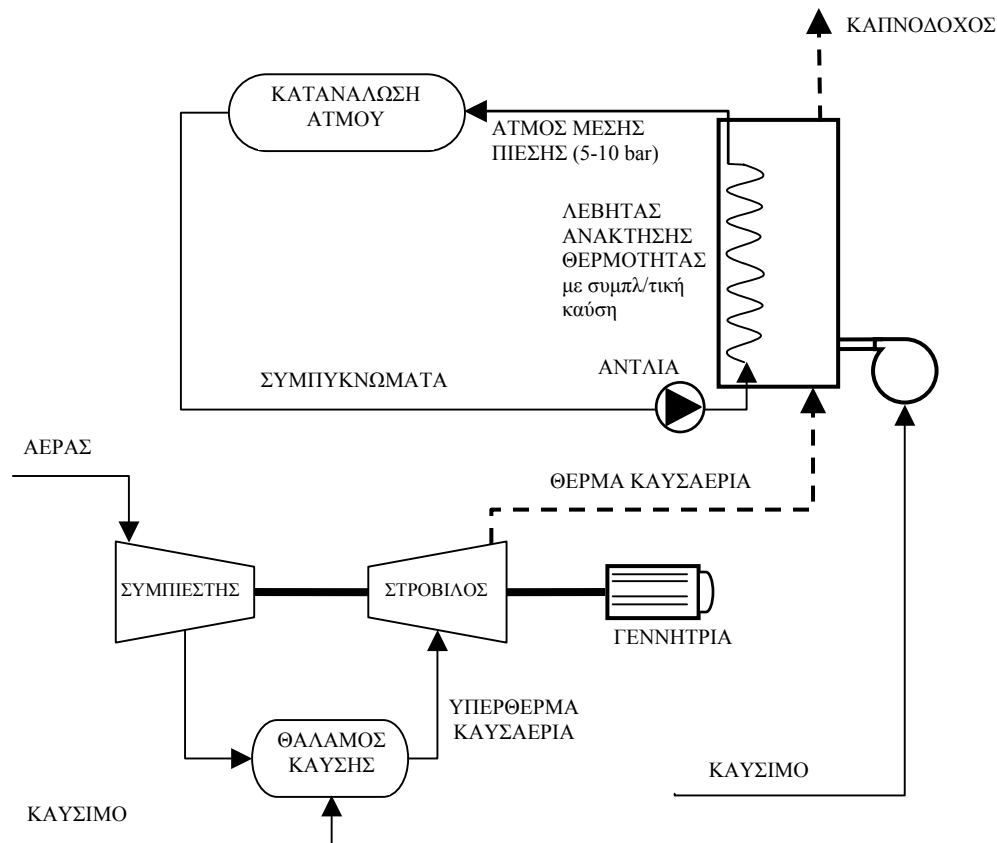
Τα συστήματα συμπαραγωγής με αεριοστρόβιλο ανοικτού κύκλου έχουν ισχύ 100 kW-100 MW και βαθμό απόδοσης περίπου 80%. Λειτουργούν συνήθως με φυσικό αέριο ή υγρό καύσιμο Diesel, ενώ ευοίωνες παρουσιάζονται οι προοπτικές για χρήση γαιανθράκων σε εξαεριομένη μορφή.

Ορισμένες παραγωγικές διεργασίες (όπως π.χ. η καταδυτική σχάση υδρογονανθράκων σε διυλιστήρια πετρελαίου) έχουν ως παραπροϊόν αέρια, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμο στον αεριοστρόβιλο.

Δεδομένου ότι τα πτερύγια του αεριοστροβίλου είναι εκτεθειμένα στα προϊόντα της καύσης, τα προϊόντα αυτά δεν πρέπει να έχουν συστατικά που προκαλούν διάβρωση (νάτριο, κάλιο, ασβέστιο, βανάδιο, θείο κ.λπ.), και τα στερεά σωματίδια πρέπει να είναι αρκετά μικρού μεγέθους, ώστε να μην προκαλούν φθορά κατά την πρόσκρουσή τους στα πτερύγια. Στις περιπτώσεις που το καυσαέριο περιέχει τέτοια συστατικά, πρέπει να καθαριστεί με ειδικές διατάξεις πριν από την είσοδό του στον αεριοστρόβιλο.

Η διάρκεια των εργασιών εγκατάστασης των συστημάτων με αεριοστρόβιλο είναι 10-14 μήνες για ισχύ μέχρι 7 MW και φτάνει τα 2 έτη για μεγαλύτερες μονάδες.

Η αξιοπιστία και η μέση ετήσια διαθεσιμότητα συστημάτων αεριοστροβίλου είναι λίγο μεγαλύτερες σε σχέση με εκείνες των συστημάτων αμμοστροβίλου, φτάνοντας το 97% στην περίπτωση λειτουργίας της μονάδας με φυσικό αέριο ή υγραέριο. Οι μονάδες που λειτουργούν με υγρό καύσιμο απαιτούν πιο συχνές συντηρήσεις, με συνέπεια το χαμηλότερο βαθμό διαθεσιμότητας. Η χρήσιμη διάρκεια ζωής των μονάδων αεριοστροβίλου είναι 15-20 έτη και μπορεί να μειωθεί σημαντικά είτε από τη χρήση καυσίμου κακής ποιότητας είτε από ανεπαρκή συντήρηση.



Σχήμα 10: Σχηματικό διάγραμμα συστήματος συμπαραγωγής με αεριοστρόβιλο και λέβητα ανάκτησης θερμότητας με συμπληρωματική καύση.

Ο ολικός βαθμός απόδοσης των συστημάτων με αεριοστρόβιλο (60-80%) είναι ελαφρά μικρότερος των συστημάτων ατμοστρόβιλου, αν και υπάρχουν εξαιρέσεις σε αυτό τον κανόνα. Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης είναι υψηλότερος τόσο στο πλήρες φορτίο όσο και σε μερικά φορτία, αλλά η μείωσή του στα μερικά φορτία είναι πιο έντονη από εκείνη των συστημάτων ατμοστρόβιλου. Επίσης, ο λόγος ηλεκτρισμού προς θερμότητα είναι υψηλότερος.

4. Σύστημα αεριοστρόβιλου με λέβητα ανάκτησης θερμότητας και συμπληρωματική καύση

Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει όλα τα βασικά τμήματα του προηγούμενου συστήματος με τη μόνη διαφορά ότι στη θέση του λέβητα ανάκτησης θερμότητας χρησιμοποιείται ατμολέβητας, ο οποίος για αέρα καύσης χρησιμοποιεί τα καυσαέρια που προέρχονται από αεριοστρόβιλο. Τα καυσαέρια αυτά περιέχουν συνήθως επαρκές ποσοστό οξυγόνου (συνήθως 15% για καύσιμο φυσικό αέριο) και, κατά συνέπεια, δεν είναι απαραίτητη η τροφοδοσία του ατμολέβητα με νερό αέρα (σε θερμοκρασία περιβάλλοντος) (Σχήμα 10).

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του συστήματος

Με την διάταξη αυτή προκύπτουν τα παρακάτω λειτουργικά πλεονεκτήματα:

- Μεγαλύτερη ευελιξία στην επιλογή αεριοστρόβιλου. Υπάρχει δυνατότητα επιλογής μονάδας είτε με μεγάλο ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης (για περιπτώσεις εγκαταστάσεων με μεγάλο λόγο H/Θ), είτε με μικρό ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης (για εγκαταστάσεις με μικρό λόγο H/Θ).
- Ανεξάρτητη ατμοπαραγωγή από την ηλεκτροπαραγωγή, με αποτέλεσμα ο τελικός λόγος H/Θ να μεταβάλλεται ανταποκρινόμενος πλήρως στις απαιτήσεις της βιομηχανίας.
- Μέγιστη εκμετάλλευση της θερμότητας των απαερίων και, τελικά, μεγαλύτερος βαθμός απόδοσης.

- δ. Μείωση του απαιτούμενου κόστους αρχικής επένδυσης, στην περίπτωση χρησιμοποίησης υφιστάμενου ατμοπαραγωγού.

Συστήματα αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται αποδοτικά στις περιπτώσεις των βιομηχανικών μονάδων που παρουσιάζουν περίπου σταθερό ηλεκτρικό φορτίο, ενώ το μέγιστο θερμικό φορτίο τους μεταβάλλεται ώστε να καλύπτεται από ατμοπαραγωγή χωρίς καθόλου συμπληρωματική καύση (ελάχιστο θερμικό φορτίο) έως και την ονομαστική ατμοπαραγωγή του λέβητα (μέγιστο θερμικό φορτίο).

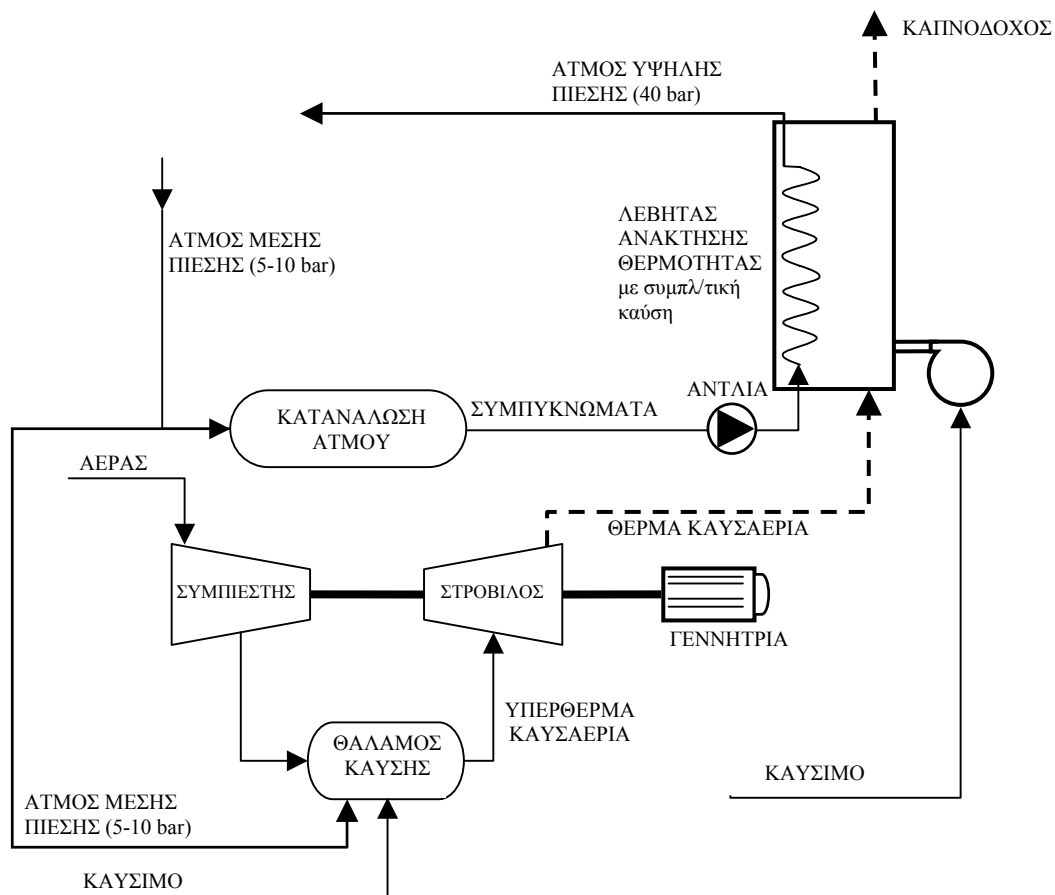
5. Συστήματα αεριοστροβίλου με έγχυση συμπληρωματικού ατμού στο στρόβιλο

Το σύστημα αεριοστροβίλου με έγχυση συμπληρωματικού ατμού στο στρόβιλο αποτελεί νεότερη εξέλιξη και εφαρμογή του συστήματος αεριοστροβίλου με ατμολέβητα συμπληρωματικής καύσης που περιγράφηκε παραπάνω. Η σχεδιάσή του στοχεύει στην κάλυψη αιχμών ηλεκτρικού φορτίου ανεξάρτητα από τις μεταβολές του θερμικού φορτίου.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 11), η διάταξη παραμένει η ίδια στα βασικά της μέρη με την προηγούμενη, με τη διαφορά ότι μέρος του παραγόμενου ατμού διοχετεύεται στο θάλαμο καύσης, σε ποσοστό μέχρι και 15% κατά βάρος του αέρα που εισέρχεται στον αεριοστρόβιλο. Στην περίπτωση της μέγιστης έγχυσης ατμού στο θάλαμο καύσης, ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης του όλου συστήματος μπορεί να αυξηθεί μέχρι 40%, εφόσον η γεννήτρια του συστήματος έχει το περιθώριο να αυξήσει την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ.

Στον αντίποδα της αύξησης του βαθμού ηλεκτρικής απόδοσης, ο βαθμός θερμικής απόδοσης του συστήματος μειώνεται δραστικά, ενώ ο συνολικός βαθμός απόδοσης μειώνεται λιγότερο. Στη θεωρητική περίπτωση που το σύνολο του παραγόμενου ατμού (χωρίς συμπληρωματική καύση) εγχέεται στο θάλαμο καύσης, ο βαθμός θερμικής απόδοσης είναι μηδέν.

Το σύστημα σχεδιάζεται αρχικά για λειτουργία με μηδενική έγχυση ατμού στο θάλαμο καύσης, ενώ η έγχυση του καυσίμου πραγματοποιείται μόνο για την κάλυψη των αιχμών ηλεκτρικού φορτίου.



Σχήμα 11: Σχηματικό διάγραμμα συστήματος συμπαραγωγής με αεριοστρόβιλο, λέβητα ανάκτησης θερμότητας και έγχυση ατμού.

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του συστήματος

Συνοψίζοντας, τα επιπλέον λειτουργικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζει το σύστημα αυτό σε σχέση με το προηγούμενο είναι τα εξής:

- α. Κάλυψη ετεροχρονισμένων αιχμών ηλεκτρικού και θερμικού φορτίου της βιομηχανίας.
- β. Δυνατότητα ανεξαρτητοποίησης της λειτουργίας της μονάδας από τη ΔΕΗ.
- γ. Μέγιστο οικονομικό όφελος σε σχέση προς τα άλλα συστήματα συμπαραγωγής με αεριοστρόβιλο.
- δ. Διευρυμένη εφαρμογή του συστήματος και σε βιομηχανίες όπου δεν είναι οικονομική η εγκατάσταση και λειτουργία άλλου συστήματος.

Παράλληλα, η εγκατάσταση αυτή παρουσιάζει και μια σειρά από μειονεκτήματα:

- α. Απαιτούνται υψηλής ακρίβειας όργανα μέτρησης και ελέγχου της παροχής ατμού στον αεριοστρόβιλο.
- β. Τόσο τα χαρακτηριστικά όσο και η ποιότητα του εγχεόμενου ατμού πρέπει να βρίσκονται εντός αυστηρών ορίων που καθορίζονται από τον κατασκευαστή του αεριοστρόβιλου.
- γ. Σε πολλές περιπτώσεις απαιτείται υψηλότερο κόστος επένδυσης.
- δ. Δεν υπάρχει σημαντική εμπειρία από τις κατασκευάστριες εταιρείες στον τύπο αυτό του αεριοστρόβιλου.

Ο θερμικός βαθμός απόδοσης αυτού του συστήματος είναι λίγο υψηλότερος από αυτόν του αεριοστρόβιλου αλλά τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά είναι όμοια. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η διάρκεια των εργασιών εγκατάστασης ενός συστήματος κλειστού κύκλου με καύση άνθρακα σε ρευστοποιημένη κλίση είναι 1,5-2 έτη και η αναμενόμενη διάρκεια ζωής είναι 20 έτη.

Μετά από την απόκτηση αρκετής εμπειρίας, η αξιοπιστία των συστημάτων κλειστού κύκλου προβλέπεται ότι θα είναι τουλάχιστον ίση με εκείνη των συστημάτων ανοικτού κύκλου, ενώ η διαθεσιμότητα θα είναι υψηλότερη χάρη στις μικρότερες απαιτήσεις συντήρησης που οφείλονται στην καθαρότητα του εργαζόμενου ρευστού.

8. Μονάδες συνδυασμένου κύκλου

Γενική περιγραφή

Ο όρος “συνδυασμένος κύκλος” αναφέρεται σε συστήματα με δύο θερμοδυναμικούς κύκλους που συνδέονται μεταξύ τους με κάποιο εργαζόμενο ρευστό και λειτουργούν σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Ο κύκλος υψηλής θερμοκρασίας (κορυφής) αποβάλλει θερμότητα που ανακτάται και χρησιμοποιείται από τον κύκλο χαμηλής θερμοκρασίας (βάσης) για την παραγωγή πρόσθετης ηλεκτρικής ή μηχανικής ενέργειας, αυξάνοντας έτσι τον βαθμό απόδοσης.

Στη γενικευμένη του μορφή, το σύστημα περιλαμβάνει έναν αεριοστρόβιλο και έναν ατμοστρόβιλο (κύκλοι Joule-Rankine). Ο αεριοστρόβιλος παράγει ηλεκτρική ενέργεια ενώ στην έξοδο του απάγονται καυσαέρια υψηλής θερμοκρασίας (400-600°C), που στη συνέχεια διοχετεύονται για περαιτέρω καύση σε ατμολέβητα ανάκτησης θερμότητας καυσαερίων. Ο παραγόμενος ατμός υψηλής πίεσης (40-100 bar) εκτονώνεται είτε σε ατμοστρόβιλο αντίθλιψης είτε σε ατμοστρόβιλο απομάστευσης (Σχήματα 14 και 15).

Η υψηλή περιεκτικότητα οξυγόνου στα καυσαέρια του αεριοστρόβιλου (περίπου 15%) καθιστά δυνατή την καύση συμπληρωματικού καυσίμου στον λέβητα καυσαερίων, εάν κριθεί αναγκαία για την αύξηση της ισχύος του συστήματος. Η συμπληρωματική καύση αυξάνει το βαθμό απόδοσης του συστήματος κατά τη λειτουργία σε μερικό φορτίο, καθιστά όμως την εγκατάσταση και ιδιαίτερα τις διατάξεις ρύθμισης και ελέγχου πιο περίπλοκες. Η λειτουργία και τα επιμέρους χαρακτηριστικά του εξοπλισμού που περιλαμβάνεται (αεριοστρόβιλος, ατμοστρόβιλος) έχουν ήδη αναπτυχθεί σε προηγούμενες ενότητες.

Βασικές διατάξεις

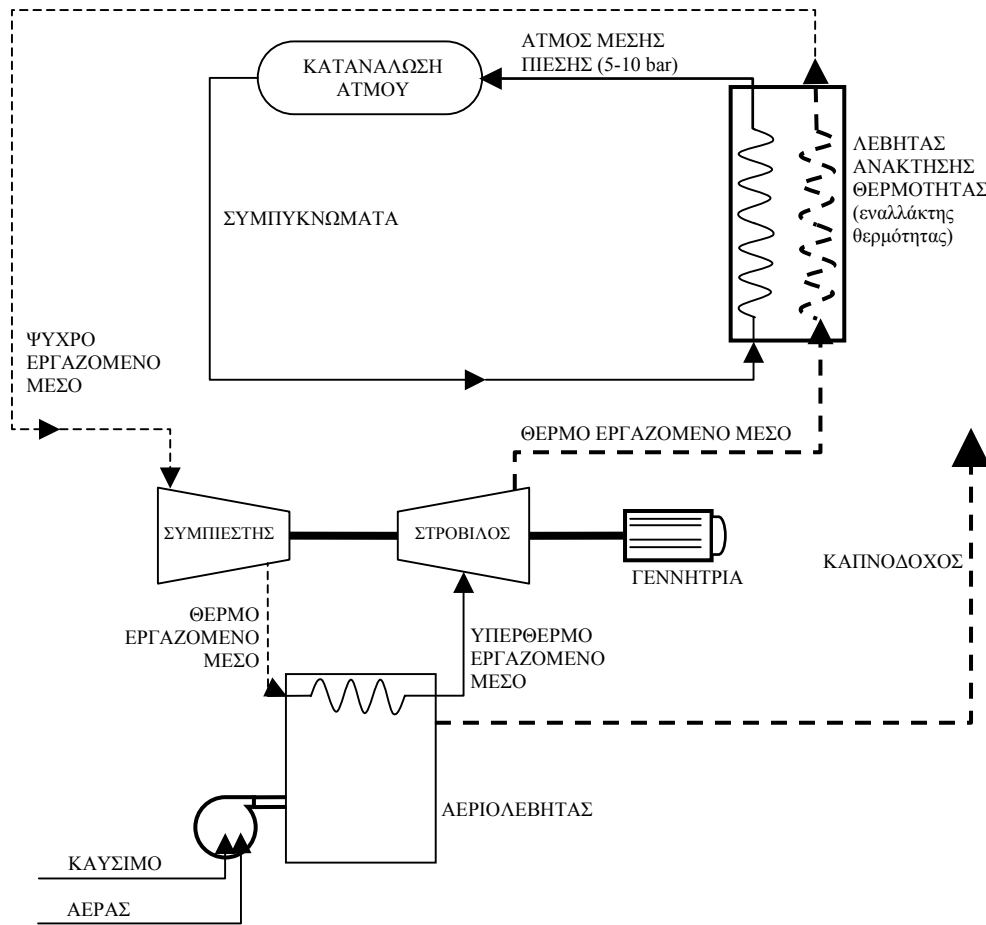
Στην περίπτωση του συνδυασμένου κύκλου με ατμοστρόβιλο αντίθλιψης, ο λόγος Η/Θ παραμένει περίπου σταθερός, δεδομένου ότι με σταθερή λειτουργία (100% του φορτίου) του αεριοστρόβιλου, όταν παρουσιάζονται μειωμένα θερμικά φορτία, μειώνεται η συμπληρωματική καύση στον ατμολέβητα που δημιουργεί και μία αντίστοιχη μείωση της ηλεκτροπαραγωγής στον ατμοστρόβιλο. Στην περίπτωση αυτή, υπάρχει μία μικρή συνολική μείωση του λόγου Η/Θ. Περαιτέρω μείωση του θερμικού φορτίου στον αεριοστρόβιλο, μέχρι 80% του ονομαστικού, δεν έχει πρακτικά επίπτωση στην θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων (που αποτελούν και το μέσο μετάδοσης θερμότητας στον ατμολέβητα). Όταν το ηλεκτρικό φορτίο μειώνεται κάτω από το 80% του πλήρους φορτίου, μειώνεται σημαντικά και η θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων, ενώ δεν είναι δυνατή –γενικά– η λειτουργία του αεριοστρόβιλου για φορτία μικρότερα του 75% του ονομαστικού φορτίου, οπότε ο αεριοστρόβιλος πρέπει να διακόψει τη λειτουργία του.

Μια σημαντική εξέλιξη που αναμένεται να επηρεάσει την προοπτική της συμπαραγωγής συνδυασμένου κύκλου είναι η αεριοποίηση του άνθρακα (coal gasification). Η προοπτική αυτή αναμένεται να βρει εφαρμογή σε εγκαταστάσεις μεγαλύτερες από 20 MW, δεδομένων των αυξημένων απαιτήσεων σε προσωπικό, σε χώρο και σε αρχικό κεφάλαιο κτήσης.

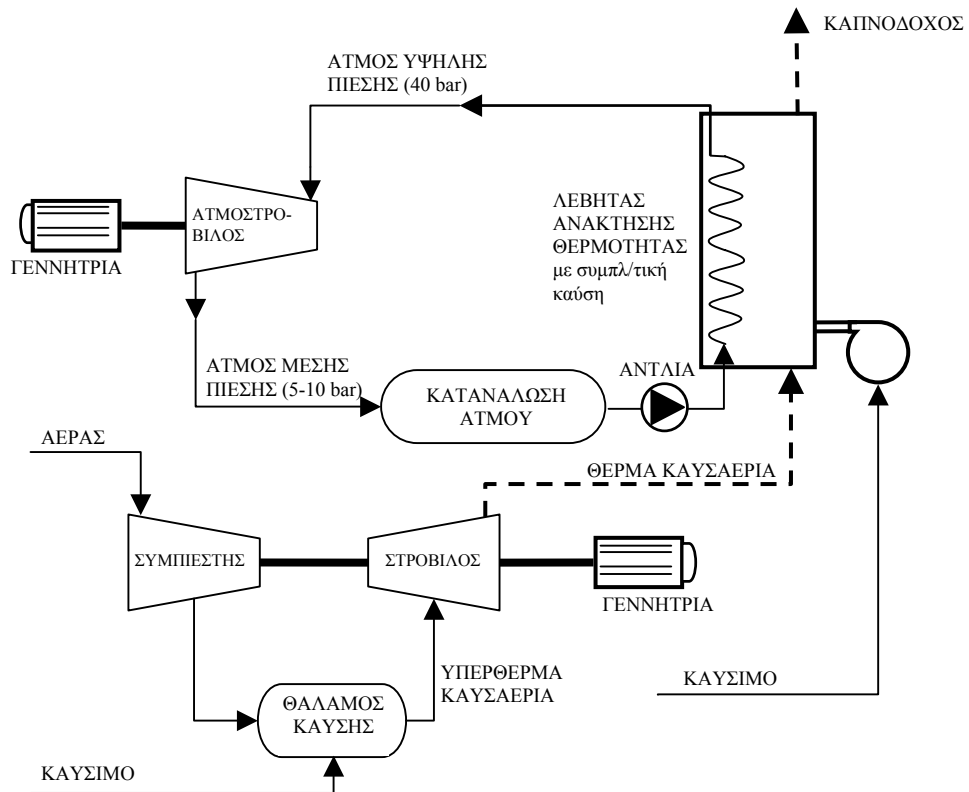
Περιοχή ισχύος και βαθμός διαθεσιμότητας

Η ισχύς των συστημάτων συνδυασμένου κύκλου βρίσκεται συνήθως στην περιοχή 20-400 MW, ενώ κατασκευάζονται επίσης και μικρότερες μονάδες με ισχύ 4-11 MW. Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης είναι 35-45% και ο ολικός βαθμός απόδοσης 70-88%. Η συγκέντρωση ισχύος (ισχύς ανά μονάδα όγκου) των συστημάτων αυτών είναι υψηλότερη από τη συγκέντρωση ισχύος των συστημάτων απλού κύκλου

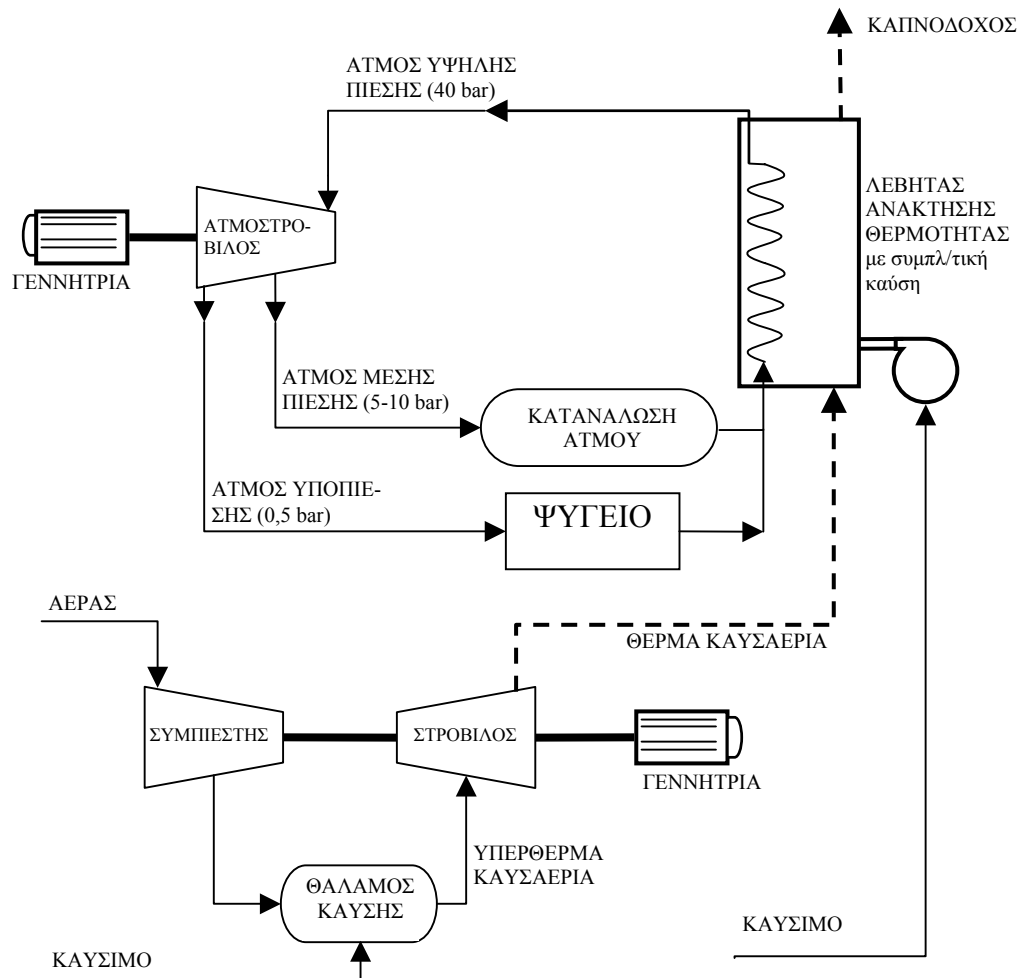
αεριοστρόβιλου (Joule) ή ατμοστρόβιλου (Rankine). Ως προς τα καύσιμα, ισχύει ό,τι αναφέρθηκε για τα



Σχήμα 13: Σχηματικό διάγραμμα συστήματος συμπαραγωγής με αεριοστρόβιλο κλειστού κύκλου.



Σχήμα 14: Σχηματικό διάγραμμα συστήματος συμπαραγωγής συνδυασμένου κύκλου με αεριοστρόβιλο και ατμοστρόβιλο αντίθλιψης.



Σχήμα 15: Σχηματικό διάγραμμα συστήματος συμπαραγωγής συνδυασμένου κύκλου με ατμοστρόβιλο απομάστευσης.

Η διάρκεια των εργασιών εγκατάστασης είναι 1,5 έως 2 έτη. Η ολοκλήρωση της εγκατάστασης είναι δυνατή σε δύο στάδια: Πρώτα εγκαθίσταται η μονάδα αεριοστρόβιλου, που μπορεί να είναι έτοιμη για λειτουργία σε 12 μήνες, και ενώ αυτή λειτουργεί, συμπληρώνεται το σύστημα με τη μονάδα του ατμοστρόβιλου.

Η αξιοπιστία των συστημάτων συνδυασμένου κύκλου είναι 80-85%, η μέση ετήσια διαθεσιμότητα 77-85% και ο οικονομικός χρόνος ζωής 15-25 έτη.

Γ. Συστήματα συμπαραγωγής με μηχανή εσωτερικής καύσης και ανάκτηση θερμότητας

1. Γενική περιγραφή

Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί έναν εναλλάκτη με μανδύα νερού και ένα λέβητα ανάκτησης θερμότητας καυσαερίων για την παραγωγή ατμού από την απορριπτόμενη από τη μηχανή Diesel ή Otto θερμότητα. Όπως και ο ατμοστρόβιλος, έτσι και το σύστημα αυτό επιτυγχάνει πολύ υψηλή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά μονάδα θερμικής που μεταφέρεται στην παραγωγή. Το κυριότερο μειονέκτημα της Diesel είναι ότι, όπως και στον αεριοστρόβιλο, οι βιομηχανικές μηχανές Diesel καίνε μόνο αέριο ή αποστάγματα του πετρελαίου. Πάντως, η αναμενόμενη στο εγγύς μέλλον προσαρμογή των ναυτικών μηχανών Diesel, που καίνε βαρύ μαζούτ, στη βιομηχανική συμπαραγωγή θα βελτιώσει την κατάσταση.

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν συστήματα συμπαραγωγής με βασική μονάδα ηλεκτροπαραγωγής μία μηχανή εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ) που μπορεί να είναι μηχανή Diesel με καύσιμο Diesel ή μηχανή Otto με καύσιμα φυσικό αέριο, βιοαέριο, υγραέριο ή ελαφρά κλάσματα πετρελαίου.

Η ανάκτηση της θερμότητας που εκλύεται από τη βασική μονάδα ηλεκτροπαραγωγής πραγματοποιείται ταυτόχρονα με την εγκατάσταση αφενός ενός λέβητα ανάκτησης της θερμότητας από τα θερμά καυσαέρια και αφετέρου ενός εναλλάκτη θερμότητας νερού-νερού για την ανάκτηση της θερμότητας από τη μηχανή (και την ταυτόχρονη ψύξη της). Η έκλυση θερμότητας από τη μηχανή γίνεται κυρίως από το κύκλωμα ψύξης του σώματος της μηχανής και, δευτερευόντως, από το κύκλωμα λίπανσης της μηχανής. Η ανάκτηση της θερμότητας χρησιμοποιείται για την παραγωγή συνήθως θερμού νερού και σπανιότερα για ατμοπαραγωγή (Σχήμα 16).

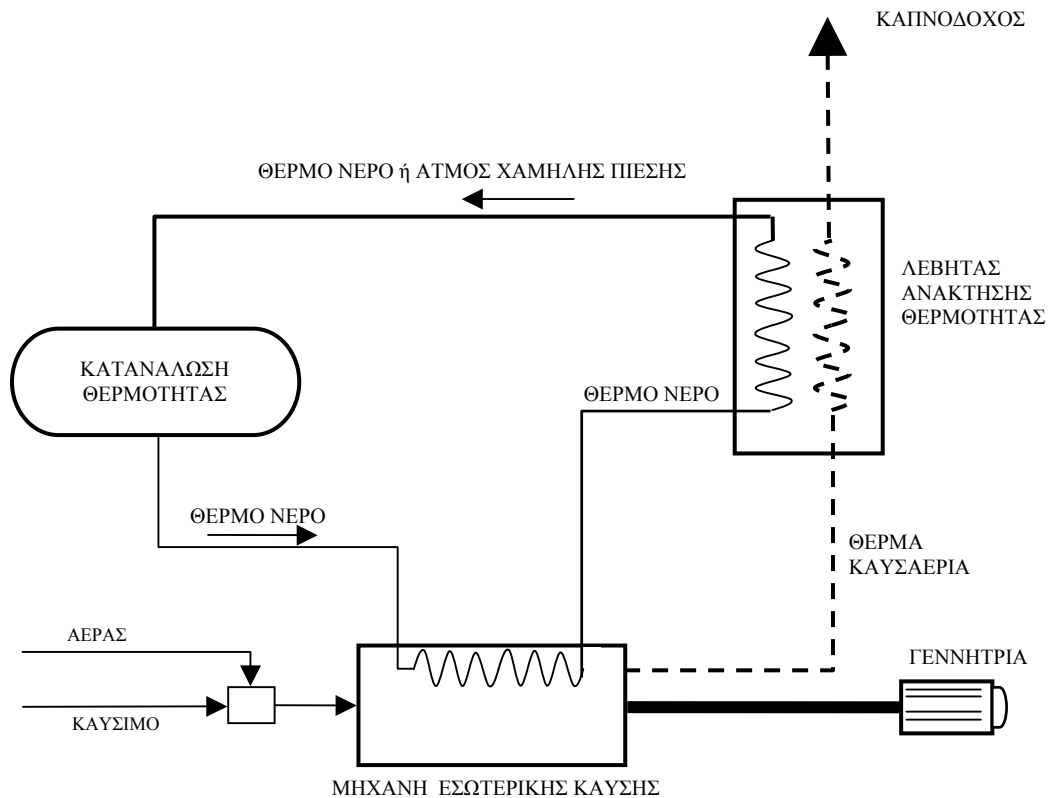
2. Βαθμός διαθεσιμότητας

Η τρέχουσα πρακτική περιοδικής συντήρησης της μηχανής (αλλαγή λαδιών, ρύθμιση βαλβίδων κ.λπ.) δεν επιδρά στο βαθμό διαθεσιμότητας της μηχανής, δεδομένου ότι ο χρόνος της συντήρησης αυτής είναι μηδαμινός. Η ετήσια συντήρηση της μηχανής πραγματοποιείται συνήθως κατά την περίοδο της γενικής συντήρησης του εργοστασίου, με αποτέλεσμα να μην επιδρά στο βαθμό διαθεσιμότητας της μονάδας. Αντίθετα, σημαντική χρονικά διακοπή της λειτουργίας της μηχανής παρουσιάζεται κατά τις εργασίες γενικής επισκευής (που πραγματοποιείται τυπικά μετά από 30.000 ώρες λειτουργίας, ήτοι περίπου μετά από 5 χρόνια).

Από πλευράς βλαβών, η μηχανή παρουσιάζει σημαντική αξιοπιστία, ειδικά στις περιπτώσεις που τηρείται σχολαστικά το πρόγραμμα συντήρησής της.

Συνοψίζοντας, εκτιμάται ότι ένας μέσος βαθμός διαθεσιμότητας του επιπέδου του 90% είναι αντιπροσωπευτικός για μεγάλες μηχανές Otto ενώ για μηχανές Diesel της ίδιας ισχύος ο βαθμός διαθεσιμότητας βρίσκεται στη περιοχή του 85%.

Η συνολική ζωή της μηχανής εκτιμάται σε 60.000 ώρες λειτουργίας, ήτοι 10 χρόνια περίπου.



Σχήμα 16: Σχηματικό διάγραμμα συστήματος συμπαραγωγής με μηχανή εσωτερικής καύσης και λέβητα ανάκτησης θερμότητας.

Δ. Συστήματα συμπαραγωγής με μηχανή Otto και ανάκτηση θερμότητας

1. Βασικές διατάξεις

Καύσιμο και αέρας αναμιγνύονται στον τροφοδότη (carbureteur) και στη συνέχεια εγχέονται στους κυλίνδρους της μηχανής και συμπιέζονται με μέγιστο λόγο συμπίεσης 12,5. Το μίγμα αναφλέγεται με τη βοήθεια των σπινθηριστών (μπουζί) και τα καυσαέρια εκτονώνονται στους κυλίνδρους, μεταδίδοντας την παραγόμενη μηχανική ισχύ στον άξονα της μηχανής.

Για την αύξηση της αποδιδόμενης ισχύος, πολλοί κατασκευαστές παράγουν μηχανές με υπερπλήρωση, όπου το μίγμα προσάγεται στους κυλίνδρους αφού συμπιεστεί, αυξάνοντας την πίεσή του από 1 bar σε 2-2,5 bar. Λόγω της αύξησης της πίεσης του μίγματος, αυξάνεται και η θερμοκρασία του, με αποτέλεσμα να απαιτείται η εγκατάσταση ενός εναλλάκτη (intercooler ή aftercooler) αέρα-νερού για την ψύξη του μίγματος. Ο εναλλάκτης αυτός μπορεί να συνδεθεί σε σειρά με το δίκτυο ανάκτησης θερμότητας της μηχανής.

Σε σύγκριση με τις μη υπερπληρούμενες μηχανές Otto, οι μηχανές με υπερπλήρωση έχουν δύο σημαντικά πλεονεκτήματα: υψηλότερο βαθμό απόδοσης και μικρότερη δαπάνη κτήσης της μηχανής ανά KWe εγκατεστημένης ισχύος.

Το σύστημα αυτό συμπαραγωγής βρίσκει εφαρμογή κυρίως στον τριτογενή τομέα (κτίρια, σχολεία, κλειστές πισίνες, νοσοκομεία), σε αγροτικές και μικρές βιομηχανίες.

2. Περιοχή ισχύος

Οι μηχανές Otto (βενζινοκινητήρες), που αποτελούν τη βασική μονάδα του συστήματος ηλεκτροπαραγωγής, είναι διαθέσιμες για ονομαστική ισχύ από 15 KWe μέχρι 1.3 KWe στις 1500 RPM. Σε περιπτώσεις μηχανής με απαιτήσεις μεγαλύτερης ονομαστικής ηλεκτρικής ισχύος, διατίθενται και μηχανές μέχρι 2 KWe στις 1000 RPM. Ο βαθμός ηλεκτρικής απόδοσης της μηχανής είναι 32-35%, ενώ ο συνολικός βαθμός απόδοσης του συστήματος είναι σταθερός για όλο σχεδόν το εύρος των ισχύων και κυμαίνεται στην περιοχή μεταξύ 80-85%.

Αντίστοιχα, σταθερός παραμένει πρακτικά και ο λόγος H/Θ για όλο το εύρος ονομαστικής ισχύος και κυμαίνεται μεταξύ 0,5-0,7.

Το συνηθέστερο καύσιμο των μηχανών Otto, που χρησιμοποιούνται σε μονάδες συμπαραγωγής, είναι το φυσικό αέριο, ενώ με μικρές μετατροπές της μηχανής μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλα καύσιμα όπως βιοαέριο, απαέρια κλιβάνων, συνθετικό αέριο, LPG και ελαφρά κλάσματα πετρελαίου (βενζίνες).

Η λειτουργία των συστημάτων αυτών σε μερικό φορτίο είναι δυνατή αλλά δεν συνιστάται η λειτουργία τους για ηλεκτρικά φορτία μικρότερα του 50% της ονομαστικής ηλεκτρικής ισχύος.

Μεταξύ 50-100% του φορτίου η κατανάλωση καυσίμου μεταβάλλεται από 60 έως 100% της ονομαστικής κατανάλωσης, που σημαίνει ότι έχουμε μικρή πτώση (20%) του συνολικού βαθμού απόδοσης στο 50% του φορτίου.

Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης του συστήματος μειώνεται κατά 20% σε φορτίο 50% του ονομαστικού, ενώ ο θερμικός βαθμός απόδοσης αυξάνεται κατά 10% στις ίδιες συνθήκες. Τέλος, ο λόγος H/Θ παρουσιάζει μείωση κατά 20%.

3. Παραγωγή θερμότητας

Το μεγαλύτερο μέρος της απορριπτόμενης θερμότητας ανακτάται από τα θερμά καυσαέρια (θερμοκρασία εξόδου καυσαερίου 300-500°C), τα οποία, αφού διέλθουν από το λέβητα ανάκτησης θερμότητας, απορρίπτονται στο περιβάλλον στους 120°C και το ποσοστό ανάκτησης θερμότητας φθάνει το 80%. Το ποσοστό αυτό μπορεί να αυξηθεί με την εγκατάσταση μιας ανοξείδωτης βαθμίδας συμπυκνωτή πριν από την έξοδο των καυσαερίων, αλλά στην περίπτωση αυτή απαιτείται αυξημένο κόστος επένδυσης. Για το λόγο αυτό, η συγκεκριμένη τεχνολογία εφαρμόζεται μόνο σε εγκαταστάσεις των οποίων η ονομαστική εγκατεστημένη ισχύς ξεπερνά το 1 MWe.

Επιπλέον θερμότητα ανακτάται, όπως αναφέρθηκε και στα γενικά της παρούσας ενότητας, από το σώμα της μηχανής, το κύκλωμα λίπανσης και τον εναλλάκτη για την ψύξη του μίγματος καυσίμου-αέρα πριν από την εισαγωγή του στους κυλίνδρους (δεν ξεπερνά το 2-5% της συνολικής ανάκτησης θερμότητας) .

Ο βαθμός θερμικής απόδοσης του συστήματος κυμαίνεται μεταξύ 50-65% ενώ, σε αντίθεση προς τα περισσότερα συστήματα, οι μονάδες με ονομαστική ισχύ μικρότερη των 500 KW παρουσιάζουν μεγαλύτερο βαθμό θερμικής απόδοσης από τις μονάδες με ονομαστική ισχύ μεγαλύτερη των 500 KW.

Ε. Συστήματα συμπαραγωγής με μηχανή Diesel και ανάκτηση θερμότητας

1. Αρχή λειτουργίας

Η ανάπτυξη της μηχανής Diesel στηρίχθηκε πάνω στον ομώνυμο θερμοδυναμικό κύκλο. Κατά τη λειτουργία της μηχανής εκχέεται καύσιμο στους κυλίνδρους, όπου ο αέρας τροφοδοσίας συμπιέζεται σε πολύ μεγαλύτερη πίεση και θερμοκρασία από τις αντίστοιχες στη μηχανή Otto, προκειμένου να πραγματοποιηθεί αυτανάφλεξη του καυσίμου (Σχήμα 16).

Επιπλέον, στη μηχανή Diesel η εκτόνωση του καυσίμου είναι μεγαλύτερη, γιατί γίνεται σε μικρότερη πίεση κατά το άνοιγμα της βαλβίδας εξόδου των καυσαερίων. Αυτοί οι δύο λόγοι είναι οι βασικότεροι για τον καλύτερο ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης της μηχανής Diesel σε σχέση με τη μηχανή Otto.

Τελευταία, έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται υπερπληρωμένες μηχανές Diesel κατ'αντιστοιχία των υπερπληρωμένων μηχανών Otto, προκειμένου να επιτευχθεί αύξηση της παραγόμενης μηχανικής (και ηλεκτρικής) ισχύος.

2. Σύστημα συμπαραγωγής

Στα συστήματα αυτά, τη βασική μονάδα του συστήματος ηλεκτροπαραγωγής αποτελεί η μηχανή Diesel. Το εύρος ισχύος των μηχανών αυτών κυμαίνεται μεταξύ 100 KW-30 MW, με αποτέλεσμα να είναι κατάλληλες τόσο για εγκαταστάσεις μικρής κλίμακας όσο και για μεγάλες βιομηχανικές μονάδες συμπαραγωγής.

Η μηχανή Diesel έχει μεγαλύτερο βαθμό ηλεκτρικής απόδοσης από τον κινητήρα Otto αλλά ο θερμικός βαθμός απόδοσης είναι μικρότερος. Ο λόγος Η/Θ είναι, κατά συνέπεια, μεγαλύτερος και κυμαίνεται μεταξύ 0,70-0,80 (1/1,3-1/1,4).

Η λειτουργία της μονάδας σε μερικό φορτίο είναι ανάλογη με αυτή του κινητήρα Otto, ενώ γενικά οι αποδόσεις του συστήματος είναι καλύτερες σε σχέση με αυτές του κινητήρα Otto.

Οι κινητήρες Diesel διακρίνονται σε ταχύστροφους, μεσόστροφους και βραδύστροφους. Ο Πίνακας 1 δίνει τα όρια ταχύτητας περιστροφής και ισχύος για τον κάθε τύπο, χωρίς τα όρια αυτά να είναι απόλυτα αυστηρά.

Τύπος	Ταχύτητα	Ισχύς	Εφαρμογές
Ταχύστροφος	0-3600	75-1500	Αυτοκίνητα-πλοία
	500-1200	5	Π
Βραδύστροφος	100-180	2000-20000	Πλοία-Βιομηχανία

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά κινητήρων Diesel.

3. Περιοχή ισχύος και βαθμός διαθεσιμότητας

Ο βαθμός απόδοσης μικρών και μεσαίων κινητήρων είναι 35-45%, ενώ σε σύγχρονους μεγάλους κινητήρες μπορεί να φτάσει το 50%. Ο ολικός βαθμός απόδοσης ενός συστήματος συμπαραγωγής με κινητήρα Diesel ανέρχεται στην περιοχή του 80%.

Κατάλληλα καύσιμα για κινητήρες Diesel είναι το φυσικό αέριο και όλα τα μεσαία αποστάγματα πετρελαίου (τα βαρύτερα για τους μεγάλους κινητήρες). Οι μεγάλοι βραδύστροφοι κινητήρες μπορούν να καύσουν ακόμη και κατάλοιπα από την απόσταξη

πετρελαίου (residuals), ενώ εκπονούνται ερευνητικά προγράμματα με αντικείμενο την καύση κονιοποιημένου άνθρακα αναμεμιγμένου με νερό ή υγρό καύσιμο.

Σε σύγκριση με τα προηγούμενα συστήματα, οι κινητήρες Diesel έχουν υψηλότερο λόγο ηλεκτρισμού προς θερμότητα και καλύτερη συμπεριφορά σε μερικά φορτία. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης παρουσιάζει πολύ μικρή πτώση με μείωση του φορτίου. Απαιτούν τακτικότερη συντήρηση και για το λόγο αυτό η διαθεσιμότητα τους είναι μικρότερη: η μέση ετήσια διαθεσιμότητα είναι 80-90%. Η διάρκεια ζωής κυμαίνεται μεταξύ 15-25 έτη και εξαρτάται από το μέγεθος της μονάδας, την ποιότητα του καυσίμου και την ποιότητα της συντήρησης.

4. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Αντίθετα με την πρακτική των παρελθόντων ετών και παρά το σημαντικά μεγαλύτερο βαθμό ηλεκτρικής απόδοσης, οι μηχανές Diesel χρησιμοποιούνται ολοένα και λιγότερο για συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Οι κυριότεροι λόγοι για την εξέλιξη αυτή είναι οι ακόλουθοι:

- α. Υψηλό κόστος συντήρησης της μηχανής.
- β. Δέσμευση για χρήση συγκεκριμένου καυσίμου.
- γ. Μικρότερη αξιοπιστία σε σχέση με μονάδες αεριοστροβίλων.
- δ. Υψηλό κόστος αρχικής επένδυσης.
- ε. Υψηλότερα σημεία δρόσου των καυσαερίων (και, κατά συνέπεια, μικρότερος βαθμός ανάκτησης θερμότητας).
- στ. Εκπομπές SO₂.
- ζ. Αυξημένη στάθμη θορύβου και κραδασμών.

Πέρα από τη βελτίωση των παραπάνω, οι νεότερες τάσεις για εξέλιξη των μηχανών Diesel αποσκοπούν:

α. στη **μείωση των εκλυόμενων ρύπων**, αφενός με την ανάπτυξη τεχνολογιών μείωσης SO₂ και NO_x, και αφετέρου με την προσθήκη φίλτρων κατακράτησης αιωρούμενων σωματιδίων. Προς την ίδια κατεύθυνση κινούνται επίσης και ερευνητικά προγράμματα που εκπονούνται με στόχο τη μείωση της δημιουργίας ρύπων με τροποποίηση του θαλάμου καύσης.

β. στην **αύξηση του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης**, ιδιαίτερα σε μερικό φορτίο με τη χρήση ηλεκτρονικά ελεγχόμενων αντλιών τροφοδοσίας καυσίμου, μέσω των οποίων η παροχή του εγχεόμενου καυσίμου ρυθμίζεται ανάλογα με το φορτίο και τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και της μηχανής.

ΣΤ. Συστήματα συμπαραγωγής μικρής κλίμακας

Για τη μείωση του κόστους τόσο της μονάδας συμπαραγωγής αυτής καθαυτής, όσο και των απαιτούμενων εγκαταστάσεων για τη σύνδεση και λειτουργία του επί μέρους εξοπλισμού των μονάδων συμπαραγωγής, έχουν αναπτυχθεί τον τελευταίο καιρό τυποποιημένα συστήματα σε μορφή “πακέτου”, με ονομαστική παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ 10-1000 kW.

Τα συστήματα αυτά (small scale cogeneration systems) περιλαμβάνουν τη βασική μονάδα ηλεκτροπαραγωγής, τους εναλλάκτες, τη γεννήτρια καθώς και τον ηλεκτρικό πίνακα ελέγχου, έτσι ώστε να απλοποιηθεί η εγκατάστασή τους με μόνες απαιτήσεις τη σύνδεση του συστήματος με το ηλεκτρικό και υδραυλικό δίκτυο της επιχείρησης.

Η βασική μονάδα ηλεκτροπαραγωγής των συστημάτων αυτών είναι μία μηχανή Diesel. Για ισχύ μικρότερη των 100 kW είναι δυνατή ή χρήση κινητήρα Otto, ενώ για ισχύ μεγαλύτερη των 600 kW μπορεί να χρησιμοποιηθεί αεριοστροβίλος. Ως καύσιμο χρησιμοποιείται φυσικό αέριο, υγραέριο, Diesel ή άλλα κλάσματα του πετρελαίου, ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη βασική μονάδα ηλεκτροπαραγωγής.

Το 27-35% της ενέργειας του καυσίμου μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό και τό 50-55% σε θερμότητα (το 20-25% θερμότητα θερμοκρασίας 350-400°C που ανακτάται από τα καυσαέρια, και το 25-30% θερμότητα θερμοκρασίας 60-110°C που ανακτάται από τα ψυκτικά κυκλώματα του κινητήρα). Επομένως, ο λόγος ηλεκτρισμού προς θερμότητα είναι 0,5-0,7.

Καθώς η διάδοση των συστημάτων συμπαραγωγής μικρής κλίμακας έχει αρχίσει πρόσφατα, δεν υπάρχουν πολλά στοιχεία γύρω από την αξιοπιστία και τη διαθεσιμότητα τους. Σχετική μελέτη με αντικείμενο 46 μονάδες εγκατεστημένες στην Καλιφόρνια έδειξε ένα μέσο όρο διαθεσιμότητας 79% με τυπική απόκλιση 22,9%.

Ο βαθμός διαθεσιμότητας των μονάδων με επιμελημένη κατασκευή και συντήρηση φθάνει το 90%. Σημαντική συμβολή στο σημείο αυτό έχει ο αυτόματος έλεγχος της λειτουργίας των συστημάτων.

Στα συστήματα αυτόματου ελέγχου περιλαμβάνονται μικροεπεξεργαστές εγκατεστημένοι στο χώρο όπου βρίσκεται η μονάδα, οι οποίοι παρακολουθούν τις τιμές κρίσιμων παραμέτρων και μεταβιβάζουν τις σχετικές πληροφορίες μέσω αποκλειστικής τηλεφωνικής γραμμής σε κεντρικό ηλεκτρονικό υπολογιστή. Όταν η εξέλιξη των τιμών ορισμένων παραμέτρων δείχνει επερχόμενη βλάβη, ειδοποιείται η ομάδα συντηρήσεως που επεμβαίνει προτού καν εκδηλωθεί η βλάβη.

Ένα τέτοιο δίκτυο παρακολούθησης συστημάτων συμπαραγωγής μικρής κλίμακας έχει εγκατασταθεί στην Αγγλία με πολύ καλά αποτελέσματα. Η αγορά συστημάτων συμπαραγωγής μικρής κλίμακας παρουσιάζει έντονη ανάπτυξη στην Αγγλία, τη Γερμανία και την Ολλανδία.

V. Συγκριτική ανάλυση τεχνολογιών συμπαραγωγής

A. Συγκριτική εξέλιξη συστημάτων συμπαραγωγής

Παλαιότερα, οι εγκαταστάσεις συμπαραγωγής σε βιομηχανικές επιχειρήσεις περιορίζονταν στις περιπτώσεις που τόσο το ηλεκτρικό όσο και το θερμικό φορτίο της βιομηχανίας ήταν σταθερά σε 24ωρη βάση 7 ημέρες την εβδομάδα, και το ηλεκτρικό φορτίο ξεπερνούσε τα 10 MW. Έτσι, στις περισσότερες περιπτώσεις, η εγκατάσταση μιας μονάδας ατμοστρόβιλου ήταν η μοναδική επιλογή για την επιχείρηση.

Ωστόσο, με την εξέλιξη και την εισαγωγή των αεριοστρόβιλων σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις συμπαραγωγής, διευρύνθηκαν οι κλάδοι αλλά και τα μεγέθη των βιομηχανιών που εγκαθιστούν συστήματα συμπαραγωγής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα στις περισσότερες νέες εγκαταστάσεις να προτιμώνται σήμερα μονάδες αεριοστρόβιλου, γιατί ο ατμοστρόβιλος σε σχέση με τον αεριοστρόβιλο παρουσιάζει τα παρακάτω μειονεκτήματα:

- Το σύστημα με ατμοστρόβιλο απαιτεί σημαντικά μεγαλύτερο κόστος επένδυσης.
- Ο βαθμός ηλεκτρικής απόδοσης του ατμοστρόβιλου είναι μικρότερος.
- Η απαιτούμενη υποδομή και το κόστος συντήρησης των συστημάτων με ατμοστρόβιλο είναι σημαντικά μεγαλύτερα.
- Ο απαιτούμενος χρόνος για τη θέση σε λειτουργία στην ονομαστική ισχύ των συστημάτων με ατμοστρόβιλο είναι πολύ μεγαλύτερος.
- Τα συστήματα με ατμοστρόβιλο απαιτούν περισσότερο διαθέσιμο χώρο για εγκατάσταση.

Τα συστήματα Diesel και αεριοστρόβιλου έχουν υψηλότερη θερμοδυναμική απόδοση από τα αντίστοιχα ατμοστρόβιλου ή από τη χωριστή παραγωγή ηλεκτρισμού και ατμού.

Τα συστήματα Diesel και αεριοστρόβιλου απαιτούν περισσότερη ενέργεια ανά kWh παραγόμενου ηλεκτρισμού από τον αμμοστρόβιλο, αλλά σημαντικά λιγότερη από τις 2500 kcal/kWh που χρειάζονται συνήθως οι κεντρικοί σταθμοί παραγωγής ισχύος (ΑΗΣ της ΔΕΗ).

Τα συστήματα Diesel παράγουν περισσότερο ηλεκτρισμό ανά μονάδα παραγόμενης θερμότητας ενώ οι αεριοστρόβιλοι υπερέχουν σ' αυτό από τους αμμοστρόβιλους.

Τελικά, η επιλογή ενός συστήματος πρέπει να γίνεται έπειτα από γενική οικονομική θεώρηση όλων των συστημάτων συμπαραγωγής που διατίθενται και είναι ικανά να καλύψουν τις ανάγκες του εργοστασίου.

Τα συστήματα συμπαραγωγής με αμμοστρόβιλο παρουσιάζουν μεγαλύτερο κόστος συντήρησης από τα συστήματα αντίστοιχης ισχύος με αεριοστρόβιλους και απαιτούν εξειδικευμένο προσωπικό για τη λειτουργία τους.

B. Σύγκριση χαρακτηριστικά μονάδων συμπαραγωγής

Η σύγκριση των τεχνολογιών συμπαραγωγής που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα θα πρέπει να αφορά στα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά τους, δηλαδή:

- το εύρος παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος,
- το μέσο ετήσιο βαθμό διαθεσιμότητας,
- τον ηλεκτρικό και θερμικό βαθμό απόδοσης,
- το λόγο H/Θ,
- το ελάχιστο επιτρεπόμενο ηλεκτρικό φορτίο,
- την ποιότητα της παραγόμενης θερμότητας και
- τη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης.

Η επιλογή της πλέον κατάλληλης τεχνολογίας συμπαραγωγής για βιομηχανικές εφαρμογές, εκτός από τις παραπάνω παραμέτρους, προϋποθέτει τη διερεύνηση και μιας σειράς άλλων παραγόντων, κυρίως οικονομικού χαρακτήρα, όπως:

- το αρχικό κόστος επένδυσης,
- το κόστος συντήρησης,
- την εξειδικευμένη λειτουργία (και, κατά συνέπεια, την πρόσληψη εξειδικευμένου προσωπικού, εκτός αντικειμένου παραγωγικής διαδικασίας),
- την τεχνική υποστήριξη των εγκαταστάσεων στην Ελλάδα και
- την οικονομική απόδοση της επένδυσης.

Γ. Συντελεστής Εκμετάλλευσης Καυσίμου για Ηλεκτροπαραγωγή

Ένα μέγεθος που έχει οριστεί για την περαιτέρω σύγκριση των διαφόρων συστημάτων συμπαραγωγής και χρησιμεύει ως δείκτης για την οικονομική σύγκριση της απόδοσης των συστημάτων είναι ο **Συντελεστής Εκμετάλλευσης Καυσίμου για Ηλεκτροπαραγωγή (ΣΕΚΗ) ή Incremental Heat Rate (I.H.R.)**.

Ο συντελεστής αυτός ορίζεται ως η ποσότητα του καυσίμου που θα πρέπει να καταναλωθεί για την παραγωγή μιας μονάδας ηλεκτρισμού, μείον το καύσιμο που καταναλώνεται για παραγωγή ατμού που χρησιμοποιείται στην παραγωγική διαδικασία. Ο συγκεκριμένος συντελεστής, ουσιαστικά, εκφράζει το ποσό του επιπλέον καυσίμου που δαπανάται για την παραγωγή μιας μονάδας ηλεκτρισμού, μετριέται σε kcal/kWh και χαρακτηρίζει την αποδοτικότητα κάθε τεχνολογίας συμπαραγωγής.

Ο συντελεστής αυτός, όπως αναφέρθηκε, χρησιμεύει για τον προσδιορισμό της οικονομικότητας της ενεργειακής απόδοσης κάθε συστήματος σε συνάρτηση με το καύσιμο που χρησιμοποιείται. Έτσι μετατρέπεται σε €/kWh, μέγεθος που για κάθε τεχνολογία

διαφοροποιείται μόνο σε σχέση με το επιλεγόμενο καύσιμο. Κατά συνέπεια, το μέγεθος αυτό αποτελεί ένα συγκρίσιμο στοιχείο κόστους παραγωγής kWh σε σχέση με την τιμή αγοράς της από τη ΔΕΗ.

Δ. Σύγκριση των τεχνικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών των μονάδων συμπαραγωγής

Για την παρουσίαση μιας ολοκληρωμένης εικόνας των συστημάτων συμπαραγωγής συντάχθηκε ο Πίνακας 2 που περιλαμβάνει όλα τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά τους. Για τη σύνταξή του χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία που προκύπτουν από τη σχετική βιβλιογραφία και από συγκεκριμένες εγκαταστάσεις στην Ευρώπη. Κατά συνέπεια, τα τεχνικά χαρακτηριστικά που αναφέρονται στο συγκεκριμένο Πίνακα είναι αρκετά κοντά σε εκείνα που δίνουν σήμερα οι περισσότεροι κατασκευαστές μονάδων συμπαραγωγής. Ωστόσο, η συνεχής εξέλιξη της τεχνολογίας στον τομέα αυτό αναμένεται να βελτιώσει κυρίως τα τεχνικά χαρακτηριστικά και να διευρύνει τα λειτουργικά χαρακτηριστικά τους.

Στον Πίνακα παρατηρούμε ότι για μικρή ισχύ ηλεκτροπαραγωγής, το πλέον ενδεικνυόμενο σύστημα συμπαραγωγής είναι με κινητήρα Otto και λέβητα ανάκτησης θερμότητας καυσαερίων, ενώ το σύστημα με κινητήρα Diesel είναι επίσης κατάλληλο για μικρή ισχύ και εγκαταστάσεις με υψηλό λόγο Η/Θ.

Η τεχνολογία με τα περισσότερα συγκριτικά πλεονεκτήματα και με τεχνικά χαρακτηριστικά που ταιριάζουν σε πολλούς βιομηχανικούς κλάδους είναι ο αεριοστρόβιλος, που απαιτεί όμως λειτουργία κοντά στο ονομαστικό του φορτίο. Ο ατμοστρόβιλος χρησιμοποιείται κυρίως σε βιομηχανίες με μικρό και σταθερό λόγο Η/Θ, καθώς και με σχετικά υψηλά ηλεκτρικά φορτία. Τέλος, μονάδες συνδυασμένου κύκλου χρησιμοποιούνται σε μεσαίου έως μεγάλου μεγέθους βιομηχανικές εγκαταστάσεις (χημικές βιομηχανίες, διυλιστήρια).

Ο συγκεκριμένος Πίνακας αποτελεί γενικά ένα βοήθημα κατ' αρχάς για τον προσδιορισμό της πλέον κατάλληλης τεχνολογίας συμπαραγωγής για μια βιομηχανική εγκατάσταση. Δεδομένων όμως των ιδιαιτεροτήτων τόσο στην παραγωγική διαδικασία όσο και στα οικονομικά αποτελέσματα που θα προκύψουν για την επιχείρηση, η τελική επιλογή θα πρέπει να βασίζεται στην προσεκτική θεώρηση καθεμιάς από τις τεχνολογίες που αναφέρονται.

Επιπλέον, από τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά των συστημάτων που παρουσιάζονται στον Πίνακα 2, σημαντικό ρόλο στην επιλογή του συστήματος διαδραματίζουν και άλλα - δευτερεύοντα- τεχνικά χαρακτηριστικά, όπως η ποιότητα της παραγόμενης θερμότητας, η μεταβλητότητα του λόγου Η/Θ, ο χρόνος εγκατάστασης και ο χρόνος ζωής της μονάδας, που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.

Στον Πίνακα 3 παρατηρούμε επίσης ότι οι μηχανές εσωτερικής καύσης (Otto και Diesel) παράγουν κατά βάση θερμό νερό 100°C και ατμό χαμηλής πίεσης, ενώ αντίθετα ατμός μέσης πίεσης (>5 bar) λαμβάνεται τόσο από συστήματα αεριοστροβίλου, ατμοστροβίλου (με στρόβιλο απομάστευσης) όσο και από συστήματα συνδυασμένου κύκλου. Ο μικρότερος χρόνος εγκατάστασης είναι αυτός των ΜΕΚ μικρής ισχύος, ενώ στην περίπτωση των συστημάτων συνδυασμένου κύκλου, ο αντίστοιχος χρόνος ξεπερνά συνήθως τα 3 χρόνια.

Σημαντικός επίσης παράγοντας κόστους που αναμένεται να επηρεάσει θετικά την οικονομικότητα των μονάδων συμπαραγωγής είναι οι εκπομπές CO₂ ανά kWh, που είναι ενδεχόμενο να αποτελέσουν αντικείμενο φορολόγησης τα προσεχή χρόνια (“πράσινος φόρος”).

E. Οικονομικά στοιχεία συστημάτων συμπαραγωγής

Τα στοιχεία που ακολουθούν έχουν σκοπό να δώσουν μόνο μία ένδειξη κόστους για το σύστημα συμπαραγωγής. Για λεπτομερή οικονομική ανάλυση, τα στοιχεία που θα χρησιμοποιηθούν θα πρέπει να προκύπτουν από συγκεκριμένες προσφορές κατασκευαστριών εταιρειών.

Γενικά, οι εγκαταστάσεις συστημάτων συμπαραγωγής με ατμολέβητα και ατμοστρόβιλο αντίθλιψης κοστίζουν από 330 €/kWe (για συστήματα 15 MWe-105 t/h ατμού) έως 440 €/kWe (για συστήματα 7 MWe-55 t/h ατμού), συμπεριλαμβανομένων του ατμολέβητα, του ατμοστροβίλου και της γεννήτριας. Στο κόστος αυτό θα πρέπει να προστεθεί 5% περίπου για τη μελέτη, την επίβλεψη και την οργάνωση του έργου, καθώς και ένα 20-30% για την κατασκευή βοηθητικού εξοπλισμού και εγκαταστάσεων (δικτύων, ατμοπαγίδων, καπνοδόχων κ.λπ.).

Οι εγκαταστάσεις συστημάτων συμπαραγωγής με αεριστρόβιλο και λέβητα ανάκτησης θερμότητας κοστίζουν από 260 €/kWe (για συστήματα 37 MWe-105 t/h ατμού) έως 560 €/kWe (για συστήματα 6 MWe-15 t/h ατμού), συμπεριλαμβανομένων του αεριοστροβίλου, του λέβητα ανάκτησης θερμότητας, του ατμοστροβίλου και της γεννήτριας. Στο κόστος αυτό θα πρέπει να προστεθεί 5% περίπου για τη μελέτη, την επίβλεψη και την οργάνωση του έργου, καθώς και ένα 10-20% για την κατασκευή βοηθητικού εξοπλισμού και εγκαταστάσεων (δικτύων, καπνοδόχων κ.λπ.).

Όσο για τα συστήματα συμπαραγωγής συνδυασμένου κύκλου με αεριστρόβιλο, ατμολέβητα υψηλής πίεσης και ατμοστρόβιλο, αυτά κοστίζουν από 250 €/kWe (για συστήματα 50 MWe-105 t/h ατμού) έως 380 €/kWe (για συστήματα 27 MWe-55 t/h ατμού), συμπεριλαμβανομένων του ατμολέβητα, του ατμοστροβίλου, του αεριοστροβίλου και των γεννητριών. Στο κόστος αυτό θα πρέπει να προστεθεί 5% περίπου για τη μελέτη, την επίβλεψη και την οργάνωση του έργου, καθώς και ένα 20-30% για την κατασκευή βοηθητικού εξοπλισμού και εγκαταστάσεων (δικτύων, ατμοπαγίδων, καπνοδόχων κ.λπ.).

Βασική μονάδα ηλεκτροπαραγωγής	Ελάχιστη ονομαστική ηλεκτρική ισχύς (MWe)	Μέγιστη ονομαστική ηλεκτρική ισχύς (MWe)	Ελάχιστο επιτρεπ. φορτίο (% επί του ονομ.)	Μέσος ετήσιος βαθμός διαθεσιμότητας (%)	Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης (%)		Θερμικός βαθμός απόδοσης (%)	Ολικός βαθμός απόδοσης (%)	Σ.Ε.Κ.Η. ¹ (KcalVKWh)	Λόγος Η/Θ
					Ονομαστικό φορτίο	Φορτίο 50%				
Κινητήρας Otto	0.015	1.3	50	85 – 90	32 – 35	12 – 25	50 – 60	80 – 85	Δεν υπάρχουν στοιχεία	0.5 – 0.8
Κινητήρας Diesel	0.1	20	50	80 – 90	35 – 45	32 – 40	40 – 45	70 – 80	1630 – 1760	0.7 – 0.9
Αεριοστρόβιλος	0.1	30	75	95 – 97	25 – 35	15 – 25	40 – 50	70 – 80	1260 – 1510	0.25 – 0.8
Ατμοστρόβιλος απομάστευσης	0.5	100	30	85 – 95	14 – 30	12 – 25	40 – 60	60 – 80	1200 – 1400	0.1 – 0.3
Ατμοστρόβιλος αντίθλιψης	0.5	100	30	85 – 95	15 – 30	12 – 25	40 – 65	65 – 85	1150 – 1250	0.1 – 0.3
Μονάδα συνδυασμένου κύκλου	4	100	40	80 – 85	35 – 45	25 – 30	40 – 50	70 – 90	1450 – 1500	0.6 – 1.1

Βασική μονάδα ηλεκτροπαραγωγής	Ποιότητα θερμότητας (1)	Μεταβλητότητα του λόγου Η/Θ	Θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων (deg C)	Χρόνος εγκατάστασης (μήνες)	Περιοδικοί έλεγχοι εγκαταστάσεων (ετησίως)	Μέσος χρόνος ζωής (έτη)
Κινητήρας Otto	Θ.Ν. Α.Χ.Π.	OXI	400 – 450	6 – 8	8	10
Κινητήρας Diesel	Θ.Ν. Α.Χ.Π.	OXI	320 – 450	6 – 24	10	10
Αεριοστρόβιλος	Α.Μ.Π. Θ.Π.Δ.	NAI (2)	400 – 600	10 – 24	4	15 – 25
Ατμοστρόβιλος απομάστευσης	Α.Χ.Π. Α.Μ.Π.	NAI	180 – 200 (3)	24 – 36	60	30
Αεριοστρόβιλος αντίθλιψης	Α.Χ.Π. Α.Μ.Π.	OXI	180 – 200 (3)	24 – 36	60	30
Μονάδα συνδυασμένου κύκλου	Α.Μ.Π.	NAI	400 – 600 (4)	80 – 85	60	25 – 30

Πίνακας 3: Λειτουργικά χαρακτηριστικά των συστημάτων συμπαραγωγής:

(1) Θ.Ν.: Θερμό νερό (συνήθως 90-100°C).

Α.Χ.Π.: Ατμός χαμηλής πίεσης (3-5 bar).

Α.Μ.Π.: Ατμός μέσης πίεσης (5-10 bar).

(2) Με λέβητα ανάκτησης θερμότητας και συμπληρωματική καύση.

(3) Θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων από τον ατμολέβητα υψηλής πίεσης προς την καπνοδόχο.

(4) Θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων από τον αεριοστρόβιλο.

¹ Συντελεστής Εκμετάλλευσης Καυσίμου για Ηλεκτροπαραγωγή (Σ.Ε.Κ.Η.).

Σύντομα βιογραφικά σημειώματα

Ο καθηγητής **Γεώργιος Μαλαχίας** είναι Διπλωματούχος Μηχανολόγος-Ηλεκτρολόγος του Ε.Μ.Π. (απόφοιτος 1962) και Διδάκτωρ Μηχανολόγος του Ε.Μ.Π. (1970). Από το έτος 1963 έως το 1975 διετέλεσε Επιμελητής της Έδρας των Στοιχείων Μηχανών του Ε.Μ.Π. Από το 1975 έως το 1982 ως Επιστημονικός Συνεργάτης του Ε.Μ.Π. δίδαξε το Μάθημα των Ανυψωτικών και Μεταφορικών Μηχανών στο Ε΄ έτος της Σχολής Μηχανολόγων του Ε.Μ.Π., επιβλέποντας, παράλληλα, πλήθος Διπλωματικών Εργασιών. Το έτος 1975 εξελέγη Επικουρικός Καθηγητής της Ναυτικής Μηχανολογίας της Σχολής Ναυτικών Δοκίμων και από το 1979 μέχρι σήμερα είναι Τακτικός Καθηγητής της ίδιας Σχολής. Από το έτος 2004 είναι Διευθυντής του Τομέα Ναυπηγικής και Ναυτικής Μηχανολογίας και του Εργαστηρίου Ναυτικής Μηχανολογίας. Διδάσκει τα μαθήματα Θερμοδυναμική και Στοιχεία Μηχανών. Έχει ασχοληθεί με θέματα εξοικονόμησης Ενέργειας όπως και με ειδικά θέματα Θέρμανσης και Κλιματισμού Κτιριακών και Βιομηχανικών Εγκαταστάσεων. Έχει συγγράψει πλήθος διδακτικών βιβλίων όπως και πολλές εργασίες επί διαφόρων μηχανολογικών θεμάτων.

Ο κ. **Ιωάννης Κατσάνης** είναι απόφοιτος της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. (1982). Από το 1986 μέχρι σήμερα είναι Επιμελητής της Ναυτικής Μηχανολογίας στη Σχολή Ναυτικών Δοκίμων. Από το 2002 εκπονεί τη διδακτορική του διατριβή στον Τομέα Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π. με θέμα τη Συμπαράγωγή Ηλεκτρικής και Θερμικής Ενέργειας. Τα ερευνητικά του ενδιαφέροντα είναι η εξοικονόμηση ενέργειας, οι εναλλακτικές μορφές ενέργειας και οι ειδικές εφαρμογές σε θέρμανση και κλιματισμό. Έχει συμμετάσχει με ανακοινώσεις σε διεθνή συνέδρια με θέμα την εξοικονόμηση ενέργειας.

Δυναμική πλοίου: ανάλυση της ευστάθειας πλοίου που πλέει σε περιορισμένα ύδατα

Π. Καπασάκης

Περίληψη

Στη μελέτη που ακολουθεί αναλύεται το πρόβλημα της πλοήγησης των πλοίων εντός διαύλων και περιορισμένων υδάτων, με ιδιαίτερη έμφαση στη μελέτη της ευστάθειάς τους και στη μαθηματική ανάλυση της διακλάδωσης (bifurcation analysis). Οι κλασικές εξισώσεις της κίνησης και των ελιγμών του πλοίου², πλαισιωμένες από ένα μοντέλο για την αλληλεπίδραση μεταξύ πλοίου και διαύλου, χρησιμοποιούνται για να δείξουν το μοντέλο της δυναμικής του ανοικτού βρόχου (open loop dynamics). Η χρήση ενός νόμου ελέγχου (ελεγκτή ή control law) και ενός σχεδίου κατεύθυνσης (guidance scheme), με τις κατάλληλες χρονικές καθυστερήσεις, που χαρακτηρίζουν την απόκριση του συστήματος, υιοθετείται για να παρουσιάσει το μοντέλο της δυναμικής συμπεριφοράς ενός πηδαλιούχου. Το πλήρες σύστημα³ αναλύεται με τη χρήση αμφοτέρων, γραμμικών και μη, τεχνικών και με σκοπό την αξιολόγηση της ευστάθειας του πλοίου υπό πεπερασμένες διαταραχές. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι, για συγκεκριμένες περιοχές των τιμών των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται, είναι δυνατόν να αναπτυχθούν ταλαντώσεις οριακού κύκλου, οι οποίες θα μπορούσαν να επηρεάσουν αρνητικά ή να θέσουν σε κίνδυνο την ευστάθεια του συστήματος καθώς και την ασφάλεια των επιχειρήσεων.

Abstract

The problem of ship steering in canals and confined waters is analyzed with emphasis on stability and bifurcation analysis. The classical maneuvering equations of motion augmented with a model for ship–canal interaction are used to model the open-loop dynamics. Coupling of a control law and a guidance scheme with appropriate time lags is employed to model the essential dynamics of a helmsman. The complete system is analyzed using both linear and nonlinear techniques in order to assess its stability under finite disturbances. The results indicate that for certain regions of parameters, limit cycle oscillations may develop that could compromise system stability and safety of operations.

² Με τον όρο πηδαλιουχία ή κίνηση ελιγμών πλοίου (ship maneuvering) ορίζεται η ελεγχόμενη αλλαγή ή η διατήρηση της κατεύθυνσης της κίνησης ενός πλοίου και της ταχύτητάς του στην κατεύθυνση αυτή. Στα πλοία επιφανείας, η πηδαλιουχία εξετάζει όλα τα διανύσματα δυνάμεων, ροπών και κινήσεων που ενεργούν σε κάθε κατεύθυνση πάνω στο οριζόντιο επίπεδο.

³ Σύστημα είναι ένα σύνολο στοιχείων (πραγμάτων, διεργασιών, εννοιών, κ.λπ.), διατεταγμένων σύμφωνα με τη φυσική και λογική τους τάξη. Στο σύστημα ανήκει και το σύνολο των σχέσεων μεταξύ των στοιχείων του. Δυναμικό χαρακτηρίζεται ένα σύστημα που περιέχει στοιχεία τα οποία επηρεάζονται από άλλα (ή επηρεάζουν άλλα) στοιχεία ή/και συστήματα. Το πλοίο αποτελεί ένα γενικότερο δυναμικό σύστημα ενώ ο αυτόματος πιλότος του ένα ειδικό δυναμικό σύστημα. Οι όροι σύστημα και δυναμικό σύστημα ταυτίζονται στη μελέτη που ακολουθεί. Τα χαρακτηριστικά μεγέθη του συστήματος περιγράφουν το σύστημα, και οι τιμές τους, σε κάθε χρονική στιγμή, καθορίζουν την κατάσταση λειτουργίας του συστήματος. Δυναμική των συστημάτων είναι η μελέτη της χρονικής μεταβολής των χαρακτηριστικών μεγεθών τους κατά τη διάρκεια μιας μεταβολής στην κατάσταση τους.

I. Εισαγωγή

A. Περιορισμένα ύδατα

Η επιτυχημένη και ασφαλής διέλευση του πλοίου που κινείται σε περιβάλλον περιορισμένων υδάτων⁴ εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του πλοίου, από τις ικανότητες του κυβερνήτη του, από τοπογραφικούς παράγοντες της περιοχής όπου βρίσκεται, και από άλλους παράγοντες, όπως π.χ. από τα ναυτιλιακά βοηθήματα που διαθέτει, από την κίνηση των άλλων σκαφών που βρίσκονται στο διάυλο, από τη δυνατότητα ή όχι της ρυμούλκησης του στο διάυλο, από τους ισχύοντες κανόνες πλοήγησης κ.λπ.

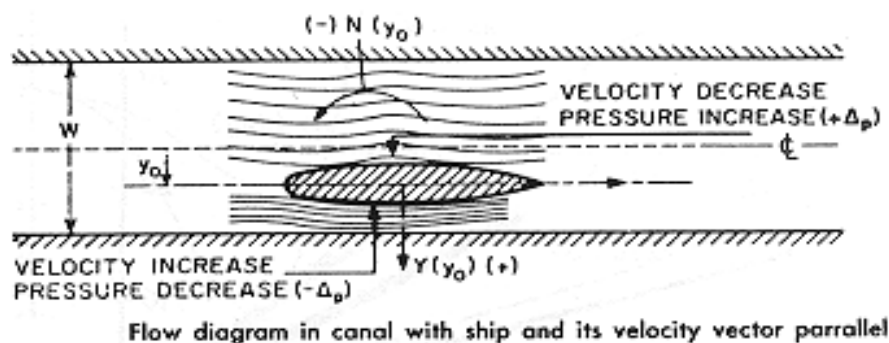
Η ανάλυση της πλοήγησης πλοίου που πλέει σε περιβάλλον περιορισμένων υδάτων είναι ιδιαίτερα περίπλοκη. Οι αποφάσεις σχετικά με την ασφαλή ναυσιπλοΐα του πλοίου σε θαλάσσιες οδούς βασίζονται τις περισσότερες περιπτώσεις στην πρακτική εμπειρία και τη ναυτοσύνη του κυβερνήτη. Ωστόσο, το πρόβλημα του χειρισμού / ελέγχου των πλοίων που πλέουν σε περιορισμένα ύδατα και, ιδιαίτερα, σε διαύλους έχει τύχει ιδιαίτερης προσοχής, τα τελευταία χρόνια. Ορισμένοι από τους λόγους που εξηγούν αυτό το ενδιαφέρον είναι: α) το ολοένα και αυξανόμενο μέγεθος των πλοίων, ειδικά των δεξαμενόπλοιων (tankers) και των ογκωδών μεταφορικών, φορτηγών πλοίων, β) οι επιπτώσεις από ατυχήματα που σχετίζονται με επικίνδυνα φορτία και το κοινωνικό κόστος από την απώλεια ή τον τραυματισμό μελών του πληρώματος καθώς και την καταστροφή της ιδιωτικής περιουσίας. Οι δυνητικοί κίνδυνοι σύγκρουσης και προσάραξης των πλοίων σε περιβάλλον περιορισμένων υδάτων συγκεντρώνουν το ενδιαφέρον της σύγχρονης έρευνας, καθώς εσφαλμένοι χειρισμοί είναι πιθανόν να καταλήξουν σε δαπανηρές ζημιές των πλοίων, με συνακόλουθες υψηλές αποζημιώσεις για τις ασφαλιστικές εταιρείες και σε καταστροφή του περιβάλλοντος. Ο όρος περιορισμένα ύδατα περιλαμβάνει στενούς διαύλους ή κανάλια, θαλάσσιες οδούς με κατακόρυφες, απόκρημνες ή προεξέχουσες ακτές, ή ευρύτερες περιοχές που πλαισιώνονται από την παρουσία μόλων πρόσδεσης σκαφών (αποβάθρες) και κυματοθραυστών. Οι περιοχές αυτές εισάγουν ουσιαστικές μεταβολές στα ελκτικά χαρακτηριστικά των πλοίων και αντικειμενικές δυσκολίες στο χειρισμό και τον έλεγχό τους.

B. Παρουσίαση του προβλήματος

Το πρόβλημα της ευστάθειας των κινούμενων πλοίων αποτέλεσε το αντικείμενο εκτεταμένων ερευνών στο παρελθόν (Comstock, 1977). Οι περισσότερες από αυτές τις έρευνες σχετίζονται με τη μελέτη της ευστάθειας στην κατεύθυνση (directional stability) του πλοίου σε ανοιχτά πελάγη κάτω από συνθήκες ελέγχου ανοιχτού βρόχου. Είναι ευρέως γνωστό ότι στην περίπτωση των περιορισμένων υδάτων, όπως είναι τα κανάλια ή τα ποτάμια, αν και είναι πιθανόν να υπάρχει ευστάθεια στην πορεία του πλοίου (positional stability) γενικά, στην πραγματικότητα ποτέ δεν συμβαίνει κάτι τέτοιο. Αυτό οφείλεται στην αποσταθεροποιητική δράση των δυνάμεων και των ροπών αναρρόφησης / έλξης (suction) που αναπτύσσονται εγγύς της όχθης. Αυτές ενεργούν πάντα με αποσταθεροποιητικό τρόπο, δηλαδή, μετά από μια μικρή αρχική διαταραχή, δημιουργούν τέτοιες συνθήκες στην πλευση του πλοίου, που τείνουν να εκτρέψουν το πλοίο από την ονομαστική του πορεία (γραμμή πλευσης) (Comstock, 1977). Αξίζει να σημειωθεί στο σημείο αυτό ότι έχουν αναφερθεί αρκετά ατυχήματα πλοίων ως αποτέλεσμα της πρόσκρουσής τους στις όχθες των διαύλων που τους ορίζουν. Σε γενικές γραμμές, το φαινόμενο εξηγείται ως εξής: Όταν ένα πλοίο κινείται σε ύδατα η έκταση των οποίων δεν περιορίζεται από το βάθος ή το πλάτος, οι γραμμές ροής δεν αναπτύσσονται μόνο γύρω από τις πλευρές του πλοίου αλλά και κατά μήκος του πυθμένα του πλοίου. Στην περίπτωση που τα ύδατα είναι αβαθή, η ροή κάτω από τη γάστρα του πλοίου

⁴ Περιορισμένα ύδατα ή αβαθή (shallow waters) ορίζονται εκείνες οι περιοχές, στις οποίες ο λόγος του βάθους των υδάτων προς το βύθισμα του πλοίου (depth to draft ratio) δεν λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες της τιμής 3 (Principles of Naval Architecture, SNAME, Vol. III).

περιορίζεται. Το φαινόμενο αυτό προκαλεί τη διοχέτευση της ροής των υδάτων κάτω από τη γάστρα του πλοίου, στις πλευρές του. Το γεγονός αυτό προκαλεί μεταβολές στο μέτρο των δυνάμεων και των ροπών που ασκούνται στο πλοίο και, επομένως, στις υδροδυναμικές παραγώγους του. Εάν, εκτός από το περιορισμένο βάθος του διαύλου, υφίσταται και περιορισμένο πλάτος, π.χ. κανάλι, οι υδροδυναμικές παράγωγοι τροποποιούνται δριμύτατα σε σχέση με εκείνες σε αβαθείς περιοχές, όπου δεν υφίσταται περιορισμένο πλάτος. Ας υποθέσουμε ότι το πλοίο, με συμμετρία ως προς το επίπεδο $x-Z$, πλέει με τέτοιο τρόπο, ώστε το διάνυσμα της ταχύτητάς του να προσανατολίζεται πάνω στο διαμήκη άξονα συμμετρίας του, και παράλληλα ότι το πλοίο κινείται πάνω στη μέση γραμμή συμμετρίας του διαύλου. Ο διάυλος έχει σταθερή διατομή και συμμετρική σε σχέση με το κατακόρυφο επίπεδό του ($x-Z$). Τότε υπάρχει συμμετρία στη ροή των υδάτων αριστερά και δεξιά του πλοίου και το πλοίο δεν υποβάλλεται σε καμία ροπή στρέψεως ή σε πλευρική δύναμη. Ωστόσο, αν το ίδιο πλοίο κινήθει κατά μήκος του ίδιου διαύλου, με το διαμήκη άξονα συμμετρίας του παράλληλο προς τη μέση γραμμή συμμετρίας / διέλευσης του διαύλου, αλλά μετατοπισμένο κατά μια οριζόντια απόσταση y από τη μέση αυτή γραμμή, η συμμετρία στη ροή διαταράσσεται, όπως φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί. Η αύξηση της ταχύτητας της ροής των υδάτων μεταξύ της γάστρας του πλοίου και της πλησιέστερης σε αυτό όχθης του διαύλου, σε συνδυασμό με την ελάττωση της ταχύτητας της ροής μεταξύ της γάστρας του πλοίου και της απομακρυσμένης από αυτό όχθης του διαύλου, δημιουργεί το ακόλουθο φαινόμενο: Το πλοίο μετακινείται, παράλληλα σε σχέση με το διαμήκη άξονα συμμετρίας του, προς την πλησιέστερη σ' αυτό όχθη, συνεπεία της εφαρμογής μιας δύναμης στο κεντροειδές του, ενώ την ίδια στιγμή δημιουργείται μία τέτοια ροπή, ως προς τον κατακόρυφο άξονα που διέρχεται από το κεντροειδές του, που τείνει να στρέψει την πλώρη του πλοίου προς την αντίπερα / απομακρυσμένη όχθη. Η δημιουργία αυτής της δύναμης και της ροπής συνίσταται στο φαινόμενο Bernoulli, καθώς η κατανομή των πιέσεων και των ταχυτήτων του νερού στην περιοχή του καναλιού / διαύλου, όπου παρουσιάζεται εκτροπή της πλεύσης του πλοίου από την ονομαστική πλεύση του, μεταβάλλεται (Principles of Naval Architecture, SNAME, Vol. III).



Η πλοήγηση του πλοίου κάτω από συνθήκες ανοιχτού βρόχου σπάνια αντιπροσωπεύει την ελκτική συμπεριφορά του πλοίου σε πρακτικές εφαρμογές. Τα πλοία που ταξιδεύουν σε κανάλια βρίσκονται κάτω από συνθήκες ελέγχου κλειστού βρόχου (closed loop control), οι οποίες εξασφαλίζονται από τον πηδαλιούχο, χειροκίνητα ή από έναν αυτόματο πιλότο. Αυτός είναι ο μοναδικός τρόπος να διατηρηθεί η πορεία του πλοίου επί της μέσης γραμμής συμμετρίας του διαύλου, δεδομένου ότι το πλοίο σε αυτές τις συνθήκες πλεύσης (καθώς πλέει επί του διαμήκους άξονα συμμετρίας του διαύλου) βρίσκεται σε κατάσταση ασταθούς ισορροπίας. Ο αυτόματος πιλότος διατηρεί, με κατάλληλες κινήσεις του πηδαλίου, την ευθύγραμμη πορεία του πλοίου, στο οποίο είναι τοποθετημένος.

Είναι, λοιπόν, σημαντικό να αξιολογήσουμε την ευστάθεια του συστήματος υπό την επίδραση πεπερασμένων διαταραχών, ενσωματώνοντας στην ανάλυση που θα ακολουθήσει ένα μοντέλο λειτουργίας υπό συνθήκες ελέγχου κλειστού βρόχου.

Γ. Αντικειμενικός σκοπός και περίγραμμα της μελέτης

Σκοπός της μελέτης αυτής είναι να παρουσιαστούν αμφότερες, γραμμικές και μη, τεχνικές για να αναλυθεί το πρόβλημα της δυναμικής ευστάθειας⁵ των πλοίων που πλέον σε περιορισμένα ύδατα υπό συνθήκες ελέγχου κλειστού βρόχου. Το μοντέλο του πλοίου παρουσιάζεται στην ενότητα II. Αυτό ακολουθεί τις συνήθεις εξισώσεις κίνησης και ελιγμών πλοίου (Clayton and Bishop, 1982), πλαισιωμένες από ένα μοντέλο που στηρίζεται στις αναρροφητικές / ελκτικές επιδράσεις της όχθης (bank suction effects) (Beck, 1976). Ως μοντέλο επιλέχθηκε ένα πλοίο της κλάσεως Mariner (φορτηγό πλοίο), επειδή υπήρχαν διαθέσιμα στοιχεία για τους υδροδυναμικούς του συντελεστές (Comstock, 1977, Bernitsas and Kekridis, 1984). Ένας νόμος ελέγχου κατεύθυνσης βασισμένος στο πρωτοβάθμιο μοντέλο του Nomoto (Nomoto's K – T model)⁶, συνδεδεμένος με ένα νόμο που βασίζεται στην ιθυντήρια γραμμή πορείας / πλεύσης, επιλέγεται προκειμένου να παρουσιασθεί ως μαθηματικό μοντέλο η θεμελιώδης συμπεριφορά του πλοίου σε συνθήκες ελέγχου κλειστού βρόχου. Δεδομένου ότι στην πράξη οι δράσεις ελέγχου (control actions) δεν εφαρμόζονται ποτέ στιγμιαία, εισάγονται κατάλληλες χρονικές καθυστερήσεις στην ανάδραση / ανατροφοδότηση (feedback)⁷. Αυτές μοντελοποιούνται με τη χρήση τεχνικών, ανάλογων με αυτές που περιγράφονται στον (Venne, 1992). Η γραμμική ανάλυση των ιδιοτιμών παρατίθεται στην ενότητα III, με σκοπό να αποκαλυφθούν τα παραμετρικά όρια ευστάθειας του συστήματος. Αποδεικνύεται ότι η ευστάθεια του συστήματος χάνεται, όταν ένα ζεύγος συζυγών μιγαδικών ιδιοτιμών διασχίσει τον άξονα των φανταστικών αριθμών. Τότε το σύστημα οδηγείται σε ασταθή συμπεριφορά, γεγονός που εμπεδώνεται με την εμφάνιση περιοδικών λύσεων ή οριακών κύκλων (limit cycles) (Guckenheimer and Holmes, 1983)⁸. Πρακτικά αυτό γίνεται κατανοητό καθώς το πλοίο παρουσιάζει ανεξέλεγκτη, χαοτική συμπεριφορά⁹ υπό την επίδραση πεπερασμένων διαταραχών και εκτρέπεται σημαντικά από

⁵ Η ικανότητα διατήρησης της πορείας ενός πλοίου είναι στενά συνδεδεμένη με την αρχή της δυναμικής ευστάθειας. Ένα σώμα ή ένα σύστημα καλείται ευσταθές σε μια κατάσταση ισορροπίας σε ακινησία ή κίνηση, αν μετά από την εφαρμογή μιας διαταραχής, που είναι πεπερασμένη σε μέγεθος και που ολοκληρώνεται σε πεπερασμένο χρονικό διάστημα, συνεπεία της δράσης μιας εξωτερικής δύναμης ή ροπής, τείνει, μετά την παρέλευση της διέγερσης, να επανέλθει στην κατάσταση ισορροπίας που βρισκόταν πριν από την εφαρμογή της διαταραχής. Στην ιδανική περίπτωση, θα ήταν επιθυμητό το πλοίο να επανερχόταν στην αρχική του πορεία χωρίς την επέμβαση του πηδαλιούχου ή του αυτόματου πιλότου.

⁶ Το πρωτοβάθμιο μοντέλο του Nomoto εκφράζεται από τη σχέση $T(dr/dt) + r = K\delta$. Ο δείκτης T καλείται ταχύτητα απόκρισης στην πηδαλιουχία (quick response to steering) και ο δείκτης K καλείται ικανότητα στροφής (turning ability).

⁷ Το βασικό χαρακτηριστικό ενός Σ.Α.Ε. κλειστού βρόχου είναι η λειτουργία της ανάδρασης, κατά την οποία το ελεγχόμενο μέγεθος που παρακολουθείται συνεχώς, επαναφέρεται από την έξοδο του συστήματος στην είσοδό του, για να συγκριθεί η τιμή του με κάποια προδιαγραφόμενη επιθυμητή τιμή. Με τον τρόπο αυτό γίνεται επίδραση στο σύστημα κατά την έννοια της μείωσης της διαφοράς μεταξύ της πραγματικής και της επιθυμητής τιμής.

⁸ Οι λύσεις των μη γραμμικών δευτεροβάθμιων δυναμικών συστημάτων μπορεί να προσεγγίζουν ασυμπτωτικά είτε ένα σημείο (σημείο ισορροπίας / equilibrium point) είτε μια κλειστή καμπύλη, γνωστή ως οριακός κύκλος, πάνω στην οποία εξαναγκάζονται να κινούνται για πάντα. Ο οριακός κύκλος αντιπροσωπεύει μια περιοδική λύση. Μια τέτοια απομονωμένη περιοδική λύση λαμβάνει χώρα χωρίς την εφαρμογή κάποιας περιοδικής διέγερσης. Η μελέτη των οριακών κύκλων είναι ένα ιδιαίτερα δύσκολο αλλά ταυτόχρονα ενδιαφέρον αντικείμενο των μη γραμμικών συστημάτων.

⁹ Χαοτικά συστήματα καλούνται τα συστήματα που παρουσιάζουν απρόβλεπτη ντετερμινιστική (ή αιτιατική, δηλαδή οριοθετημένη, περιορισμένη από το φυσικό νόμο) συμπεριφορά. Συγκεκριμένα, η συμπεριφορά των λύσεων τους μπορεί να είναι τυχαία, ακόμη και αν τα συστήματα αυτά καθώς και οι εισοδοί τους έχουν απολύτως ντετερμινιστικά χαρακτηριστικά, ως αποτέλεσμα της υπερβολικής ευαισθησίας των συστημάτων αυτών στις αρχικές συνθήκες. Καθώς κανείς δε μπορεί ποτέ να είναι απόλυτα βέβαιος για την αρχική κατάσταση, η τελική κατάσταση ενός τέτοιου συστήματος ενδέχεται να είναι απρόβλεπτη.

την ονομαστική του πορεία χωρίς να επανέλθει, οποιοδήποτε διορθωτικό μέτρο και αν υιοθετηθεί εκ των υστέρων από τον πηδαλιούχο. Δηλαδή, το πλοίο υφίσταται σημαντική έκπτωση κατά τον πλου του με ιθυντήριο σημείο. Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί, ότι ανάλογες συνθήκες πλευσης, όπως εκείνες των πλοίων που πλέουν σε διάυλο, επικρατούν και στην περίπτωση των παραπλεόντων, αντιπλεόντων ή προσεγγιζόντων πλοίων. Η ουσιαστική διαφορά μεταξύ αυτών των δύο ζητημάτων είναι ότι το όριο του διαύλου έχει μεγάλο μήκος σε σχέση με το μήκος του πλοίου και διαθέτει σταθερή διατομή. Για το λόγο αυτό, οι δυνάμεις και οι ροπές αλληλεπίδρασης σε ένα διάυλο μπορεί να θεωρηθεί ότι εξαρτώνται μόνο από την πλευρική μετατόπιση του πλοίου, y , και από την γωνία εκτροπής του, ψ (yaw angle). Στην περίπτωση των πλοίων που προσεγγίζει το ένα το άλλο ή των αντιπλεόντων ή των παραπλεόντων πλοίων, οι δυνάμεις αλληλεπίδρασης είναι συναρτήσεις της διαμήκους / οριζόντιας απόστασης που χωρίζει τα δύο πλοία, της πλευρικής / εγκάρσιας απόστασής τους, των γωνιών εκτροπής τους, ψ , και, τέλος, του μεγέθους των πλοίων. Στην περίπτωση αυτή, μια μικρή εκτροπή του ενός από τα δύο πλοία πλησίον του άλλου, συνεπεία άστοχης κίνησης του πηδαλιούχου ή ακούσιας πλευρικής μετατόπισης του ενός προς το άλλο ή και των δύο πλοίων μαζί (κινήσεις θαλασσιών ρευμάτων, ανέμου στις οποίες ο χειριστής του πλοίου έχει μικρό ή μη άμεσο έλεγχο), μπορεί να προκαλέσει δριμύτατο αποσταθεροποιητικό αποτέλεσμα, με μη αναστρέψιμη εξέλιξη, οφειλόμενο στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις και ροπές από το νερό, δηλαδή τη μεταβολή των υδροδυναμικών συντελεστών. Συγκεκριμένα, η τάση που εμφανίζεται είναι η προσέγγιση του ενός πλοίου προς το άλλο, με συνέπεια τη σύγκρουσή τους. Συνεπώς, συνθήκες πλευσης πλοίων, όπως συνάντηση και υπερκερασμός σε διάυλο, χειρισμοί προς αποφυγή συγκρούσεως, διέλευση πλοίου κοντά σε αγκυροβολημένο πλοίο σε διάυλο, ανεφοδιασμός πλοίων εν πλω (UNREP) και είσοδος, έξοδος πλοίου από λιμένα, παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον και θα πρέπει να αξιολογούνται με μεγάλη προσοχή.

Ακολουθεί μη γραμμική ανάλυση βασισμένη σε μεθόδους διακλάδωσης κατά Hopf¹⁰ (Hopf bifurcation methods) (Chow and Mallet-Paret, 1977 και Hassard and Wan, 1978), η οποία παρουσιάζεται στην ενότητα IV. Συμπεράσματα και προβληματισμοί παρατίθενται στην ενότητα V. Στην ενότητα VI αναφέρονται και άλλες επιδράσεις από το περιβάλλον των περιορισμένων υδάτων στην πηδαλιούχηση του πλοίου, εκτός από το θέμα της ευσταθούς ή μη συμπεριφοράς του.

II. Διατύπωση του προβλήματος

A. Δυναμική πλοίου

Εστιάζοντας την προσοχή μας στο οριζόντιο επίπεδο, το μαθηματικό μοντέλο που διέπει την κίνηση του πλοίου αποτελείται από τις εξής δύο εξισώσεις: τη μη γραμμική εξίσωση της μεταφορικής κίνησης του πλοίου παράλληλα στο διαμήκη άξονα συμμετρίας του x (sway), και τη μη γραμμική εξίσωση της περιστροφικής του κίνησης ως προς τον κατακόρυφο άξονα του Z (yaw). Αν θεωρήσουμε ένα μεταφερόμενο σύστημα καρτεσιανών συντεταγμένων τοποθετημένο στο γεωμετρικό κέντρο (κεντροειδές) του πλοίου, οι εξισώσεις κίνησης του Νεύτωνα λαμβάνουν τη μορφή¹¹:

$$m \cdot (\dot{v} + u \cdot r + x_G \cdot \dot{r}) = Y, \quad (1)$$

$$I_Z \cdot \dot{r} + m \cdot x_G \cdot (\dot{v} + u \cdot r) = N, \quad (2)$$

¹⁰ Αυτή η διακλάδωση συνήθως καλείται διακλάδωση Poincare'-Andronov - Hopf και σχετίζεται με την εμφάνιση περιοδικών λύσεων ή οριακών κύκλων για το μη γραμμικό σύστημα.

¹¹ Η τελεία πάνω από το μέγεθος a εκφράζει τη μεταβολή του μεγέθους αυτού ως προς το χρόνο (δηλαδή, είναι η παράγωγος da/dt).

Όπου v και r είναι η σχετικές ταχύτητες sway και yaw του κινούμενου πλοίου σε σχέση με το νερό, m είναι η μάζα του πλοίου, I_z η ροπή αδρανείας του σε σχέση με τον κατακόρυφο άξονα z , και u η σταθερή ταχύτητα πλευσης του. Δεδομένου ότι όλες οι ποσότητες θα θεωρηθούν ως αδιάστατα μεγέθη σ' αυτή την ανάλυση, στα επόμενα θα θεωρήσουμε το u ίσο με τη μονάδα. x_G είναι η διαμήκης θέση του κέντρου βαρύτητας του πλοίου σε σχέση με το κεντροειδές του, και Y, N αντιπροσωπεύουν τη συνολική διεγείρουσα δύναμη (excitation sway force) και ροπή (yaw moment), αντίστοιχα.

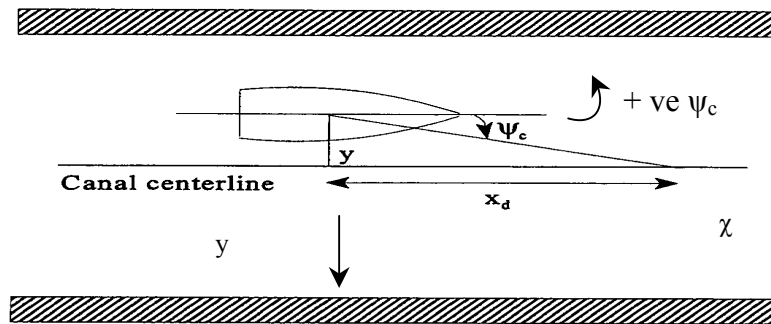


Figure 1: Vehicle geometry and definitions of symbols

Ένα σύνθητες αδρανειακό σύστημα (χ, y) , όπου ο άξονας των χ κατευθύνεται στην υποτιθέμενη ονομαστική γραμμή πορείας του πλοίου και ο άξονας των y εκφράζει την απόσταση του πλοίου από τον άξονα συμμετρίας του διαύλου, φαίνεται στη Figure 1.

Υποθέτουμε ότι η ονομαστική ευθεία γραμμή πορείας του πλοίου είναι κατά μήκος του άξονα συμμετρίας του διαύλου. Στις περιπτώσεις όπου η έννοια του γεωμετρικού άξονα συμμετρίας του διαύλου δεν είναι κατάλληλη, υποθέτουμε ότι η ονομαστική πορεία του πλοίου είναι κατά μήκος εκείνης της θέσης που εξασφαλίζει στο πλοίο τη μηδενική απόκλιση / εκτροπή του από την επίδραση της όχθης. Αυτή η υπόθεση είναι συνεπής με τις συνιστώμενες πρακτικές / τακτικές ναυσιπλοΐας που χρησιμοποιούνται σήμερα. Στη Figure 1 το πλοίο βρίσκεται στο σημείο (χ, y) και επιχειρεί να στρέψει το διαμήκη άξονα συμμετρίας του προς την κατεύθυνση ενός σημείου στόχου (ιθυντήριο σημείο / target point) που βρίσκεται μπροστά από το πλοίο και επί της ονομαστικής του πορείας σε απόσταση x_d (preview distance). ψ_c (commanded heading angle) είναι η γωνία που σχηματίζει η ιθυντήρια γραμμή πλευσης με το διαμήκη άξονα συμμετρίας του πλοίου, ώστε το πλοίο να βρεθεί σύντομα, μετά από κατάλληλο χειρισμό του πηδαλιούχου, στο σημείο τομής της ιθυντήριας γραμμής πλευσης και του γεωμετρικού άξονα συμμετρίας του διαύλου (δηλαδή, στο ιθυντήριο σημείο). Ο γεωμετρικός άξονας συμμετρίας του διαύλου αποτελεί τη γραμμή αναγωγής ή την ονομαστική πορεία του πλοίου ή τη γραμμή θέσεώς του.

Από τη γεωμετρία του σχήματος συνάγονται οι ακόλουθες σχέσεις:

$$\dot{\psi} = r \quad (3)$$

$$\dot{y} = \sin \psi + v \cos \psi \quad (4)$$

B. Υδροδυναμικοί συντελεστές

Επιλέγουμε ένα πλοίο κλάσεως Mariner ως αντιπροσωπευτικό μοντέλο. Οι υδροδυναμικοί συντελεστές και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πλοίου αυτού λαμβάνονται από τις ερευνητικές πηγές (Comstock, 1977) και (Bernitsas and Kekridis, 1984). Αποτελέσματα πειραματικής και θεωρητικής έρευνας (Beck, 1976) χρησιμοποιήθηκαν με σκοπό να παρουσιασθούν ως μοντέλο οι ελκτικές / αναρροφητικές δυνάμεις και οι ροπές από την επίδραση της όχθης του διαύλου στο πλοίο. Αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στη Figure 2. Αυτά εκφράζουν τη μεταβολή των συντελεστών δύναμης και ροπής εγγύτητας σε σχέση με την παρέκκλιση του πλοίου (η) από τον άξονα συμμετρίας του διαύλου, για πλάτος διαύλου $w = 0.4 L$ (L : Μήκος πλοίου) και για λόγο βήθους διαύλου προς βύθισμα πλοίου (h/T) ίσο με 1.9.

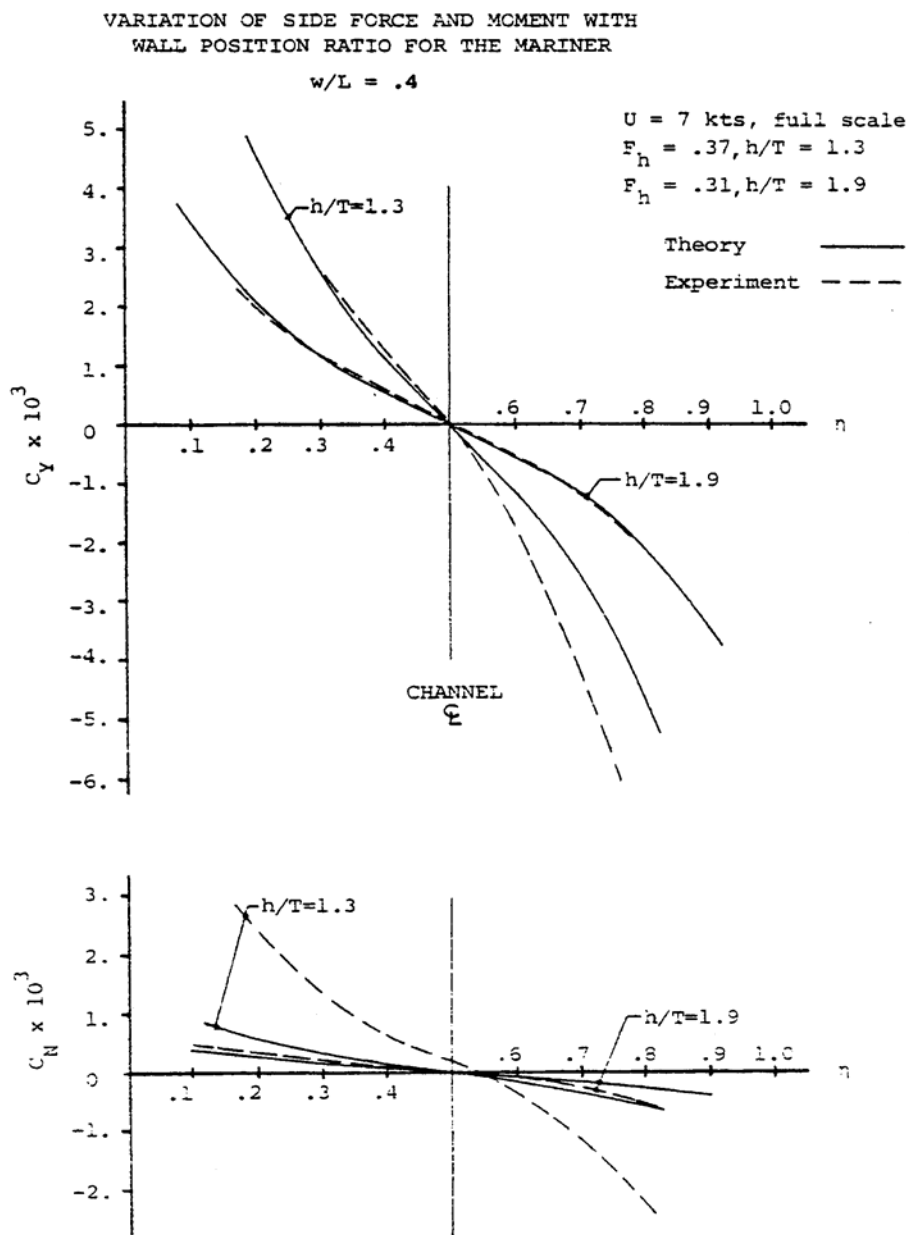


Figure 2: Forces and moments due to canal [Beck (1976)]

Γ. Νόμος ελέγχου

Το γραμμικοποιημένο σύστημα των εξ. (1) έως (3) μπορεί να εκφραστεί με τον ακόλουθο τρόπο:

$$\begin{aligned}\dot{\psi} &= r \\ \dot{v} &= a_{11}\psi + a_{12}v + a_{13}r + a_{14}y + b_1\delta \\ \dot{r} &= a_{21}\psi + a_{22}v + a_{23}r + a_{24}y + b_2\delta\end{aligned}\quad (5)$$

όπου οι συντελεστές a_{ij} , b_j είναι συναρτήσεις των υδροδυναμικών συντελεστών και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του πλοίου και δ η γωνία στροφής του πηδαλίου.

Ο νόμος ελέγχου, που θα χαρακτηρίζει τη συμπεριφορά του χειριστή (πηδαλιούχου), δε βασίζεται στην ανάδραση από την πλευρική (ολισθαίνουσα) ταχύτητα του πλοίου v αλλά στις μεταβολές των ψ και r , επειδή στη ναυσιπλοΐα ο χειριστής αντιλαμβάνεται καλύτερα τις μεταβολές της γωνίας κατεύθυνσης του πλοίου (ψ) και το ρυθμό μεταβολής της γωνίας αυτής, r . Συνεπώς, επιλέγουμε ο νόμος ελέγχου να βασισθεί στο μοντέλο του Nomoto (Crane et al., 1989), που παρουσιάζεται ως ακολούθως με την υπόθεση ότι η ταχύτητα v είναι αμελητέα:

$$\dot{r} = ar + c\psi + b\delta \quad (6) \quad a = a_{23}, b = b_2, c = a_{21}$$

Ένας άλλος γραμμικός νόμος ελέγχου μπορεί να εισαχθεί με τη μορφή :

$$\delta_0 = k_1(\psi - \psi_c) + k_2 r \quad (7)$$

Τα κέρδη k_1 και k_2 υπολογίζονται με τέτοιο τρόπο, ώστε το σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου που προκύπτει από τις εξ. (3), (6) και (7) να έχει την επιθυμητή δυναμική συμπεριφορά. Η παρουσία της διαφοράς $(\psi - \psi_c)$ στην εξ. (7) εκφράζει την προσπάθεια που καταβάλλει ο χειριστής να κατευθύνει το διαμήκη άξονα του πλοίου προς την επιθυμητή πορεία (γραμμή αναγωγής). Η χαρακτηριστική εξίσωση του συστήματος των εξ. (3), (6) και (7) έχει τη μορφή :

$$s^2 - (a + bk_2)s - (c + bk_1) = 0$$

Αν η επιθυμητή χαρακτηριστική εξίσωση του ίδιου συστήματος έχει τη μορφή

$$s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 = 0$$

τότε τα κέρδη ελέγχου υπολογίζονται από τις εξής σχέσεις :

$$k_1 = -\frac{\omega_n^2}{b} - \frac{c}{b}$$

$$k_2 = -\frac{a + 2\zeta\omega_n}{b}$$

Η φυσική συχνότητα ω_n και ο συντελεστής ή βαθμός απόσβεσης ζ επιλέγονται με βάση τις γενικές ιδιότητες των δευτεροβάθμιων συστημάτων ελέγχου¹². Σχετικά υψηλές τιμές της φυσικής συχνότητας ω_n και χαμηλές τιμές του συντελεστή απόσβεσης ζ αντιπροσωπεύουν τη συμπεριφορά ενός άμεσα αποκρινόμενου (ευέλικτου) χειριστή ενώ το αντίθετο είναι αληθές για συνδυασμούς χαμηλών τιμών της φυσικής συχνότητας ω_n και υψηλών τιμών του συντελεστή απόσβεσης ζ .

Τέλος, για να ληφθεί υπόψη ο περιορισμός της μέγιστης γωνίας στροφής πηδαλίου, η γωνία του πηδαλίου που πρέπει να εφαρμοστεί μετά από εντολή του χειριστή ικανοποιεί τη σχέση:

$$\delta = \delta_{sat} \tanh\left(\frac{\delta_0}{\delta_{sat}}\right) \quad (8)$$

Η τιμή της παραμέτρου δ_{sat} , που αποτελεί τη μέγιστη γωνία στροφής του πηδαλίου προς αποφυγή του φαινομένου stall¹³, λαμβάνει τιμές στην περιοχή των 0.4 rad. δ_0 είναι η κλίση της δ στην αρχή (σημείο τομής, 0) των αξόνων και εκφράζεται με τη σχέση (7).

Δ. Σχέδιο κατεύθυνσης

Δεδομένου ότι ο προηγούμενος νόμος ελέγχου καθιστά το πλοίο ευσταθές για οποιαδήποτε απαίτηση της γωνίας κατεύθυνσης (ψ_c), θα πρέπει να συζευχθεί με ένα κατάλληλο σχέδιο κατεύθυνσης / προσανατολισμού, ώστε ο νόμος αυτός να εξασφαλίζει τη διατήρηση του ίχνους του πλοίου κατά μήκος της επιθυμητής του πορείας (γραμμή αναγωγής). Το απλούστερο σχήμα που εκφράζει το μοντέλο των γενικών εκφάνσεων της συμπεριφοράς του πηδαλιούχου είναι αυτό στο οποίο η απαιτούμενη γωνία κατεύθυνσης (ψ_c) ταυτίζεται με τη γωνία παρατήρησης του οπτήρα (διόπτρευση), όπως φαίνεται στη Figure 1, δηλαδή,

$$\psi_c = -\tan^{-1}\left(\frac{y}{x_d}\right) \quad (9)$$

Η πληροφορία του σφάλματος της θέσης του πλοίου, αναφορικά με την παρέκκλιση του από τον άξονα συμμετρίας του διαύλου, y , θεωρούμε ότι υπολείπεται του πραγματικού σφάλματος της θέσης του πλοίου, y , κατά T δευτερόλεπτα. Με άλλα λόγια,

$$y = y(t - T) \quad (10)$$

¹² Ενδεικτικά αναφέρονται οι ακόλουθες τιμές για το συντελεστή ζ : $\zeta = [0.5 \text{ under damped system, } 1.3 \text{ over damped system}]$, χρόνος αποκατάστασης T_s (settling time) = $4/\zeta\omega_n$. Αν είναι γνωστός ο χρόνος T_s τότε μπορεί να υπολογισθεί η παράμετρος ω_n .

¹³ Η γωνία δ_{sat} είναι η γωνία εκτροπής του πηδαλίου πέρα από την οποία παρατηρείται απότομη πτώση της ικανότητας παροχής υδροδυναμικής άντωσης από την υδροτομή (πηδάλιο), λόγω του φαινομένου του αποχωρισμού της ροής του ύδατος.

Στην εξίσωση αυτή, η χρονική καθυστέρηση, T , εκφράζει το χρόνο που απαιτείται ώστε ο πηδαλιούχος να ενεργήσει με γνώμονα την παρέκκλιση του πλοίου από τη γραμμή αναγωγής, λαμβάνοντας τα κατάλληλα διορθωτικά μέτρα.

III. Γραμμική ανάλυση

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που απορρέουν από τη γραμμική ανάλυση του συστήματος των εξισώσεων, οι οποίες διέπουν την κίνηση του πλοίου. Σκοπός αυτής της ανάλυσης είναι να αξιολογηθεί η ευστάθεια ή μη των εξισώσεων αυτών σε σχέση με μικρές αποκλίσεις από την ευθεία γραμμή αναφοράς της πορείας του πλοίου. Δεν θα επιχειρηθεί στο σημείο αυτό ο χαρακτηρισμός της παροδικής απόκρισης (μεταβατικό φαινόμενο / transient response)¹⁴ του συστήματος. Αυτό μπορεί να υλοποιηθεί μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων.

Η παρουσίαση της μεθόδου της γραμμικής ανάλυσης του συστήματος των εξισώσεων που διέπουν την κίνηση του πλοίου, προκειμένου να μελετηθεί η ασυμπτωτική συμπεριφορά του συστήματος, ξεφεύγει από το σκοπό της παρούσας μελέτης. Αναφέρεται ότι αυτή συνίσταται στη μέθοδο ανάπτυξης κατά Taylor (των y και δ , $\delta(t-T_1)$, $y(t-T_2)$) και, ακολούθως, στην προσέγγιση σε πρώτο, δεύτερο και τρίτο βαθμό, ενώ παράλληλα αξιολογούνται και τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της τεχνικής του κριτηρίου ευστάθειας κατά Nyquist¹⁵ στο πεδίο της συχνότητας.

A. Αποτελέσματα

Στις Figures 3 έως 6 παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα. Όλα τα αποτελέσματα αφορούν σε αδιάστατα μεγέθη. Η μεταβολή της κρίσιμης τιμής της απόστασης x_d σε σχέση με τη φυσική συχνότητα ω_n του συστήματος, για μηδενική χρονική καθυστέρηση και με μέγεθος επηρεασμού την τιμή του συντελεστή απόσβεσης ζ , φαίνεται στη Figure 3. Η ευστάθεια του συστήματος εξασφαλίζεται για τιμές της απόστασης x_d μεγαλύτερες από την κρίσιμη τιμή της. Είναι φανερό ότι χαμηλότερες τιμές της φυσικής συχνότητας ω_n απαιτούν υψηλότερες τιμές της παραμέτρου x_d , προκειμένου να εξασφαλιστεί η ευστάθεια του συστήματος. Αυτό σημαίνει ότι ένας λιγότερο ευέλικτος πηδαλιούχος θα χρειαστεί μεγαλύτερη απόσταση x_d για να λειτουργήσει σωστά. Ανάλογα συμπεράσματα ισχύουν και στην περίπτωση που μεταβάλλεται ο συντελεστής απόσβεσης ζ του συστήματος. Στην περίπτωση αυτή υψηλότερες τιμές του ζ εκφράζουν την καλύτερη και πιο άμεση αντίληψη του πηδαλιούχου, ο οποίος χρειάζεται μικρότερη απόσταση x_d για να αντιδράσει σωστά.

Η επίδραση της χρονικής καθυστέρησης T_2 παρουσιάζεται στη Figure 4. Οι χρονικές καθυστερήσεις εκφράζονται σε δευτερόλεπτα. Από τη μελέτη της εικόνας αυτής συνάγεται ότι καθυστερήσεις που κυμαίνονται σε λογικά επίπεδα δεν επηρεάζουν ουσιαστικά την ευστάθεια του συστήματος, τουλάχιστον σε γραμμική έννοια. Βέβαια, η χρονική καθυστέρηση μπορεί να έχει σοβαρή επίπτωση στην πρόσκαιρη απόκριση του συστήματος (transient response), όπως και στην ικανότητά του να απορρίπτει τις εξωτερικές διαταραχές. Αυτό δύναται να στηριχθεί με ένα συστηματικό αριθμό εκτελέσεων αριθμητικών

¹⁴ Σε μεταβατική κατάσταση βρίσκεται ένα σύστημα κατά τη διάρκεια της μετάβασής του από μια σταθερή κατάσταση (steady state) σε μια άλλη.

¹⁵ Χρησιμοποιώντας το κριτήριο Nyquist, από τη σχέση $\arg\{G(j\omega)\} = -\pi$ υπολογίζεται η τιμή της συχνότητας ω (phase crossover frequency). Αντικαθιστώντας την τιμή αυτή στην εξίσωση $(1/x_d) \cdot ||G(j\omega)|| = 1$, υπολογίζεται η κρίσιμη τιμή της απόστασης x_d .

προσομοιώσεων. Ανάλογα συμπεράσματα ισχύουν και για την περίπτωση που η χρονική καθυστέρηση T_1 ¹⁶ λάβει μη μηδενικές τιμές, όπως φαίνεται στη Figure 5.

Τελικά, το έντονα αποσταθεροποιητικό αποτέλεσμα από την παρουσία του διαύλου περιγράφεται στη Figure 6, όπου επιχειρείται να δοθεί έμφαση στη μεταβολή της συμπεριφοράς του συστήματος, στην περίπτωση του πλου σε διάυλο, σε σχέση με τη συμπεριφορά του ίδιου συστήματος στο ανοιχτό πέλαγος. Γίνεται αντιληπτό, ότι, στην περίπτωση του πλου σε διάυλο, απαιτείται να αυξηθεί πολύ περισσότερο η απόσταση x_d (κατά τάξη μεγέθους), αν υιοθετηθούν οι ίδιες παράμετροι ελέγχου, όπως και στην περίπτωση του ανοιχτού πελάγους.

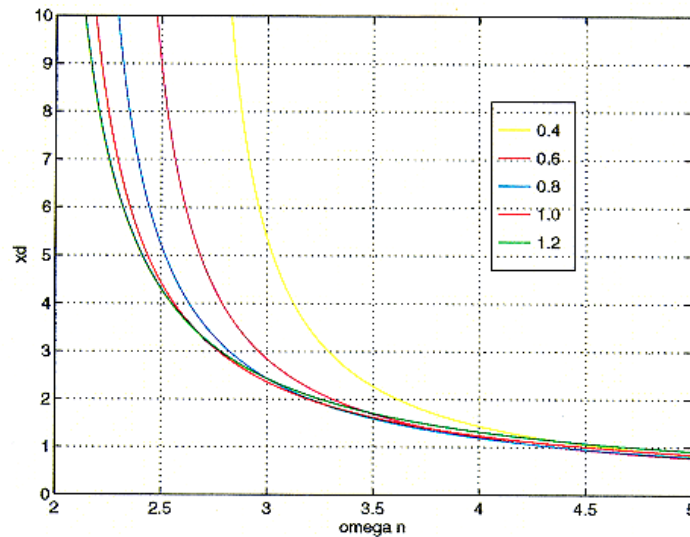


Figure 3: Critical x_d versus ω_n for $T_2 = 0$ and various values of ζ

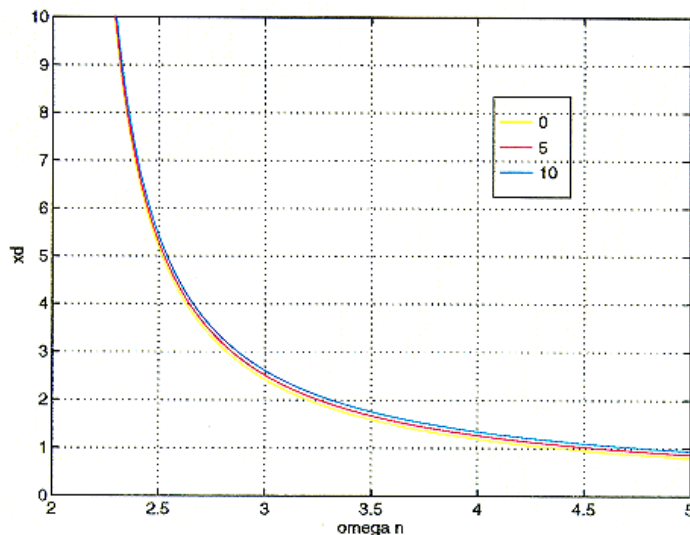


Figure 4: Critical x_d versus ω_n for $\zeta = 0.8$ and various values of T_2

¹⁶ Η χρονική καθυστέρηση T_1 υφίσταται στο νόμο έλεγχου που διέπει τη συμπεριφορά της δ . Παράλληλα, μια διαφορετική χρονική καθυστέρηση, T_2 , παρουσιάζεται στη διαδικασία επεξεργασίας του σφάλματος θέσεως, y , του πλοίου. Αυτή η χρονική καθυστέρηση (T_1) μαζί με την T_2 εκφράζουν τη συνολική απαίτηση χρονικής υστέρησης της αντίδρασης του πλοίου από την εφαρμογή της διορθωτικής δράσης ελέγχου (δηλαδή, της εκτροπής του πηδαλίου, προκειμένου το πλοίο να βρεθεί στη γραμμή αναγωγής).

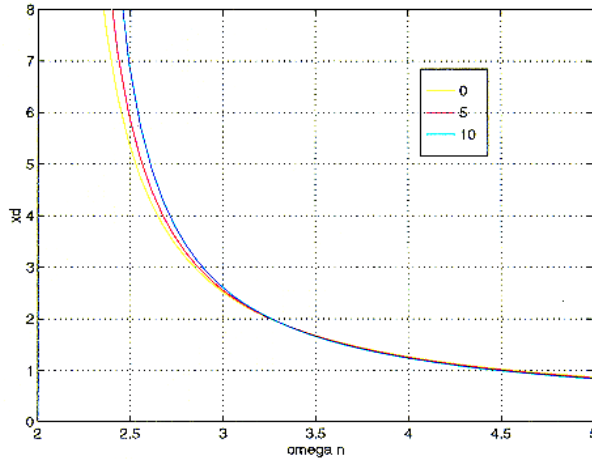


Figure 5: Critical x_d versus ω_n for $\zeta = 0.8$, $T_2 = 5$ sec and various values of T_1

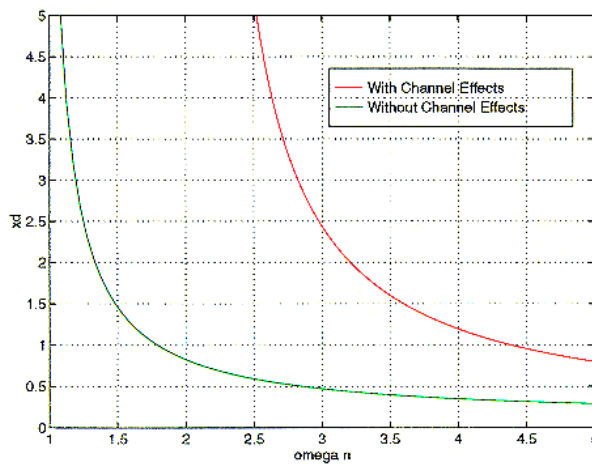


Figure 6: Critical x_d versus ω_n for $\zeta = 0.8$ and zero time lag: Channel effects

IV. Μη γραμμική ανάλυση

Είναι δυνατόν να αποδειχθεί αριθμητικά ότι σε όλες τις περιπτώσεις, που εμφανίζεται απώλεια ευστάθειας στην προηγούμενη ενότητα, ένα ζεύγος συζυγών μιγαδικών ιδιοτιμών, του αντίστοιχου προβλήματος ιδιοτιμών, διασχίζει τον άξονα των φανταστικών αριθμών. Σε μια τέτοια κατάσταση στην οποία μια συγκεκριμένη παράμετρος μεταβάλλεται, έτσι που το πραγματικό μέρος ενός ζεύγους συζυγών μιγαδικών ιδιοτιμών του πίνακα του γραμμικοποιημένου συστήματος να διέρχεται από το σημείο μηδέν, το σύστημα καταλήγει να απομακρύνεται από τη σταθερή κατάστασή του (steady state) με ταλαντευόμενο τρόπο. Αυτού του είδους η απώλεια ευστάθειας καλείται διακλάδωση κατά Hopf (Hopf bifurcation) και παρουσιάζεται εν γένει με δύο μορφές: super critical ή sub critical. Στην πρώτη περίπτωση δημιουργούνται ευσταθείς οριακοί κύκλοι, αφού η ονομαστική κίνηση του πλοίου επί της ευθείας γραμμής πλεύσης του χάσει την ευστάθειά της. Το πλάτος (amplitude) αυτών των οριακών κύκλων συνεχώς αυξάνεται, καθώς η παράμετρος απόσταση (x_d) αποκλίνει αυξανόμενη από την κρίσιμη τιμή της. Για μικρότερες τιμές της παραμέτρου αυτής από την κρίσιμη τιμή της, ο οριακός κύκλος που προκύπτει έχει μικρό πλάτος και ελάχιστα διαφέρει από την ονομαστική αρχική κατάσταση του συστήματος. Ωστόσο, στη δεύτερη περίπτωση δημιουργούνται ευσταθείς οριακοί κύκλοι, προτού η ονομαστική κίνηση επί της ευθείας γραμμής πλεύσης χάσει την ευστάθειά της. Επομένως, ανάλογα με τις αρχικές συνθήκες, είναι δυνατόν το σύστημα να αποκλίνει από την ονομαστική ευθύγραμμη πορεία του και να συγκλίνει προς κάποιον οριακό κύκλο, πριν ακόμη η ονομαστική κίνησή του χάσει την ευστάθειά της. Αυτό σημαίνει ότι στη δεύτερη περίπτωση το πεδίο έλξης της ονομαστικής

κατάστασης του συστήματος περιορίζεται και συρρικνώνεται στο μηδέν, καθώς προσεγγίζεται το κρίσιμο σημείο. Το πλοίο, στην περίπτωση αυτή, ρίχνεται σε μια ταλαντευόμενη σταθερή κατάσταση (steady state), ως συνέπεια της δράσης τυχαίων διαταραχών επαρκούς μεγέθους, ακόμη και όταν η ονομαστική κατάσταση παραμένει ευσταθής. Αφού η ονομαστική κατάσταση γίνει ασταθής, παρατηρείται μια ασυνεχής αύξηση στο μέγεθος των κινήσεων, καθώς δεν υφίστανται πλησίον απλοί, ευσταθείς πόλοι έλξης (attractors), προκειμένου το πλοίο να συγκλίνει. Είναι, συνεπώς, θεμελιώδες στη σχεδίαση, να γίνεται διάκριση μεταξύ των δύο αυτών τύπων της διακλάδωσης (bifurcation).

Η παρουσίαση της μεθόδου της μη γραμμικής ανάλυσης του συστήματος των εξισώσεων που διέπουν την κίνηση του πλοίου, ξεφεύγει από το σκοπό της παρούσας μελέτης. Αρκεί να αναφερθεί ότι αντικειμενικός σκοπός αυτής της ανάλυσης είναι ο υπολογισμός ενός συγκεκριμένου συντελεστή κ (cubic stability coefficient), ο οποίος υπαγορεύει την ευστάθεια των οριακών κύκλων.

Η παρουσίαση της μεθόδου της μη γραμμικής ανάλυσης του συστήματος των εξισώσεων που διέπουν την κίνηση του πλοίου, ξεφεύγει από το σκοπό της παρούσας μελέτης. Αρκεί να αναφερθεί ότι αντικειμενικός σκοπός αυτής της ανάλυσης είναι ο υπολογισμός ενός συγκεκριμένου συντελεστή κ (cubic stability coefficient), ο οποίος υπαγορεύει την ευστάθεια των οριακών κύκλων.

- Αν ο συντελεστής κ λάβει τιμές μικρότερες του μηδενός, τότε εμφανίζονται οριακοί κύκλοι, όταν η παράμετρος x_d λάβει τιμές μικρότερες από την $x_{d \text{ critical}}$, και αυτοί είναι ευσταθείς.
- Αν ο συντελεστής κ λάβει τιμές μεγαλύτερες του μηδενός, τότε εμφανίζονται οριακοί κύκλοι, όταν η παράμετρος x_d λάβει τιμές μεγαλύτερες από την $x_{d \text{ critical}}$, και αυτοί είναι ασταθείς.

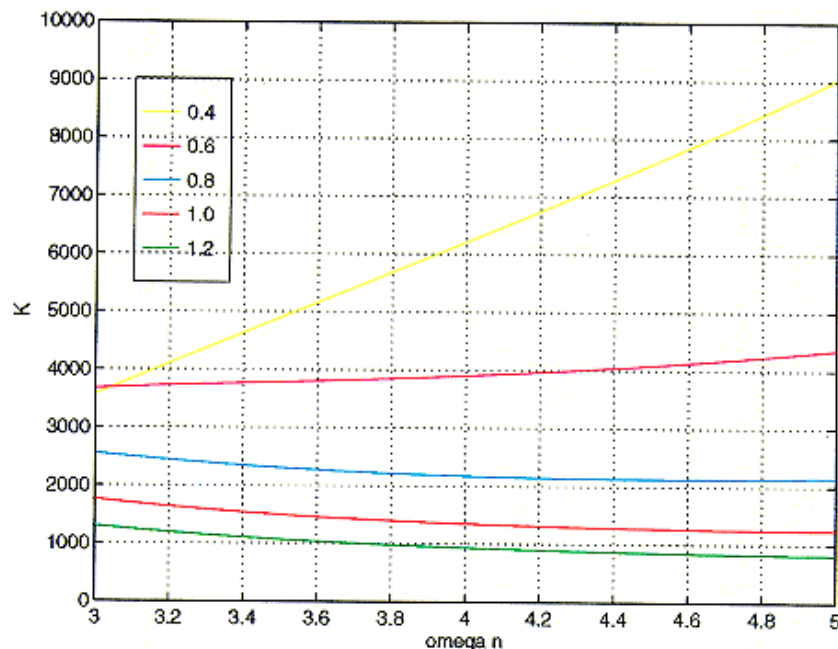


Figure 7: Nonlinear coefficient κ versus ω_n for $\delta_{bat} = 0.4$ and various values of ζ

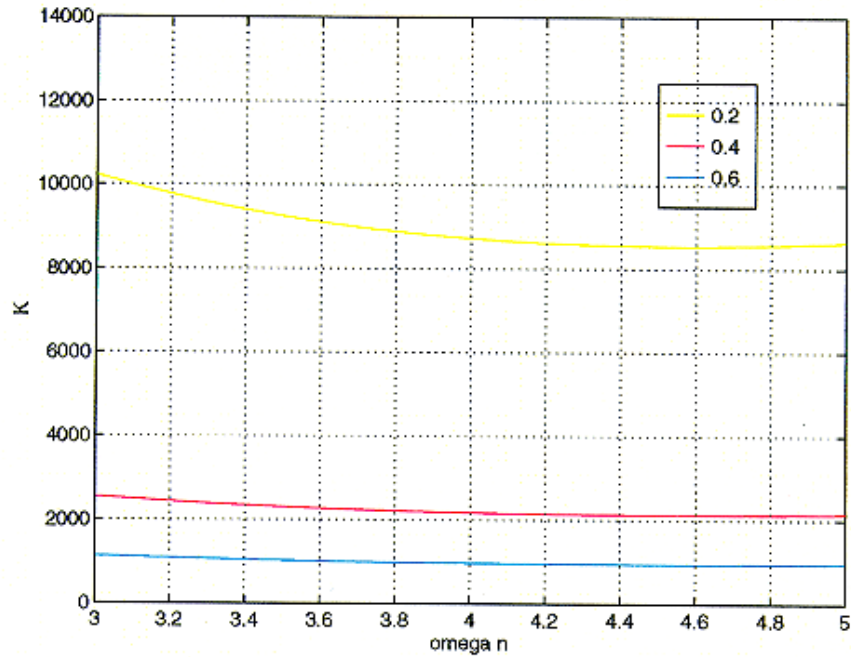


Figure 8: Nonlinear coefficient \mathcal{K} versus ω_n for $\zeta = 0.8$ and various values of δ_{sat}

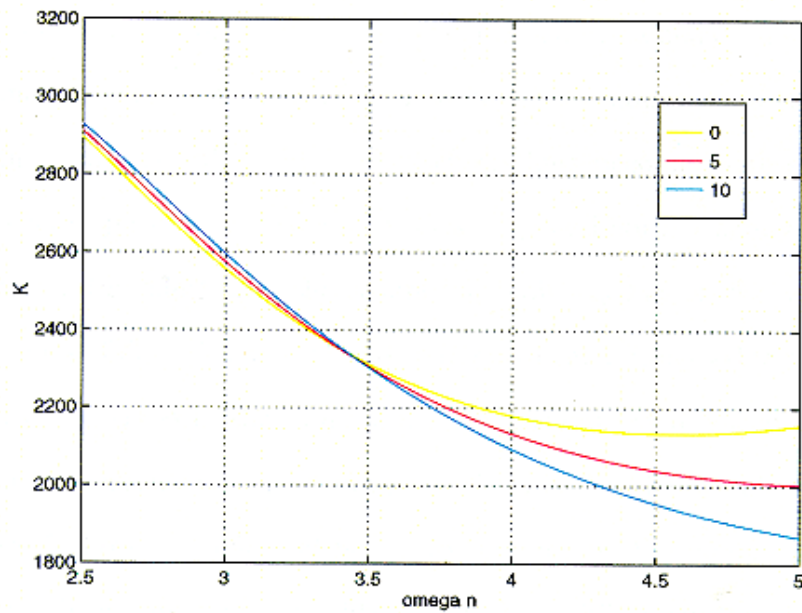


Figure 9: Nonlinear coefficient \mathcal{K} versus ω_n for $\zeta = 0.8$, $\delta_{sat} = 0.4$, $T_1 = 0$, and various values of T_2 (sec)

A. Αποτελέσματα

Χαρακτηριστικά αποτελέσματα, από την άποψη του μη γραμμικού συντελεστή ευστάθειας κ , παρουσιάζονται στις Figures 7 έως 10. Το γενικό συμπέρασμα από τη μελέτη αυτών των γραφικών παραστάσεων είναι ότι οι διακλαδώσεις έχουν sub critical μορφή. Αυτό σημαίνει ότι οποιοδήποτε αποτέλεσμα προκύπτει από τη γραμμική ανάλυση του προβλήματος θα πρέπει να αξιολογηθεί με επιφύλαξη. Οι οριακοί κύκλοι εμφανίζονται πριν η ευστάθεια του συστήματος στη γραμμική της έννοια χαθεί και μπορεί να αναπτυχθεί μία αυτοσυντηρούμενη

ταλάντωση στο σύστημα, ως απόρροια της δράσης μιας εξωτερικής διαταραχής, ακόμη και αν η ονομαστική κατάσταση ισορροπίας του συστήματος εξακολουθεί να είναι ευσταθής. Η μορφή των διακλαδώσεων καθίσταται περισσότερο sub critical, δηλαδή, ο συντελεστής κ λαμβάνει μεγαλύτερες θετικές τιμές, για χαμηλότερες τιμές του συντελεστή απόσβεσης ζ , όπως φαίνεται στη Figure 7. Η Figure 8 δείχνει την επίδραση της τιμής της μέγιστης γωνίας πηδαλίου στο συντελεστή κ . Μεγαλύτερες τιμές της δ_{sat} , αν και δεν σχετίζονται με την κρίσιμη τιμή της x_d , είναι υπεύθυνες για τις σημαντικές μεταβολές που υφίσταται η τιμή του συντελεστή κ . Η γενική τάση είναι οι υψηλότερες τιμές της παραμέτρου δ_{sat} να έχουν ως συνέπεια τη μείωση του συντελεστή κ . Η Figure 9 δείχνει την επίδραση των μη μηδενικών χρονικών καθυστερήσεων στο μη γραμμικό συντελεστή κ . Όπως και στα αποτελέσματα της γραμμικής ανάλυσης, η επίδραση είναι ελάχιστη. Τελικά, η γραφική παράσταση της Figure 10 δηλώνει την επίδραση από την παρουσία του διαύλου στο συντελεστή κ . Αυτή παρουσιάζεται για μηδενικές χρονικές καθυστερήσεις, $\zeta = 0.8$ και $\delta_{sat} = 0.4$. Είναι φανερό ότι η παρουσία του διαύλου έχει ως συνέπεια η μορφή των διακλαδώσεων να γίνεται περισσότερο sub critical σε αντίθεση με την περίπτωση του ανοιχτού πελάγους. Αυτό συνεπάγεται το δριμύτατα αποσταθεροποιητικό αποτέλεσμα που συνιστά η παρουσία του διαύλου σε αμφότερες τις αναλύσεις (γραμμική και μη γραμμική).

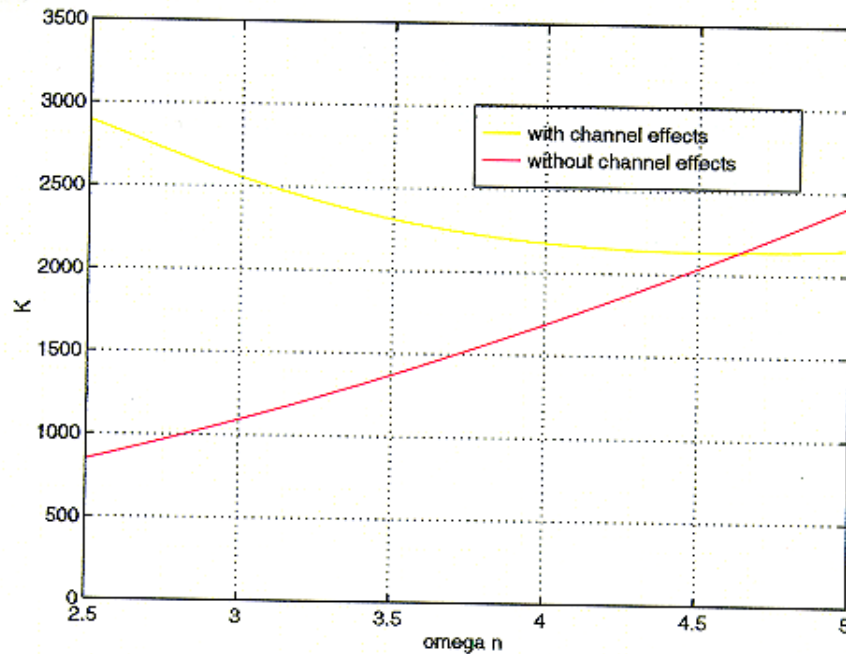


Figure 10: Nonlinear coefficient \mathcal{K} versus ω_n , with and without channel effects

V. Συμπεράσματα / προβληματισμοί

Αυτή η μελέτη παρουσιάζει τις γραμμικές και μη ιδιότητες της ευστάθειας της ευθύγραμμης κίνησης των πλοίων επιφανείας σε περιορισμένα ύδατα. Οι κλασικές εξισώσεις κίνησης και πλοήγησης, ενσωματώνοντας την ελκτική επίδραση του διαύλου, συζεύχθηκαν με κατάλληλα σχήματα ναυτιλίας, κατεύθυνσης και νόμων ελέγχου, προκειμένου να προσομοιάσουν τη συμπεριφορά του πηδαλιούχου. Η μελέτη αυτή μπορεί να εφαρμοστεί για διαφορετικού τύπου πλοία και για διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά διαύλου, τα δε βασικά της συμπεράσματα μπορούν να συνοψισθούν ως ακολούθως :

- Υπάρχει μια κρίσιμη απόσταση x_d που εξασφαλίζει ευστάθεια κατά την ευθύγραμμη πορεία του πλοίου. Για τιμές μικρότερες της τιμής x_d , το σύστημα είναι ασταθές.
- Αν συμπεριληφθούν και οι επιδράσεις από την παρουσία του διαύλου, η κρίσιμη τιμή της x_d μπορεί να είναι υψηλότερη κατά τάξη μεγέθους σε σχέση με εκείνη στο ανοιχτό πέλαγος. Αν χρησιμοποιηθεί η ίδια τιμή για την απόσταση x_d και στις δύο περιπτώσεις, ο αντίστοιχος νόμος ελέγχου, για χειρισμούς εντός του διαύλου, πρέπει να ανταποκρίνεται πολύ πιο γρήγορα, από εκείνον που θα χρησιμοποιείτο σε χειρισμούς στο ανοιχτό πέλαγος.
- Η κρίσιμη αυτή απόσταση ελαττώνεται μονοτονικά με την αύξηση της ικανότητας στην απόκριση του νόμου ελέγχου. Αυτό σημαίνει ότι για να χρησιμοποιηθούν μικρότερες τιμές της παραμέτρου x_d , θα πρέπει να εξασφαλισθούν περισσότερο ευέλικτοι νόμοι ελέγχου.
- Λογικές χρονικές καθυστερήσεις στην πράξη δεν φαίνεται να έχουν ουσιαστική επίδραση στις τιμές της απόστασης x_d .
- Καθώς η προαναφερθείσα μεταβλητή παίρνει τιμές μικρότερες από την οριακή / κρίσιμη της τιμή, ένα ζεύγος συζυγών μιγαδικών ιδιοτιμών του πίνακα του γραμμικοποιημένου συστήματος διασχίζει τον άξονα των φανταστικών αριθμών. Αυτή η συνθήκη ανταποκρίνεται σε μία διακλάδωση κατά Hopf (Hopf bifurcation) των περιοδικών λύσεων του συστήματος, και το σύστημα παρουσιάζει μια ταλαντευόμενη συμπεριφορά που εκφράζεται με την εμφάνιση οριακών κύκλων.
- Οι οριακοί κύκλοι σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν ήταν ασταθείς. Το γεγονός αυτό έχει τις ακόλουθες συνέπειες :
 - (α) Είναι πιθανόν το σύστημα να χάσει την ευστάθειά του, προτού να λάβει η απόσταση x_d την κρίσιμη τιμή της. Αυτό σημαίνει ότι τα αποτελέσματα της γραμμικής ανάλυσης θα πρέπει να εξετασθούν με επιφύλαξη.
 - (β) Καθώς η απόσταση x_d λαμβάνει την κρίσιμη τιμή της, το σύστημα βιώνει την παρουσία των οριακών κύκλων οι οποίοι παρουσιάζουν μεγάλο πλάτος. Ασφαλώς, η κατάσταση αυτή είναι ιδιαίτερα επικίνδυνη για το πλοίο και μπορεί στην πράξη να αποφευχθεί με εύστοχες αλλαγές στις σχεδιαστικές παραμέτρους του συστήματος.

VI. Άλλες επιδράσεις στην πλοήγηση του πλοίου από το περιβάλλον των περιορισμένων υδάτων

Το βάθος των υδάτων έχει ουσιαστική επίδραση στην τροχιά στροφής του πλοίου που πλέει σε περιορισμένα ύδατα. Ο κυκλικός ελιγμός είναι η πιο κοινή δοκιμή πηδαλιουχίας. Διεξάγεται σε ήρεμη θάλασσα όταν υπάρχει άπνοια. Ο ελιγμός αρχίζει με πλευση σε ευθεία γραμμή και σταθερή ταχύτητα. Κατόπιν, με σταθερή παροχή καυσίμου στην προωστήρια μηχανή, εφαρμόζεται μια σταθερή εκτροπή του πηδαλίου δ και η δοκιμή συνίσταται στον καθορισμό της τροχιάς του πλοίου μέχρι αλλαγής κατεύθυνσης 360 μοιρών. Η δοκιμή επαναλαμβάνεται για διάφορες παροχές καυσίμου και διάφορες τιμές της δ . Τα δεδομένα που

συναντά κανείς στην επιστημονική βιβλιογραφία είναι πειραματικά (Crane 1979) και συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- (α) Σε βάθος υδάτων 2.5 φορές το βύθισμα του πλοίου διαπιστώνεται 5 έως 10 % αύξηση στη διάμετρο στροφής του (τακτική και τελική).
- (β) Σε βάθος υδάτων 1.25 φορές το βύθισμα του πλοίου διαπιστώνεται 60 έως 100 % αύξηση στη διάμετρο στροφής του πλοίου (τακτική και τελική).

Οι παραπάνω διαπιστώσεις έγιναν για την περίπτωση ενός δεξαμενόπλοιου (tanker) 278000 DWT τύπου Esso Osaka, το οποίο έπλεε με πλήρη φόρτο, με τη μισή τιμή της μέγιστης ταχύτητάς του και με θέση του γωνιοδείκτη πηδαλίου στις 35 deg. Αξίζει να αναφερθεί ότι σε συνθήκες ανοικτού πελάγους το πλοίο αυτό, με τις προαναφερθείσες συνθήκες πλεύσης, παρουσίασε μέγιστη τακτική διάμετρο στροφής 3.0 μήκη πλοίου.

Η απόσταση που διάνυσε το πλοίο αυτό, αφού ανεστάλη η κίνηση του πρόσω (ελιγμός κράτησης) στα πειραματικά τεστ, ήταν, εν γένει, ανεξάρτητη από το βάθος των υδάτων. Η απόσταση αυτή ήταν περί τα 500 m για ταχύτητα πλοίου 3.8 knots και επιβεβαιώθηκε σε δύο δοκιμές με άμεση εκτέλεση εντολής 45 rpm astern και ενώ το πηδάλιο τοποθετήθηκε σε δύο θέσεις, 35 deg αριστερά και 35 deg δεξιά. Εντούτοις, η απόκλιση από την κατεύθυνση (heading) του πλοίου αυτού, κατά την κράτηση, αυξήθηκε από 18 σε 50 και ακολούθως σε 88 deg, καθώς το πλοίο έπλεε από βαθιά σε μεσαίου βάθους και, τέλος, σε αβαθή ύδατα, προς τα δεξιά, χωρίς αυτό να εξαρτάται από τη θέση του πηδαλίου. Το πηδάλιο χάνει την αποτελεσματικότητά του όταν το πλοίο πλέει σε περιορισμένα ύδατα. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε κατάσταση ανάγκης και κυρίως κατά την πηδαλιουχία του πλοίου σε ανοικτό πέλαγος, η καλύτερη λύση είναι να στραφεί το πηδάλιο του πλοίου στη μέγιστη γωνία του, εφόσον υπάρχει αρκετός χώρος. Αυτό συμβαίνει, εκτός από τις μικρές ταχύτητες πλεύσης, διότι η απόσταση που καλύπτεται κατά την αρχική κατεύθυνση σε μια πλήρη στροφή (προχώρηση) είναι πολύ μικρότερη από εκείνη που καλύπτεται αν δοθεί η εντολή ανάποδα ολοταχώς. Σημειώνεται ότι ο ελιγμός κράτησης είναι η μοναδική μέθοδος αποφυγής σύγκρουσης, όταν δεν υπάρχει η δυνατότητα να επιχειρηθεί ο ελιγμός πλήρους στροφής (δραστικός ελιγμός).

Η γρήγορη ανάπτυξη του μεγέθους των εμπορικών πλοίων (και ιδιαίτερα των δεξαμενόπλοιων) δεν συνοδεύθηκε από ανάλογη σημαντική αύξηση της ταχύτητάς τους, γεγονός που κατέληξε στη μείωση της ισχύος ανά τόνο εκτοπίσματος. Επομένως, η διαθέσιμη ισχύς για την κράτηση δεν ακολούθησε την αύξηση της αδράνειας των πλοίων αυτών, με αποτέλεσμα τη μικρότερη ικανότητα στην κράτησή τους. Η διαπίστωση αυτή δεν ισχύει για τα πολεμικά πλοία, τα οποία παρουσιάζουν σαφώς καλύτερα ελκτικά στοιχεία.

Ένα άλλο φαινόμενο που παρουσιάζεται όταν το πλοίο διέρχεται από περιορισμένα ύδατα είναι η βύθιση και κατακόρυφη μετατόπιση της πλώρης του (sinkage and trim) (Tuck, 1966 and 1967). Η βύθιση αφορά στην προς τον πυθμένα κατακόρυφη μετατόπιση του κέντρου βαρύτητας του πλοίου. Ως θετική μετατόπιση της πλώρης του πλοίου ορίζεται η γωνία στροφής της πλώρης προς τα άνω ως προς το κέντρο βαρύτητάς του. Η κίνηση του πλοίου που προκύπτει από το συνδυασμό και των δύο αυτών ταυτόχρονων μετατοπίσεων του πλοίου καλείται squat. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η πρύμη βυθίζεται και το δορυφόρο κύμα υψώνεται ενώ παράλληλα αυξάνει ο κίνδυνος εκτροπής του πλοίου από το ίχνος του. Αν ακολουθήσει αύξηση των στροφών της προωστήριας μηχανής, είναι πιθανόν να αυξηθεί το βύθισμα του πλοίου χωρίς να αυξηθεί κατ' ανάγκη και η ταχύτητά του, καθώς αυξάνει η συνολική του αντίσταση. Σε αρκετές περιπτώσεις, η πλώρη του πλοίου μπορεί να στραφεί προς τα κάτω, και το πλοίο, παράλληλα με τη βύθισή του, να παρουσιάσει έμπλωρη συμπεριφορά. Το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται σε χαμηλές ταχύτητες και ενώ το πλοίο πλέει σε περιορισμένα ύδατα. Η κρίσιμη ταχύτητα του πλοίου εκφράζεται με τη σχέση:

$$U = \sqrt{gD_w}$$

όπου το D_W εκφράζει το βάθος του διαύλου, το U είναι η ταχύτητα του πλοίου και g η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Η βύθιση αποτελεί το κυρίαρχο φαινόμενο για ταχύτητες πλοίου μικρότερες από την κρίσιμη, ενώ η κατακόρυφη μετατόπιση της πλώρης αποτελεί το κυρίαρχο φαινόμενο για ταχύτητες πλοίου μεγαλύτερες από την κρίσιμη. Η κατακόρυφη μετατόπιση της πλώρης σ' αυτές τις περιπτώσεις είναι θετική.

Από την προηγούμενη ανάλυση είναι φανερό ότι καθοριστικής σημασίας απαίτηση για ένα πλοίο που κινείται σε διάυλο ή σε περιοχές περιορισμένων υδάτων είναι η άμεση απομάκρυνσή του από τον πυθμένα. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται η δυναμική ευστάθεια του πλοίου καθώς και η ασφάλεια των επιχειρήσεων.

Αναφορές

1. F. A. Papoulias and P. E. Kapasakis, "Bifurcation Analysis of Ship Steering in Canals", Journal of Ship Research, Vol. 46, No. 2, pp. 1-9, June 2003.
2. P. E. Kapasakis, "Stability analysis of ship steering in canals", Master's Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, C.A., U.S.A, 1997.
3. D. V. Venne, "Effects of positional information time lags on motion stability of autonomous vehicles", Master's Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, C.A., U.S.A, 1992.
4. F. A. Papoulias, D. V. Venne and G. P. Cummings, "Effects of positional information time lags on autonomous vehicle guidance and control", Int. Shipbuild, Progr, 41, no. 428, pp. 361-392, 1994.
5. F. A. Papoulias, "On the nonlinear Dynamics of Pursuit Guidance for Marine Vehicles", Journal of Ship Research, Vol. 37, no.4, pp. 342-353, Dec 1993.
6. F. A. Papoulias, "Loss of stability of guidance and control laws for autonomous vehicles", Dynamics and Stability of Systems, Oxford University Press, Vol. 8, no.2, 1993.
7. R. F. Beck, "Forces and moments on a ship moving in a canal", Report No. 179, Dept. of Naval Architecture and Marine Engineering, The University of Michigan, Ann Arbor, 1976.
8. M. M Bernitsas and N. S. Kekridis, "Nonlinear simulation of time dependent towing of ocean vehicles", Report No. 283, Dept. of Naval Architecture and Marine Engineering, The University of Michigan, Ann Arbor, 1984.
9. S. N Chow and J. Mallet Paret, "Integral averaging and bifurcation", Journal of Differential Equations, 26, pp. 112-159, 1977.
10. B. R. Clayton and R. E. D. Bishop, "Mechanics of Marine Vehicles", Gulf Publishing Company, Houston, 1982.
11. J. P. Comstock, "Principles of Naval Architecture", The Society of Naval Architects and Marine Engineers, New York, 1977.
12. J. Guckenheimer and P. Holmes, "Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems, and Bifurcations of Vector Fields", Springer Verlag, New York, 1983.
13. B. Hassard and Y. H. Wan, "Bifurcation formulae derived from center manifold theory", Journal of Mathematical Analysis and Applications, 63, pp. 297-312, 1978.
14. "Motion in Waves and Controllability", Principles of Naval Architecture (2nd Revision), SNAME, Vol. III, pp. 279-290.
15. B. Friedland, "Control System Design: An Introduction to State Space Methods", Mc Graw Hill, New York, 1986.

16. F. A. Papoulias, “*Modern Control Systems*”, Informal lecture notes for ME 4811, Summer 1992, revised: Naval Postgraduate School, Monterey, C.A., U.S.A, Summer 1995.
17. Θ. Λουκάκης, Γ. Αθανασούλης, Γ. Γανός, “*Υδροδυναμική Πλοίου (Δυναμική Ευστάθεια και Πηδαλιουχία, Συμπεριφορά σε Θαλάσσιους Κυματισμούς)*”, Ε.Μ.Π, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων, Αθήνα 1985.
18. Ι. Κ. Χατζηλάου, “*Εισαγωγή στα Σ.Α.Ε*”, Σ.Ν.Δ., Πειραιάς 1988.

Σύντομο βιογραφικό σημείωμα

Ο **Πλωτάρχης (Μ) Π. Καπασάκης Π.Ν.** είναι απόφοιτος της Ιωνιδείου Προτύπου Σχολής Πειραιώς (1986). Στη Σ.Ν.Δ. κατετάγη το 1986 και το 1990 ονομάστηκε Σημαιοφόρος Μηχανικός. Υπηρέτησε στα Π. Πλοία Α/Τ Κριεζής, Φ/Γ Μακεδονία, Κ/Φ Δόξα, Φ/Γ Ψαρά και Φ/Γ Ύδρα. Είναι κάτοχος πτυχίου Master of Science in Mechanical Engineering από το Naval/Mechanical Eng. Dpt. του N.P.G.S. του Monterey των Η.Π.Α (1997). Το 2000 αποφοίτησε από τη Σ.Ε.Α.Ν. Έχει διδάξει ως καθηγητής στα σταδιοδρομικά σχολεία του Κ.Ε.ΣΑΚ. στους Ανθυποπλοίαρχους (Μ), Σημαιοφόρους (Μ) και Επικελευστές Μηχανικούς. Σήμερα υπηρετεί στο επιτελείο της Διοίκησης Φρεγατών ως Αρχιμηχανικός και είναι βοηθός καθηγητού έδρας Ναυτικών Μηχανών της Σ.Ν.Δ.. Είναι μέλος του Τ.Ε.Ε. Είναι παντρεμένος με την Τριανταφυλλιά Ελευσινιώτη και πατέρας δύο παιδιών.

ΤΡΙΤΗ ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ:

ΥΑΙΚΑ

Μελέτη της διεπιφάνειας στα σύνθετα υλικά με χρήση της Φασματογραφίας Ράμαν

Α. Παϊπέτης, Ν.Μ. Μελανίτης και Χ. Κοϊμτζόγλου

Περίληψη

Σε αυτή τη μελέτη παρουσιάζεται η μικρομηχανική συμπεριφορά μοντέλων σύνθετων υλικών με τη χρήση της φασματογραφίας Ράμαν. Η τεχνική δίνει τη δυνατότητα τοπικής μέτρησης της τάσης σε κρυσταλλικές ίνες, όπως οι ίνες άνθρακα (Melanitis *et al.* 1992) ή Kevlar® (Vlattas & Galiotis 1992). Πρότυπα σύνθετα υποβλήθηκαν σε σταδιακή φόρτιση και μετρήθηκε η αξονική τάση στην ίνα. Κατάλληλες γεωμετρίες επιλέχθηκαν για τη μελέτη της μεταφοράς τάσης στην ελαστική περιοχή αλλά και παρουσία υποβάθμισης της διεπιφάνειας. Η μεταφορά τάσης αναλύθηκε με χρήση αναλυτικών μοντέλων. Μια παράμετρος β περιγράφει πλήρως τη μεταφορά τάσης στη διεπιφάνεια στην ελαστική περιοχή. Οι μηχανισμοί διάχυσης ενέργειας οδηγούν στην υποβάθμιση της διεπιφάνειας και η εναπομένουσα ενέργεια στην ίνα αντιπροσωπεύει αυτή την υποβάθμιση. Με αυτή την προσέγγιση, η συμπεριφορά της διεπιφάνειας στα μοντέλα σύνθετων μπορεί να παραλληλιστεί με την αναμενόμενη συμπεριφορά της διεπιφάνειας σε δομικά σύνθετα υλικά.

Abstract

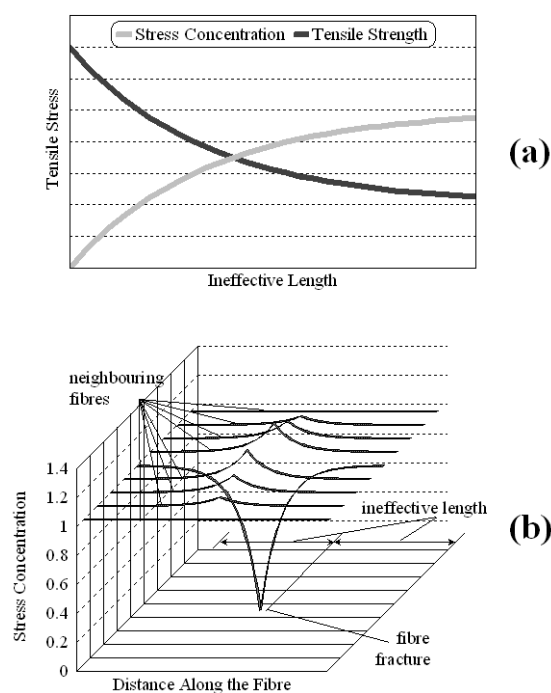
This study involved the investigation of the micromechanics of reinforcement of model carbon fibre / epoxy composites using the technique of Remote Laser Raman Microscopy. The technique allows in-situ axial stress monitoring in highly crystalline fibres, such as carbon (Melanitis *et al.* 1992) or Kevlar® (Vlattas & Galiotis 1992). Model composites were subjected to incremental tensile loading, while the stress in the fibre is monitored at each level of applied strain. The stress transfer regime is studied in the elastic domain using a model single fibre composite, where a fibre of finite length (i.e. of a length smaller than the coupon gauge length) was embedded along a resin coupon. A shear lag approach was employed to model the stress transfer efficiency of the interface through the use of the shear-lag parameter β . The stress build-up in the fibre in the presence of energy dissipation mechanisms such as fibre fractures is modelled, and the stress-transfer efficiency is quantified at different levels of applied composite strain. Parallels between the interfacial efficiency of single fibre systems and practical composites are drawn.

I. Εισαγωγή

A. Η διεπιφάνεια

Ο ρόλος της διεπιφάνειας σε ένα σύνθετο υλικό είναι η μεταφορά τάσης μεταξύ των γειτονικών ινών, μέσω ενός μηχανισμού που ενεργοποιείται μέσω διάτμησης (Pairopetis & Galiotis 2001). Αυτό μπορεί να συμβεί στο γεωμετρικό τόπο μιας ασυνέχειας, όπως ένα σπάσιμο ινών, ή κατά τη διάρκεια μιας εκτός άξονα φόρτισης. Η μέγιστη τιμή της τάσης διάτμησης, που η διεπιφάνεια μπορεί να αντέξει πριν από την αστοχία, είναι η αντοχή της διεπιφάνειας. Εντούτοις, η διεπιφανειακή αστοχία μπορεί να οριστεί με ποικίλους τρόπους. Στις περισσότερες περιπτώσεις, περιλαμβάνει αποκόλληση (Netravali *et Al* 1989) ή τοπική διαρροή της μήτρας (Kelly & Tyson 1965). Γενικά, μπορεί να οριστεί μια εξέλιξη της διεπιφανειακής υποβάθμισης που αρχίζει από τη θραύση και προχωρά κατά τον άξονα της

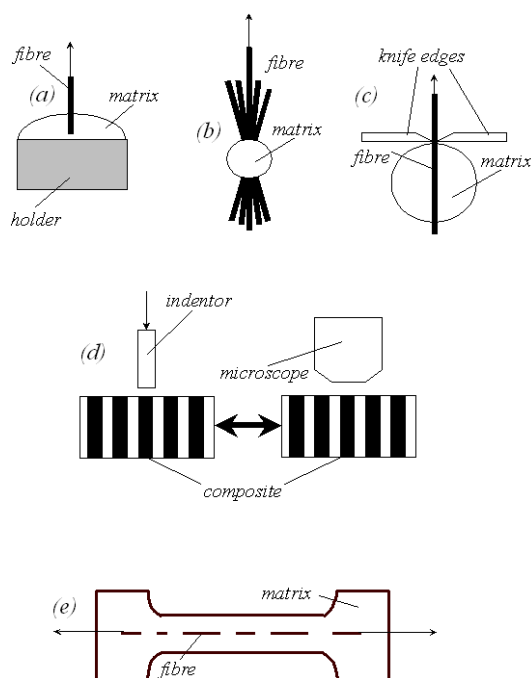
ίνας, όσο αυξάνεται η τάση στο άπειρο (Nairn *et al* 1996). Οι Drzal & Madhucar (1993) έδειξαν ότι η μεταφορά τάσης στη διεπιφάνεια σχετίζεται άμεσα με μακρομηχανικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού. Ειδικότερα, η αντοχή σε εφελκυσμό μονοδιεύθυντων σύνθετων υλικών εξαρτάται από το μέγεθος και τη συσσώρευση των ελαττωμάτων γύρω από ασυνέχειες, όπως θραύσεις ινών (Reifsnider 1994). Με τη σειρά του, το μέγεθος του ελαττώματος που προκαλείται από μία θραύση εξαρτάται από το ανενεργό μήκος ή μήκος μεταφοράς τάσης, που ορίζεται ως το μήκος που απαιτείται έως ότου η ίνα αποκτήσει και πάλι την μακροσκοπική τιμή τάσης ή, διαφορετικά, την τάση που θα είχε ελλείψει της διατμητικής διαταραχής (Σχήμα 1). Το μήκος αυτό είναι εν δυνάμει το πιο αξιόπιστο μέγεθος για την εκτίμηση της συμπεριφοράς της διεπιφάνειας, αφού είναι άμεσα εξαρτώμενο από τις τοπικές διατμητικές ιδιότητες του σύνθετου και καθορίζει το μέγεθος της συγκέντρωσης τάσης που θα προκληθεί από τη θραύση (Chohan & Galiotis 1996).



Σχήμα 1: (a) Αντοχή σύνθετου ως προς το μήκος μεταφοράς και (b) διατμητική διαταραχή στην περιοχή της θραύσης.

Η σύζευξη μακροσκοπικών και μικροσκοπικών ιδιοτήτων στα σύνθετα υλικά είναι κάθε άλλο παρά προφανής. Διάφορες μικρομηχανικές μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί με σκοπό τη μέτρηση της επάρκειας μεταφοράς τάσης στη διεπιφάνεια (Σχήμα 2). Το επιθυμητό αποτέλεσμα κάθε τέτοιας μεθόδου/δοκιμής είναι μια ιδιότητα του σύνθετου απαλλαγμένη από συστηματικά λάθη που οφείλονται στις όποιες ιδιαιτερότητες της δοκιμής, όπως η τοπική γεωμετρία (Pitkethly *et al.* 1993). Οι προϋποθέσεις που μια τέτοια μέθοδος θα πρέπει να πληροί είναι: (a) να προσομοιάζει τις συνθήκες φόρτισης σε πραγματικά σύνθετα, (b) να ορίζει την αστοχία της διεπιφάνειας, όπως αυτή θα αναμενόταν σε συνθήκες λειτουργίας και, κυρίως, (c) να συσχετίζει τα μεγέθη που προσδιορίζονται πειραματικά με τις ιδιότητες του σύνθετου, μέσω ενός κατά προτίμηση απλού και αξιόπιστου μοντέλου. Οι δοκιμές πολλαπλής θραύσης (fragmentation test) (Kelly & Tyson 1965) ή εξόλκωσης (pullout test) (Shiryayeva & Andreevskaya 1962) δεν προσδιορίζουν κατ' ανάγκη ιδιότητες που θα αναμενόταν να έχει ένα πραγματικό σύνθετο υλικό. Η δοκιμή εξόλκωσης από δέσμη ινών (bundle pullout test) (Qiu & Schwartz 1993) είναι πιο ρεαλιστική αλλά και πιο ευάλωτη σε συστηματικά λάθη, λόγω περίπλοκης γεωμετρίας. Η δοκιμή διάτρησης (indentation test) (Mandel *et al.* 1986) είναι η μόνη που πραγματοποιείται σε μακροσκοπικό σύνθετο υλικό αλλά ο μηχανισμός αστοχίας της διεπιφάνειας δεν ταυτίζεται με αυτόν που αναμένεται να συμβεί στο σύνθετο κατά τη

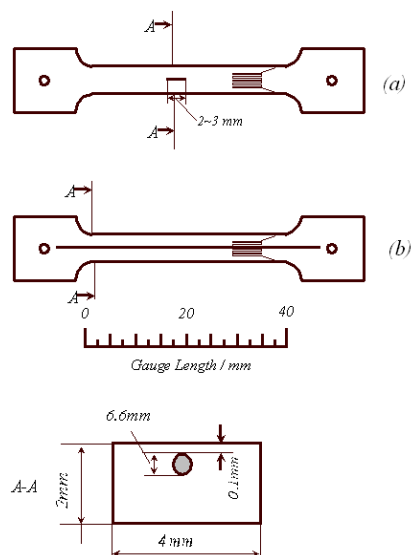
λειτουργία του. Συμπερασματικά, κάθε δοκιμή έχει ελαττώματα και πρέπει να αντιμετωπισθεί κριτικά για μια αξιόπιστη ερμηνεία των αποτελεσμάτων της.



Σχήμα 2: Πειραματικές μέθοδοι μέτρησης της αντοχής της διεπιφάνειας: (a) Εξόλκωση (pull-out), (b) Εξόλκωση δέσμης (microbundle pull-out), (c) Μικροπρόσφυση (microbond), (d) Μικροδιάτρηση (microindentation) και (e) Πολλαπλή θραύση.

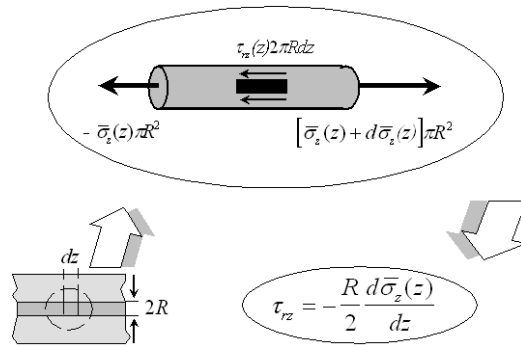
B. Η δοκιμή πολλαπλής θραύσης

Μια γνωστή μικρομηχανική μέθοδος δοκιμής είναι η δοκιμή πολλαπλής θραύσης (fragmentation test, Σχήμα 2e). Σύμφωνα με αυτή τη δοκιμή (Kelly & Tyson 1965) κατασκευάζεται πρότυπο σύνθετο υλικό από μια ίνα σε μεγάλη ποσότητα μήτρας. Το δοκίμιο υποβάλλεται στη συνέχεια στα αυξανόμενα επίπεδα εφελκυστικής παραμόρφωσης, με αποτέλεσμα την επανειλημμένη θραύση της ίνας. Η δοκιμή συνεχίζεται έως ότου το μήκος των θραυσμάτων να μην αρκεί για να αναπτυχθεί το μέγιστο φορτίο και, επομένως, οι διαδοχικές θραύσεις σταματούν ή προκαλείται κορεσμός (Pairopetis & Galiotis 1997). Η μεταφορά τάσης συσχετίζεται άμεσα με την κατανομή των μηκών, που μετρώνται κατά τον κορεσμό (Ohsawa *et al.* 1978; Netravali *et al.* 1989). Η προϋπόθεση μιας τέτοιας προσέγγισης είναι ότι το μήκος τεμαχίων συσχετίζεται με το ενεργό μήκος μεταφοράς τάσης στο αντίστοιχο δομικό σύνθετο υλικό. Τα πλεονεκτήματα της δοκιμής έγκεινται στην κυλινδρική συμμετρία και την πειραματική μέτρηση ενός στατιστικά σημαντικού πληθυσμού.



Σχήμα 3: Γεωμετρίες πολλαπλής θραύσης για τη μελέτη Ράμαν: (α) “πεπερασμένη” ίνα και (β) “άπειρη” ίνα.

Εντούτοις, στη δοκιμή πολλαπλής θραύσης οι μηχανισμοί αστοχίας που εμφανίζονται στο στάδιο κορεσμού δεν είναι απαραίτητως εκείνοι που επικρατούν στις συνήθεις παραμορφώσεις λειτουργίας ενός δομικού σύνθετου, οι οποίες είναι κανονικά μια τάξη μεγέθους χαμηλότερες (Drzal & Madhucar 1993). Έτσι, εισάγεται η έννοια της ατελούς διεπιφάνειας (Piggot 1980; Melanitis & Galiotis 1993; Nairn *et al.* 1996), όπου προβλέπεται η υπό κλίμακα διόρθωση του θεωρητικού τασικού πεδίου, σύμφωνα με παραμέτρους ατελούς διεπιφάνειας ή “άλματα μετατόπισης” (displacement jumps) (Hashin 1990). Αυτά συμβαίνουν σε περιοχές όπου η διεπιφάνεια έχει υποστεί βλάβη και, κυρίως, στην περιοχή της θραύσης. Αρχικά, η βλάβη προκαλείται από την ίδια τη θραύση της ίνας, που ενδεχομένως ευθύνεται και για τη μεγαλύτερη πρόκληση βλάβης, αφού αφορά και σε μεγάλη απελευθέρωση ενέργειας που διαχέεται στη διεπιφάνεια. Με την αύξηση της παραμόρφωσης τίθενται σε λειτουργία δευτερεύοντες μηχανισμοί υποβάθμισης, όπως τοπική διαρροή ή αστοχία της μήτρας. Με την αύξηση της τάσης, η ζώνη της βλάβης εκτείνεται προς το κέντρο του θραύσματος. Η μόνη αναγκαία συνθήκη είναι ότι η μέγιστη διατμητική τάση στη “ζώνη βλάβης” δεν ξεπερνά το όριο διάτμησης της άθικτης μήτρας. Έτσι, κατά μήκος του θραύσματος μπορεί να συνυπάρχουν μια άθικτη περιοχή και περιοχές περιορισμένης ή εκτεταμένης βλάβης, μέχρι και περιοχές πλήρους αποκόλλησης. Συνεπώς, το μήκος στο οποίο η τάση μεταφέρεται επαρκώς μπορεί να μειωθεί εντυπωσιακά στον κορεσμό. Είναι λοιπόν προφανές ότι, προκειμένου να χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα της δοκιμής πολλαπλής θραύσης σε δομικά σύνθετα, η προκληθείσα βλάβη πρέπει να ποσοτικοποιηθεί ως συνάρτηση της εφαρμοζόμενης παραμόρφωσης.

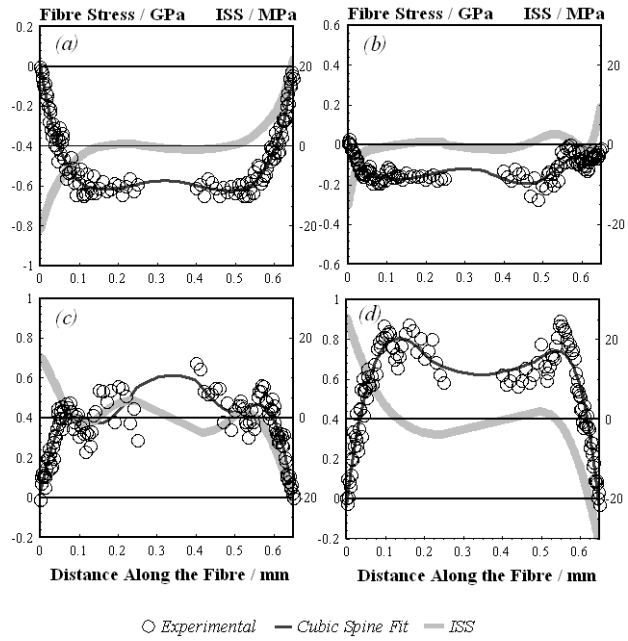


Σχήμα 4: Ισορροπία δυνάμεων στην ίνα.

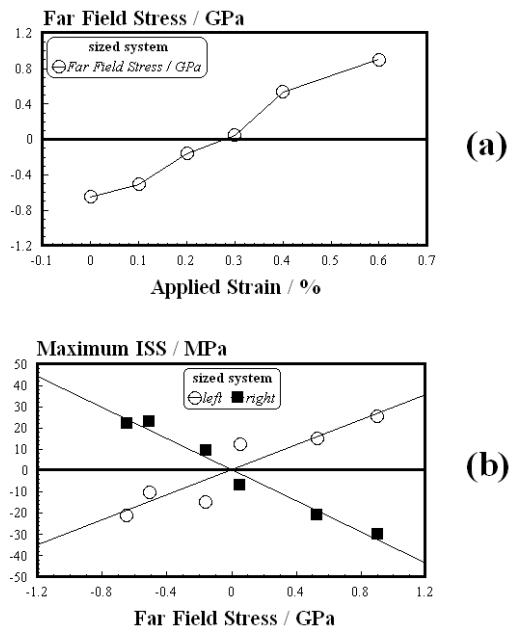
Γ. Μελέτη της διεπιφάνειας με Φασματογραφία Raman

Η φασματογραφία Ράμαν είναι πλέον μια καταξιωμένη μέθοδος για τη μελέτη της μεταφοράς τάσης στη διεπιφάνεια (Galiotis 1993). Στην περίπτωση έντονα ανισότροπων ινών, η μετατόπιση συγκεκριμένων μοριακών δονήσεων Ράμαν με τη μακροσκοπικά εφαρμοζόμενη τάση αποδίδεται στη μη αρμονικότητά της (Bretzlaff & Wool 1983; Tashiro *et al.* 1990). Η μετατόπιση μπορεί να βαθμονομηθεί αντιστοιχώντας σε απόλυτες τιμές τάσης ή παραμόρφωσης με ακρίβεια μικρομέτρου, κάτι που έχει πραγματοποιηθεί για ίνες άνθρακα (Melanitis & Galiotis 1993) ή Kevlar® (Vlattas & Galiotis 1992; Banister *et al.* 1995).

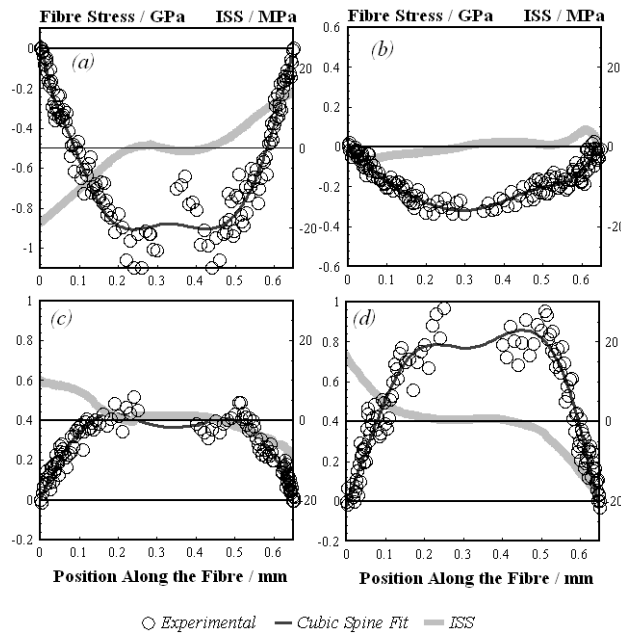
Η δοκιμή πολλαπλής θραύσης είναι ιδανική για τον έλεγχο Raman. Ανάλογα με το μήκος ινών (συνεχές ή ασυνεχές) διάφορες παράμετροι, όπως (α) η τάση ινών ακόμη και πριν από την πολλαπλή θραύση, (β) η φύση και η διάδοση της βλάβης στις υψηλές εφαρμοσμένες τάσεις και (γ) η συμπεριφορά της διεπιφάνειας στα διαφορετικά περιβάλλοντα, μπορούν να μελετηθούν λεπτομερώς. Στη γεωμετρία “άπειρης” ίνας (Σχήμα 3b), μια ίνα ενσωματώνεται κατά μήκος ολόκληρου του ενεργού μήκους του δοκιμίου ρητίνης. Κατά τη θραύση των ινών, η αξονική τάση ινών καθώς και η διατμητική μπορούν να μετρηθούν στο γεωμετρικό τόπο της αστοχίας. Όπως αναμένεται, το ποσό ενέργειας που απελευθερώνεται κατά τη θραύση θα οδηγήσει ταυτόχρονα σε υποβάθμιση της διεπιφάνειας στην περιοχή. Αντίθετα, αν η ασυνέχεια είναι παρούσα από την αρχή της δοκιμής (Σχήμα 3a), η διατμητική τάση είναι μετρήσιμη πριν προκληθεί βλάβη στη διεπιφάνεια, δηλαδή στην ελαστική περιοχή (Galiotis & Paipetis 1998). Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την ενσωμάτωση μιας ίνας των πεπερασμένων διαστάσεων (“πεπερασμένη” ίνα) κατά τον άξονα φόρτισης δοκιμίου ρητίνης (Σχήμα 3a). Έτσι, (α) η διάτμηση είναι παρούσα σε κάθε επίπεδο παραμόρφωσης και (β) η πιθανότητα πρόκλησης βλάβης από τη έντονη απελευθέρωση ενέργειας από τη θραύση εκμηδενίζεται. Επιπλέον, κάθε θλιπτική τάση οφείλεται αποκλειστικά στο διαφορετικό συντελεστή θερμικής διαστολής μεταξύ ίνας και μήτρας (Paipetis & Galiotis 1996). Σε χαμηλές παραμορφώσεις, το πεδίο μπορεί αν θεωρηθεί ελαστικό και να αντιμετωπιστεί αναλυτικά ως τέτοιο (Galiotis & Paipetis 1998).



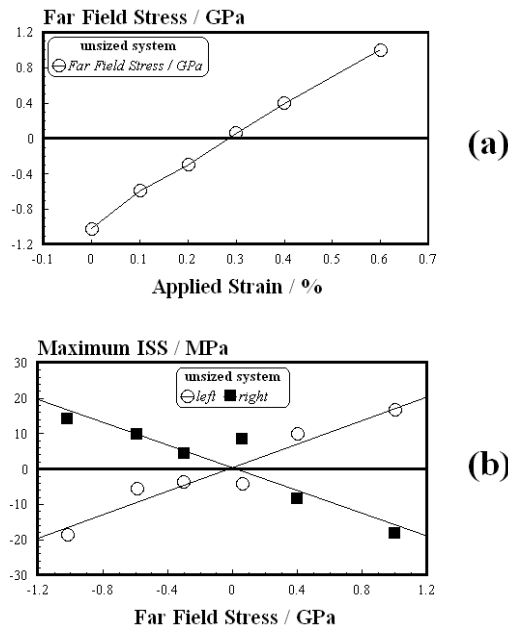
Σχήμα 5: Κατανομές αξονικής και διατμητικής τάσης για παραμόρφωση (a) 0.0%, (b) 0.2%, (c) 0.4% και (d) 0.6%: σύστημα με επικάλυψη και “πεπερασμένη” ίνα.



Σχήμα 6: (a) Τάση στο άπειρο ως προς παραμόρφωση και (b) μέγιστη διατμητική τάση ISS ως προς την τάση στο άπειρο: σύστημα με επικάλυψη και “πεπερασμένη” ίνα.



Σχήμα 7: Κατανομές αξονικής και διαμητικής τάσης για παραμόρφωση (a) 0.0%, (b) 0.2%, (c) 0.4% και (d) 0.6%: σύστημα χωρίς επικάλυψη και “πεπερασμένη” ίνα.



Σχήμα 8: (a) Τάση στο άπειρο ως προς παραμόρφωση και (b) μέγιστη διαμητική τάση ISS ως προς την τάση στο άπειρο: σύστημα χωρίς επικάλυψη και “πεπερασμένη” ίνα.

II. Πειραματικές διατάξεις

A. Υλικά

Ίνες άνθρακα M40B-40B (με εποξεική επικάλυψη) και M40B (χωρίς εποξεική επικάλυψη) υψηλού μέτρου ελαστικότητας (40 GPa) από τη Soficar χρησιμοποιήθηκαν για αυτή τη μελέτη. Η μήτρα είναι εποξεική ρητίνη δύο μερών MY-750 / HY-951 από τη Ciba Geigy, με κύκλο πολυμερισμού 2 h στους 60°C και 0.5 h στους 120°C. Η αντοχή σε διάτμηση και η θερμοκρασία υαλώδους μετάβασης είναι $30.3 \pm \text{MPa}$ και 88°C, αντίστοιχα (Paiptis & Galiotis 1997).

Δύο τύποι δοκιμών κατασκευάστηκαν με τη χρήση ειδικών μήτρων (Paiptis & Galiotis 1997). Η γεωμετρία των δοκιμών παρουσιάζεται στο Σχήμα 3. Σε σύνολο εξετάστηκαν τέσσερα συστήματα (δύο είδη ινών για “πεπερασμένη” και “άπειρη” ίνα). Οι δοκιμές έγιναν σε μηχανή Hounsfield με ρυθμό παραμόρφωσης $0.25 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$ και strain gauges για τη μέτρηση της παραμόρφωσης.

B. Φασματογραφία Raman

Για τα φάσματα Raman χρησιμοποιήθηκε το τηλε-μικροσκόπιο Ράμαν (Paiptis & Galiotis 1996). Καταγράφηκε η δόνηση Raman E_{2g} στους 1580 cm^{-1} (Vidano *et al.* 1981). Η δόνηση αυτή ενδείκνυται για μετρήσεις τάσης (Kim 1986 *et al.*; Melanitis *et al.* 1994; Robinson *et al.* 1987), γιατί (α) είναι η ισχυρότερη (Fitzer *et al.* 1987), (β) είναι παρούσα σε όλες τις γραφικές δομές (Tuinstra & Koenig 1970), (γ) ορίζεται με ακρίβεια θεωρητικά και πειραματικά, και (δ) αν και δεν είναι ευαίσθητη στην πόλωση και τη συχνότητα του laser (Katagiri *et al.* 1988), έχει τη μεγαλύτερη ευαισθησία από όλες τις δονήσεις πρώτης τάξης στην εφαρμοζόμενη τάση (Galiotis 1992). Στις 2700 cm^{-1} , η δόνηση δεύτερης τάξης είναι επίσης χρησιμοποιήσιμη (Filiou *et al.* 1992; van den Heuel *et al.* 1997). Με χρήση των κατάλληλων καμπυλών βαθμονόμησης, η μετατόπιση της συχνότητας μετατρέπεται σε τάση ή παραμόρφωση της ίνας:

$$\sigma_z = \frac{V - V_{ref}}{\alpha_\sigma} \quad (1)$$

Η σταθερά αναλογίας που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη μελέτη ήταν $\alpha_\sigma = -3,0 \text{ cm}^{-1} / \text{GPa}$ (Galiotis *et al.* 1996).

Γ. Μελέτη κατανομής αξονικών τάσεων

Κατανομές αξονικής τάσης στα δοκίμια “πεπερασμένης” ίνας μετρήθηκαν μέχρι 0.6% παραμόρφωση σε βήματα 0.1%. Τα δοκίμια “άπειρης” ίνας μελετήθηκαν σε διαδοχικές παραμορφώσεις έως και 5%.

Γενικά, τμήματα του ενεργού μήκους του δοκιμίου περίπου 2,5-3 mm σαρώθηκαν σε διαφορετικά επίπεδα παραμόρφωσης, με βήμα 1 μm στην περιοχή της ασυνέχειας και κατόπιν σε βήματα 2, 5 και 10 μm μακριά από αυτήν.

Η ισορροπία δυνάμεων στο απειροστό μήκος της ίνας είναι (Σχήμα 4):

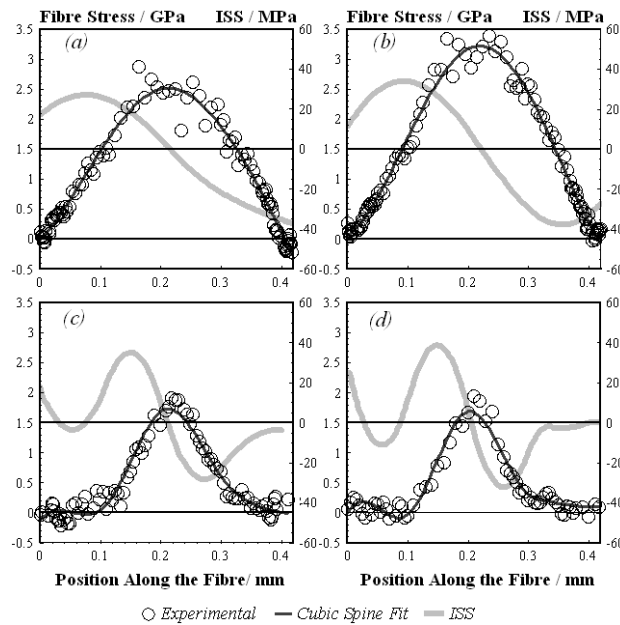
$$[\bar{\sigma}_z(z) + d\bar{\sigma}_z(z)]\pi R^2 - \bar{\sigma}_z(z)\pi R^2 - \tau_{rz}(z)2\pi R dz = 0 \quad (2)$$

όπου $\bar{\sigma}_z$ η αξονική τάση στη διατομή, τ_{rz} η διάτμηση και R η ακτίνα της ίνας.

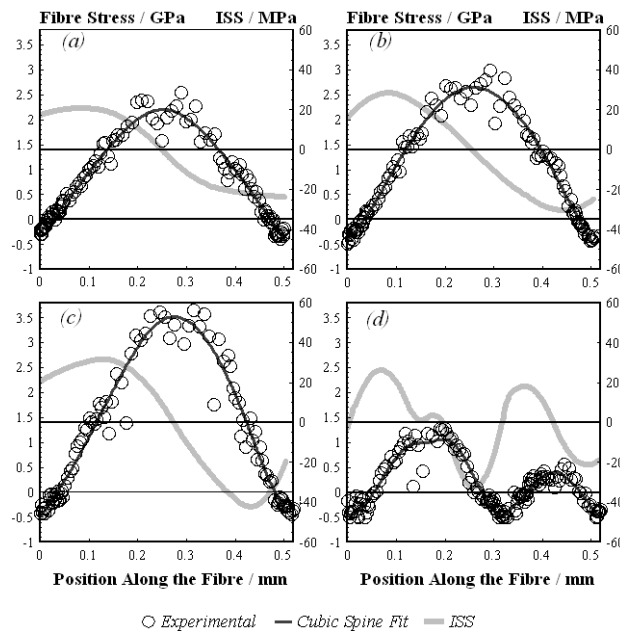
Η εξ. (2) δίνει για τη διάτμηση (Cox 1952; Rosen 1965; Piggott 1980):

$$\tau_{rz} = -\frac{R}{2} \frac{d\bar{\sigma}_z(z)}{dz} \quad (3)$$

Η παραγωγή των πειραματικών δεδομένων έγινε μετά από παρεμβολή με συναρτήσεις b-spline (Hayes, 1974), και έτσι υπολογίστηκε η διάτμηση κατά μήκος της ίνας. Χαρακτηριστικές κατανομές αξονικών τάσεων και διατμητικών τάσεων σε διάφορα επίπεδα παραμόρφωσης παρουσιάζονται στο Σχήμα 5 (“πεπερασμένη” ίνα με επικάλυψη), στο Σχήμα 7 (“πεπερασμένη” ίνα χωρίς επικάλυψη), στο Σχήμα 9 (“άπειρη” ίνα με επικάλυψη) και στο Σχήμα 10 (“άπειρη” ίνα χωρίς επικάλυψη). Στα Σχήματα 6 και 8 παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές της αξονικής τάσης (α) και της διάτμησης (β) ως προς την παραμόρφωση για την πεπερασμένη γεωμετρία.



Σχήμα 9: Κατανομές αξονικής και διατμητικής τάσης για παραμόρφωση (a) 1.5%, (b) 1.9%, (c) 3.8% και (d) 4.8%: σύστημα με επικάλυψη και “άπειρη” ίνα.



Σχήμα 10: Κατανομές αξονικής και διατμητικής τάσης για παραμόρφωση (a) 1.5%, (b) 2.1%, (c) 2.6% και (d) 4.4%: σύστημα χωρίς επικάλυψη και “άπειρη” ίνα.

III. Σχολιασμός

A. Γεωμετρία “πεπερασμένης” ίνας

Ο Cox (1952) εισήγαγε τη θεωρία shear-lag, θεωρώντας ότι η διατμητική δύναμη S είναι ανάλογη της διαφοράς μεταξύ της αξονικής μετατόπισης στην ίνα w και της μετατόπισης w_∞ που θα υπήρχε απουσία της ίνας:

$$S = H(w - w_\infty) \quad (4)$$

όπου H η σταθερά αναλογίας. Η αξονική ισορροπία [εξ. (3)] με τη παραπάνω υπόθεση δίνει για την αξονική τάση $\sigma_z(z)$:

$$\frac{\partial^2 \sigma_z(z)}{\partial z^2} - \beta^2 \sigma_z(z) = -\beta^2 E_f \varepsilon_\infty \quad (5)$$

όπου:

$$\beta = \sqrt{\frac{2G_m^{R_\infty}}{R^2 E_f \ln\left(\frac{R_\infty}{R}\right)}} \quad (6)$$

Σύμφωνα με την εξ. (5), η αξονική τάση στη διεπιφάνεια είναι:

$$\sigma_z(z) = E_f \varepsilon_\infty \left[1 - \frac{\cosh\left(\beta\left(\frac{l}{2} - z\right)\right)}{\cosh\left(\beta\frac{l}{2}\right)} \right] \quad (7)$$

όπου ε_∞ η τάση στο άπειρο και $G_m^{R_\infty}$ το όριο διάτμησης κυλίνδρου μήτρας ακτίνας R_∞ , όπου υπάρχει η διατμητική διαταραχή. Η διατμητική τάση είναι:

$$\tau_{rz}(z) = E_f \varepsilon_\infty \frac{\sqrt{\frac{G_m^{R_\infty}}{2E_f \ln\left(\frac{R_\infty}{R}\right)}} \sinh\beta\left(\frac{l}{2} - z\right)}{\cosh\beta\frac{l}{2}} \quad (8)$$

Ανάλογες μορφές έχουν προκύψει και από άλλες λύσεις (Nayfeh 1977; Nairn 1997), με τη βασική υπόθεση ότι για δεδομένο r , όλες οι τάσεις είναι μόνο συνάρτηση του z . Οι επιπρόσθετες υποθέσεις που πρέπει να ισχύουν είναι (Galiotis & Paipetis 1998):

- η ίνα και η μήτρα συμπεριφέρονται ως γραμμικώς ελαστικά στερεά,
- η διεπιφάνεια είναι άθικτη και
- δεν μεταφέρεται τάση στη διατομή στο άκρο της ίνας.

Η γεωμετρία της “πεπερασμένης” ίνας πληροί όλες τις παραπάνω προϋποθέσεις (Galiotis & Paipetis 1998), αφού θεωρητικά δεν υπάρχει βλάβη στη διεπιφάνεια και η παραμόρφωση είναι αρκετά χαμηλή, ώστε να μην υπάρχει μετάβαση στην πλαστική περιοχή. Συνεπώς, η εξ. (7) μπορεί να λυθεί παραμετρικά ως προς το β (Nairn, 1997). Για $\beta l \geq 10$, η 8 απλοποιείται (Galiotis & Paipetis 1998):

$$\sigma_z(z) = \sigma_\infty [1 - e^{-\beta z}] \quad (9)$$

όπου $\sigma_\infty = E_f \varepsilon_\infty$ η τάση στο μέσον της ίνας. Η διατμητική τάση δίνεται ως:

$$\tau_{rz} = -\frac{R\sigma_\infty\beta}{2} e^{-\beta z} \quad (10)$$

Από τις εξ. (9) και (10) και αφού η $\sigma_z(z)$ μετριέται για κάθε z , η σταθερά β προσδιορίζεται:

(i) από την εξ. (9) και για μήκος l_o , όπου $z = l_o = 1/\beta$, ή με εκθετική παρεμβολή στα πειραματικά δεδομένα της αξονικής τάσης (Galiotis & Paipetis 1998) και (ii) από την εξ. (10) για τη μέγιστη διάτμηση (interfacial shear stress ISS) στο άκρο της ίνας $z = 0$:

$$\tau_{max} = -\frac{R\beta}{2} \sigma_\infty \quad (11)$$

όπου με γραμμική παρεμβολή προσδιορίζεται η παράμετρος β για κάθε άκρο (Σχήμα 6b και 8b). Οι τιμές της παραμέτρου β όπως υπολογίστηκαν παρουσιάζονται στους Πίνακες 1 και 2, όπου φαίνεται ότι οι δύο μέθοδοι συμφωνούν με ακρίβεια $10^{-4} \mu\text{m}^{-1}$. Συμπερασματικά, η θεωρία shear lag περιγράφει επαρκώς το τασικό πεδίο στην ασυνέχεια (Cox 1952).

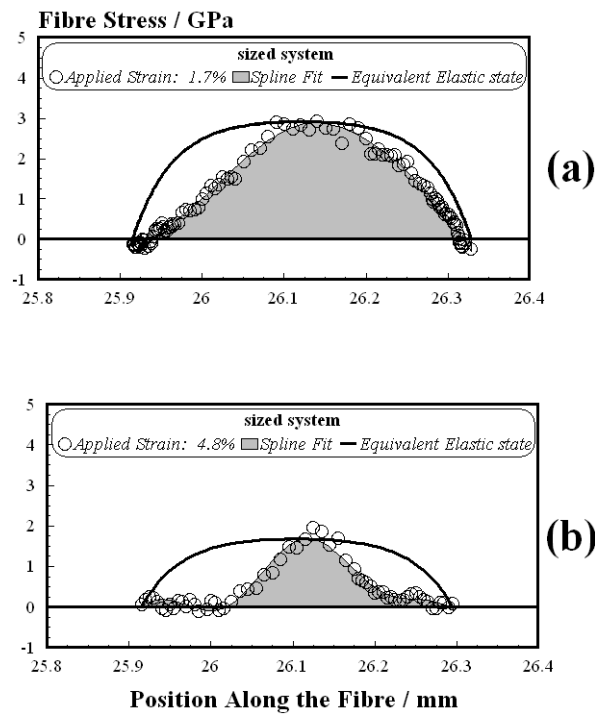
Αν και η τιμή της διατμητικής τάσης οφείλει να είναι μηδέν στην ασυνέχεια (McCartney 1989; Nairn 1992), η πειραματική μέθοδος έδωσε πεπερασμένες τιμές διάφορες του μηδενός (Σχήματα 6 και 8). Αυτό ερμηνεύεται με την παραδοχή ότι η επίδραση της ασυνέχειας είναι περιορισμένη τοπικά και μπορεί να αγνοηθεί στην παρούσα λύση, χωρίς να επηρεάζει την ακρίβειά της (Nairn 1992). Συνεπώς, η παράμετρος β μπορεί να χαρακτηρίσει πλήρως τη μεταφορά τάσης στη διεπιφάνεια στην ελαστική περιοχή.

Σύστημα	$\varepsilon_\infty /$ %	β (αριστερά) / μm^{-1}	β (δεξιά) / μm^{-1}	μέσο $\beta / \mu\text{m}^{-1}$	Τάση στο άπειρο / GPa
με επικάλυψη	0	0.0235	0.0192	0.020775	-0.65
	0.6	0.0213	0.0191		0.90
χωρίς επικάλυψη	0	0.0095	0.0094	0.00925	-1.0
	0.6	0.0082	0.0099		1.0

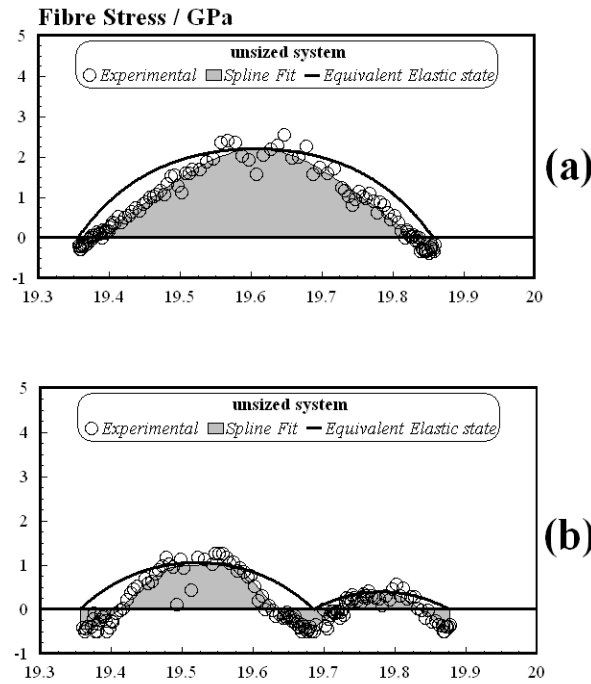
Πίνακας 1: Παράμετρος β [εξ. (9)].

Σύστημα	β (αριστερά)/ μm^{-1}	β (δεξιά)/ μm^{-1}	μέσο $\beta/ \mu\text{m}^{-1}$
με επικάλυψη	0.0222	0.0178	0.0200
χωρίς επικάλυψη	0.0098	0.0101	0.0099

Πίνακας 2: Παράμετρος β [εξ. (11)].



Σχήμα 11: Πειραματικές μετρήσεις και θεωρητική ελαστική συμπεριφορά: σύστημα με επικάλυψη και “άπειρη” ίνα.



Σχήμα 12: Πειραματικές μετρήσεις και θεωρητική ελαστική συμπεριφορά: σύστημα χωρίς επικάλυψη και “άπειρη” ίνα.

B. Γεωμετρία “άπειρης” ίνας

Όπως προαναφέρθηκε, κατά τη δοκιμή πολλαπλής θραύσης είναι αναπόφευκτη η υποβάθμιση της διεπιφάνειας. Αυτή οφείλεται σε τοπική διαρροή της μήτρας (Vlatts & Galiotis 1992) ή ρηγμάτωση (ten Busschen & Selvadurai 1995), με αποτέλεσμα την ύπαρξη “ζωνών” διαφορετικής επάρκειας μεταφοράς τάσης (Melanitis *et al.* 1992). Από το σημείο της θραύσης και προς το κέντρο του θραύσματος παρουσιάζονται (a) η ζώνη ατελούς μεταφοράς, (b) η ενδιάμεση ζώνη και (c) η ζώνη που δεν έχει υποστεί βλάβη. Η αυξανόμενη παραμόρφωση οδηγεί στην αύξηση της ζώνης (a) εις βάρος της ζώνης (c), ενώ η ζώνη (b) παραμένει σταθερή. Οι Yallee & Young (1998) έκαναν χρήση της θεωρίας shear-lag, υποθέτοντας την ύπαρξη μιας ζώνης πλήρους αποκόλλησης και μια ελαστική ζώνη, για να υπολογίσουν την ενέργεια θραύσης της διεπιφάνειας. Οι Nairn *et al.* (1996) χρησιμοποίησαν ένα δίζωνικό μοντέλο με διαφορετική επάρκεια μεταφοράς τάσης κατά ζώνη. Παρόλα αυτά, τα διζωνικά / πολυζωνικά μοντέλα είναι δύσχρηστα και οδηγούν σε ασυνεχείς κατανομές της διατμητικής τάσης (Piggott 1980; Nairn *et al.* 1996), που δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Μια εναλλακτική προσέγγιση θα συνίστατο στην αξιολόγηση της διαχεόμενης ενέργειας κατά την πολλαπλή θραύση. Αυτό είναι δυνατό από την ελαστική περιοχή μέχρι και την περιοχή, όπου η υποβάθμιση της διεπιφάνειας είναι πλέον έκδηλη (Cox 1952; Nairn *et al.* 1996; Galiotis & Paipetis 1998).

Ο πρωτεύων μηχανισμός διάχυσης ενέργειας στη διεπιφάνεια οφείλεται στη θραύση των ινών που προκαλεί και την υποβάθμισή της και, κατά συνέπεια, την απόκλιση από την ελαστική λύση. Αυτό δεν συμβαίνει για τη γεωμετρία “πεπερασμένης” ίνας (Σχήμα 5), που μπορεί όμως να χρησιμοποιηθεί ως η κατάσταση αναφοράς για ένα δεδομένο σύστημα.

Στην ελαστική περιοχή, η παράμετρος β είναι σταθερή και ανεξάρτητη από την παραμόρφωση ε_∞ . Η ενέργεια $E_{elastic}$ στην ίνα μπορεί να υπολογιστεί με ολοκλήρωση της εξ. (7) κατά το μήκος της:

$$E_{elastic} = \int_{z=0}^l E_f \varepsilon_{\infty} \left[1 - \frac{\cosh\left(\beta\left(\frac{l}{2} - z\right)\right)}{\cosh\left(\beta\frac{l}{2}\right)} \right] dz = E_f \varepsilon_{\infty} l \left[1 - \frac{2}{\beta l} \tanh \beta \frac{l}{2} \right] \quad (12)$$

Αντίστοιχα, η ενέργεια της υποβαθμισμένης διεπιφάνειας μπορεί να υπολογιστεί από τις πειραματικές καμπύλες με αντίστοιχη ολοκλήρωση:

$$E_{stored} = \int_{z=0}^l \sigma_z(z) dz \quad (13)$$

Από τις εξ. (12) και (13), ο δείκτης επάρκειας μεταφοράς τάσης ζ μπορεί να οριστεί ως εξής:

$$\zeta = \frac{E_{stored}}{E_{elastic}} \quad (14)$$

Η απλή αυτή προσέγγιση ποσοτικοποιεί την απόδοση της διεπιφάνειας ανεξάρτητα από την τοπική διακύμανση των ιδιοτήτων της.

Στα Σχήματα 11 και 12 παρουσιάζονται οι θεωρητικές ελαστικές καμπύλες αξονικής τάσης μαζί με αυτές που προσδιορίστηκαν πειραματικά, για σχετικά χαμηλή (Σχήματα 11a και 12a) και υψηλή (Σχήματα 11b και 12b) παραμόρφωση. Η επιφάνεια κάτω από τις καμπύλες αντιστοιχεί στην ενέργεια της ίνας. Η διαφορά ανάμεσα στις καμπύλες οφείλεται στη διάχυση ενέργειας, λόγω υποβάθμισης ή αστοχίας της διεπιφάνειας. Στα Σχήματα 13a και b, παρουσιάζεται ο ζ ως συνάρτηση της τάσης για την ίνα με και χωρίς επικάλυψη, αντίστοιχα.

Στην πρώτη περίπτωση, ο ζ πέφτει στο 0.70 ± 0.04 με την έναρξη της πολλαπλής θραύσης (Σχήμα 13a). Ενώ είναι σχετικά σταθερός μέχρι και παραμόρφωση 2.3%, κατόπιν πέφτει δραματικά. Σε 3.0% παραμόρφωση, ο ζ είναι περίπου 50% και η διακύμανση των τιμών είναι πλέον σημαντική, κάτι που υποδεικνύει τη στατιστική φύση της υποβάθμισης, για να υποβιβαστεί ακόμα στο 0.43 ± 0.05 στο τέλος του πειράματος. Η συμπεριφορά αυτή είναι χαρακτηριστική της δράσης δευτερευόντων μηχανισμών υποβάθμισης σε μεγάλες παραμορφώσεις (Paipetis & Galiotis 1996).

Στο δεύτερο σύστημα, ο ζ είναι 0.82 ± 0.07 με την έναρξη της πολλαπλής θραύσης (Σχήμα 13b), δηλαδή παρουσιάζει σημαντικά μικρότερη υποβάθμιση από το πρώτο σύστημα. Αν η διεπιφάνεια είναι λιγότερο αποδοτική, είναι και λιγότερο ευάλωτη στην υποβάθμιση. Γι' αυτό το λόγο και ενώ η μεταφορά τάσης είναι σημαντικά καλύτερη στο πρώτο σύστημα, η αρχική διαφορά δεν είναι εμφανής μετά την έναρξη της πολλαπλής θραύσης (Paipetis *et al.* 1999). Ο ζ μειώνεται σημαντικά στο 2.1% με αντίστοιχη αύξηση της διακύμανσης. Τέλος, στο 4.4% ο ζ φτάνει στην ελάχιστη τιμή του, δηλαδή 0.34 ± 0.09 , δείχνοντας ότι αυτό το σύστημα είναι πιο ευάλωτο σε δευτερεύοντες μηχανισμούς υποβάθμισης.

IV. Συμπεράσματα

Στην ελαστική περιοχή, αρκεί μια παράμετρος β για να περιγράψει πλήρως τη μεταφορά τάσης στα πρότυπα σύνθετα που μελετήθηκαν. Η παράμετρος αυτή μπορεί να προσδιοριστεί πειραματικά και είναι ανεξάρτητη από την παραμόρφωση. Η επάρκεια μεταφοράς τάσης ως προς την παραμόρφωση εξαρτάται από την ενέργεια που διαχέεται κατά την πολλαπλή θραύση, αρχίζοντας με ένα άλμα υποβάθμισης με την θραύση της ίνας και συνεχίζοντας με δευτερεύοντες μηχανισμούς, ακόμα και στο στάδιο που πλέον δεν παρατηρούνται άλλες θραύσεις. Ο δείκτης ζ περιγράφει αυτή την υποβάθμιση ως συνάρτηση της παραμόρφωσης.

Ο ζ παραμένει σχετικά σταθερός σε σχετικά χαμηλές παραμορφώσεις και μειώνεται σημαντικά σε μεγάλες παραμορφώσεις, όπου άλλοι μηχανισμοί πέραν της θραύσης της ίνας είναι κυρίαρχοι.

Αναφορές

D. J. Bannister, M. C. Andrews, A. J. Cervenka and R. J. Young, 1995: “*Analysis of the single-fiber pull-out test by means of Raman-Spectroscopy. 2. Micromechanics of deformation for an Aramid / Epoxy system*”, *Compos. Sci. Technol.* **53**, pp. 411-421.

R. F. Bretzloff and J. Wool, 1983: “*Frequency shifting and assymetry in infrared bands of stressed polymers*”, *Macromolecules* **16**, pp. 1907-1917.

V. Chohan and C. Galiotis, 1996: “*Interfacial measurements and fracture characteristics of 2D microcomposites using Remote Laser Raman Spectroscopy*”, *Composites Part A* **27A**, 881-888.

C. L. Cox, 1952: “*The elasticity and strength of paper and other fibrous materials*”, *J. Appl. Phys.* **3**, pp. 72-79.

L. T. Drzal and M. Madhucar, 1993: “*Fiber matrix adhesion and its relationship to composite mechanical properties*”, *J.Mater.Sci* **28**, pp. 569-610.

C. D. Filiou, C. Galiotis and D. N. Batchelder, 1992: “*Residual Stress Distribution in Carbon Fibre/ Thermoplastic Matrix Pre-impregnated Composite Tapes*”, *Composites*, **28**, pp. 28-37.

E. Fitzer , E. Gantner, F. Rozploch, and D. Steinert, 1987: “*Application of laser-Raman spectroscopy for characterisation of carbon fibres*”, *High Temperatures - High Pressures* **19**, pp. 537-544.

C. Galiotis and A. Paipetis, 1998: “*Definition and measurement of the shear-lag parameter, beta, as an index of the stress transfer efficiency in polymer composites*”, *J.Mater.Sci* **33**, pp. 1137-1143.

C. Galiotis, 1993: “*A study of mechanisms of stress transfer in continuous-fibre and discontinuous-fibre model composites by Laser Raman-Spectroscopy*”, *Compos. Sci. Technol.* **48**, pp. 15-28.

C. Galiotis, 1992: “*Raman optomechaical studies on fibres, composites and fibre-matrix interfaces*”, in *Phase Interaction in Composite Materials*, (ed. S.A. Paipetis & C.G. Papanicolaou), pp.173-184. Oxon: Omega Scientific.

C. Galiotis, V. Chohan, A. Paipetis and C. Vlattas, 1996: “*Interfacial measurements in single and multi fiber composites using the technique of laser Raman spectroscopy*”, in *Fiber Matrix & Interface Properties*, ASTM STP 1290 (ed. C.A. Spragg & L.T. Drzal), pp.19-33. Philadelphia: American Society for Testing & Materials.

Z. Hashin, 1990: “*Thermoelastic properties of fiber composites with imperfect interface*”, *Mech. Mater.* **8**, pp. 333-348.

J. G. Hayes, 1974: “*Numerical methods for curve and surface fitting*”, *Bull. Inst. Math. Applic.* **10**, pp. 144-152.

- J. M. Heddegepeth, 1961: “*Stress Concentrations in Filamentary Structures*”, in NASA TN D-882, National Aeronautics & Space Administration, Washington, DC.
- G. Katagiri, H. Ishida and A. Ishitani, 1988: “*Raman spectra of graphitic edge planes*”, *Carbon* **26**, pp. 565-571.
- A. Kelly and W. R. Tyson, 1965: “*Tensile properties of fibre reinforced metals: copper / tungsten and copper molybdenum*”, *J. Mech. Phys. Sol.* **13**, pp. 329-350.
- P. K. Kim, Y. Xu, C. Chang and S. L. Hsu, 1986: “*Spectroscopic mechanical analysis of stress distribution in composites*”, *Polymer* **27**, pp. 1547-1552.
- J. F. Mandel, D. H. Grande, T. H. Tsiang and F. J. McGarry, 1986: “*Modified microdebonding test for direct in situ fiber-matrix bond strength determination in fiber composites*”, in *Composite materials: testing & design*, (ed. J. M. Whitney) ASTM STP 893, pp. 87-108. Philadelphia: American Society for Testing & Materials.
- L. N. McCartney, 1989: “*New theoretical model of stress transfer between fiber and matrix in a uniaxially fibre-reinforced composite*”, *Proc. R. Soc. Lond.* **A425**, pp. 215-244.
- N. Melanitis and C. Galiotis, 1993: “*Interfacial micromechanics in model composites using Laser Raman-Spectroscopy*”, *Proc. R. Soc. Lond. A* **440**, pp. 379-398.
- N. Melanitis, C. Galiotis, P. L. Tetlow and C. K. L. Davies, 1992: “*Interfacial shear-stress distribution in model composites .2. Fragmentation studies on carbon-fibre epoxy systems*”. *J.Compos. Mater.* **26**, pp. 574-610.
- N. Melanitis, P. L. Tetlow, C. Galiotis and S. B. Smith, 1994: “*Compressional behaviour of carbon-fibers .2. Modulus softening*”, *J.Mater.Sci* **29**, pp. 786-799.
- J. A. Nairn, 1992: “*A Variational mechanics analysis of the stresses around breaks in embedded fibers*”, *Mech. Mater.* **13**, pp. 131-154.
- J. A. Nairn, 1997: “*On the use of shear-lag methods for analysis of stress transfer in unidirectional composites*”, *Mech. Mater.* **26**, pp. 63-80.
- J. A. Nairn, Y. C. Liu and C. Galiotis, 1996: “*Analysis of stress transfer from the matrix to the fiber through an imperfect interface: application to the single fiber fragmentation test*”, in *Fiber Matrix & Interface Properties*, ASTM STP 1290 (ed. C.A. Spragg & L.T. Drzal), pp. 47-65. Philadelphia: American Society for Testing & Materials.
- A. H. Nayfeh, 1977: “*Thermomechanically induced interfacial stresses in fibrous composites*”, *Fibre Sci. Tech.*, **10**, pp. 195-209.
- A. N. Netravali, R. B. Henstenburg, S. L. Phoenix and P. Schwartz, 1989: “*Interfacial shear stress studies using the single-filament-composite test. 1. Experiments on graphite fibres in epoxy*”, *Polym.Compos.* **10**, pp. 226-241.
- T. Ohsawa, A. Nakayama, M. Miwa and E. Tsushima, 1978: “*Temperature dependence of critical fiber length for glass fiber-reinforced thermosetting resins*”, *Journal of Appl. Polym. Sci.*, **22**, pp. 3203-3212.
- A. Paipetis and C. Galiotis, 2001: “*Modelling the Stress Transfer Efficiency of Carbon / Epoxy Interfaces*”, *Proceedings of the Royal Society of London*, **2011**, p. 1555.

A. Paipetis and C. Galiotis, 1996: “Effect of fiber sizing on the stress transfer efficiency in carbon / epoxy model composites”, *Composites: Part A* **27A**, pp. 755-767.

A. Paipetis and C. Galiotis, 1997: “A study of the stress-transfer characteristics in model composites as a function of material processing, fiber sizing and temperature of the environment”, *Compos. Sci. Technol.* **57**, pp. 827-838.

A. Paipetis, C. Galiotis, Y. C. Liu and J. Nairn, 1999: “Stress transfer from the matrix to the fiber in a fragmentation test - Raman experiments and analytical modelling”, *J. Compos. Mater.* **33**, pp. 377-399.

A. Paipetis, C. Vlattas and C. Galiotis, 1996: “Remote Laser Raman Microscopy (Reram) .I. Design and Testing of a Confocal Microprobe”, *J. Raman Spectrosc.* **27**, pp. 519-526.

M. R. Piggott, 1980: “Load-Bearing Fibre Composites”, Oxford: Pergamon Press.

Σύντομα βιογραφικά σημειώματα

Ο **Χρήστος Κοϊμτζόγλου** γεννήθηκε το 1973 στην Κομοτηνή. Το Μάρτιο του 1997 αποφοίτησε από το τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών και Αεροναυπηγών του πανεπιστημίου Πατρών και το Νοέμβριο του 2003 τελείωσε τη διδακτορική του διατριβή στο ίδιο τμήμα. Έχει ασχοληθεί με τη μικρομηχανική της δυναμικής φόρτισης, με μετρήσεις τάσεων / παραμορφώσεων σε ίνες άνθρακα και σε σύνθετα υλικά με τη χρήση της φασματοσκοπικής μεθόδου Raman (laser Raman spectroscopy), όπως και με πειράματα πολλαπλής θραύσης (fragmentation tests) και μηχανικού χαρακτηρισμού πολυμερών και σύνθετων υλικών. Από τον Απρίλιο του 2005 εργάζεται στην εταιρεία INASCO Hellas, όπου ασχολείται με θέματα χρήσης νανοσωλήνων από άνθρακα (carbon nanotubes) σε σύνθετα υλικά, ακουστικής κινητήρων και εφαρμογής νέων μεθόδων ελέγχου της ποιότητας και της εναπομένουσας ζωής των δομικών υλικών των αεροσκαφών.

Ο **Νικόλαος Εμμ. Μελανίτης** είναι Μηχανολόγος Μηχανικός (Πανεπιστήμιο Πατρών 1987) και Διδάκτωρ του Πανεπιστημίου του Λονδίνου (1991). Η επιστημονική του ειδίκευση εντάσσεται στις περιοχές μηχανολογίας, τεχνολογίας και επιστήμης των υλικών και πειραματικής μηχανικής (μεταλλικών, πολυμερών και σύνθετων υλικών). Η επαγγελματική και πρακτική του εμπειρία σε θέματα έρευνας και καινοτομίας, μεταφοράς τεχνολογίας και διαχείρισης έργου έχει προκύψει από την βετή απασχόλησή του ως συμβούλου τεχνολογίας και συντονιστή του Δικτύου ΠΡΑΞΗ. Το 1998 ορίστηκε από τη ΓΓΕΤ National Contact Point για το 5ο Πρόγραμμα Πλαίσιο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης, και το 2002 ορίστηκε ως εθνικός εμπειρογνώμονας του Ευρωπαϊκού Προγράμματος Innovation (FP6). Από το 1999 είναι Καθηγητής Τεχνολογίας Ναυτικών Υλικών της Σχολής Ναυτικών Δοκίμων. Έχει διδάξει τα μαθήματα της Πειραματικής Αντοχής των Υλικών, της Μεταλλουργίας και της Τεχνολογίας Καυσίμων και Λιπαντικών. Έχει συμμετάσχει σε πλήθος ερευνητικών προγραμμάτων και έχει δημοσιεύσει 39 εργασίες -11 σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά, 26 σε proceedings επιστημονικών συνεδρίων, 2 διδακτικά εγχειρίδια- και έχει δώσει πλήθος διαλέξεων σε διεθνείς εκδηλώσεις για θέματα καινοτομίας, μεταφοράς τεχνολογίας και αξιοποίησης ερευνητικών αποτελεσμάτων. Το International Citation Index αναφέρει περισσότερες από 200 ετεροαναφορές στο συγγραφικό έργο του έως το Νοέμβριο 2005.

Ο **Αλκιβιάδης Παϊπέτης** είναι Μηχανολόγος Μηχανικός με ειδίκευση στα σύνθετα υλικά και τις μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου. Αποφοίτησε από το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο το 1991, πήρε Master στην επιστήμη των υλικών με τιμητική διάκριση από το Queen Mary College το 1992 και διδακτορικό στην επιστήμη των υλικών από το Πανεπιστήμιο του Λονδίνου το 1997. Έχει εργασθεί στο Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών ως

επιστημονικός συνεργάτης και στην ΠΥΡ.ΚΑΛ. ως Μηχανικός Έρευνας και Ανάπτυξης. Έχει συμμετάσχει σε πάνω από 10 προγράμματα έρευνας και ανάπτυξης και σε πάνω από 10 βιομηχανικές μελέτες. Έχει δημοσιεύσει 3 διατριβές, 18 εργασίες σε διεθνή περιοδικά, 2 κεφάλαια σε βιβλία, 3 πατέντες, 15 εργασίες σε Πρακτικά Συνεδρίων με κριτές και έχει παρουσιάσει 22 εργασίες του σε συνέδρια (στις 4 ως προσκεκλημένος ομιλητής). Οι ετεροαναφορές στις δημοσιεύσεις του υπερβαίνουν τις 100 (Νοέμβριος 2005). Τον Απρίλιο του 2002 εκλέχθηκε Ειδικός Επιστήμονας στην ΣΝΔ και το Μάιο του 2004 Λέκτορας στον Τομέα Εφαρμοσμένης Μηχανικής και Ναυτικών Υλικών.

Φασματομηχανική μελέτη της συμπεριφοράς των ανθρακονημάτων σε θλιπτική καταπόνηση

N. E. Μελανίτης

Περίληψη

Τα ανθρακονήματα αποτελούν την ενισχυτική φάση πολλών σύγχρονων σύνθετων υλικών υψηλών επιδόσεων. Λόγω της μικροσκοπικής φύσης τους, η ως τώρα μελέτη της συμπεριφοράς τους σε θλίψη δεν έχει προσχωρήσει σε βάθος. Η παρούσα μελέτη χρησιμοποιεί μία έξυπνη διάταξη σε συνδυασμό με φασματογραφική τεχνική, ώστε να αντιμετωπίσει τις τεχνικές δυσκολίες προσδιορισμού των θλιπτικών ιδιοτήτων των ανθρακονημάτων. Η αξονική παραμόρφωση αστοχίας σε θλίψη ανθρακονημάτων από πολυακρίλο-νιτρίλιο μετρήθηκε πειραματικά με την εφαρμογή μικρών και διακεκριμένων θλιπτικών φορτίων σε μεμονωμένες ίνες, οι οποίες είχαν κολληθεί κατά μήκος παραλληλεπίπεδης προβόλου δοκού. Ανιχνεύοντας τις συχνότητες Raman κατά μήκος της ίνας με τη βοήθεια ενός ειδικά σχεδιασμένου μικροσκοπίου Raman, η κρίσιμη θλιπτική παραμόρφωση αστοχίας προσδιορίστηκε με μεγάλη ακρίβεια. Επιπλέον, επιχειρήθηκε εκτίμηση της τιμής του μέτρου ελαστικότητας σε θλίψη, σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή σε εφελκυσμό. Η κρίσιμη θλιπτική παραμόρφωση αστοχίας είναι αντιστρόφως ανάλογη του ονομαστικού μέτρου ελαστικότητας της ίνας. Η εκτιμώμενη μείωση του μέτρου ελαστικότητας σε θλίψη, σε σχέση με την τιμή σε εφελκυσμό, είναι περίπου 10% για ίνες υψηλής δυσκαμψίας και σημαντικότερη για ίνες μέσης και χαμηλής δυσκαμψίας.

Abstract

The combination of the cantilever beam technique and Raman spectroscopy was found to provide a unique tool for carbon fibre mechanical and structural characterisation. The calibration of the Raman frequencies of carbon fibres with strain allows for the utilisation of carbon fibres not only as reinforcement phase in full composites but as strain sensors as well. In the current study the axial compressive strain to failure of various types of PAN-based carbon fibres was monitored by applying gradient compressive load to single filaments which have been bonded along to a rectangular polymer cantilever beam. By monitoring the Raman frequencies along the fibre, the critical compressive strain required for first fibre failure could be assessed and the residual load that each type of fibre supported after first failure, could be measured. Estimates of the compressive moduli for all fibres could, also, be obtained by considering the dependence of the Raman frequency upon compressive strain in the elastic region. The critical compressive strain to failure was found to decrease with fibre modulus. The initial compressive moduli of high-modulus fibres were estimated to decrease up to a maximum of 10% with respect to their tensile moduli, whereas more significant reductions were found in the case of intermediate and low-modulus fibres.

I. Εισαγωγή

Διάφορες μέθοδοι για την εκτίμηση της συμπεριφοράς σε θλίψη ινών υψηλών επιδόσεων (ανθρακονημάτων, Kevlar κ.λπ.) έχουν καταγραφεί μέχρι σήμερα στη διεθνή βιβλιογραφία. Η παλαιότερη μέθοδος, αυτή του ελαστικού βρόχου [1, 2], βασίζει την εκτίμηση της παραμόρφωσης αστοχίας σε θλίψη στο λόγο ακτίνας, ίνας (r)-ακτίνας καμπυλότητας του βρόχου (R), ο οποίος συνεχώς συρρικνώνεται με τη μετατόπιση των άκρων της ίνας, που

σχηματίζει το βρόχο. Η εξωτερική πλευρά του βρόχου εφελκύεται ενώ η εσωτερική συνθλίβεται. Η τιμή του λόγου r/R λίγο πριν την αστοχία αντιστοιχεί στην παραμόρφωση θραύσης. Η μέθοδος αυτή εφαρμόστηκε στη μελέτη ινών Kevlar [3]. Η εφαρμογή της στη μελέτη ανθρακονημάτων δεν είναι ικανοποιητική, καθώς τα ανθρακονήματα έχουν πολύ μικρές διαμέτρους (4-7 μm), παρουσιάζουν δυσκολία στο χειρισμό του βρόχου και δεν επιτρέπουν τον εντοπισμό της έναρξης της αστοχίας (εσωτερική ή εξωτερική επιφάνεια του βρόχου) σε ψαθυρά υλικά.

Πειράματα αξονικής θλιπτικής καταπόνησης ινών έχουν δοκιμαστεί σε πολυμερικά δοκίμια με εμβαπτισμένες ίνες [4]. Η έναρξη της αστοχίας έχει εντοπιστεί με το οπτικό μικροσκόπιο κατά τη σταδιακή εφαρμογή του θλιπτικού φορτίου επί του πολυμερούς δοκιμίου, αλλά η οποιαδήποτε εκτίμηση αστοχίας επηρεάζεται από το τασικό πεδίο της περιβάλλουσας την ίνα ρητίνης και το λόγο Poisson των δύο φάσεων (ίνας/μήτρας). Παρόμοιες μελέτες έχουν βασίσει τους υπολογισμούς τους στη διαφορά του συντελεστή θερμικής διαστολής ίνας/μήτρας και τις τάσεις συρρίκνωσης που αναπτύσσονται κατά τη θερμοσκλήρυνση της ρητίνης [6, 7, 8, 9, 10]. Σε όλες τις προαναφερθείσες μελέτες, η καταπόνηση της ίνας δεν είναι μονοαξονική θλιπτική αλλά τριαξονική.

Μία διαφορετική μέθοδος για την επιβολή μονοαξονικής θλίψης σε μεμονωμένες ίνες παρουσιάστηκε από τον Deteresa [11], με την πρόσφυση τους στη θλιβόμενη επιφάνεια προβόλου καμπτόμενης ορθογωνικής δοκού. Η πρόσφυση των ινών διασφαλίστηκε με την επικάλυψή τους με λεπτό υμένα διαφανούς ακριλικού σπρέι, που αποτρέπει το λυγισμό τους δίχως να επιβάλλει ένα πολύπλοκο τριαξονικό τασικό πεδίο. Με την κάμψη της δοκού, οι γραμμικά αναπτυσσόμενες θλιπτικές τάσεις μεταφέρονται στην επικολημένη ίνα, η κατάσταση της οποίας (συνέχεια ή αστοχία) παρατηρείται με οπτικό μικροσκόπιο. Η κρίσιμη παραμόρφωση αστοχίας σε θλίψη προσδιορίζεται από τη θέση της πρώτης αστοχίας. Οι δυνατότητες εφαρμογής της μεθόδου περιορίζονται στις ίνες με εμφανή τρόπο αστοχίας και επηρεάζονται από την αξιοπιστία της οπτικής παρατήρησης.

Η παρούσα διερεύνηση επιδιώκει το συνδυασμό της μεθόδου της καμπτόμενης ορθογωνικής δοκού και τη διεισδυτική και ακριβέστατη φασματογραφική παρατήρηση κάθε σημείου κατά μήκος της επικολημένης ίνας άνθρακα, με την αντικατάσταση του οπτικού μικροσκοπίου από το μικροσκόπιο Raman. Προηγούμενες μελέτες έχουν αποδείξει τη σχέση συχνοτήτων Raman και εφελκυστικών παραμορφώσεων για τα ανθρακονήματα [12]. Η παρούσα προσέγγιση χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από το συγγραφέα για το φασματομηχανικό χαρακτηρισμό των ανθρακονημάτων σε θλίψη [13]. Η παρατήρηση αυτή οδηγεί σε μία καινοτόμο μεθοδολογία, με τη βοήθεια της οποίας το φάσμα Raman ενός συνθέτου υλικού μπορεί να αποτυπώνει με εντυπωσιακή ακρίβεια το πεδίο των τάσεων και των παραμορφώσεων ανά πάσα στιγμή και σε κάθε σημείο του υλικού.

II. Πειραματική διαδικασία

A. Δοκίμια και προετοιμασία

Τρεις τύποι ανθρακονημάτων (με βάση το PAN-πολυακριλονιτρίλιο) του ίδιου κατασκευαστή μελετήθηκαν στα πλαίσια του παρόντος προγράμματος. Τα χαρακτηριστικά τους και οι ιδιότητές τους παρατίθενται στον Πίνακα 1. Το μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό έχει υπολογιστεί σε προεμβαπτισμένες δεσμίδες νημάτων (pre-pregs) και για παραμορφώσεις έως 0,4%.

Ίνα/Διάμετρος (μm)	Διάμετρος ίνας	(Εφελκυστικό) Μέτρο Ελαστικότητας* (GPa)	Αντοχή σε εφελκυσμό (GPa)
HM-Standard high mod.	7 μm	390	3,2
IM intermediate mod.	7 μm	345	3,5
LM low modulus	7 μm	305	3,5

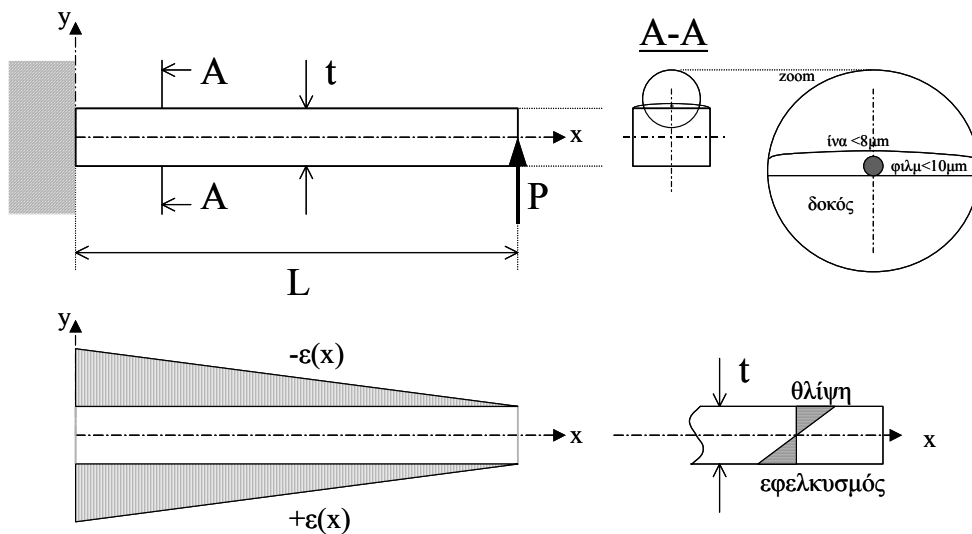
* Το ονομαστικό μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό έχει μετρηθεί από τον κατασκευαστή με πρότυπες μετρήσεις επί δεσμίδων ινών, για παραμορφώσεις από 0 ως 0,4%

Πίνακας 1: Ιδιότητες ανθρακονημάτων προγράμματος.

Ορθογωνικοί δοκοί από PMMA (Poly-methyl-methacrylate) διαστάσεων (ελεύθερου μήκους προβόλου x πλάτος x πάχος =) 50mm x 10mm x 5,5mm χρησιμοποιήθηκαν ως υπόβαθρο για την επικόλληση των ινών στην άνω θλιβόμενη επιφάνεια με τη βοήθεια διάφανου ακριλικού σπρέι (krylon). Το πάχος της επικάλυψης (φιλμ) δεν ξεπέρασε τα 10μm, ώστε να μην επηρεαστούν τα χαρακτηριστικά της ελαστικής δοκού και οι συνακόλουθοι υπολογισμοί. Η ξήρανση του φιλμ έγινε σε φούρνο κενού σε θερμοκρασία δωματίου.

B. Διάταξη προβόλου δοκού

Η διάταξη της προβόλου δοκού παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 4: Σκαρίφημα προβόλου δοκού, πλάγια όψη, τομή A-A, μεγέθυνση τομής. Η κατανομή των επιφανειακών παραμορφώσεων, ως συνάρτηση της απόστασης x από το πακτωμένο άκρο της δοκού, και η κατανομή των παραμορφώσεων εκατέρωθεν της ουδέτερης γραμμής, καθ' όλο το πάχος t της δοκού.

Η κάμψη του ελεύθερου άκρου της προβόλου δοκού επιτυγχάνεται με μικρόμετρο ακριβείας, επιβάλλοντας μετατόπιση δ , η οποία υπολογίζεται:

$$\delta_{\max} = \frac{P.L^3}{3.E.I} \quad (1)$$

δ_{\max} , η μέγιστη ματατόπιση του ουδέτερου άξονα της δοκού, στο ελεύθερο άκρο της
P, το εφαρμοζόμενο φορτίο
L, το ελεύθερο μήκος της προβόλου δοκού (50mm)
E, το μέτρο ελαστικότητας (Young modulus) του υλικού της δοκού
I, η ροπή αδράνειας

Η ροπή M στο σημείο x από το πακτωμένο άκρο της δοκού δίνεται από τη σχέση 2:

$$M = P.L.\left(1 - \frac{x}{L}\right) \quad (2)$$

Η παραμόρφωση $\varepsilon(x,y)$ στο σημείο x από το πακτωμένο άκρο της δοκού και σε απόσταση y από τον ουδέτερο άξονα της δοκού δίνεται από τη σχέση [3]:

$$\varepsilon_{(x,y)} = \frac{M.y}{E.I} \quad (3)$$

Τέλος, η μέγιστη τιμή της παραμόρφωσης στην επιφάνεια της δοκού ($y=+t/2$ για την άνω, θλιβόμενη, επιφάνεια) προκύπτει από τις σχέσεις 2 και 3 και για $y=t/2$:

$$\varepsilon_{(x)}^{\max} = \frac{3.t.\delta_{\max}}{2.L^2} \cdot \left(1 - \frac{x}{L}\right) \quad (4)$$

Η κατανομή των παραμορφώσεων κατά μήκος της προβόλου δοκού και στην επιφάνειά της, όπως αυτή προκύπτει από την εξ. (4), παρουσιάζεται και γραφικά στο Σχήμα 1. Η γραμμική σχέση ισχύει υπό την προϋπόθεση ότι το υλικό της προβόλου δοκού (PMMA) έχει το ίδιο μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό και θλίψη, και ότι για το εύρος των παραμορφώσεων του παρόντος πειράματος δεν παρουσιάζει φαινόμενα πλαστικής συμπεριφοράς, ερπυσμού και μη γραμμικότητας. Οι ανωτέρω προϋποθέσεις επιβεβαιώθηκαν με πειράματα για παραμορφώσεις έως 1,6%.

Βασική προϋπόθεση για την επιτυχία της μεθόδου είναι η ακριβής φόρτιση της επικολλημένης ίνας. Η φασματογραφία Raman και η ευαισθησία του φάσματος (της γραμμής G που εμφανίζεται στα $\sim 1580 \text{ cm}^{-1}$) στην εφελκυστική παραμόρφωση χρησιμοποιήθηκαν με επιτυχία για την επιβεβαίωση της ακριβούς μεταφοράς των επιφανειακών (τάσεων και) παραμορφώσεων της δοκού στην επικολλημένη ίνα [14]. Κατά τον έλεγχο αυτό, ελεύθερες ίνες σε διάταξη εφελκυσμού και επικολλημένες ίνες σε πρόβολο δοκού υπό κάμψη παρουσίασαν την ίδια ευαισθησία φάσματος Raman σε παραμόρφωση.

Γ. Φασματογραφία Raman

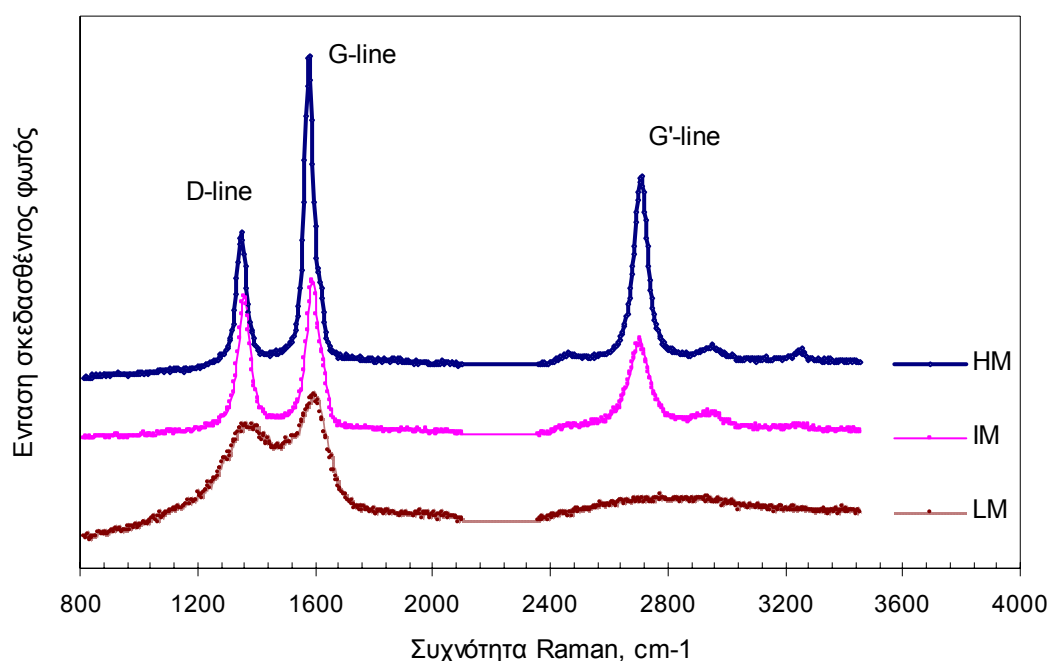
Φάσματα Raman ελήφθησαν με τη χρήση Argon-ion laser (514,5 nm). Τροποποιημένο μικροσκόπιο Nikon χρησιμοποιήθηκε για την εστίαση του προσπίπτοντος φωτός σε σημείο διαμέτρου 2μm επί την ίνα (ανθρακονήματος). Η ισχύς του laser περιορίστηκε στα 2 mW για την αποφυγή υπερθέρμανσης του συστήματος ίνας / ακριλικού φιλμ / δοκού. Το σκεδαζόμενο φως συνελέγη από την ίδια οπτική διάταξη και απεστάλη σε φασματογράφο SPEX 1877 (triple monochromator). CCD κάμερα (Write Instruments) υγρού αζώτου χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή των φωτονίων και του σήματος Raman. Το λογισμικό της κάμερας χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των συχνοτήτων (θέσης κορυφής και πλάτους κατανομής στο μέσον του ύψους), με εφαρμογή Λορεντζιανής κατανομής στα πειραματικά δεδομένα.

III. Πειραματικά αποτελέσματα

A. Φάσματα Raman ανθρακονημάτων

Τα φάσματα Raman των τριών ανθρακονημάτων του προγράμματος ελήφθησαν σε κατάσταση ισορροπίας (απαραμόρφωτες ίνες) και παρουσιάζονται στο Σχήμα 2. Στα καταγεγραμμένα φάσματα παρουσιάζονται οι κυριότερες κορυφές που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες μορφές ταλάντωσης της κρυσταλλικής δομής του γραφίτη. Η κορυφή που εμφανίζεται στα $\sim 1360 \text{ cm}^{-1}$ (D-line) αντιστοιχεί στην ταλαντωτική ιδιομορφή A1g (ιδιομορφή που αποδίδεται στην ύπαρξη ατελειών της γραφιτικής δομής στην επιφάνεια του ανθρακονήματος). Η κορυφή που εμφανίζεται στα $\sim 1580 \text{ cm}^{-1}$ (G-line) αντιστοιχεί στην κύρια ταλαντωτική ιδιομορφή του γραφιτικού κρυστάλλου E2g [15]. Ο λόγος των εντάσεων των δύο κορυφών συσχετίζεται με το μέγεθος των γραφιτικών κρυστάλλων στην επιφάνεια των ανθρακονημάτων [12, 15]. Μία αναλυτικότερη παρουσίαση της σχέσης κρυσταλλικότητας-μέτρου ελαστικότητας των ανθρακονημάτων παρατίθεται στην βιβλιογραφία [16]. Η κορυφή που εμφανίζεται στα $\sim 2700 \text{ cm}^{-1}$ (G'-line) έχει αποδοθεί στο δεύτερης τάξης φάσμα της γραφιτικής δομής [12, 16]. Τα φάσματα αυτά αποτέλεσαν τις μετρήσεις αναφοράς (παραμόρφωση $\varepsilon=0\%$) για τη μελέτη της επίδρασης της παραμόρφωσης στο φάσμα Raman των ανθρακονημάτων του παρόντος προγράμματος.

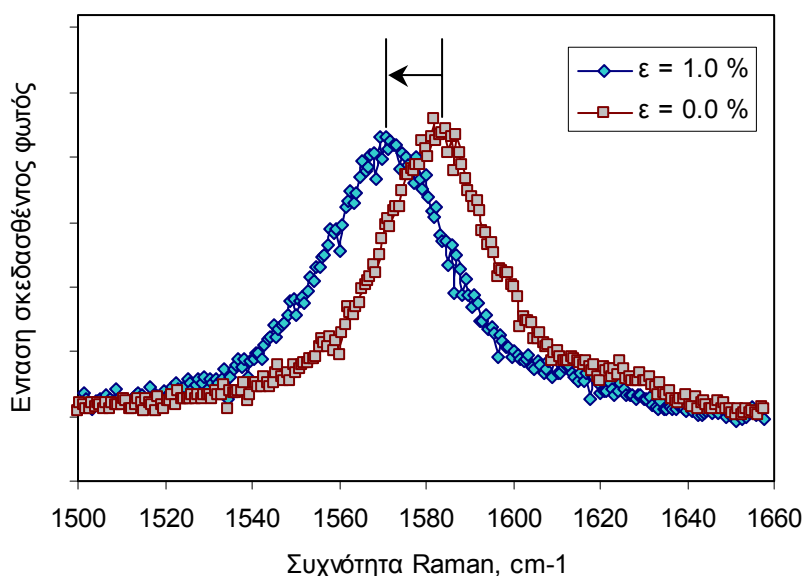
Τα πειραματικά δεδομένα αναλύθηκαν με λογισμικό και η θέση (peak position) και το πλάτος (στο μέσον) των κορυφών (half-height bandwidth) υπολογίστηκαν με τη βοήθεια Λορεντζιανής κατανομής.



Σχήμα 5: Το φάσμα Raman των τριών ανθρακονημάτων του προγράμματος. Όσο μεγαλύτερο το μέτρο ελαστικότητας (και η κρυσταλλικότητα στην επιφάνεια των ινών), τόσο εντονότερες οι κορυφές G και G'. Στις χαμηλού μέτρου ελαστικότητας (και κρυσταλλικότητας) ίνες, οι δευτέρας τάξεως γραμμές (G') εξαφανίζονται και οι πρώτης τάξεως κορυφές πλαταινούν.

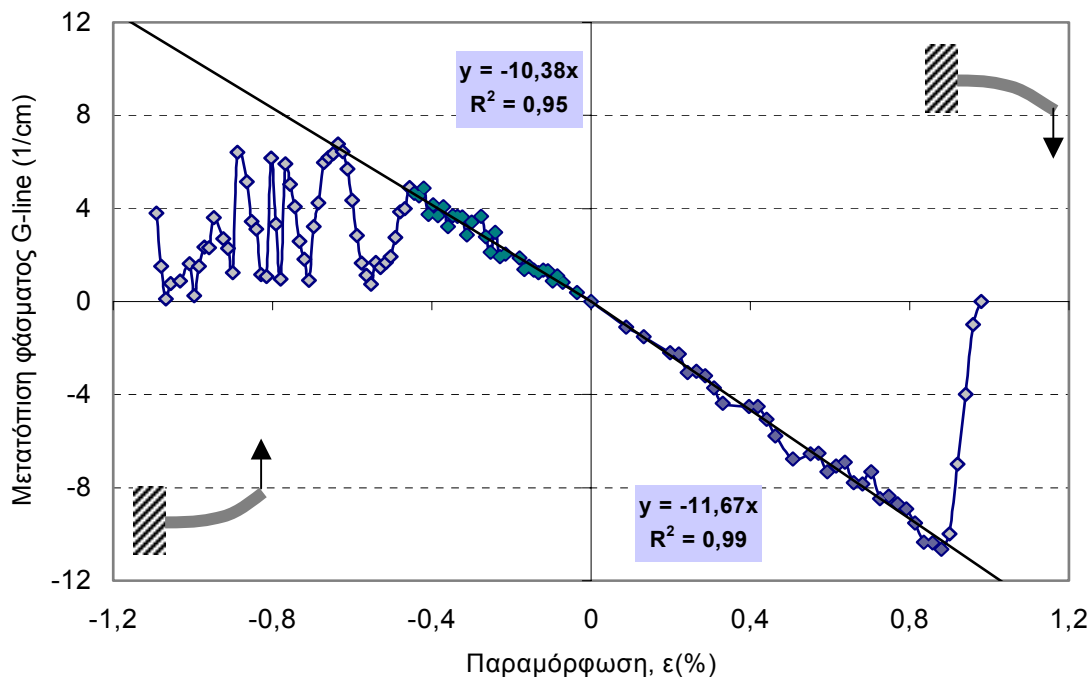
B. Ευαισθησία φασμάτων Raman στην παραμόρφωση

Η ευαισθησία της κορυφής G (1580 cm^{-1}) στην παραμόρφωση εξετάστηκε με τη βοήθεια της προβόλου δοκού, τόσο σε εφελκυσμό όσο και σε θλίψη. Ο εφελκυσμός ή η θλίψη της άνω επιφάνειας ελεγχόταν κάθε φορά από τη βύθιση ή την ανύψωση της προβόλου δοκού από το ελεύθερο άκρο. Οι επικολημένες ίνες σαρώθηκαν με το μικροσκόπιο Raman και τα φάσματα καταγράφηκαν ως συνάρτηση της απόστασης από το ελεύθερο άκρο και, κατά συνέπεια, ως συνάρτηση της επιβαλλόμενης παραμόρφωσης, σύμφωνα με την εξ. (4). Τρεις ίνες από κάθε τύπο (μέτρο ελαστικότητας) ελέγχθηκαν σε εφελκυσμό και άλλες τρεις σε θλίψη. Η μετατόπιση της κορυφής G (προς χαμηλότερες τιμές) με την εφελκυστική παραμόρφωση για μία ίνα υψηλού μέτρου ελαστικότητας παρατίθεται στο Σχήμα 3. Η θλιπτική παραμόρφωση επιφέρει μετατόπιση της κορυφής G (προς υψηλότερες τιμές).



Σχήμα 6: Η μετατόπιση της κορυφής G του ανθρακονήματος HM (υψηλού μέτρου ελαστικότητας) κατά -11 περίπου cm^{-1} με την εφαρμογή παραμόρφωσης $\varepsilon = 1\%$. Πολλές διαδοχικές μετρήσεις (για διαφορετικές τιμές παραμόρφωσης) επιτρέπουν τον προσδιορισμό της ευαισθησίας της G-line στην παραμόρφωση. Η ιδιότητα αυτή καθιστά την ίνα ιδανικό αισθητήρα παραμόρφωσης.

Η μετατόπιση της κορυφής G ως συνάρτηση της παραμόρφωσης για το ανθρακόνημα HM, τόσο σε εφελκυσμό όσο και σε θλίψη, παρουσιάζεται στο Σχήμα 4. Η πρώτη αστοχία του νήματος σε εφελκυσμό εμφανίζεται για παραμόρφωση περίπου 1%. Στο σημείο αυτό, η θραύση της ίνας προκαλεί αποφόρτισή της με αποτέλεσμα την επιστροφή της συχνότητας Raman στην τιμή του αφόρτιστου νήματος. Η γραμμική παρεμβολή για παραμορφώσεις από 0 ως 0,8% (πριν την επίδραση της αστοχίας) οδηγεί στον υπολογισμό της ευαισθησίας της συχνότητας G σε εφελκυσμό (Raman Frequency Gauge Factor, [17]) σε $-11,7\text{ cm}^{-1}/\%$ ($R^2=0,99$). Η πρώτη αστοχία του νήματος σε θλίψη εμφανίζεται για παραμόρφωση περίπου -0,5%. Στο σημείο αυτό, η αστοχία προκαλεί αποφόρτιση της ίνας και επιστροφή της συχνότητας στην τιμή του αφόρτιστου νήματος. Η επικολημένη ίνα επαναφορτίζεται στη συνέχεια (με μηχανισμό που αντιστοιχεί στη μετάδοση τάσεων, μέσω της διεπιφάνειας ίνας / μήτρας, [17]) και αστοχεί κάθε φορά που η τάση ξεπερνά την αντοχή της σε θλίψη. Η γραμμική παρεμβολή για παραμορφώσεις από 0 ως -0,4% (πριν την επίδραση της αστοχίας) οδηγεί στον υπολογισμό της ευαισθησίας της συχνότητας G σε θλίψη (κατ' αντιστοιχία με αυτήν σε εφελκυσμό) σε $-10,4\text{ cm}^{-1}/\%$ ($R^2=0,95$). Παρατηρείται μείωση της ευαισθησίας της συχνότητας G στη θλίψη σε σχέση με αυτήν στον εφελκυσμό της τάξεως του 10%.



Σχήμα 7: Η ευαισθησία του της συχνότητας Raman (G-line) ανθρακονήματος υψηλού μέτρου ελαστικότητας (390 GPa) στην εφελκυστική και θλιπτική παραμόρφωση. Τα δεδομένα σε εφελκυσμό και τα δεδομένα σε θλίψη έχουν προκύψει από ανεξάρτητα πειράματα και έχουν αναλυθεί ξεχωριστά.

Η ευαισθησία του φάσματος Raman (G-line) στην παραμόρφωση για όλα τα υπό εξέταση ανθρακονήματα σε εφελκυσμό και θλίψη, σύμφωνα με την διαδικασία που παρουσιάστηκε παραπάνω, και όπως αυτή εκφράζεται με το RFGF (Raman Frequency Gauge Factor), συνοψίζεται στον Πίνακα 2.

Ίνα-Δυσκαμψία	Εφελκυσμός*	Θλίψη*	Κρίσιμη παραμόρφωση πρώτης αστοχίας (%)
	RFGF (cm ⁻¹ /%)	RFGF (cm ⁻¹ /%)	
HM (390 GPa)	- 11,7 ± 0,3	- 10,4 ± 0,7	≥ 0,50
IM (345 GPa)	- 10,4 ± 0,3	- 9,1 ± 0,8	0,50 - 0,90
LM (230 GPa)	- 7,6 ± 0,4	- 5,1 ± 0,3	≥ 0,90

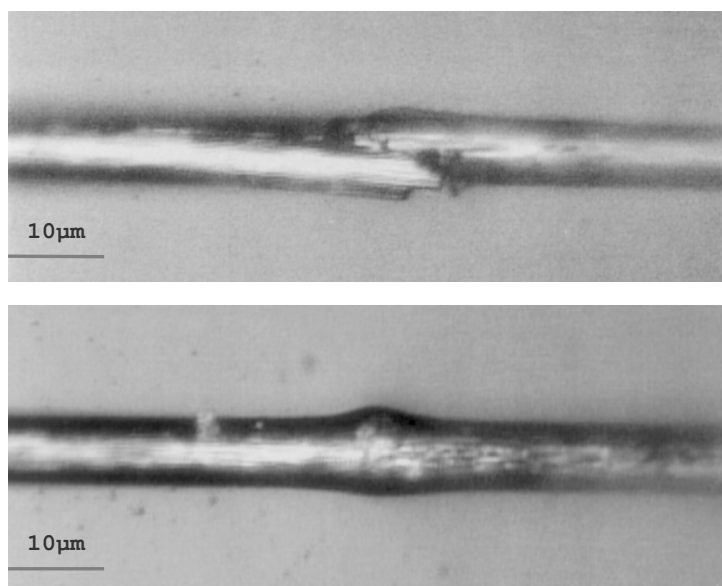
* ο συντελεστής ευαισθησίας είναι σε κάθε περίπτωση αρνητικός και εκφράζει για μεν τον εφελκυσμό τη μετατόπιση της συχνότητας της G-line σε χαμηλότερες τιμές με την αύξηση της εφελκυστικής παραμόρφωσης, για δε την θλίψη τη μετατόπιση της συχνότητας (G-line) σε μεγαλύτερες τιμές με την αύξηση της (συμβατικά αρνητικής) θλιπτικής παραμόρφωσης.

Πίνακας 2: Ευαισθησία Raman G-line ανθρακονημάτων στην παραμόρφωση.

Γ. Αστοχία ανθρακονημάτων σε θλίψη

Η αστοχία σε θλίψη των ανθρακονημάτων με υψηλό μέτρο ελαστικότητας (HM) λαμβάνει χώρα με διατμητικό τρόπο (υπό γωνία ως προς τον άξονα της ίνας), θυμίζοντας την αστοχία των ψαθυρών υλικών σε θλίψη. Αντίθετα, η αστοχία των λοιπών ανθρακονημάτων του προγράμματος (μέσου και χαμηλού μέτρου ελαστικότητας) παρουσιάζεται με τοπική “βαρελοποίηση”, θυμίζοντας την αστοχία των μεταλλικών όλκιμων υλικών. Στην περίπτωση αυτή, οι συχνότητες δεν επιστρέφουν στην αρχική τιμή (του αφόρτιστου νήματος) αλλά

παύουν να μετατοπίζονται παρά την αυξανόμενη παραμόρφωση, υποδηλώνοντας συμπεριφορά έντονων πλαστικών παραμορφώσεων. Οι δύο χαρακτηριστικές μορφές αστοχίας αποτυπώνονται στις φωτογραφίες του Σχήματος 5.



Σχήμα 8: Χαρακτηριστική αστοχία σε θλίψη.
Άνω: ανθρακόνημα HM υψηλού μέτρου ελαστικότητας.
Κάτω: ανθρακόνημα LM χαμηλού μέτρου ελαστικότητας.

Η αστοχία σε θλίψη των ανθρακονημάτων υψηλού μέτρου ελαστικότητας (HM) εμφανίζεται σε θλιπτική παραμόρφωση περίπου 0,5%. Η αστοχία σε θλίψη των ανθρακονημάτων χαμηλού μέτρου ελαστικότητας (LM) εμφανίζεται από θλιπτική παραμόρφωση 0,9% και πάνω. Η αστοχία των ινών με ενδιάμεσες τιμές δυσκαμψίας εμφανίζεται ανάμεσα σε 0,5% και 0,9% παραμόρφωση (με αρκετά μεγάλη απόκλιση). Λόγω του μικρού αριθμού δειγμάτων, δεν μπορεί να προσδιοριστεί αξιόπιστα η σταθερή απόκλιση των μετρήσεων.

IV. Συζήτηση

Όταν ίνες πολύ υψηλής κρυσταλλικότητας, όπως οι πολυδιακετυλενικές (PDA), τανύζονται, η μακροσκοπική παραμόρφωση επί της ίνας ταυτίζεται με τη μικροσκοπική παραμόρφωση σε μικροκρυσταλλικό και ατομικό επίπεδο [18]. Η μακροσκοπικά εφαρμοζόμενη τάση μεταφέρεται στους ατομικούς δεσμούς, επιμηκύνοντας ή συμπιέζοντάς τους και αυξάνοντας ή μειώνοντας τις ενδοατομικές αποστάσεις, αντίστοιχα. Οι συχνότητες Raman που συσχετίζονται με τους δεσμούς αυτούς μετατοπίζονται σε χαμηλότερες τιμές κατά τον εφελκυσμό [18] και σε υψηλότερες τιμές κατά τη θλίψη [19]. Όπως έχει υποδειχθεί από σχετική μελέτη [19], τόσο η ευαισθησία των συχνοτήτων Raman πολυδιακετυλενικών ινών όσο και η δυσκαμψία τους (μέτρο ελαστικότητας) διατηρούνται στις ίδιες τιμές σε εφελκυσμό και θλίψη. Ίνες με μερική κρυσταλλικότητα, όπως οι αραμιδικές (Kevlar), παρουσιάζουν συχνότητες Raman με ευαισθησία στην εφελκυστική παραμόρφωση, ανάλογη με το μέτρο ελαστικότητάς τους [20, 21].

Βασίζόμενοι στην παραπάνω ανάλυση, μπορούμε να ισχυριστούμε πως σε ίνες με μερική κρυσταλλικότητα ο συντελεστής ευαισθησίας (RFGF) σε παραμόρφωση αποτελεί μέτρο της δυσκαμψίας του υλικού, δηλαδή μέτρο του τρόπου με τον οποίο οι κρύσταλλοι του υλικού παραλαμβάνουν το εξωτερικά επιβαλλόμενο φορτίο. Η αλλαγή του συντελεστή ευαισθησίας

ανάμεσα σε εφελκυσμό και θλίψη για την ίδια ίνα υποδηλώνει την αλλαγή της δυσκαμψίας της ίνας από εφελκυσμό σε θλίψη, σύμφωνα με την εξ. (5).

$$E_{\thetaλίψη} = \frac{RFGF_{\thetaλίψη}}{RFGF_{\epsilonφελκυσμού}} \cdot E_{\epsilonφελκυσμού} \quad (5)$$

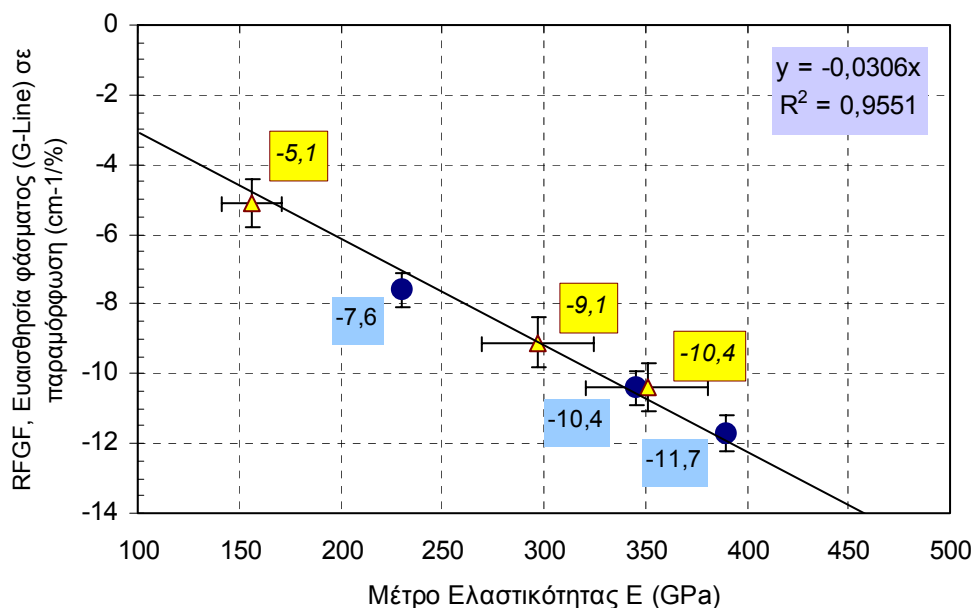
Με τη βοήθεια της παραπάνω ανάλυσης της εξ. (5), το μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη για τα ανθρακονήματα του προγράμματος μπορεί να εκτιμηθεί ως ακολούθως:

Ίνα-Δυσκαμψία	$RFGF_{(\thetaλίψη)} / RFGF_{(\epsilonφελκυσμού)}$	Μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη, $E_{\thetaλίψη}$, GPa
HM (390 GPa)	0,90 ± 0,08	351 ± 30
IM (345 GPa)	0,86 ± 0,08	297 ± 28
LM (230 GPa)	0,68 ± 0,07	156 ± 16

Πίνακας 3: Εκτίμηση μέτρου ελαστικότητας ανθρακονημάτων σε θλίψη.

Και στην παρούσα μελέτη, ο συντελεστής ευαισθησίας των συχνοτήτων Raman στην παραμόρφωση (εφελκυστική) παρουσιάζει σαφή σχέση με το μέτρο ελαστικότητας (σε εφελκυσμό), όπως προκύπτει και από τη διαγραμματοποίηση των πειραματικών δεδομένων του Πίνακα 2 (Σχήμα 6). Ουσιαστικά, η κλίση της γραμμής μέτρου ελαστικότητας-ευαισθησίας του φάσματος σε παραμόρφωση, που υπολογίζεται σε $-3 \text{ cm}^{-1}/\text{GPa}$, εκφράζει την μετατόπιση του φάσματος (G-line) των ανθρακονημάτων, με την εφαρμογή τάσης ίσης με 1 GPa, ανεξαρτήτως του μέτρου ελαστικότητας της ίνας. Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνει την άποψη πως η ευαισθησία του φάσματος Raman σε παραμόρφωση είναι συνάρτηση της ευθυγράμμισης των κρυστάλλων των ινών ως προς τον άξονά τους. Ίνες υψηλού μέτρου ελαστικότητας και υψηλής κρυσταλλικότητας (οι γραφιτικοί κρύσταλλοι είναι προσανατολισμένοι στη διεύθυνση της ίνας σε υψηλό βαθμό) παραλαμβάνουν ευκολότερα την τάση που αντιστοιχεί στην επιβαλλόμενη παραμόρφωση στη διεύθυνση των ατομικών δεσμών. Αντίθετα, ίνες χαμηλού μέτρου ελαστικότητας και μικρότερης κρυσταλλικότητας (οι γραφιτικοί κρύσταλλοι είναι λιγότερο ευθυγραμμισμένοι ως προς τη διεύθυνση της ίνας) παραλαμβάνουν με μεγαλύτερη δυσκολία την τάση που αντιστοιχεί στην επιβαλλόμενη παραμόρφωση, καθώς το εξωτερικό φορτίο αναλώνεται στην περιστροφή των φτωχά ευθυγραμμισμένων κρυστάλλων, μετατόπιση των διακένων και ατελειών της δομής, με αποτέλεσμα να μην φορτίζονται έντονα οι ατομικοί δεσμοί που συσχετίζονται με την ταλαντωτική ιδιομορφή της G-line.

Η παραπάνω ανάλυση οδηγεί στο συμπέρασμα πως η γραφιτική κρυσταλλική δομή έχει ευαισθησία φάσματος (G-line) σε τάση ίση με $\sim -3 \text{ cm}^{-1}/\text{GPa}$, ανεξαρτήτως αρχικού μέτρου ελαστικότητας της ίνας. Η παραμόρφωση στην οποία αντιστοιχεί αυτή η εσωτερική τάση είναι συνάρτηση του ονομαστικού μέτρου ελαστικότητας της κάθε ανθρακικής ίνας. Έτσι, η εφαρμογή εφελκυστικών τάσεων τείνει να ευθυγραμμίσει τους γραφιτικούς κρυστάλλους, καθιστώντας την ίνα περισσότερο δύσκαμπτη, ενώ η εφαρμογή θλιπτικών τάσεων επιτείνει τον αποπροσανατολισμό των γραφιτικών κρυστάλλων (ως προς τη διεύθυνση της ίνας), καθιστώντας την ίνα λιγότερο δύσκαμπτη. Αντίστοιχες ενδείξεις για εργοσκήληση των ανθρακονημάτων υπό εφελκυσμό [22] και μαλάκυσή τους υπό θλίψη [23] έχουν ήδη παρουσιαστεί στη βιβλιογραφία [24].



Σχήμα 9: Η ευαισθησία του φάσματος (G-line) των ανθρακονημάτων στην εφελκυστική παραμόρφωση, ως συνάρτηση του ονομαστικού μέτρου ελαστικότητας των ινών σε εφελκυσμό (σύμβολο ●). Η κλίση της γραμμής (η οποία περνά από την αρχή των αξόνων) υπολογίζεται σε περίπου $-3 \text{ cm}^{-1}/\text{GPa}$ και εκφράζει την ευαισθησία του φάσματος (G-line) στην τάση. Η ευαισθησία του φάσματος των ανθρακονημάτων στη θλιπτική παραμόρφωση, ως συνάρτηση του εκτιμηθέντος μέτρου ελαστικότητας σε θλίψη [εξ. (5) και Πίνακας 3, σύμβολο Δ] συμπίπτει εντυπωσιακά στην ίδια γραμμή.

Ο προσδιορισμός της αντοχής σε θλίψη των ανθρακονημάτων παρουσιάζει δυσκολία που οφείλεται σε δύο ανταγωνιστικούς παράγοντες: τον κυρίαρχο προσανατολισμό των κρυστάλλων ως προς τον άξονα των ινών [4, 25] και το μέτρο διάτμησης [25]. Η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας αντιστοιχεί στον καλύτερο προσανατολισμό των γραφικών κρυστάλλων περί τον άξονα της ίνας, οδηγώντας σε αύξηση της αντοχής. Την ίδια στιγμή, η μείωση της ανισοτροπίας στην κρυσταλλική δομή οδηγεί στη μείωση της διατμητικής δυσκαμψίας, γεγονός που οδηγεί σε διατμητικού τύπου (45° γωνία) αστοχίες. Η ανάπτυξη ενός μοντέλου δομής δυσχεραίνεται ακόμα περισσότερο από το φαινόμενο της διαφορετικής δομής στην επιφάνεια και τον πυρήνα των ανθρακονημάτων (skin-core effect) [26] και την παρουσία δομικών ατελειών στην επιφάνεια [27], που πολύ συχνά ευθύνονται για την ενεργοποίηση της αστοχίας σε θλίψη, ειδικά σε ανθρακονήματα χαμηλού μέτρου ελαστικότητας.

V. Συμπεράσματα

Ο συνδυασμός της μεθόδου της προβόλου δοκού και της φασματογραφίας Raman παρέχει ένα μοναδικό εργαλείο για τη μελέτη της συμπεριφοράς και των ιδιοτήτων των ανθρακονημάτων σε θλίψη.

Αναφορικά με τη μέθοδο, παρουσιάζει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

1. Δεν επιτρέπει την επιρροή του φαινομένου του ελεύθερου μήκους δοκιμής (gauge length effect) στα πειραματικά αποτελέσματα, καθώς η ίνα υποβάλλεται σε βαθμωτή παραμόρφωση κατά μήκος της καμπτόμενης δοκού.
2. Άκαιρη αστοχία, οφειλόμενη σε ατέλεια ενός συγκεκριμένου νήματος, εντοπίζεται από την πρόωμη μετατόπιση της συχνότητας και τη συνακόλουθη ανάκαμψή της.

3. Η ίνα είναι “κλειδωμένη” σε θέση και παραμόρφωση και μπορεί να σαρωθεί οπτικά και φασματογραφικά πολλές φορές.
4. Κίνδυνοι για την υγεία του χειριστή από αιωρούμενα θραύσματα νημάτων αποκλείονται με την εμφάνιση του νήματος στο φιλμ.
5. Η ίνα μπορεί εύκολα να ανακτηθεί από το διαλυτό φιλμ για περαιτέρω ανάλυση (π.χ. ηλεκτρονικό μικροσκόπιο).

Αναφορικά με το υλικό:

1. Τα ανθρακονήματα παρουσιάζουν ευαισθησία του φάσματος Raman σε παραμόρφωση τόσο στον εφελκυσμό (μετατόπιση του φάσματος σε μικρότερες τιμές), όσο και σε θλίψη (μετατόπιση του φάσματος σε μεγαλύτερες τιμές).
2. Η διαφορετική ευαισθησία σε παραμόρφωση ανάμεσα στον εφελκυσμό και τη θλίψη υποδηλώνει διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας των ανθρακονημάτων σε εφελκυσμό και θλίψη. Η διαφορά αυτή κυμαίνεται από 10%, για τα ανθρακονήματα υψηλού ονομαστικού μέτρου ελαστικότητας, έως και 30%, για τα ανθρακονήματα χαμηλού ονομαστικού μέτρου ελαστικότητας.
3. Η ευαισθησία του φάσματος Raman των ανθρακονημάτων σε τάση είναι η ίδια για όλα τα ανθρακονήματα ($\sim -3 \text{ cm}^{-1}/\text{GPa}$), ανεξαρτήτως ονομαστικού μέτρου ελαστικότητας.
4. Η συσχέτιση των ευρημάτων 2 & 3 οδηγεί στη διατύπωση ενός μοντέλου δομής και συμπεριφοράς των ανθρακονημάτων σε καταπόνηση (εφελκυσμό ή θλίψη) που εξηγεί τον τρόπο αστοχίας τους σε θλίψη: Τα ανθρακονήματα με υψηλό ονομαστικό μέτρο ελαστικότητας αστοχούν σε θλίψη με “ψαθυρό” τρόπο ενώ τα ανθρακονήματα με χαμηλό μέτρο ελαστικότητας αστοχούν υπό θλίψη με “όλκιμο” τρόπο.
5. Η κρίσιμη παραμόρφωση για αστοχία σε θλίψη αυξάνεται όσο ελαττώνεται το ονομαστικό μέτρο ελαστικότητας των ανθρακονημάτων.

Συνοψίζοντας, η μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στην παρούσα μελέτη αφενός αποτελεί ένα ιδανικό εργαλείο για το χαρακτηρισμό των μηχανικών ιδιοτήτων των ανθρακονημάτων και αφετέρου επιτρέπει την αξιοποίηση των ανθρακονημάτων και ως αισθητήρων στα προηγμένα σύνθετα υλικά, των οποίων αποτελούν την ενισχυτική φάση.

Αναφορές

1. D. Sinclair, “*A Bending Method for Measurement of the Tensile Strength and Youngs Modulus of Glass Fibers*”, Journal of Applied Physics 21, p. 380, 1950.
2. W. R. Jones and J. W. Johnson, “*Intrinsic Strength and Non-Hookean Behaviour of Carbon Fibres*”, Carbon 9, p. 645, 1971.
3. J. H. Greenwood and P. G. Rose, “*Compressive Behavior of Kevlar-49 Fibers and Composites*”, Journal of Materials Science 9, p. 1809, 1974.
4. H. M. Hawthorne and E. Teghtsoonian, “*Axial-Compression Fracture in Carbon-Fibers*”, Journal of Materials Science 10, p. 41, 1975.
5. H. Jahankhani and C. Galiotis, “*Interfaces Polym Cer*”, p. 107, 1988.
6. P. N. Gillham, P. N. Reitz and M. J. Doyle, Polym Eng Sci 8, p. 277, 1968.
7. I. M. Robinson et al., “*Stress-Induced Twinning of Polydiacetylene Single-Crystal Fibers in Composites*”, Journal of Materials Science 21, p. 3440, 1986.
8. I. M. Robinson et al., “*Study of Model Polydiacetylene Epoxy Composites .2. Effect of Resin Shrinkage*”, Journal of Materials Science 22, p. 3642, 1987.
9. S. J. Deteresa, R. S. Porter and R. J. Farris, “*Compressive and Torsional Behavior of Kevlar-49 Fiber*”, Journal of Materials Science 19, p. 57, 1984.
10. W. C. Dale and E. Baer, “*Fiber-Buckling in Composite Systems - Model For Ultrastructure Of Uncalcified Collagen Tissues*”, Journal of Materials Science 9, p. 369, 1974.

11. S. J. Deteresa et al., "*Experimental-Verification of a Microbuckling Model for the Axial Compressive Failure of High-Performance Polymer Fibers*", Journal of Materials Science 23, p. 1886, 1988.
12. C. Galiotis and D. N. Batchelder, "*Strain Dependences of the 1st-Order and 2nd-Order Raman-Spectra of Carbon-Fibers*", Journal of Materials Science Letters 7, p. 545, 1988.
13. N. Melanitis and C. Galiotis, "*Compressional behaviour of carbon fibres - a Raman spectroscopic study*", Journal of Materials Science 25, p. 5081, 1990.
14. S. P. Timoshenko, "*Theory Elastic Stability*", 1961.
15. F. Tuinstra and J. L. Koenig, "*Characterization of Graphite Fiber Surfaces with Raman Spectroscopy*", Journal of Composite Materials 4, p. 492, 1970.
16. N. Melanitis, P. L. Tetlow and C. Galiotis, "*Characterisation of PAN-based carbon fibres with LRS - part I*", Journal of Materials Science 31, p. 851, 1996.
17. N. Melanitis, PhD thesis, University of London, 1991.
18. C. Galiotis et al., "*The Study of Model Polydiacetylene Epoxy Composites .I. The Axial Strain in the Fiber*", Journal of Materials Science 19, p. 3640, 1984.
19. C. F. Fan and S. L. Hsu, "*Spectroscopic Study of A Model Composite - Compressive Behavior of the Reinforcement Fiber and the Buildup of Thermal Residual-Stress*", Journal of Polymer Science Part B-Polymer Physics 27, p. 337, 1989.
20. C. Galiotis et al., "*Strain Dependence of the Raman Frequencies of a Kevlar-49 Fiber*", Polymer Communications 26, p. 354, 1985.
21. S. Van der Zwaag et al., "*Chain Stretching in Aramid Fibers*", Polymer Communications 28, p. 276, 1987.
22. G. J. Curtis et al., "*Non-Hookean Behaviour of Strong Carbon Fibres*", Nature 220, p. 1024, 1968.
23. P. Henrat, "*Looking Ahead Materi*", p. 389, 1987.
24. S. Kumar et al., 1st P Am Soc Comp Te 8, 1986.
25. S. J. Deteresa et al., "*A Model for the Compressive Buckling of Extended Chain Polymers*", Journal of Materials Science 20, p. 1645, 1985.
26. D. Hull, Cambridge Solid Stat 10, 1981.
27. I. L. Kalnin, "*Carbon Fibres and Their Properties*", p. 62, 1985.

Μέτρηση του ανισότροπου μητρώου ελαστικότητας σε σύνθετα υλικά με τη χρήση υπερήχων

A. Παϊπέτης

Περίληψη

Η διάδοση κυμάτων στα υλικά είναι συνάρτηση των ελαστικών ιδιοτήτων τους. Κατά συνέπεια, μελετώντας τον τρόπο διάδοσης, είναι δυνατή η εκτίμηση του ελαστικού μητρώου των υλικών καθώς επίσης και της χρονοεξέλιξής του, όταν το υλικό καταπονείται στη διάρκεια ζωής του. Στην περίπτωση ανισότροπων υλικών το πρόβλημα είναι ακόμη πιο ενδιαφέρον, αφού όχι μόνο αλλάζουν τα στοιχεία του μητρώου δυσκαμψίας αλλά είναι δυνατόν να μεταβληθεί και η συμμετρία του υλικού.

Στην παρούσα εργασία υπολογίζεται το μητρώο δυσκαμψίας προηγμένου σύνθετου υλικού Al_2O_3/Al_2O_3 με μη καταστροφική μέθοδο. Ο υπολογισμός βασίζεται στις ταχύτητες διάδοσης ηχητικών κυμάτων στο υλικό. Η πειραματική μέτρηση πραγματοποιήθηκε με τη χρήση διάταξης που σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε στο εργαστήριο. Η διάταξη βασίζεται σε σύστημα πομπού-δέκτη με δυνατότητα ελέγχου της γωνίας πρόσπτωσης στο υλικό, εφόσον το τελευταίο είναι εμβαπτισμένο σε νερό για να επιτευχθεί ακουστική σύζευξη. Η μέτρηση του χρόνου διάδοσης της διαμήκουσ και των εγκάρσιων συνιστωσών του διαδιδόμενου κύματος στο σύνθετο δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού των αντίστοιχων ταχυτήτων διάδοσης, ως συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης για δεδομένο επίπεδο σάρωσης. Ο υπολογισμός των ελαστικών σταθερών για την πλήρη κατασκευή του μητρώου δυσκαμψίας του υλικού συνίσταται στη λύση του αντίστροφου προβλήματος κυματικής διάδοσης, όπως αυτό περιγράφεται από την εξίσωση Christoffel. Με αυτό τον τρόπο, επιτεύχθηκε η μέτρηση και των 9 ελαστικών σταθερών που περιγράφουν πλήρως το ορθότροπο μέσο. Οι μετρήσεις που προέκυψαν με την μέθοδο των υπερήχων συγκρίθηκαν με αντίστοιχες μετρήσεις που προέκυψαν από καταστροφικές δοκιμές.

Abstract

The stiffness matrix of Al_2O_3/Al_2O_3 composites has been non-destructively evaluated using ultrasonics. The method is based on the propagation velocities of sound waves in the material. These were estimated experimentally using a custom pulser-receiver setup which allows control of the angle of the incident pulse on the sample, while the latter is immersed in a water bath. The recording of the time delay of the longitudinal and transverse wave components as they travel through the composite, allows the determination of their respective propagation velocities within the composite, as a function of the incident angle for a given recording plane. The derivation of the elastic constants in order to reproduce the stiffness matrix of the composite is an inverse wave propagation problem described by the Christoffel equation. All 9 elastic constants are derived assuming an orthotropic medium. The derived elastic constants are compared to experimental data acquired destructively.

I. Εισαγωγή

Τα σύνθετα κεραμικά υλικά βρίσκονται στην αιχμή της τεχνολογίας για εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών, ειδικά αφότου τα υπερκράματα καλύπτουν πλέον οριακά τις απαιτήσεις. Η θερμική τους σταθερότητα, σε συνδυασμό με τη δυνατότητα επιλεκτικής ενίσχυσης για

βελτίωση της μηχανικής συμπεριφοράς [1], και η προσαρμογή των ιδιοτήτων της διεπιφάνειάς τους για την επίτευξη της επιθυμητής δυσθραυστότητας [2] τα καθιστούν ιδανικά ως υποψήφια δομικά για την κατασκευή “θερμών” εξαρτημάτων (πτερύγια, ακροφύσια, θάλαμοι καύσης) [3]. Τα σύνθετα αλουμίνας / αλουμίνας (Al_2O_3/Al_2O_3) αποτελούν μια κατηγορία τέτοιων υλικών: επιδεικνύουν εξαιρετική θερμική σταθερότητα σε οξειδωτικά περιβάλλοντα για θερμοκρασίες έως και $1200^\circ C$ [4]. Οι ακραίες θερμομηχανικές φορτίσεις, τις οποίες υφίστανται αυτά τα υλικά, σε συνδυασμό με το εξαιρετικά υψηλό κόστος τους επιβάλλουν τον μη καταστροφικό έλεγχο της ακεραιότητάς τους καθ’ όλη τη διάρκεια ζωής τους. Αυτό είναι απαραίτητο για την αξιόπιστη εκτίμηση της βλάβης που έχουν υποστεί για δεδομένο χρόνο φόρτισης καθώς και για την εκτίμηση της εναπομένουσας διάρκειας ζωής τους [5].

Μια τέτοια μέθοδος πρέπει να εξασφαλίζει το γρήγορο και αξιόπιστο χαρακτηρισμό του υλικού με τη δυνατότητα διακρίβωσης τοπικών διακυμάνσεων αυτών των ιδιοτήτων, πολλών δε μάλλον αν το υλικό είναι ανισότροπο. Σε αυτή την περίπτωση, όχι μόνο κάθε ιδιότητα είναι συνάρτηση της θέσης αλλά και η οποιαδήποτε φόρτιση μπορεί ενδεχομένως να αλλάξει τη συμμετρία του υλικού [6]. Η μέθοδος των υπερήχων [7] μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα στην περίπτωση των προηγμένων σύνθετων υλικών, πληρώνοντας όλες τις παραπάνω προδιαγραφές.

Από μια σημειακή πηγή ενός ισότροπου μέσου απείρων διαστάσεων εκπέμπονται τρία σφαιρικά κύματα [8]. Τα κύματα αυτά αποτελούνται από ένα ισότροπο και δύο διατμητικά που ταυτίζονται. Η διάδοση του κύματος είναι συνάρτηση των ελαστικών ιδιοτήτων του υλικού και ανεξάρτητη από τη διεύθυνση της διάδοσης. Αντίθετα, σε ανισότροπα μέσα, οι ταχύτητες διάδοσης κάθε κυματικής συνιστώσας εξαρτώνται εξ ορισμού από τη διεύθυνση διάδοσης: ο βαθμός ανισοτροπίας επηρεάζει άμεσα τη διάδοση και τα δύο διατμητικά κύματα δεν ταυτίζονται. Αν είναι γνωστός ο τρόπος διάδοσης των τριών κυμάτων στο υλικό, είναι προφανές ότι το πρόβλημα του υπολογισμού των ελαστικών ιδιοτήτων του υλικού έγκειται στην επίλυση των εξισώσεων που διέπουν τη συμμετρία του υλικού αυτού.

Σε αυτή τη μελέτη παρουσιάζεται ο υπολογισμός των ελαστικών ιδιοτήτων ορθότροπου σύνθετου αλουμίνας / αλουμίνας με τη χρήση υπερήχων [9]. Οι υπολογισθείσες τιμές συγκρίνονται με τιμές που προέκυψαν από καταστροφικό έλεγχο του υλικού.

II. Θεωρητικό Υπόβαθρο

A. Ορθότροπα Υλικά

Η γενικευμένη συνάρτηση τάσης - παραμόρφωσης ορθότροπου υλικού γράφεται ως:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

και, αντίστοιχα, η σχέση παραμόρφωσης -τάσης

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

όπου $[S]$ είναι το μητρώο ενδοτικότητας. Τα μητρώα δυσκαμψίας και ενδοτικότητας είναι αμοιβαία αντίστροφα. Για ορθότροπο υλικό, η σχέση των στοιχείων των μητρώων είναι:

$$\begin{aligned} S_{11} &= \frac{C_{22}C_{33} - C_{23}^2}{C}, & S_{22} &= \frac{C_{33}C_{11} - C_{13}^2}{C}, & S_{33} &= \frac{C_{11}C_{22} - C_{12}^2}{C}, \\ S_{12} &= \frac{C_{13}C_{23} - C_{12}C_{33}}{C}, & S_{13} &= \frac{C_{12}C_{23} - C_{13}C_{22}}{C}, & S_{23} &= \frac{C_{12}C_{13} - C_{23}C_{11}}{C}, \\ S_{44} &= \frac{1}{C_{44}}, & S_{55} &= \frac{1}{C_{55}}, & S_{66} &= \frac{1}{C_{66}} \end{aligned} \quad (3)$$

όπου

$$C = C_{11}C_{22}C_{33} - C_{11}C_{23}^2 - C_{22}C_{13}^2 - C_{22}C_{12}^2 + 2C_{12}C_{23}C_{13}$$

Για ορθότροπο υλικό, η σχέση των στοιχείων του μητρώου ενδοτικότητας S_{ij} , ως συνάρτηση των ελαστικών σταθερών, είναι:

$$[S_{ij}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

όπου

$$\frac{\nu_{ij}}{E_i} = \frac{\nu_{ji}}{E_j} \quad i,j=1,2,3 \quad (5)$$

B. Κυματική Διάδοση σε Πολύστρωτες Πλάκες

Ο ταυστής της κυματικής διάδοσης για ανισότροπο υλικό περιγράφεται από την εξίσωση του Christoffel [10]:

$$\Gamma_{ij} = C_{ijkl} n_k n_l \quad (6)$$

όπου C_{ijkl} είναι τα στοιχεία του μητρώου δυσκαμψίας και n_k ($k=1,2,3$) είναι οι συνιστώσες του διανύσματος διεύθυνσης \hat{n} .

Οι φασικές ταχύτητες των τριών κυμάτων, που διαδίδονται για δεδομένη διεύθυνση \hat{n} , δίνονται από τις ιδιοτιμές του ταυστή διάδοσης Γ_{ij} , σύμφωνα με την εξίσωση

$$\det(\Gamma_{ij} - \rho V^2 \delta_{ij}) = 0 \quad (7)$$

όπου οι διευθύνσεις πόλωσης αποτελούν τα αντίστοιχα ιδιοδιανύσματα.

Για ορθότροπο υλικό, τα στοιχεία του τανυστή διάδοσης Γ_{ij} έχουν τη μορφή:

$$\begin{aligned} \Gamma_{11} &= C_{11}n_1^2 + C_{66}n_2^2 + C_{55}n_3^2, & \Gamma_{22} &= C_{66}n_1^2 + C_{22}n_2^2 + C_{44}n_3^2, \\ \Gamma_{33} &= C_{55}n_1^2 + C_{44}n_2^2 + C_{33}n_3^2, & \Gamma_{23} &= (C_{23} + C_{44})n_2n_3, \\ \Gamma_{13} &= (C_{13} + C_{55})n_1n_3, & \Gamma_{12} &= (C_{12} + C_{66})n_1n_2 \end{aligned} \quad (8)$$

Γ. Το Αντίστροφο Πρόβλημα

Τα στοιχεία του μητρώου δυσκαμψίας προσδιορίζονται με τα ακόλουθα διαδοχικά βήματα. Το στοιχείο C_{33} υπολογίζεται άμεσα από την ταχύτητα, που μετριέται σε κάθετη πρόσπτωση (δηλ. $\theta = 0^\circ$)

$$C_{33} = \rho_b V^2 \quad (9)$$

όπου ρ_b είναι η πυκνότητα σε kg/m^3 .

Τα στοιχεία δυσκαμψίας C_{22} , C_{23} και C_{44} υπολογίζονται από τις μετρήσεις ταχύτητας που καταγράφονται στο επίπεδο $\psi = 90^\circ$ με ελαχιστοποίηση της παρακάτω συνάρτησης:

$$F(C_{ij}) = \sum_{p=1}^N \{f_p(\lambda_p(n), C_{ij})\}^2 \quad (10)$$

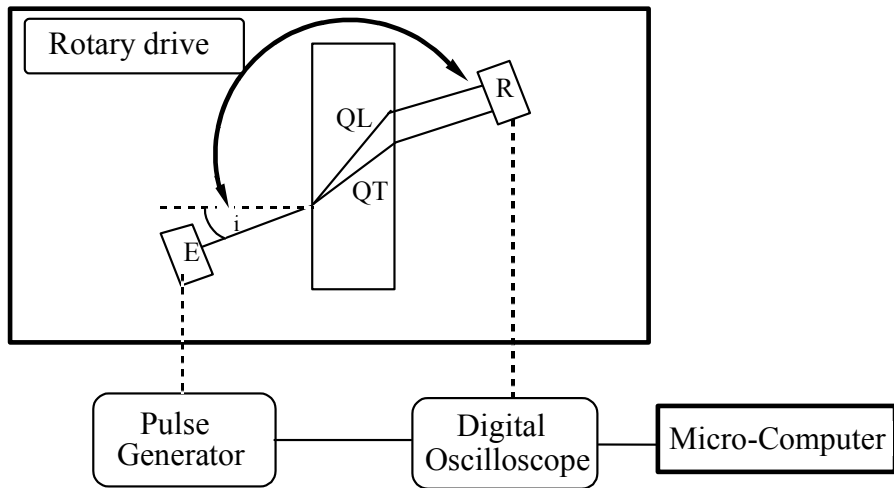
$$f_p^{(32)}(\lambda_p(n), C_{ij}) = \lambda_p^2 - \lambda_p(\Gamma_{33} + \Gamma_{22}) + \Gamma_{11}\Gamma_{22} - \Gamma_{32}^2 \quad (11)$$

όπου $p = 1$ ως N , N ο αριθμός των μετρήσεων και $\lambda_p = \rho V p^2$.

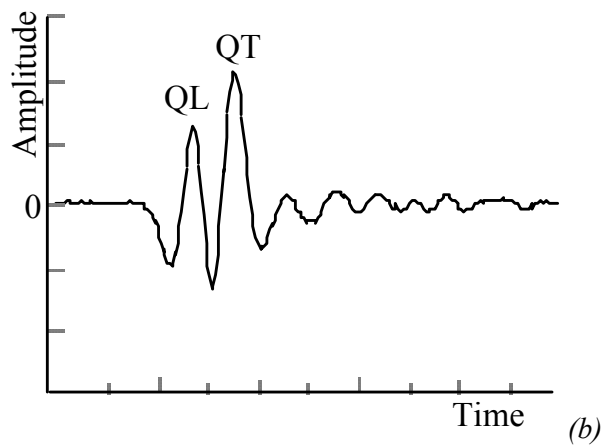
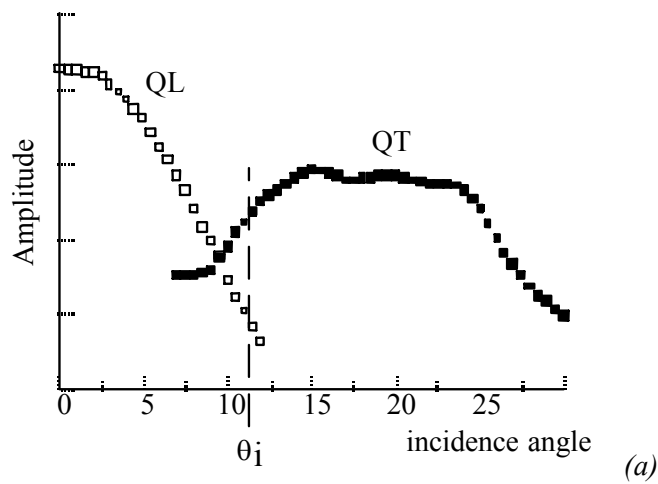
Τα στοιχεία δυσκαμψίας C_{11} , C_{31} , C_{55} υπολογίζονται από τις μετρήσεις ταχύτητας, που καταγράφονται στο επίπεδο $\psi = 0^\circ$, με ελαχιστοποίηση της συνάρτησης (10) με:

$$f_p^{(13)}(\lambda_p(n), C_{ij}) = \lambda_p^2 - \lambda_p(\Gamma_{11} + \Gamma_{33}) + \Gamma_{11}\Gamma_{33} - \Gamma_{13}^2 \quad (12)$$

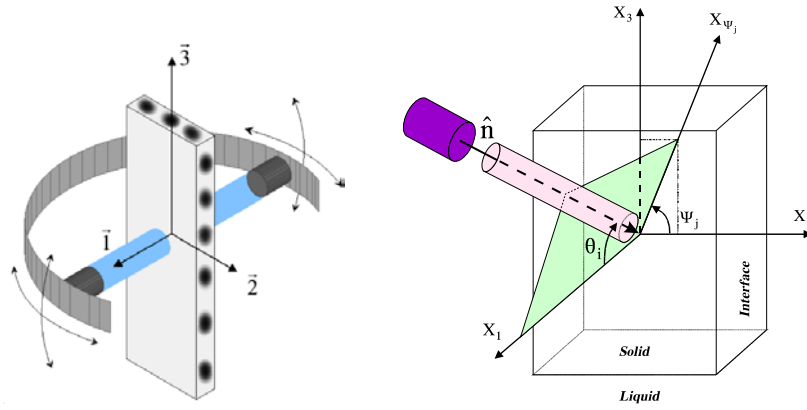
Τα δύο τελευταία στοιχεία του μητρώου C_{12} and C_{66} υπολογίζονται από τις μετρήσεις ταχύτητας, που καταγράφονται στο μη κύριο επίπεδο $\psi = 45^\circ$, και τα εφτά στοιχεία που έχουν ήδη υπολογιστεί. Ο αριθμός των διαδιδόμενων κυμάτων που μπορεί να προσδιοριστεί πειραματικά σε αυτό το επίπεδο διαφέρει για διαφορετικά επίπεδα συμμετρίας του υλικού και μπορεί να επηρεάσει την ακρίβεια της διαδικασίας προσδιορισμού.



Σχήμα 1: Σχηματική διάταξη πομπού δέκτη [9].



Σχήμα 2: Q_L & Q_T κύματα (a) πλάτος για γωνία πρόσπτωσης θ_i , (b) τυπικό σήμα [9].



Σχήμα 3: Ορισμός επιπέδων σάρωσης σε σχέση με τους κύριους άξονες του υλικού.

III. Πειραματικό Μέρος

A. Υλικά

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε είναι σύνθετο Al_2O_3/Al_2O_3 (mullite-based matrix composite reinforced by oxide-based Nextel™ 720 fibres), συμμετρικό $0^\circ/90^\circ$ και κατασκευάστηκε με τη μέθοδο PIP (polymer infiltration process) [11]. Οι ιδιότητες του υλικού είναι βελτιωμένες χάρη στην εφαρμογή ειδικού επιστρώματος στη διεπιφάνεια με την τεχνική sol-gel.

Η περιεκτικότητα ιών κατ' όγκο ήταν 41%. Τα δοκίμια κόπηκαν με διαμαντοτροχό από πλάκα σύνθετου υλικού $150 \times 150 \text{ mm}^2$.

B. Μέτρηση Φασικών Ταχυτήτων

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1, το δοκίμιο εμβαπτίζεται σε δεξαμενή υγρού, για να επιτευχθεί η ακουστική σύζευξη (απεσταγμένο νερό) ανάμεσα σε έναν πομπό (E) και ένα δέκτη (R), συνδεδεμένους σε κοινό άξονα με δύο περιστροφικούς βαθμούς ελευθερίας. Επιλέχθηκε συχνότητα 5MHz για αντιπροσωπευτική δειγματοληψία ομογενούς μέσου $\theta_i = 0$ και διακριτότητα μεταξύ των Q_L και Q_T , με τη μεταβολή της γωνίας πρόσπτωσης θ_i (Σχήμα 2).

Ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης, ο παλμός που εκπέμπεται από τον E διαθλάται σε ένα δύο ή τρία κύματα (ένα ψευδοδιαμήκες Q_L και ένα ή δύο ψευδοεγκάρσια Q_{T1} & Q_{T2}), που διαδίδονται στο στερεό με διαφορετικές ταχύτητες και πολώσεις. Ο δέκτης R καταγράφει ένα, δύο ή τρία κύματα με σχετική χρονοκαθυστέρηση. Η διαφορά στο χρόνο διάδοσης μετριέται για κάθε κύμα σε σχέση με το χρόνο διάδοσης στο μέσο σύζευξης χωρίς την παρεμβολή του δοκιμίου. Για κάθε επίπεδο και γωνία πρόσπτωσης θ_i , η καθυστέρηση Δt για τα κύματα Q_L και Q_T καθορίζεται σε σχέση με το σήμα αναφοράς, δηλαδή το χρόνο με και χωρίς το δοκίμιο. Η καθυστέρηση Δt μετριέται με τη χρήση μετασχηματισμού Hilbert για καλύτερη διακριτότητα [12]. Η διαδικασία αφορά στη μέτρηση της χρονοκαθυστέρησης του ψευδοδιαμήκους κύματος Q_L και του ενός ή και των δύο ψευδοεγκάρσιων Q_{T1} & Q_{T2} , με την προϋπόθεση ότι είναι επαρκώς διακριτά (Σχήμα 2).

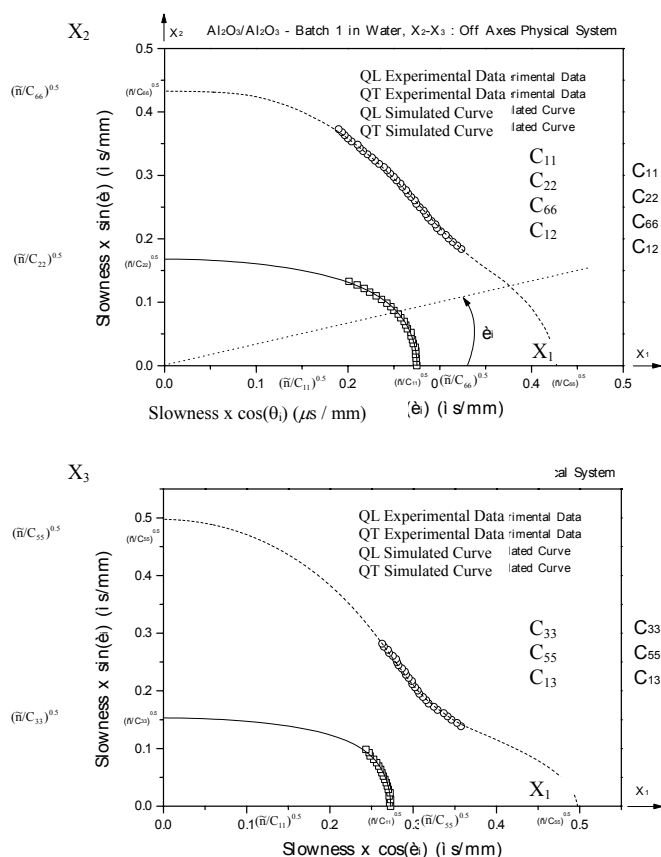
Για κάθε Δt , η αντίστοιχη ταχύτητα διάδοσης ορίζεται ως:

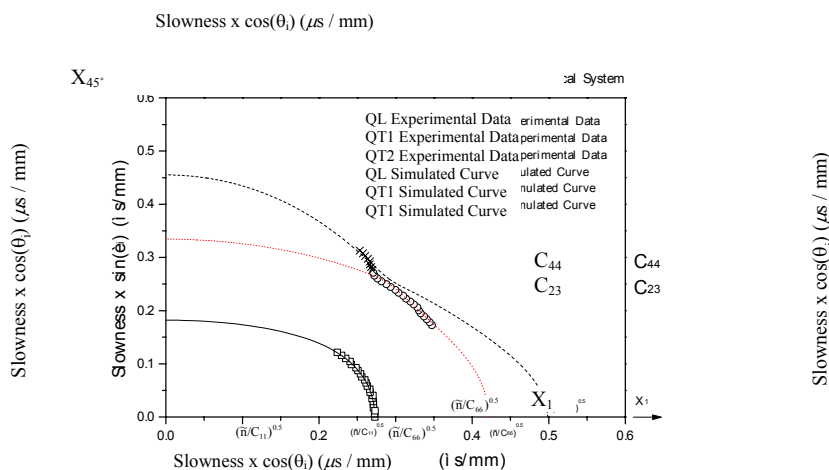
$$V = \frac{V_0}{\sqrt{1 + \frac{V_0 \Delta t}{h} \left(\frac{V_0 \Delta t}{h} - 2 \cos \theta_i \right)}} \quad (13)$$

όπου V είναι η ταχύτητα διάδοσης στο υλικό (m/s), V_0 είναι η ταχύτητα διάδοσης στο υγρό σύζευξης, (m/s); h είναι το πάχος του δοκιμίου, (m), δt είναι η καθυστέρηση (s) και θ_i είναι η γωνία πρόσπτωσης (μοίρες).

Γ. Δοκιμές Εφελκυσμού

Για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων του υλικού, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές εφελκυσμού σε δοκίμια 60x10 mm², σύμφωνα με το πρότυπο CEN ENV 658-1. Τα δοκίμια φορτίστηκαν με σταθερό ρυθμό μετατόπισης μέχρι την τελική θραύση τους, με ταυτόχρονη καταγραφή του φορτίου, της μετατόπισης, της διαμήκουσ και της εγκάρσιας παραμόρφωσης, και υπολογίστηκαν οι ιδιότητες του υλικού (μέτρο ελαστικότητας, αντοχή σε εφελκυσμό και λόγος Poisson). Πριν τις δοκιμές, τα δοκίμια ελέγχθηκαν για τυχόν ελαττώματα με C-Scan (Physical Acoustic Corporation [PAC] Ultrasonic system). Η παραμόρφωση μετρήθηκε με ροζέτες strain gauge (KYOWA) που επικολλήθηκαν στο δοκίμιο με το κατάλληλο συγκολλητικό. Χρησιμοποιήθηκαν tabs ινών γυαλιού/εποξεικής ρητίνης που επικολλήθηκαν στα δοκίμια με σύστημα εποξεικής ρητίνης (BFD technicoll 8260 thermoset epoxy resin system). Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε υδραυλική μηχανή MTS Universal Testing Machine με υδραυλικές αρπάγες, με έλεγχο μετατόπισης, σε κανονικές συνθήκες (25° C & 70% σχετική υγρασία).





Σχήμα 4: Πολικά διαγράμματα καμπυλών Βραδύτητας (Slowness curves): πειραματικά σημεία και θεωρητικές καμπύλες.

IV. Αποτελέσματα

A. Μη Καταστροφικός Έλεγχος

Τα ορθότροπα υλικά καθώς και τα υλικά υψηλότερου βαθμού συμμετρίας (π.χ. εγκάρσιως ισότροπα ή ισότροπα) χαρακτηρίζονται πλήρως με τη μέθοδο των υπερήχων. Τα ορθότροπα υλικά έχουν τρεις ορθογώνιους άξονες συμμετρίας, που ορίζονται ως οι κύριοι άξονες του υλικού. Όμως, για τη διάδοση και των τριών κυμάτων απαιτείται η διέγερση του υλικού σε κάποιο επίπεδο, που δεν αποτελεί επίπεδο συμμετρίας. Για τον πλήρη προσδιορισμό των ιδιοτήτων η σάρωση έγινε σε τρία επίπεδα.

Στο Σχήμα 3 ορίζονται τα επίπεδα σάρωσης, δύο από τα οποία είναι κύρια επίπεδα. Το τρίτο επίπεδο ορίζεται από τους άξονες $X_1 X_{ij}$ όπου $\psi=45^\circ$.

Στα Σχήματα 4 και 5 παρουσιάζονται τα πολικά διαγράμματα βραδύτητας και η βραδύτητα ως προς τη γωνία πρόσπτωσης. Οι πειραματικές τιμές παρουσιάζονται ως σημεία και οι συνεχείς γραμμές αποτελούν τις θεωρητικά υπολογιζόμενες καμπύλες, με βάση το προκύπτον μητρώο δυσκαμψίας (Πίνακας 4.1). Τα στοιχεία του μητρώου C_{ij} εισάγονται στην εξ. (7) και η φασική ταχύτητα $V^{computed}$ για κάθε διεύθυνση διάδοσης n υπολογίζεται ως η ιδιοτιμή του τανυστή διάδοσης Γ_{ij} , μέσω της εξίσωσης:

$$V_p^{computed} = (\lambda_p / \rho_b)^{1/2} \quad (14)$$

όπου λ_p είναι οι υπολογιζόμενες ιδιοτιμές. Ο αντίστροφος υπολογισμός των φασικών ταχυτήτων μπορεί να γίνει για όλο το φάσμα των γωνιών $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ και για κάθε επίπεδο σάρωσης ($\psi = 0^\circ, 90^\circ$ και 45°). Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες μηχανικές σταθερές. Η απόκλιση (Πίνακας 4.2) υπολογίζεται από τα πειραματικά δεδομένα των ταχυτήτων και τις θεωρητικά υπολογιζόμενες ταχύτητες από το μητρώο δυσκαμψίας ως:

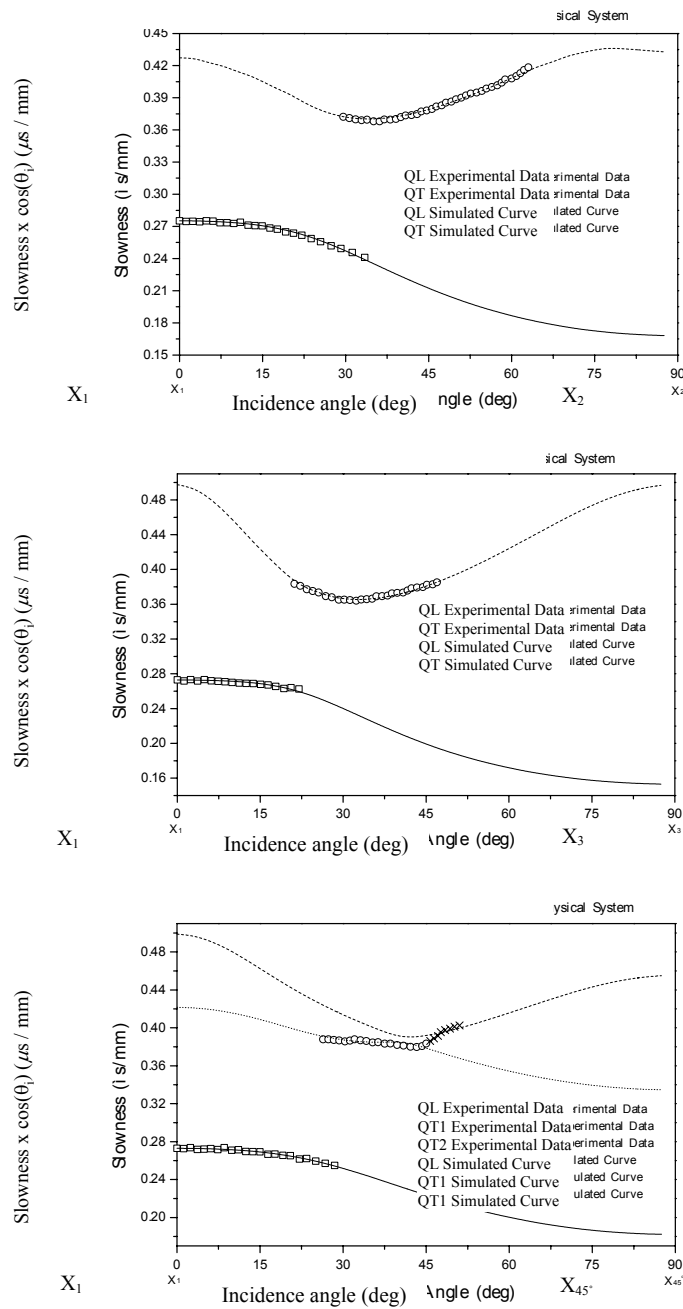
$$\sigma(C_{ij}, V_p) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{p=1}^N \left(\frac{V^{computed} - V^{exp}}{V^{computed}} \right)^2} \text{ in \%} \quad (15)$$

όπου $V^{computed} = (\lambda_p / \rho_b)^{1/2}$ και V^{exp} οι πειραματικές τιμές.

Το διάστημα εμπιστοσύνης $I(C_{ij})$, για κάθε στοιχείο του μητρώου, προσδιορίζεται στατιστικά από την εξ. (15) η τετραγωνική ρίζα του μέσου των τετραγώνων των σφαλμάτων για κανονική κατανομή σε επίπεδο εμπιστοσύνης 90%.

B. Έλεγχος C-Scan

Τα C-Scans των δοκιμίων, που υποβλήθηκαν σε εφελκυσμό, παρουσιάζονται στο Σχήμα 6. Υπάρχουν περιοχές με εμφανείς βλάβες κάθετα στο μήκος των δοκιμίων, που αποδίδονται σε αρχικά ελαττώματα τα οποία έγιναν εμφανέστερα κατά την κοπή. Αν και τα ελαττώματα μπορούν να θεωρηθούν υπεύθυνα για την πρόωρη αστοχία δοκιμίων, δεν αναμένεται να επηρεάζουν σημαντικά τις ελαστικές ιδιότητες του υλικού που προσδιορίζονται από τις δοκιμές εφελκυσμού.

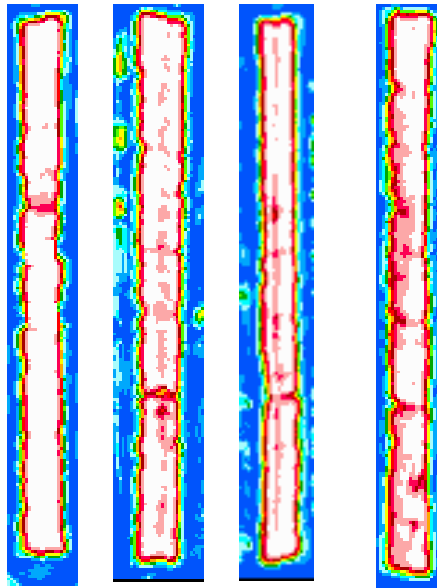


Σχήμα 5: Βραδύτητα (Slowness) ως προς γωνία πρόσπτωσης: πειραματικά σημεία και θεωρητικές καμπύλες.

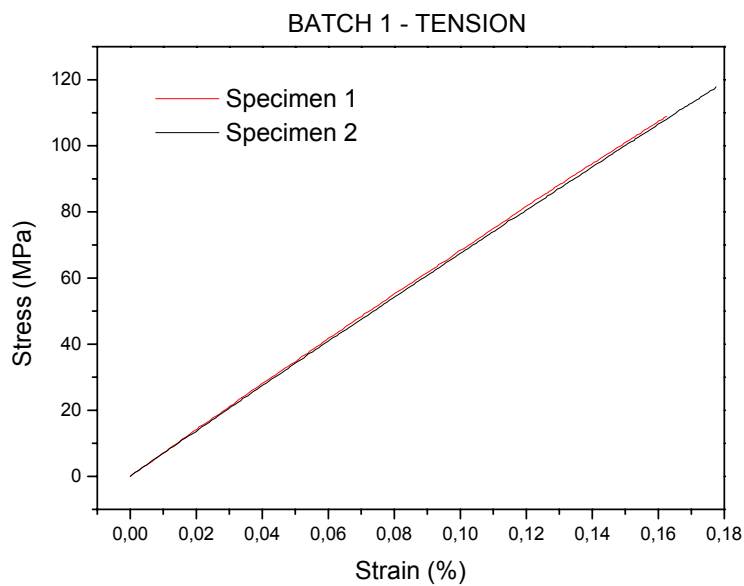
Γ. Δοκιμές εφελκυσμού

Χαρακτηριστικές καμπύλες τάσης / παραμόρφωσης παρουσιάζονται στο Σχήμα 7 και οι αντίστοιχες μηχανικές ιδιότητες στον Πίνακα 3.

Το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson υπολογίζονται με ακρίβεια περίπου 1% και 2%, αντίστοιχα. Οι τιμές του λόγου Poisson αντιστοιχούν στον συν-επίπεδο λόγο Poisson, που αντιστοιχεί στον ν_{23} στο σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιήθηκε για τον μη καταστροφικό έλεγχο.



Σχήμα 6: Έλεγχος C scan των δοκιμίων.



Σχήμα 7: Καμπύλες τάσης / παραμόρφωσης σε εφελκυσμό (δύο δοκίμια).

V. Σχολιασμός και συμπεράσματα

Το μητρώο δυσκαμψίας των σύνθετων αλουμίνας / αλουμίνας υπολογίστηκε επιτυχώς με τη μη καταστροφική μέθοδο των υπερήχων. Η μέθοδος έδωσε αξιόπιστα αποτελέσματα για τις πέντε από τις εννέα ελαστικές σταθερές του μητρώου δυσκαμψίας, με την υπόθεση ότι το υλικό είναι ορθότροπο. Η ακρίβεια της μεθόδου περιορίζεται από τον ακριβή προσδιορισμό των φασικών ταχυτήτων στο υλικό, που εξαρτάται από το πλάτος αλλά και από το διαχωρισμό των κυμάτων που διαδίδονται.

Λόγω της διαστρωμάτωσης του υλικού ($0^\circ/90^\circ$ συμμετρικό) δεν αναμενόταν να διαφέρουν τα μέτρα ελαστικότητας E_{22} και E_{33} . Η υπολογιζόμενη διαφορά (62.42 GPa Vs. 71.23 GPa) (Πίνακας 2) αποδίδεται στη στατιστική φύση της μεθόδου. Όπως ήταν αναμενόμενο και λόγω του ελέγχου C-scan, υπάρχει διακύμανση των ιδιοτήτων στον όγκο του υλικού. Η διακύμανση των ιδιοτήτων είναι σημαντική όσο είναι συγκρίσιμη με τον όγκο ελέγχου της μεθόδου των υπερήχων. Οι τοπικές διακυμάνσεις των ιδιοτήτων είναι υπολογίσιμες μέσω πολλαπλών σαρώσεων με τη μέθοδο των υπερήχων, όπου είναι δυνατή η παρουσίαση της κατανομής των ιδιοτήτων αλλά και ο προσδιορισμός της μέσης τιμής τους.

Οι μετρήσεις των μηχανικών σταθερών που προκύπτουν από τη μέθοδο των υπερήχων είναι πολύ ακριβείς στην περίπτωση του μέτρου ελαστικότητας (πειραματική τιμή 65.6 GPa και μέση υπολογιζόμενη τιμή 67 GPa): όπως αναμενόταν, η πειραματική τιμή του μέτρου ελαστικότητας είναι πιο κοντά στο μέσο όρο των υπολογιζόμενων τιμών, εφόσον αφορά σε μια μακροσκοπική ιδιότητα του υλικού.

Όμως, στην περίπτωση του λόγου Poisson, η διαφορά είναι σημαντική (πειραματική τιμή $\nu_{23} = 0.045$ και μέση υπολογιζόμενη τιμή $\nu_{23} = 0.452$). Η διαφορά αποδίδεται μερικώς σε γεωμετρικούς παράγοντες, λόγω της πεπερασμένης διάστασης του δοκιμίου εφελκυσμού που πάντα οδηγεί σε χαμηλότερη εκτίμηση του λόγου. Οι διαφορές αυτές τονίζουν την ανάγκη για τη χρήση μη καταστροφικών μεθόδων προσδιορισμού των ιδιοτήτων, όπως οι υπέρηχοι που δεν υπόκεινται στους γεωμετρικούς περιορισμούς συμβατικών μεθόδων.

Τέλος, παρατηρείται ότι η τεχνική των υπερήχων είναι αρκετά ευαίσθητη στο να προσδιορίζει διαφορές των ιδιοτήτων σε κύριες διευθύνσεις, που για τη δεδομένη γεωμετρία δεν είναι αναμενόμενες. Επιπλέον, η ακρίβεια της μεθόδου δείχνει ότι είναι δυνατός ο υπολογισμός της υποβάθμισης των ιδιοτήτων του υλικού καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του.

	Σταθερά (GPa)	Διάστημα Εμ/νης(90%)	Σφάλμα (%)	Ποιότητα μέτρησης
C_{11}	= 33.28	± 0.13		Υψηλή
C_{22}	= 85.88	± 1.15	0.33	Υψηλή
C_{12}	= 12.14	± 0.19		Υψηλή
C_{66}	= 13.95	± 0.11		Υψηλή
C_{33}	= 100.83	± 3.85		Χαμηλή
C_{13}	= 16.21	± 0.64	0.29	Υψηλή
C_{55}	= 9.97	± 0.47		Χαμηλή
C_{23}	= 47.95	± 2.25		Χαμηλή
C_{44}	= 14.93	± 3.58	0.46	Χαμηλή

Πίνακας 1: Μητρώο δυσκαμψίας του σύνθετου Al_2O_3/Al_2O_3 .

Μηχανική	Σταθερά	Μονάδα	Υλικό	Al ₂ O ₃ /Al ₂ O ₃	
E ₁	= 30.36	GPa	Συχνότητα (MHz)	5	
E ₂	= 62.42	GPa	Πάχος (mm)	2.56	
E ₃	= 71.23	GPa	Ποκνότητα (kg/m³)	2480	
G ₁₂	= 1.40	GPa	Water T (°C)	23	
G ₁₃	= 9.97	GPa	Σύστημα	Principle	
G ₂₃	= 14.93	GPa	Συντεταγμένων		
ν ₁₂	= 0.07	-	θ_{critical}(deg)		
ν ₁₃	= 0.127	-	X₁-X₂	X₁-X₃	X₁-X₄₅
ν ₂₃	= 0.452	-	29.3	20.2	25.9

Πίνακας 2: Μηχανικές Σταθερές και πειραματικές παράμετροι.

Ιδιότητα	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση
Μέτρο ελαστικότητας, E (GPa)	65.6	0.686
Λόγος Poisson, ν	0.045	0.001
Αντοχή, σ_{ult} (MPa)	113.4	6.3
Παραμόρφωση αστοχίας (%)	0.17	0.01

Πίνακας 3: Χαρακτηρισμός σε εφελκυσμό του σύνθετου Al₂O₃/Al₂O₃.

Αναφορές

1. G. Evans and F. W. Cox, "The physics and mechanics of fibre reinforced brittle matrix composites", *J. Mater. Sci.*, **29** (1994), pp. 3857-3896.
2. R. Naslain, "Fibre-matrix interfaces and interphases in ceramic matrix composites processed by CVI", *Composite Interfaces*, **1** (1993), pp. 253-286.
3. D. Anson, W. J. Sheppard and W. P. Parks, "Impact of ceramic components in gas turbines for industrial cogeneration", ASME Paper 92-GT-393 International Gas Turbine & Aeroengine Congress & Exhibition, Cologne, Germany, June 1992.
4. S. M. Johnson, Y. Blum, C. Kanazawa, H.-J. Wu, J. R. Porter, P.E.D. Morgan, D. B. Marshall and D. Wilson, "Processing and properties of an Oxide/Oxide Composite", *Key Engineering Materials*, **127**, (1997), pp. 231-238.
5. P. F. Norton, G. A. Frey, H. Bagheri, A. Flerstein, C. Twardochleb, O. Jimenez and A. Saith, "Ceramic gas turbine development project – design and life assessment of ceramic components", ASME Paper 95-GT-383, International Gas Turbine & Aeroengine Congress & Exhibition, Houston, Texas, June 1995.
6. S. Baste and B. Audoin, "On internal variables in anisotropic damage", *Eur. J. Mech., A/Solids*, **10**, (1991), pp. 587-606.
7. C. Aristegui and S. Baste, "Optimal recovery of the elasticity tensor of general anisotropic materials from ultrasonic velocity data", *J. Acoust. Soc. Am.* **101** (1996), pp. 813-833.
8. A. H. Nayfeh, "Wave propagation in layered anisotropic media", Elsevier, Amsterdam, 1995.
9. CEN WI114: Determination of elastic properties by an ultrasonic technique, *European Technical Committee*, **184**, 2000.
10. B. A. Auld, "Acoustic Fields and Waves in Solids", Wiley-InterScience, New York, 1973.

11. W. Schafer, W. D. Vogel, T. Haug and M. Frieß, "*Fibre reinforced ceramics derived from composites*", *High temperatures – High Pressures*, **27/28** (1995/1996), pp. 321-324.
12. B. Audoin and B. Castagnede, "*A innovative application of the Hilbert transform to time delay estimation of overlapped ultrasonic echos*", *Ultrasonics*, **34** (1996), pp. 25-33.

Τα ναυτικά υλικά του μέλλοντος

N. E. Μελανίτης

Περίληψη

Ποια θα είναι τα υλικά του (άμεσου) μέλλοντος, στα οποία θα στηριχτεί η ναυτική επιστήμη και τεχνολογία; Πώς προσεγγίζουν το ερώτημα αυτό οι επιτελείς της σύγχρονης Ναυτικής Αμυνας; Μία σύνοψη των σύγχρονων τάσεων και προβλέψεων που θεωρούν ως θεμελιώδη την μικρο- και νανο-μηχανική προσέγγιση της επιστήμης και τεχνολογίας των υλικών. Η προοπτική-διερεύνηση ξεκινά από το επίπεδο του υπολογιστικού σχεδιασμού των νέων υλικών και αναδεικνύει το ρόλο της προσομοίωσης. Εστιάζει στο ρόλο της σύνθεσης (διεργασίες παραγωγής) και παραθέτει μία σειρά από εφαρμογές των υλικών του μέλλοντος στο πλοίο με τα έξυπνα υλικά και τους αισθητήρες, τα δομικά υλικά κανονικών και υψηλών θερμοκρασιών, τα υλικά μηχανών πρόωσης, τα υλικά θαλάσσιου περιβάλλοντος, τους υπεραγωγούς και ημιαγωγούς να βρίσκονται στην πρώτη γραμμή του ενδιαφέροντος. Τέλος, τίθενται προς διερεύνηση μία σειρά ζητημάτων που αφορούν το πολεμικό πλοίο (κόστος συντήρησης, επέκταση διάρκειας ζωής, ασφάλεια επιβαινόντων, ανιχνευσιμότητα σκάφους και ασφάλεια επικοινωνιών), καθώς και τον τρόπο με τον οποίο τα νέα υλικά θα τα επηρεάσουν.

Abstract

Which developments in materials will be the drivers of the future naval science and technology? How this question is approached by the Naval Defence experts? A review of the current trends and forecasts considers as fundamental driver of the naval technology the micro and nano approach in materials design and development. Foresight studies conducted have highlighted the importance of computational mechanics and simulation in synthesis, design and production of materials. Smart materials and structures, sensors and functional components in marine engines and naval platforms, superconductors and semiconductors are placed the frontline of the future ship design. Maintenance and life cycle management, personnel safety and ship traceability, communication security and reliability and the way the new materials will affect them are some of the features of the reviewed analysis.

I. Εισαγωγή

Η Επιστήμη και η Τεχνολογία των Υλικών καλύπτει μία πολυτομεακή επιστημονική περιοχή και αποτελεί μία από τις 9 κατευθύνσεις αιχμής για τη Ναυτική Άμυνα του μέλλοντος. Υστερα από μία 10ετή μελέτη διερεύνησης των τεχνολογικών προοπτικών για το Αμερικανικό Ναυτικό ως το 2035, το Εθνικό Συμβούλιο Έρευνας κατέληξε σε μία ολοκληρωμένη στρατηγική ανάπτυξης που συνοψίζεται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1 Οι κινητήριες Τεχνολογίες για τη Σύγχρονη Ναυτική Άμυνα. Από τη μελέτη του Αμερικανικού Εθνικού Συμβουλίου Έρευνας για το Αμερικανικό Πολεμικό Ναυτικό [1].

Ειδικότερα για την Επιστήμη των Υλικών, η μελέτη εκτιμά πως οποιαδήποτε ανάπτυξη και καινοτομία στο άμεσο μέλλον θα πρέπει να προσεγγίζει τις μηχανικές και φυσικές ιδιότητες των υλικών σε ατομική και μοριακή κλίμακα (κατανόηση της μικρο- και νανο-δομής), και να σχεδιάζει νέα υλικά με υπολογιστικές μεθόδους. Μόνο έτσι θα μπορέσουν να υπάρξουν επιπλέον βελτιώσεις στα συμβατικά και τα προηγμένα ναυτικά υλικά, όπως σιδηρούχα κράματα, σύνθετα υλικά με μήτρα τιτανίου, πολυμερικά σύνθετα, κεραμικά υψηλών θερμοκρασιών, ημιαγωγούς ευρείας κενής ζώνης, οπτικά υλικά και επικαλύψεις, και έξυπνα υλικά (φερροηλεκτρικά, φερρομαγνητικά και φερροελαστικά). Η ανάπτυξη υλικών με προηγμένες δυνατότητες θα επιτρέψει την περαιτέρω εξέλιξη ηλεκτρομηχανικών συστημάτων και αισθητήρων αλλά και των συστημάτων που βασίζονται σε ολοκληρωμένα κυκλώματα. Η ανωτέρω προσέγγιση (κατανόηση μικροδομής και υπολογιστικός σχεδιασμός), συνδυαζόμενη με νέες τεχνικές σύνθεσης υλικών (επιμεταλλώσεις με ιόντα υψηλής ενέργειας, χημική εναπόθεση ατμών, κ.λπ.), θα επιτρέψει την ανάπτυξη υλικών με μικρότερη πυκνότητα ατελειών και, κατά συνέπεια, βελτιωμένες ιδιότητες.

II. Τεχνολογικές τάσεις στην ανάπτυξη νέων υλικών

Ο υπολογιστικός σχεδιασμός νέων υλικών, βασισμένος στην κατανόηση της μικροδομής των υλικών και η σύνθεση νέων υλικών προϋποθέτει την προσομοίωση δομών και διεργασιών. Η προσομοίωση αποτελεί την οικονομικά αποδοτικότερη διαδικασία, καθώς βασίζεται σε μοντέλα δομής και λειτουργίας τα οποία επιβεβαιώνονται υπολογιστικά στον υπολογιστή πριν την εφαρμογή τους σε εργαστηριακό και βιομηχανικό επίπεδο, μειώνοντας το κόστος ανάπτυξης.

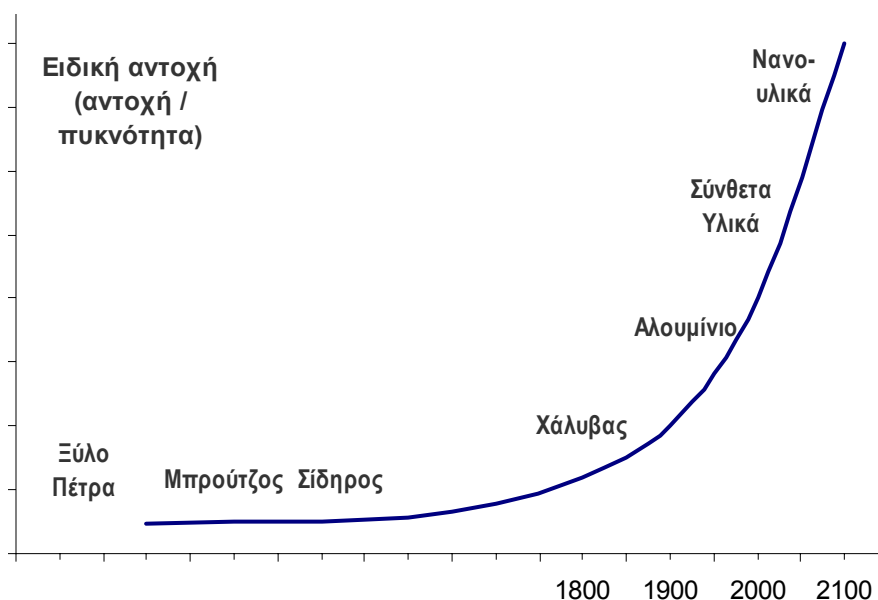
Με την προσομοίωση περιγράφονται η δομή και οι ιδιότητες των υλικών (π.χ. οι μικροδομές, οι ατέλειές τους, η πρόσφυση διαφορετικών φάσεων, οι θερμοδυναμικές, οι μηχανικές ιδιότητές τους), αλλά και οι διεργασίες παραγωγής τους σε μικροσκοπικό επίπεδο (όπως ανάπτυξη υμενίων, χημική εναπόθεση ατμών, επιταξική ανάπτυξη κ.λπ.) και σε μακροσκοπικό επίπεδο (π.χ. χύτευση, στερεοποίηση, μορφοποίηση κ.λπ.).

Ποια είναι τα υλικά του μέλλοντος και ποιες ναυτικές εφαρμογές αφορούν; Έξυπνα υλικά και αισθητήρες, δομικά υλικά κανονικών και υψηλών θερμοκρασιών, υλικά μηχανών πρόωσης, υλικά θαλάσσιου περιβάλλοντος, υπεραγωγοί και ημιαγωγοί βρίσκονται στην πρώτη γραμμή του ενδιαφέροντος.

Εξυπνα υλικά με ενσωματωμένους αισθητήρες και ενεργοποιητές θα αποτελέσουν την κύρια εξέλιξη σε εξαρτήματα, δομικά μέρη και συστήματα του πλοίου του μέλλοντος. Γνωστά και ως κράματα μνήμης σχήματος (memory shape alloys), τα υλικά αυτά έχουν την ικανότητα να υφίστανται μορφικές αλλαγές, όταν και όπως χρειάζεται, εφόσον λειτουργούν μέσα σε ένα ολοκληρωμένο ηλεκτρομηχανικό σύστημα.

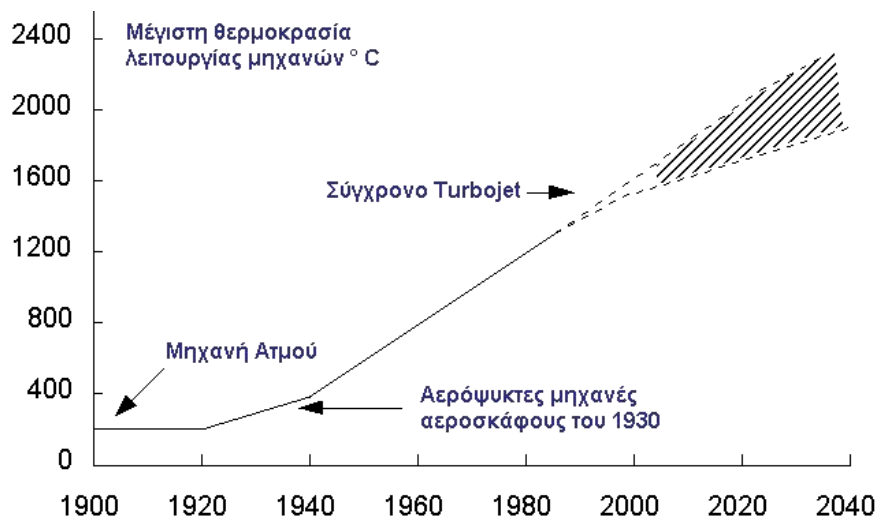
Το ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τα νανο-υλικά αναδεικνύεται υπό το πρίσμα της αναμενόμενης μετατροπής των πλοίων σε ολοκληρωμένα συστήματα ενεργειακής ισχύος και πρόωσης. Τα μαγνητικά νανο-υλικά θα συνδράμουν εντυπωσιακά στις δυνατότητες αποθήκευσης ενέργειας.

Η αντοχή και η δυσκαμψία των δομικών υλικών (που βρίσκουν εφαρμογή στις πλωτές κατασκευές αλλά και στα εξαρτήματα μηχανών) αποτελούν ιδιότητες προτεραιότητας για το πλοίο του μέλλοντος. Αξιοσημείωτη είναι η εξέλιξη της ειδικής αντοχής (λόγος αντοχής - πυκνότητας) των δομικών υλικών με το πέρασμα των χρόνων και οι προβλέψεις για το άμεσο μέλλον (Σχήμα 2).



Σχήμα 2: Εξέλιξη της ειδικής Αντοχής δομικών υλικών στο πέρασμα των αιώνων [2].

Μεταλλικές και κεραμικές επικαλύψεις επιφανειών χρησιμοποιούνται ήδη σήμερα για τη βελτίωση της επίδοσης και επέκτασης της διάρκειας ζωής των πτερυγίων αεροστροβίλων. Η αποφυγή της διάβρωσης και της οξείδωσης σε υψηλές θερμοκρασίες (>2000° C) και η μείωση του υψηλού κόστους συντήρησης -καθώς οι αμυντικοί προϋπολογισμοί έχουν τάση πτωτική- αποκτούν ιδιαίτερη σημασία. Καρβίδια και νιτρίδια του πυριτίου, καρβίδια του βορίου και του τιτανίου, υμένια συνθετικού διαμαντιού, σύνθετα υλικά άνθρακα-άνθρακα αναπτύσσονται ήδη για τους λόγους αυτούς.



Σχήμα 3: Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας στις θερμικές μηχανές στο πέρασμα των χρόνων [2].

Οι ναυτικές μηχανές προβλέπεται να έχουν μικρότερο βάρος, ικανότητα λειτουργίας σε μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών (Σχήμα 3), καλύτερη αντίσταση σε διάβρωση και οξείδωση. Σύνθετα υλικά, κράματα αλουμινίου και μεσομεταλλικές ενώσεις αποτελούν τους καλύτερους υποψήφιους. Πτερύγια αεροστροβίλων από μονοκρυσταλλικά υλικά νικελίου-αλουμινίου (για αντίσταση σε ερπυσμό), αεροσυμπιεστές από σύνθετα υλικά με μήτρα αλουμινίου, ενισχυμένα με ίνες καρβιδίου του πυριτίου, κελύφη μηχανών από μεσομεταλλικές ενώσεις g-TiAl με υψηλότατη δυσκαμψία αποτελούν μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα.

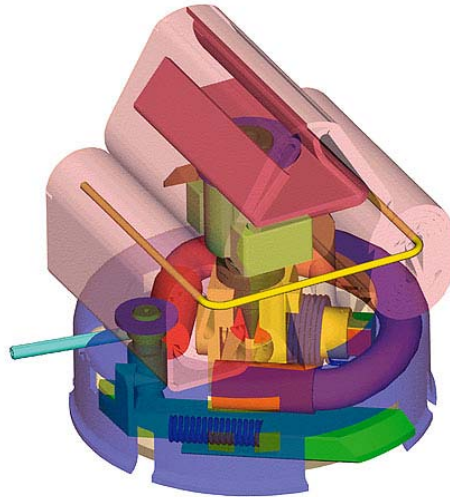
Η ανάγκη για καλύτερα και ευκολότερα συγκολλησίμα ναυπηγικά υλικά με μεγαλύτερη αντοχή στη μηχανική διάβρωση και υψηλότερη αντίσταση στη διάδοση ρωγμών λόγω κόπωσης αναμένεται να οδηγήσει στην αξιοποίηση και εξέλιξη των τιτανιούχων κραμάτων και των σύνθετων υλικών με μήτρα τιτανίου.

Πλην των δομικών υλικών, τα μελλοντικά ναυτικά συστήματα απαιτούν εξελίξεις σε μερικές ακόμη κατηγορίες υλικών, όπως υπεραγωγούς και μαγνητικά υλικά, οργανικά υλικά και επικαλύψεις, λειτουργικά (functional) υλικά και ημιαγωγούς υψηλών θερμοκρασιών.

Οι ναυτικές εφαρμογές της υπεραγωγιμότητας συμπεριλαμβάνουν υπεραγώγιμους μαγνήτες για ηλεκτρικούς κινητήρες και συστήματα πρόωσης, υπεραγώγιμους μαγνητικούς αισθητήρες για ανίχνευση ναρκών, υπεραγώγιμα μαγνητικά συστήματα για αποθήκευση ενέργειας και υλικά για χαμηλής ισχύος αναλογικά και ψηφιακά κυκλώματα.

Βελτιωμένα μαγνητικά υλικά θα απαιτηθούν για μαγνητικούς αισθητήρες χαμηλού κόστους και υψηλής ευαισθησίας, με εφαρμογές σε μαγνητόμετρα, αντένες, καθώς και για βιολογικούς και χημικούς αισθητήρες.

Προηγμένοι ενεργοποιητές από νανο-υλικά, ενσωματωμένοι στις κεφαλές πυραυλικών συστημάτων, θα προσδώσουν ανταγωνιστική πρωτοπορία στους κατόχους τους.



Σχήμα 4 Νανοκρυσταλλικά υλικά και ημιαγωγοί στην κεφαλή πυραυλικών συστημάτων.

Καθώς το ζήτημα της επέκτασης της διάρκειας ζωής των πλοίων θα καθίσταται κρίσιμότερο, τεχνικές και υλικά επίστωσης θα αναπτυχθούν περαιτέρω, με στόχο τη μείωση της οπισθέλκουσας δύναμης και των αντιστάσεων τριβής των πλοίων με το νερό αλλά και την αντιμετώπιση των ρυπαντικών επικαθήσεων στο κύτος του σκάφους.

Η ασφάλεια στο πλοίο και το υποβρύχιο επιβάλλει την εξέλιξη των πολυμερών υλικών, που ήδη χρησιμοποιούνται, τη βελτίωση της θερμο-οξειδωτικής τους σταθερότητας σε υψηλές θερμοκρασίες και τη βελτίωση των πυρίμαχων ιδιοτήτων τους.

III. Συμπεράσματα: Το πολεμικό πλοίο του μέλλοντος

Προηγμένα υλικά ενεργοποίησης στις πυραυλικές κεφαλές, UAVs με αισθητήρες υψηλών επιδόσεων, σκάφη προστατευμένα με επικαλύψεις πυρίμαχες και αντιδιαβρωτικές με μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και χαμηλότερο κόστος συντήρησης, νέοι αισθητήρες ανίχνευσης βλαβών με δυνατότητες συνεχούς ελέγχου, μικρότεροι, ελαφρότεροι και αποδοτικότεροι κινητήρες χάρη στη χρήση υπεραγωγίων υλικών, ανασχεδιασμός του σκάφους με στόχο τη μείωση της ανιχνευσιμότητάς του, υπεραγωγία φίλτρα που επιτρέπουν επικοινωνίες σε περιοχές υψηλού ηλεκτρονικού θορύβου αλλά και δυνατότητες υποθαλάσσιων επικοινωνιών, μηχανές από υλικά που θα επιτρέπουν χαμηλότερο κόστος παραγωγής και μακρύτερη διάρκεια ζωής, ημιαγωγοί και φωτονικά υλικά με νέες δυνατότητες στις ασφαλείς επικοινωνίες και την επεξεργασία σήματος. Τα παραπάνω θα αποτελούν σε λίγα χρόνια συμβατικές τεχνολογίες πάνω σε μία σύγχρονη ναυτική πλατφόρμα. Τεχνολογίες, που τα στελέχη του Πολεμικού Ναυτικού πρέπει να αντιλαμβάνονται και να κατέχουν, για να τις αξιοποιούν καλύτερα και για να μη θεωρούν το πλοίο ένα μαύρο κουτί με αυτοματοποιημένες διεργασίες και εαυτούς απλούς επιβάτες.

Αναφορές

1. Technology for the United States Navy and Marine Corps, 2000-2035: Becoming a 21st Century Force; Vol. 2: Technology
2. Materials Science and Engineering for the 1990s: Maintaining Competitiveness in the Age of Materials, National Academy Press, 1989
3. Semiconductor Industry Association. 1996. National Technology Roadmap for Semiconductors, San Jose, Calif.

ΤΕΤΑΡΤΗ ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ:
ΦΥΣΙΚΕΣ ΕΠΙΣΤΗΜΕΣ

Μαθηματικές μέθοδοι πρόγνωσης θαλάσσιου κυματισμού. Ένα ολοκληρωμένο επιχειρησιακό σύστημα

Γ. Ν. Γαλάνης, Γ. Κ. Εμμανουήλ και Γ. Β. Κάλλος

Περίληψη

Ένα ολοκληρωμένο σύστημα πρόγνωσης θαλάσσιου κυματισμού, το οποίο έχει αναπτυχθεί από τον Τομέα Μαθηματικών της Σχολής Ναυτικών σε συνεργασία με την Ομάδα Ατμοσφαιρικών Μοντέλων και Πρόγνωσης Καιρού του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Αθηνών, παρουσιάζεται στην εργασία αυτή. Το σύστημα βασίζεται στη χρήση ενός σύγχρονου αριθμητικού μοντέλου πρόγνωσης θαλάσσιου κυματισμού (WAM-cycle 4), σε συνδυασμό με δύο μαθηματικές μεθόδους αφομοίωσης (assimilation) παρατηρήσεων από δορυφόρους ή επίγειες πηγές (buoys, παρατηρήσεις πλοίων κ.λπ.). Τα αποτελέσματα της εργασίας εστιάζουν αφενός στην καλή προσαρμογή του μοντέλου στην περιοχή της Μεσογείου και αφετέρου στη βελτίωση της ποιότητας των αποτελεσμάτων με τη χρήση των προγνωστικών μεθόδων assimilation.

Abstract

A fully operational system of wave forecasting developed by the Section of Mathematics of Hellenic Naval Academy in cooperation with the Atmospheric Modeling Group of Physics Department of University of the Athens is presented in this paper. This system is based on an up to date wave model (WAM-cycle 4) in conjunction with two different assimilation methods. The latter may use satellite, buoy or any other available observations. The results are mainly focused on the well tuning of the system in the area of Mediterranean Sea as well as on the assimilation impact and the resulting final forecasting improvement.

I. Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια, η ανάγκη για υψηλής ακρίβειας πρόγνωση της κατάστασης θάλασσας γίνεται ολοένα και πιο επιτακτική, λόγω του αυξημένου αριθμού δραστηριοτήτων που επηρεάζονται άμεσα. Τουρισμός, θαλάσσιες μεταφορές, εμπορικές εφαρμογές, αμυντικά θέματα είναι κάποιοι από τους σημαντικότερους τομείς στους οποίους η καλή γνώση θαλάσσιων παραμέτρων, για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χρονικό ορίζοντα, αποδεικνύεται ιδιαίτερα χρήσιμη. Για πολλά χρόνια, τέτοιου είδους προγνώσεις προέρχονταν κυρίως από ωκεανογραφικούς-στατιστικούς χάρτες, από παρατηρήσεις-αναφορές πλοίων καθώς και από εμπειρικές μεθόδους, βασιζόμενες σε χάρτες γενικής ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας. Η ποιότητα, όμως, τέτοιας μορφής δεδομένων δεν ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις των σύγχρονων αναγκών.

Από την άλλη μεριά, οι προγνώσεις θαλάσσιου κυματισμού που βασίζονται αποκλειστικά στην πρόγνωση της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου, ακόμη και αν αυτή είναι υψηλής ακρίβειας, δεν είναι σήμερα αποτελεσματικές. Πράγματι, προγνώσεις αυτού του τύπου λαμβάνουν υπόψη τους μόνο μία από τις παραμέτρους που διαμορφώνουν την κατάσταση της θάλασσας, αγνοώντας σημαντικό αριθμό πληροφοριών σχετικά με τα τοπικά χαρακτηριστικά της περιοχής (κλειστή ή ανοικτή θάλασσα, πολυπλοκότητα των ακτών), τη βαθυμετρία, την πιθανότητα μεταφερόμενου κυματισμού από γειτονικές περιοχές κ.λπ.

Επιπλέον, προγνώσεις αυτού του τύπου, παρά το γεγονός ότι υιοθετούνται ακόμη και σήμερα από μετεωρολογικούς φορείς, δεν μπορούν να προσφέρουν παρά μόνο γενικές πληροφορίες που αφορούν μεγάλες σε έκταση περιοχές χωρίς τη δυνατότητα εξειδικευμένων και χωρικά περιορισμένων προγνώσεων.

Η σύγχρονη απάντηση-λύση στα παραπάνω προβλήματα, όπως αυτή προτείνεται από τα μεγαλύτερα επιχειρησιακά και ερευνητικά κέντρα παγκοσμίως, είναι η χρήση αριθμητικών μοντέλων πρόγνωσης θαλάσσιου κυματισμού, σε συνδυασμό με άλλες μαθηματικές μεθόδους για την καλύτερη προσαρμογή στις τοπικές συνθήκες ενδιαφέροντος.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται ένα ολοκληρωμένο σύστημα πρόγνωσης θαλάσσιου κυματισμού, το οποίο έχει αναπτυχθεί από τον Τομέα Μαθηματικών της Σχολής Ναυτικών σε συνεργασία με την Ομάδα Ατμοσφαιρικών Μοντέλων και Πρόγνωσης Καιρού (ΟΑΜ&ΠΚ) του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Αθηνών.

Το σύστημα αυτό βασίζεται στη χρήση ενός σύγχρονου και από τα πλέον διαδομένα αριθμητικά μοντέλου πρόγνωσης θαλάσσιου κυματισμού: στο μοντέλο WAM-cycle 4 [12]. Γίνεται επίσης χρήση δύο διαφορετικών μαθηματικών μεθόδων αφομοίωσης (assimilation) παρατηρήσεων από δορυφόρους ή επίγειες πηγές (buoys, παρατηρήσεις πλοίων κ.λπ.). Τα βασικά χαρακτηριστικά καθώς και οι ακριβείς δυνατότητες του συστήματος αυτού, όπως έχει αναπτυχθεί από την ομάδα μας, παρουσιάζονται στην ενότητα II.

Το προτεινόμενο σχήμα λειτουργεί σήμερα επιχειρησιακά στις εγκαταστάσεις του Πανεπιστημίου Αθηνών και η μέχρι τώρα απόδοσή του είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική, όπως αποδεικνύεται και από σχετικά στατιστικά στοιχεία που παραθέτονται στην ενότητα III. Πιλοτικά ήδη χρησιμοποιείται από Ναυτιλιακές εταιρείες με στόχο τον προσδιορισμό της βέλτιστης διαδρομής πλοίου και τη μείωση με τον τρόπο αυτό της κατανάλωσης καυσίμων, ενώ είναι σε εξέλιξη και η εγκατάστασή του στην Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (EMY) στα πλαίσια της αναβάθμισης των υπολογιστικών συστημάτων της τελευταίας.

II. Το επιχειρησιακό σύστημα

Στην παράγραφο αυτή περιγράφονται τα μοντέλα που έχουν χρησιμοποιηθεί στο προτεινόμενο σύστημα πρόγνωσης θαλάσσιου κυματισμού. Πέρα από κάποια βασικά στοιχεία για το θεωρητικό τους υπόβαθρο, παρουσιάζεται και ο ακριβής τρόπος με τον οποίο λειτουργούν επιχειρησιακά στη συγκεκριμένη εφαρμογή.

A. Το κυματικό μοντέλο

Όπως αναφέρθηκε και στην Εισαγωγή, βασικό ρόλο στην λειτουργία του συστήματος που παρουσιάζεται παίζει το κυματικό μοντέλο WAM-cycle 4 [12].

Πρόκειται για ένα φασματικό κυματικό μοντέλο τρίτης γενιάς που αναπτύχθηκε στο Max-Planck-Institut für Meteorologie, στο Αμβούργο της Γερμανίας. Υπολογίζει την εξέλιξη του διδιάστατου φάσματος της κυματικής ενέργειας, χωρίς καμία αρχική υπόθεση για τη μορφή του. Επιλύει την εξίσωση μεταφοράς για βαθύ και ρηχό νερό σε καρτεσιανές ή σφαιρικές συντεταγμένες με οποιαδήποτε επιθυμητή διακριτική ικανότητα (resolution) σε χρόνο και χώρο. Πιο συγκεκριμένα, υπολογίζει την διδιάστατη μεταβολή του φάσματος της ενέργειας μέσω της ολοκλήρωσης της εξίσωσης μεταφοράς:

$$\frac{d\mathbf{F}}{dt} + \frac{\partial}{\partial\phi}(\dot{\phi}\mathbf{F}) + \frac{\partial}{\partial\lambda}(\dot{\lambda}\mathbf{F}) + \frac{\partial}{\partial\theta}(\dot{\theta}\mathbf{F}) = \mathbf{S}.$$

Εδώ με F συμβολίζεται η φασματική πυκνότητα, όπως αυτή εκφράζεται μέσω των παραμέτρων (f, θ, ϕ, λ), όπου f η συχνότητα, θ η διεύθυνση, ϕ το γεωγραφικό πλάτος και λ το γεωγραφικό μήκος. Η συνάρτηση S έχει τρεις συνιστώσες: Την ατμοσφαιρική (άνεμος) S_{in} , τη σκέδαση S_{dis} , και τη μη γραμμική μεταφορά S_{nl} :

$$S = S_{in} + S_{dis} + S_{nl}.$$

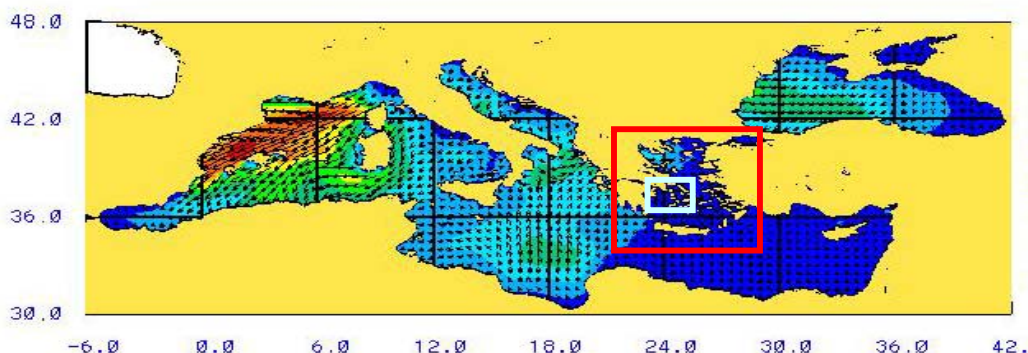
Στο μοντέλο αυτό υπάρχει η δυνατότητα χρήσης υποπεριοχών ολοκλήρωσης που δέχονται οριακές συνθήκες από το κυρίως πλέγμα (1 way nesting).

Τα φυσικά φαινόμενα που μοντελοποιεί το WAM είναι η διάδοση των κυματισμών στο γεωγραφικό χώρο, η μεταβολή της σχετικής τους συχνότητας, η διάθλαση λόγω βάθους και παρουσίας ρευμάτων, καθώς και φαινόμενα γένεσης και απόσβεσης των κυματισμών (διέγερση από τον άνεμο, απόσβεση λόγω θραύσης κυματισμών σε βαθύ νερό, μη γραμμικές τετραδικές αλληλεπιδράσεις κύματος-κύματος, απόσβεση λόγω τριβής πυθμένα).

Εξαγόμενα του μοντέλου είναι το σημαντικό ύψος κύματος, η μέση κυματική κατεύθυνση και συχνότητα, το ύψος και η μέση κατεύθυνση της αποθαλασσίας (swell), τα πεδία τάσης του ανέμου, διορθωμένα κατά τον παράγοντα της επαγόμενης κυματικής τάσης (wave-induced wind stress) και το συντελεστή τριβής (drag coefficient) σε κάθε κομβικό σημείο του πλέγματος για επιλεγμένες χρονικές στιγμές, καθώς και το δισδιάστατο φάσμα του κυματισμού σε επιλεγμένα σημεία και χρονικές στιγμές.

Ο επίσημος κώδικας του μοντέλου WAM έχει εγκατασταθεί σε περισσότερα από 35 ινστιτούτα παγκοσμίως και χρησιμοποιείται για ερευνητικές αλλά και επιχειρησιακές εφαρμογές. Επίσης εφαρμόζεται για την παρουσίαση και βελτιστοποίηση κυματικών δεδομένων από δορυφόρους.

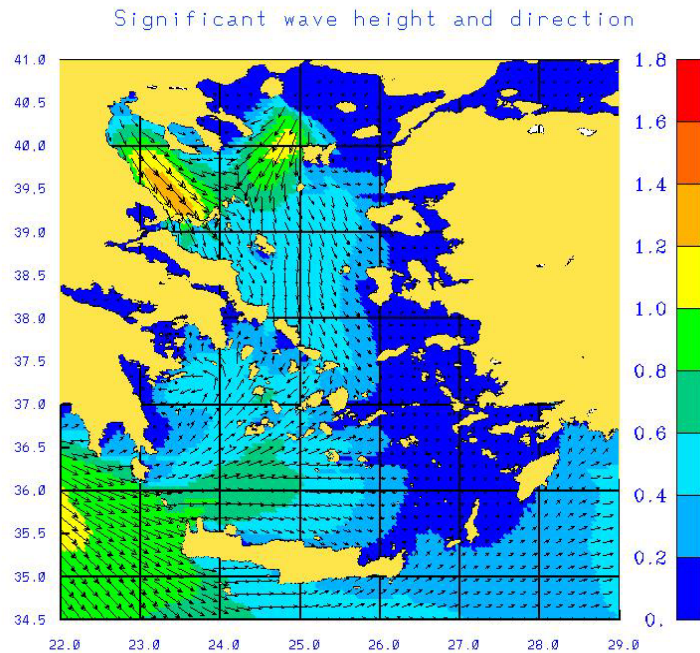
Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εφαρμογής, το κυματικό μοντέλο καλύπτει τρεις διαφορετικές περιοχές: Τη Μεσόγειο Θάλασσα, το Αιγαίο Πέλαγος και την ευρύτερη περιοχή του Σαρωνικού (Σχήμα 1).



Σχήμα 1: Οι τρεις περιοχές ολοκλήρωσης του κυματικού μοντέλου. Με κόκκινο πλαίσιο ορίζεται η περιοχή του Αιγαίου και με γαλάζιο η ευρύτερη περιοχή του Σαρωνικού.

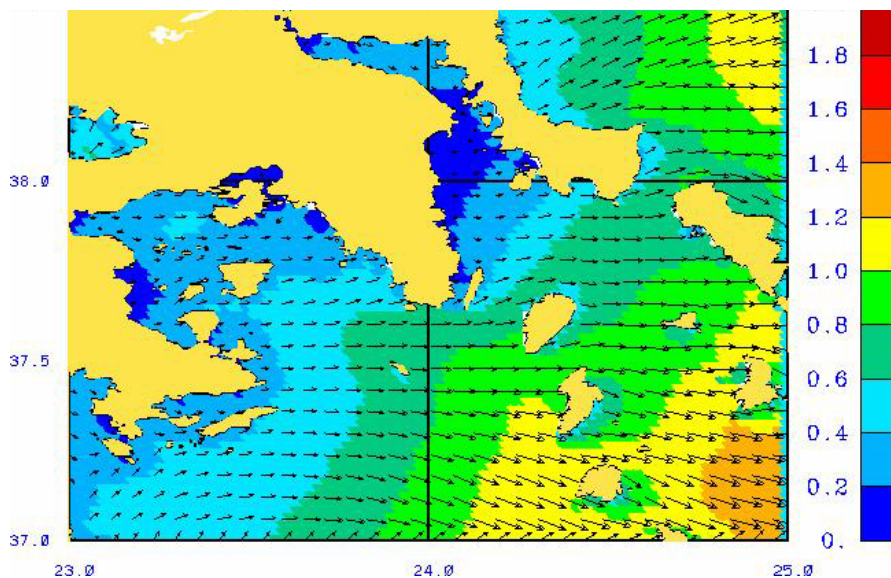
Πιο συγκεκριμένα, η περιοχή της Μεσογείου (6W – 42E, 30N – 48N) καλύπτεται με διακριτική ικανότητα 0.1 μοίρες και για χρονικό ορίζοντα 72 ωρών. Έτσι, υπάρχει η δυνατότητα προγνωστικών δεδομένων ανά 10 περίπου χιλιόμετρα.

Η περιοχή της ελληνικής επικράτειας (22E – 29E, 34.5N – 41N) δέχεται ως οριακές συνθήκες τα αποτελέσματα του πρώτου πεδίου (1-way nesting). Το μοντέλο ολοκληρώνει τη διαδικασία εδώ με διακριτική ικανότητα 0.05 μοιρών, δηλαδή ανά 5 χιλιόμετρα, και για χρονικό διάστημα επίσης 72 ωρών.



Σχήμα 2: Η περιοχή ολοκλήρωσης του μοντέλου στο Αιγαίο Πέλαγος και η πρόγνωση για τη διεύθυνση κύματος (διανύσματα) και το σημαντικό ύψος (παλέτα χρωμάτων).

Η μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα 0.02 μοίρες, ή 2 Km περίπου, εξασφαλίζεται στην περιοχή του Σαρωνικού με όρια 23E-25E, 37N-38.5N. Γίνεται με τον τρόπο αυτό εφικτή η ακριβής προσομοίωση και των πλέον ιδιαίτερων τοπικών χαρακτηριστικών της περιοχής. Για την ολοκλήρωση του μοντέλου εδώ χρησιμοποιούνται ως αρχικές συνθήκες τα αποτελέσματα του μοντέλου στο δεύτερο πεδίο (Αιγαίο Πέλαγος). Ο χρονικός ορίζοντας πρόγνωσης είναι 48 ώρες.

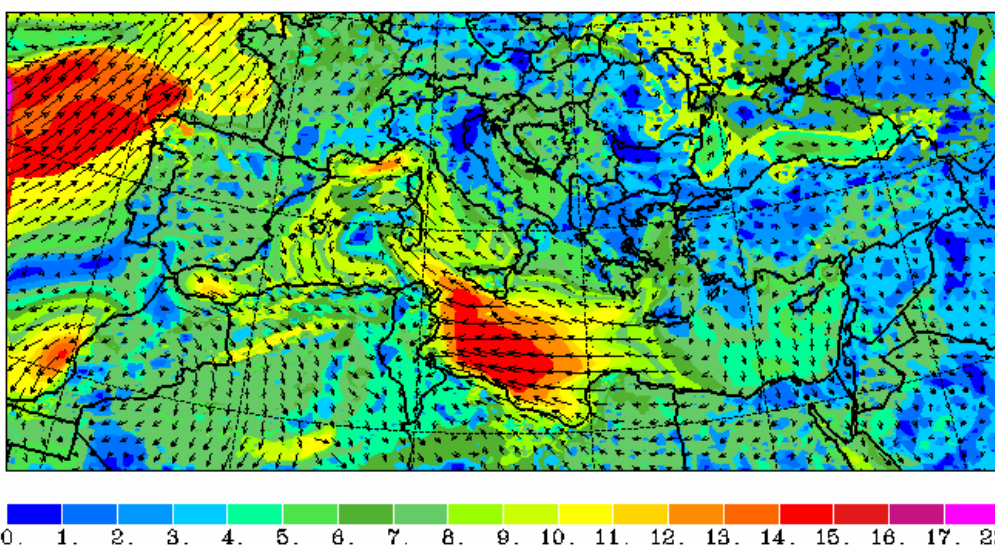


Σχήμα 3: Η πρόγνωση για την περιοχή του Σαρωνικού και τμήματος του κεντρικού Αιγαίου.

Αξίζει να τονισθεί ότι η επιλογή των περιοχών κάλυψης του μοντέλου καθώς και η αντίστοιχη διακριτική ικανότητα μπορούν σχετικά εύκολα να μεταβληθούν, ανάλογα με τις ανάγκες του χρήστη του συστήματος καθώς και της διαθέσιμης υπολογιστικής ισχύος.

Β. Το ατμοσφαιρικό μοντέλο

Για τη λειτουργία του κυματικού μοντέλου WAM, που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη υπό-ενότητα, είναι απαραίτητη η χρήση ατμοσφαιρικών προγνωστικών δεδομένων με ιδιαίτερη έμφαση στα στοιχεία που αφορούν τον άνεμο σε ύψος 10 μέτρων από την επιφάνεια της θάλασσας. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, τα στοιχεία αυτά προέρχονται από το ατμοσφαιρικό μοντέλο “SKIRON/ETA” [10, 11], το οποίο λειτουργεί επίσης σε επιχειρησιακή βάση στο Πανεπιστήμιο Αθηνών. Είναι ένα μη υδροστατικό μοντέλο, το οποίο παρέχει μετεωρολογικά προγνωστικά πεδία (άνεμος, θερμοκρασία, βροχόπτωση κ.λπ.) για την ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου (8W – 42E, 29N - 47N), με διακριτική ικανότητα 0.1 μίρες (περίπου 10 χιλιόμετρα).



Σχήμα 4 : Η περιοχή κάλυψης του ατμοσφαιρικού μοντέλου SKIRON/ETA και η πρόγνωση της διεύθυνσης (διανύσματα) και της ταχύτητας (παλέτα χρωμάτων) του ανέμου.

Γ. Τα συστήματα αφομοίωσης (assimilation) εξωτερικών παρατηρήσεων

Τα τελευταία χρόνια, σημαντική ώθηση στην προσπάθεια επίτευξης προγνωστικών κυματικών δεδομένων υψηλής ποιότητας έχει δώσει η δυνατότητα ενσωμάτωσης στα κυματικά μοντέλα εξωτερικών παρατηρήσεων, όπως μετρήσεις από σηματοδρές (buoys), παρατηρήσεις πλοίων αλλά και καταγραφές δορυφόρων. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται για τη διόρθωση τόσο των αρχικών τιμών όσο και των προγνώσεων των μοντέλων, μέσω της χρήσης μαθηματικών μεθόδων που εξασφαλίζουν την ομαλή διασπορά τους στην περιοχή ενδιαφέροντος.

Στο σύστημα που παρουσιάζεται στην εργασία αυτή χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικά σχήματα αυτού του τύπου για την αφομοίωση μετρήσεων που αφορούν το σημαντικό ύψος κύματος αλλά και το συνολικό ενεργειακό φάσμα.

Πιο συγκεκριμένα, η πρώτη μέθοδος που αποσκοπεί στην αφομοίωση των παρατηρήσεων ύψους κύματος έχει αναπτυχθεί στο Μετεωρολογικό Ινστιτούτο της Νορβηγίας DNMI [5]. Το υπολογιστικό σχήμα που χρησιμοποιεί βασίζεται στην κλασική μέθοδο διαδοχικών διορθώσεων, όπως αυτή προτάθηκε από τον [3] και η βασική του λειτουργία είναι η ίδια με τη μέθοδο SI (Statistical Interpolation), που χρησιμοποιείται ευρέως σε μεγάλο αριθμό ατμοσφαιρικών και κυματικών μοντέλων.

Η ανάλυση χρησιμοποιεί ως αρχική τιμή το αποτέλεσμα του μοντέλου για το σημαντικό ύψος κύματος (SWH^P). Η τιμή αυτή διορθώνεται στη συνέχεια με τη χρήση των διαθέσιμων παρατηρήσεων (SWH^O), μέσω των επόμενων εξισώσεων :

$$SWH_i^A(k+1) = SWH_i^A(k) + \sum_{j=1}^N a_{ij}(SWH_j^O - SWH_j^A(k)),$$

$$SWH_x^A(k+1) = SWH_x^A(k) + \sum_{j=1}^N a_{xj}(SWH_j^O - SWH_j^A(k)),$$

όπου $a_{ij} = (m_{ij} + d_{ij}) / M_j$, $a_{xj} = m_{xj} / M_j$ είναι οι συντελεστές βάρους. Εδώ οι δείκτες i, j αναφέρονται στα σημεία παρατήρησης, η παράμετρος x στα σημεία ολοκλήρωσης (grid points), οι εκθέτες O, P, T και A στην παρατήρηση, αρχική, πραγματική και αναλυμένη τιμή, αντίστοιχα. N είναι ο αριθμός των παρατηρήσεων και k δείκτης για τον αριθμό των επαναλήψεων. Οι επαναλήψεις ξεκινούν θέτοντας:

$$SWH_x^A(1) = SWH_x^P, \quad SWH_i^A(1) = SWH_x^P$$

Οι συντελεστές m_{ij} και d_{ij} είναι οι συνδιασπορές του μοντέλου και της παρατήρησης αντίστοιχα, ενώ M_j είναι μία συνάρτηση των m_{ij} and d_{ij} , η οποία υπολογίζεται με τέτοιο τρόπο, ώστε για κάθε παρατήρηση οι παραπάνω εξισώσεις να συγκλίνουν.

Όσον αφορά τη δεύτερη μέθοδο assimilation, που χρησιμοποιείται για τη διόρθωση απ' ευθείας του ενεργειακού φάσματος του μοντέλου, πρόκειται για ένα σχήμα που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του Ευρωπαϊκού προγράμματος EnviWave¹⁷, στο οποίο συμμετείχε και η ομάδα μας. Βασίζεται σε ένα σχήμα Optimal Interpolation [1], στο οποίο επιλύεται αρχικά η διανυσματική εξίσωση

$$(R + HBH^T)w_a = y - Hx_b$$

ως προς w_a , και στη συνέχεια υπολογίζεται η x_a μέσω της σχέσης

$$x_a = x_b + BH^T w_a,$$

όπου R είναι ο πίνακας συνδιασποράς των παρατηρήσεων, B ο αντίστοιχος πίνακας του μοντέλου, H ένας τελεστής που υπολογίζεται από παλαιότερες παρατηρήσεις, y το διάνυσμα των παρατηρήσεων, x_b η πρώτη πρόγνωση του μοντέλου και x_a τα επεξεργασμένα δεδομένα. Βασικές έννοιες για τις μεθόδους assimilation σε ατμοσφαιρικά και κυματικά μοντέλα μπορούν να βρεθούν στα [7, 9].

III. Αποτελέσματα

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται ορισμένα από τα βασικά αποτελέσματα επαλήθευσης (verification) του μοντέλου, σε σχέση με διαθέσιμες παρατηρήσεις από διαφορετικές πηγές (bouys, δορυφόρους).

Οι σηματοδότες (bouys) που χρησιμοποιήθηκαν καλύπτουν ολόκληρη την περιοχή του Αιγαίου, όπως φαίνεται και στο επόμενο σχήμα όπου εντοπίζονται οι θέσεις τους:

¹⁷ <http://www.oceanor.no/projects/enviwave/index.htm>.



Σχήμα 5: Οι θέσεις των buoys που χρησιμοποιήθηκαν.

Οι ακριβείς γεωγραφικές συντεταγμένες τους είναι :

Βουόγ	Γεωγραφικό Πλάτος	Γεωγραφικό Μήκος
1. Άθως	40.0	24.7
2. Λέσβος	39.2	25.8
3. Μύκονος	37.5	25.5
4. Ηράκλειο (Αβγό)	36.0	25.6

Πίνακας 1: Οι συντεταγμένες των buoys που χρησιμοποιήθηκαν.

Στον Πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζουμε τις μέσες αποκλίσεις (Bias) καθώς και τις αντίστοιχες μέσες απόλυτες αποκλίσεις (Absolute Bias) που παρατηρήθηκαν, συγκρίνοντας τις τιμές του σημαντικού ύψους κύματος (Significant Wave Height) που καταγράφηκαν από τα buoys και τις αντίστοιχες προγνώσεις του μοντέλου στο κοντινότερο σημείο ολοκλήρωσης (grid point). Η περίοδος της στατιστικής επεξεργασίας ήταν μεγαλύτερη του ενός έτους (Ιανουάριος 2004-Φεβρουάριος 2005), προσφέροντας έτσι αυξημένη ασφάλεια για τα στατιστικά συμπεράσματά μας.

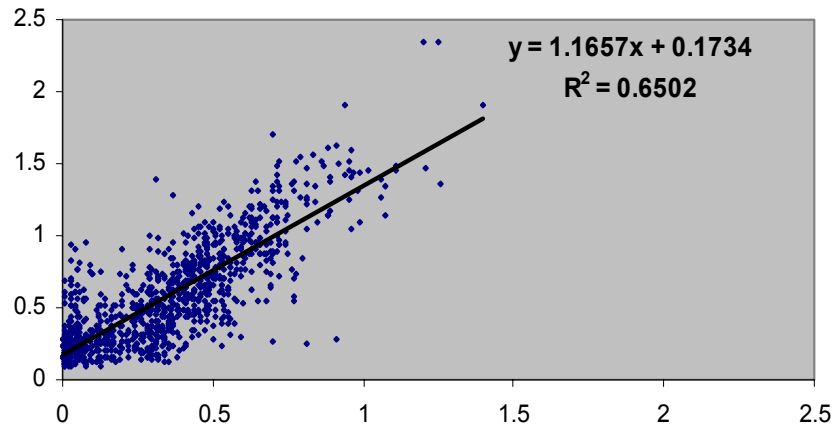
Buoys	Green		Yellow		Cyan	
	WH Bias (m)	WH Abs. Bias (m)	WH Bias (m)	WH Abs. Bias (m)	WH Bias (m)	WH Abs. Bias (m)
Άθως	0.17	0.24	0.18	0.25	0.20	0.31
Ηράκλειο	-0.07	0.18	-0.06	0.16	-0.11	0.16
Μύκονος	0.13	0.47	0.19	0.43	0.27	0.42
Λέσβος	0.23	0.26	0.25	0.27	0.27	0.30
Σύνολο	0.12	0.28	0.14	0.28	0.16	0.30

Πίνακας 2: Αποκλίσεις των τιμών πρόγνωσης του μοντέλου για το σημαντικό ύψος κύματος από τις τιμές που καταγράφηκαν από τα buoys.

Η παρουσίαση είναι χωρισμένη στα τρία δυνατά 24-ωρα πρόγνωσης. Όπως είναι φανερό, τόσο από τις επιμέρους τιμές όσο και από τη συνολική (μέσος όρος) τιμή των δύο στατιστικών παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν, η απόδοση του μοντέλου είναι πολύ ικανοποιητική, αφού οι αποκλίσεις των προγνώσεων από τις αντίστοιχες τιμές που κατέγραψαν τα buoys είναι τις τάξεως των λίγων εκατοστών. Αξιοσημείωτο είναι επίσης το γεγονός ότι η θετική αυτή συμπεριφορά παραμένει αναλλοίωτη με την αύξηση του χρονικού

ορίζοντα πρόγνωσης, αφού οι τιμές των αποκλίσεων εμφανίζουν πολύ περιορισμένη αύξηση (2-4 εκατοστά).

Η παραπάνω διαπίστωση ενισχύεται περαιτέρω από το επόμενο xy-scatter διάγραμμα, όπου παρουσιάζεται η συσχέτιση των προγνώσεων του μοντέλου για το σημαντικό ύψος κύματος (οριζόντιος άξονας) με τις αντίστοιχες τιμές του buoy της Λέσβου (κάθετος άξονας):

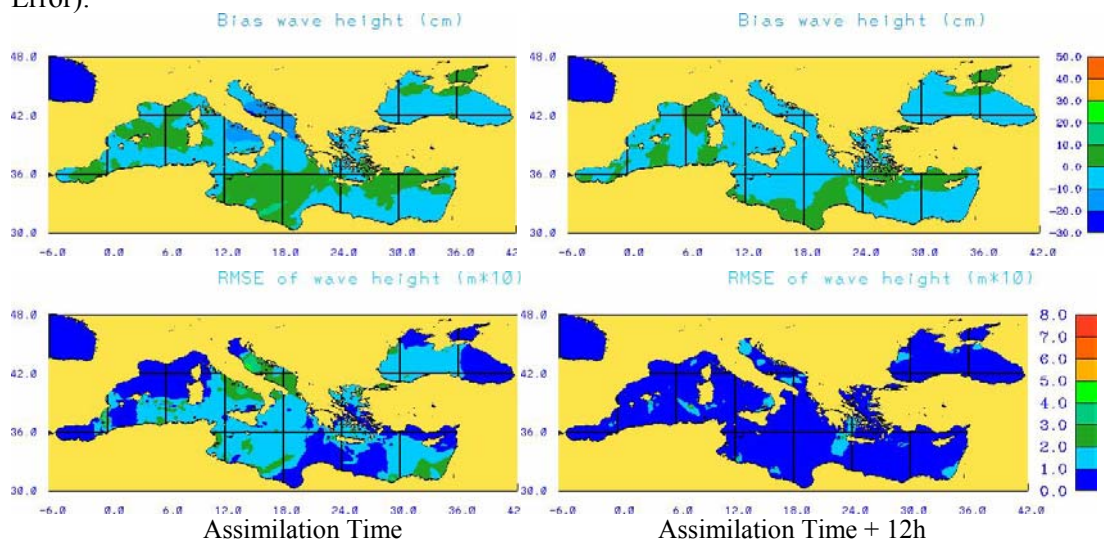


Σχήμα 6: Διάγραμμα συσχέτισης των τιμών πρόγνωσης του μοντέλου με τις παρατηρήσεις του buoy της Λέσβου.

Όπως μπορεί εύκολα κανείς να παρατηρήσει, υπάρχει ικανοποιητική προσαρμογή στην αντίστοιχη ευθεία γραμμικής συσχέτισης και ομαλή διασπορά των αποκλίσεων από αυτήν, γεγονός που δηλώνει την απουσία συστηματικού σφάλματος.

Παρά την ικανοποιητική αυτή αρχική απόδοση του μοντέλου, η συνεισφορά των συστημάτων αφομοίωσης (assimilation) παρατηρήσεων που προέρχονται από δορυφόρους ή άλλες πηγές είναι ιδιαίτερα σημαντική.

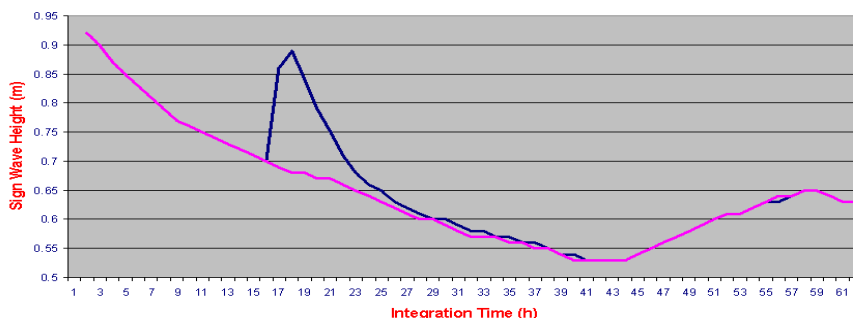
Στα επόμενα Σχήματα παρουσιάζεται η επίδραση των συστημάτων αυτών μέσω της σημείο προς σημείο σύγκρισης των τιμών του μοντέλου, πριν και μετά την ενεργοποίηση των συστημάτων assimilation. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται δύο βασικές στατιστικές παράμετροι: Η μέση απόκλιση (Bias) και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (Root Mean Square Error).



Σχήμα 7: Σημείο προς σημείο σύγκριση των τιμών του μοντέλου, πριν και μετά την ενεργοποίηση των συστημάτων assimilation.

Όπως προκύπτει από τη μελέτη και των δύο παραμέτρων, η επίδραση των συστημάτων αφομοίωσης είναι υπαρκτή αρκετά όμως περιορισμένη, ακόμη και 12 ώρες μετά από την αρχική ενσωμάτωση των παρατηρήσεων. Επιπλέον, φαίνεται να περιορίζεται σε συγκεκριμένες περιοχές και να μην εκτείνεται στο σύνολο του χώρου ενδιαφέροντος. Αυτό είναι αποτέλεσμα των τοπικών χαρακτηριστικών της Μεσογείου, όπου η πολυπλοκότητα της ακτογραμμής και ο μεγάλος αριθμός νησιών δεν επιτρέπουν σε μεταβολές-διαταραχές που εμφανίζονται να μεταφερθούν εύκολα σε γειτονικές περιοχές.

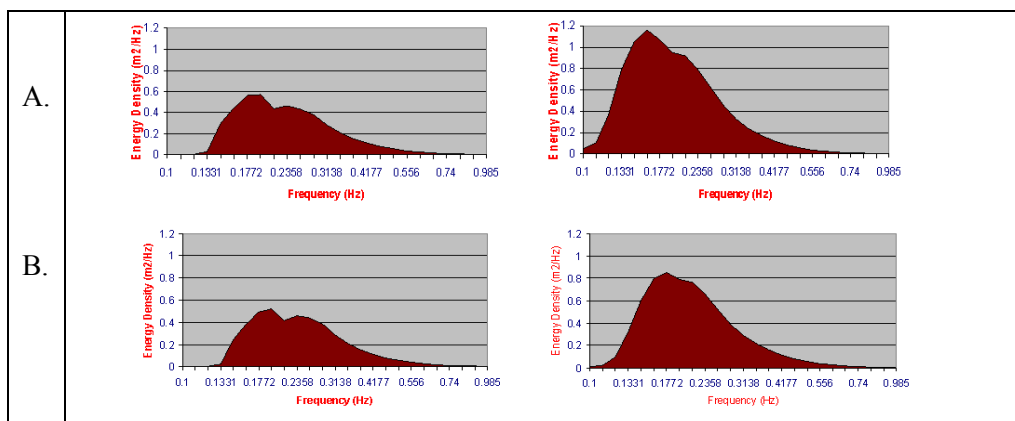
Η συνεισφορά των συστημάτων αφομοίωσης, όταν μία -και μόνο- παρατήρηση λαμβάνεται υπόψη, παρουσιάζεται στο επόμενο διάγραμμα:

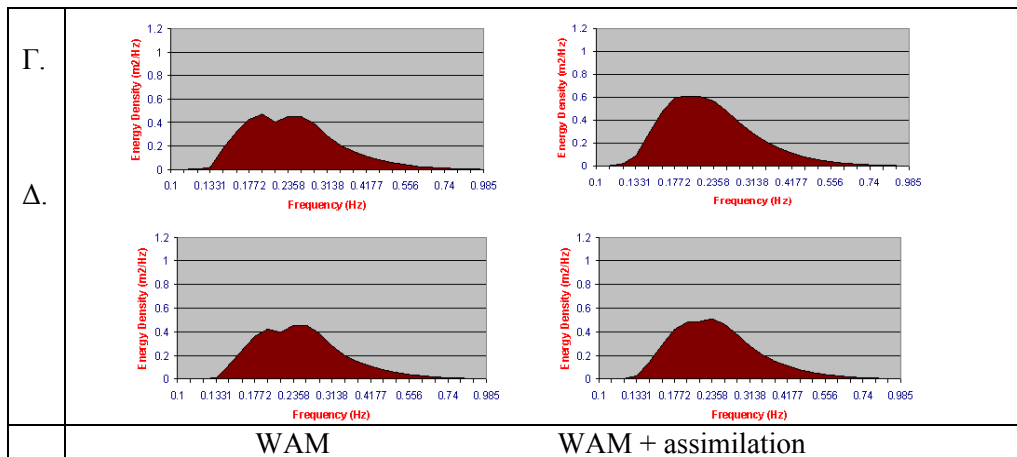


Σχήμα 8: Η πρόγνωση του σημαντικού ύψους κύματος χωρίς (ροζ γραμμή) και με (μπλε γραμμή) σύστημα αφομοίωσης.

Γίνεται εδώ περισσότερο εμφανής η διάρκεια της επίδρασης της εξωτερικής παρατήρησης, η οποία μετά από περίπου 10–12 ώρες εκμηδενίζεται, αν δεν υπάρξει νέα διαδικασία εισαγωγής δεδομένων.

Η επίδραση ιδιαίτερα του συστήματος assimilation που χρησιμοποιεί απ' ευθείας το φάσμα της ενέργειας παρουσιάζεται στα επόμενα διαγράμματα:





Σχήμα 9: Διαγράμματα κατανομής της ενέργειας ανά συχνότητα σε διαφορετικές ώρες μετά την επίδραση του συστήματος αφομοίωσης:

- A. Στιγμή της αφομοίωσης
 B. Ώρα αφομοίωσης + 2 ώρες
 Γ. Ώρα αφομοίωσης + 4 ώρες
 Δ. Ώρα αφομοίωσης + 6 ώρες

Γίνεται εδώ φανερό ότι το σύστημα assimilation διατηρεί αναλλοίωτη τη γενική μορφή της κατανομής της ενέργειας, αυξάνοντας όμως τη συνολική τιμή της (εμβαδόν), προσαρμοζόμενο στην (μεγαλύτερη) τιμή της παρατήρησης. Η επίδραση αυτή φαίνεται να εκμηδενίζεται μετά από 6 περίπου ώρες, σε αντίθεση με τις περιπτώσεις αφομοίωσης σημαντικού ύψους κύματος που μελετήθηκαν νωρίτερα, όπου η διάρκεια της επίδρασης ήταν σχεδόν διπλάσια.

IV. Συμπεράσματα

Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκε ένα ολοκληρωμένο σύστημα πρόγνωσης κατάστασης θάλασσας, το οποίο συνδυάζει τη χρήση ενός κυματικού μοντέλου τελευταίας γενιάς και μαθηματικών μεθόδων αφομοίωσης παρατηρήσεων, που προέρχονται από δορυφόρους ή επίγειες πηγές. Το σύστημα αυτό καλύπτει ολόκληρη την περιοχή της Μεσογείου με διακριτική ικανότητα που ξεκινά από τα 10 Km και φτάνει μέχρι και τα 2 Km στην περιοχή του Σαρωνικού.

Η προγνωστική ικανότητα του συστήματος ελέγχθηκε για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο του ενός έτους σε σχέση με όλες τις διαθέσιμες παρατηρήσεις στην περιοχή ενδιαφέροντος και βρέθηκε σε ιδιαίτερα ικανοποιητικά επίπεδα.

Η συνεισφορά των συστημάτων αφομοίωσης είναι σημαντική αν και χωρικά περιορισμένη, λόγω των τοπικών χαρακτηριστικών της Μεσογείου: κλειστή θάλασσα με πολύπλοκη ακτογραμμή.

Η αξιοπιστία των τελικών αποτελεσμάτων καθώς και ο πολύ υψηλός βαθμός διακριτικής ικανότητας -και άρα δυνατότητας διαφοροποιημένης χωρικά πρόγνωσης- καθιστά το προτεινόμενο σύστημα χρήσιμο για εφαρμογές σε πολλούς διαφορετικούς τομείς:

- Προσδιορισμός βέλτιστης διαδρομής πλοίου με πολλαπλά οφέλη: Μείωση κατανάλωσης καυσίμων, μείωση ταλαιπωρίας επιβατών και υλικών.
- Τουριστική εκμετάλλευση.
- Αμυντικές εφαρμογές.

Αναφορές

1. J. E. Aarnes, “*Iterative methods for data assimilation and an application to ocean state modeling*”, SINTEF Applied Mathematics, December 2003.
2. L. Aouf et al., “*Validation and assimilation of ENVISAT ASAR directional wave spectra in wave model WAM*”, JSC, 221, 2004
3. A. Bratseth, “*Statistical interpolation by means of successive corrections*”, Tellus Ser.A, 38, pp. 439-447, 1986.
4. G. P. Cressman, “*An Operational Objective Analysis System*”, Mon. Wea. Rev., 87, pp. 367-374, 1959.
5. L. A. Breivik and M. Reistad, “*Assimilation of ERS-1 Altimeter Wave Height in an operational Numerical Wave Model*”, Weather and forecasting, V9, N3, 9/1994.
6. L. A. Breivik et al., “*Assimilation of ERS SAR wave spectra in an operational wave model, Journal of Geophysical Research*”, V103, N C4, 4/1998.
7. R. Daley, “*Atmospheric Data Analysis*”, Cambridge University Press. ISBN 0-521-45825-0 (1993).
8. H. Johnsen, “*Wind and wave data calibration and validation results*”, Report No IT750/2-2004 of Enviwave Project, Contract No EVG1-CT-2001-00051.
9. E. Kalnay, “*Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability*”, Cambridge University Press. ISBN 0-521-79629-0 (2003).
10. G. Kallos, “*The Regional weather forecasting system SKIRON. Proceedings, Symposium on Regional Weather Prediction on Parallel Computer Environments*”, 15-17 October 1997, Athens, Greece, 1997.
11. A. Papadopoulos, P. Katsafados and G. Kallos, “*Regional weather forecasting for marine application*”. Global Atmos. Ocean Syst., 8, No 2-3, pp. 219-237, 2001.
12. WAMDIG: The WAM-Development and Implementation Group, S. Hasselmann, K. Hasselmann, E. Bauer, L. Bertotti, C. V. Cardone, J. A. Ewing, J. A. Greenwood, A. Guillaume, P. A. E. M. Janssen, G. J. Komen, P. Lionello, M. Reistad and L. Zambresky, “*The WAM Model - a third generation ocean wave prediction model*”, J. Phys. Oceanogr., Vol. 18, No. 12, pp. 1775-1810, 1988.

Σύντομα βιογραφικά σημειώματα

Ο Δρ. Γεώργιος Ν. Γαλάνης γεννήθηκε στα Χανιά Κρήτης το 1967. Είναι Διδάκτορας του Μαθηματικού Τμήματος του Πανεπιστημίου Αθηνών και εργάζεται στον Τομέα Μαθηματικών της Σχολής Ναυτικών Δοκίμων από το 1998. Η ερευνητική του δραστηριότητα επικεντρώνεται σε θέματα Διαφορικής Γεωμετρίας και Εφαρμογών. Έχει συγγράψει 28 εργασίες που έχουν γίνει δεκτές προς δημοσίευση σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά και έχει συμμετάσχει σε 15 διεθνή συνέδρια που έχουν διοργανωθεί στην Ελλάδα και το εξωτερικό. Συνεργάζεται με την Ομάδα Ατμοσφαιρικών Μοντέλων και Πρόγνωσης Καιρού του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Αθηνών από το 2000. Αποτέλεσμα της συνεργασίας αυτής είναι σημαντικός αριθμός δημοσιεύσεων αλλά και επιχειρησιακές εφαρμογές που χρησιμοποιούνται σήμερα τόσο από το Πανεπιστήμιο Αθηνών όσο και από επιχειρησιακά κέντρα της Ελλάδας και του εξωτερικού.

Ο Γεώργιος Κ. Εμμανουήλ γεννήθηκε στην Αθήνα το 1973. Είναι πτυχιούχος του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Αθηνών και κάτοχος του Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης κατεύθυνσης Φυσικής Περιβάλλοντος του ίδιου τμήματος. Σήμερα είναι υποψήφιος διδάκτορας του Πανεπιστημίου Αθηνών με θέμα διατριβής: “Μέθοδοι αφομοίωσης δορυφορικών μετρήσεων σε αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης κυματισμού και αξιολόγησή τους”. Παράλληλα εργάζεται ως Μετεωρολόγος-Προγνώστης στην Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία, ως Εργαστηριακός Συνεργάτης Πληροφορικής στα ΤΕΙ Πειραιά και ως Επιστημονικός Συνεργάτης σε ερευνητικά προγράμματα της Ομάδας Ατμοσφαιρικών

Μοντέλων και Πρόγνωσης Καιρού του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Αθηνών. Τα κυριότερα αντικείμενα της ερευνητικής του δραστηριότητας είναι η μελέτη και βελτίωση αριθμητικών μοντέλων ατμόσφαιρας και θαλάσσης, μέθοδοι αφομοίωσης παρατηρήσεων σε τέτοιου είδους μοντέλα και μελέτη των αποτελεσμάτων.

Ο **Δρ. Γεώργιος Κάλλος** είναι Αναπληρωτής Καθηγητής στο Πανεπιστήμιο Αθηνών, στον Τομέα Φυσικής Εφαρμογών. Είναι επίσης Senior Research Associate στο SUNY/ASRC, Albany, NY. Είναι ο επικεφαλής της ομάδας Ατμοσφαιρικών Μοντέλων και Πρόγνωσης Καιρού του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Αθηνών. Έχει πτυχίο από το Πανεπιστήμιο Αθηνών/Τμήμα Μαθηματικών (1975), MSc και PhD από το Georgia Institute of Technology, Geophysical Sciences/Atmospheric Sciences Division, School of Geophysical Sciences, U.S.A, (1985). Έχει 25 χρόνια εμπειρία σε ατμοσφαιρικά μοντέλα εργαζόμενος στο Πανεπιστήμιο Αθηνών, Georgia Institute of Technology, Colorado State University, State University of New York at Albany, (SUNY/ASRC) και National Center for Atmospheric Research (NCAR). Ο Δρ. Κάλλος έχει 62 δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά, 89 δημοσιεύσεις σε πρακτικά συνεδρίων, και 67 δημοσιεύσεις σε θέματα σχετικά με τη φυσική και τη χημεία της ατμόσφαιρας. Οι περισσότερες από αυτές αφορούν ατμοσφαιρικά μοντέλα. Έχει συμμετάσχει σε 57 ερευνητικά προγράμματα στο σύνολο σχεδόν των οποίων ήταν επιστημονικός υπεύθυνος ή συντονιστής. Είναι μέλος στο Editorial Board των επιστημονικών περιοδικών “Global Atmosphere-Ocean Systems – GAOS” και “Environmental Fluid Mechanics” (EFM).

Υπολογισμός των παραγόντων ηλεκτρομαγνητικής μετάβασης πρωτονίου σε $\Delta(1232)$ από την Κβαντική Χρωμοδυναμική σε πλέγμα

Α. Τσάπαλης

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία μελετώνται οι παράγοντες ηλεκτρομαγνητικής μετάβασης του πρωτονίου σε σωματίο Δέλτα (1232), με χρήση της πλεγματικής Κβαντικής Χρωμοδυναμικής (ΚΧΔ). Η μελέτη σε χωροχρονικό πλέγμα αποτελεί το μοναδικό τρόπο πλήρους κατανόησης των μη διαταρακτικών φαινομένων της ΚΧΔ χωρίς προσεγγίσεις. Η ηλεκτρομαγνητική μετάβαση πρωτονίου σε Δέλτα περιγράφεται μέσω τριών παραγόντων μετάβασης: του μαγνητικού διπολικού παράγοντα $M1$, του ηλεκτρικού τετραπολικού $E2$ και του βαθμωτού τετραπολικού $C2$. Ύπαρξη μη μηδενικών τιμών για τους τετραπολικούς παράγοντες $E2$ και $C2$ συνδέεται με χωρική παραμόρφωση του πρωτονίου κατά τον άξονα του σπιν. Για το λόγο αυτό, μελετώνται έντονα τόσο μέσω προσεγγιστικών φαινομενολογικών μοντέλων όσο και πειραμάτων σκέδασης σε χαμηλές και μεσαίες ενέργειες. Πειραματικά έχουν διαπιστωθεί μη μηδενικές τιμές για τους τετραπολικούς παράγοντες $E2$ και $C2$. Στην εργασία αυτή αναπτύσσουμε μια στρατηγική με την οποία μετράμε τα πλάτη μετάβασης για όλες τις δυνατές τιμές μεταφοράς τετραορμής, που επιτρέπονται στο πλέγμα, και αξιοποιούμε όλους τους συνδυασμούς πλατών και ορμών, ώστε να εξάγουμε για πρώτη φορά στατιστικά ακριβή αποτελέσματα για το διπολικό και τους τετραπολικούς παράγοντες μετάβασης και σε συμφωνία με τις πειραματικές παρατηρήσεις στην περιοχή της αναλλοίωτης μεταφοράς τετραορμής $Q^2 \approx 0.1-1.3 \text{ GeV}^2$. Η μελέτη έγινε στην προσέγγιση της παράλειψης των βρόγχων των κουάρκ. Επιπλέον, παρουσιάζουμε προκαταρκτικά αποτελέσματα από τη συνεχιζόμενη μελέτη σε πλέγματα με δύο γεύσεις δυναμικών κουάρκ και κουάρκ σθένους με τιμές κοντά στις φυσικές, με σκοπό την εκτίμηση της επίδρασης του πιονικού νέφους στη δομή του πρωτονίου.

Abstract

The Nucleon to $\Delta(1232)$ electromagnetic transition form factors are evaluated from Lattice QCD. Formulation of QCD on space-time Euclidean lattices has been established as the only method available for non-perturbative studies without approximations. The electromagnetic transition of the proton to Delta is parameterised through the magnetic dipole $M1$, the electric quadrupole $E2$ and the scalar quadrupole $C2$ transition form factors. Non-zero values for the quadrupole form factors $E2$ and $C2$ is connected to the spatial deformation of the proton along the spin axis. Therefore, they are studied intensively both in phenomenological models and experiments in low and medium energies. Non-zero values have been experimentally established for the quadrupole amplitudes $E2$ and $C2$. In this work we present a method for the measurement of the transition amplitude for all the momentum transfer values allowed on the lattice. We utilize all the available measurements obtaining statistically accurate results for the dipole and quadrupole form factors in agreement with the experiment in the momentum transfer squared regime $Q^2 \approx 0.1-1.3 \text{ GeV}^2$. The quenched approximation has been used in this study. In addition, we present first results from the continuing study on lattices with two flavours of dynamical quarks and valence quarks with lighter masses in order to investigate the influence of the pion cloud on the structure of the nucleon.

I. Εισαγωγή

Η πλεγματική ΚΧΔ είναι η μόνη μέθοδος που επιτρέπει τη μελέτη των φαινομένων του αδρονικού κόσμου, βασισμένη σε πρώτες αρχές. Η κατανόηση της δομής του πρωτονίου, του βασικότερου συστατικού παράγοντα της ύλης στο σύμπαν, αποτελεί βασική ερευνητική προτεραιότητα αυτής της μεθόδου. Οι παράγοντες ηλεκτρομαγνητικής δομής, οι συναρτήσεις δομής και οι γενικευμένες κατανομές παρτονίων είναι ποσότητες που περιέχουν πλήθος πληροφοριών σχετικά με τη δομή του νουκλεονίου και μελετώνται συστηματικά με την πλεγματική ΚΧΔ. Ένα εξίσου σημαντικό θέμα είναι η ύπαρξη παραμόρφωσης στη βασική κατάσταση του νουκλεονίου. Η παραμόρφωση είναι συνήθης στις δέσμιες καταστάσεις στην ατομική και πυρηνική φυσική και είναι ενδιαφέρον να μελετηθεί η εμφάνισή της στις αδρονικές καταστάσεις λόγω της ΚΧΔ. Ποσοτικά, η παραμόρφωση κατά μήκος του άξονα του σπιν δίνεται από την τετραπολική ροπή στο εσωτερικό σύστημα αναφοράς του σώματος

$$Q_0 = \int d\vec{r} \rho(\vec{r})(3z^2 - r^2) \quad (1)$$

όπου $\rho(\vec{r})$ η κατανομή πυκνότητας φορτίου. Για ένα σωματίο με σπιν 1/2 όπως το πρωτόνιο, η κβαντική μέτρηση της τετραπολικής ροπής δεν είναι δυνατή. Με αυτή την έννοια, δεν είναι μετρήσιμη φασματοσκοπικά η παραμόρφωση του πρωτονίου. Η τετραπολική παραμόρφωση, συνεπώς, αναζητείται στην ηλεκτρομαγνητική διέγερση του πρωτονίου στο $(I, J) = (3/2, 3/2)$ συντονισμό, το $\Delta(1232)$. Πειράματα παραγωγής πιονίου με σκέδαση φωτονίου ή ηλεκτρονίου από πρωτόνιο έχουν ανιχνεύσει τετραπολικά πλάτη για διάφορες τιμές μεταφοράς τετραορμής από το $Q^2 = 0$ [1, 2] έως και μερικά GeV^2 [3, 4]. Κανόνες επιλογής για σπιν-ομοτιμία επιτρέπουν μαγνητική διπολική, $M1$, ηλεκτρική τετραπολική, $E2$, και Coulomb τετραπολική, $C2$, μεταβάσεις με τους αντίστοιχους παράγοντες μετάβασης G_{M1} , G_{E2} και G_{C2} , οι οποίοι είναι συναρτήσεις της αναλλοίωτης μεταφοράς τετραορμής q^2 . Η ακριβής πειραματική μέτρηση [3] στο $-q^2 = 0.127 \text{ GeV}^2$ έδωσε τις τιμές

$$R_{EM} \equiv -\frac{G_{E2}}{G_{M1}} = (-2.3 \pm 0.3 \pm 0.6)\% \quad , \quad (2)$$

$$R_{SM} \equiv -\frac{|\mathbf{q}|}{2m_\Delta} \frac{G_{C2}}{G_{M1}} = (-6.1 \pm 0.2 \pm 0.5)\%$$

για τους λόγους των τετραπολικών προς τον κυρίαρχο διπολικό παράγοντα μετάβασης, γνωστούς και ως EMR και CMR, αντίστοιχα. Στις τιμές αυτές, το πρώτο σφάλμα που δίνεται είναι το συστηματικό και το δεύτερο το σφάλμα μοντέλου. Σημειώνουμε ότι η μοντελοποίηση της ισχυρής διάσπασης του Δ είναι αναπόφευκτη στην εξαγωγή των παραγόντων μετάβασης από τις πειραματικές μετρήσεις των ενεργών διατομών και οδηγεί σε μη αμελητέα αβεβαιότητα. Οι μη μηδενικές τιμές των λόγων στην εξ. (2) είναι ασυμβίβαστες με σφαιρικό πρωτόνιο [5]. Με τρία διαφορετικά μοντέλα, συνάγεται ότι ένα επίμηκες κατά τον άξονα του σπιν πρωτόνιο είναι το πιο πιθανό. Στο μη σχετικιστικό μοντέλο κουάρκ, η χρωμομαγνητική υπέρλεπτη αλληλεπίδραση που οφείλεται στην ανταλλαγή ενός γκλουονίου παράγει πρόσμιξη D-κατάστασης στη βασική κατάσταση του νουκλεονίου και του Δ . Όμως, στο μοντέλο αυτό ή στη σχετικιστική εκδοχή του, το διπολικό πλάτος και ο λόγος R_{EM} υπολογίζεται μικρότερος σε σχέση με τις πειραματικές [7]. Με χρήση S-καταστάσεων μόνο και συνεισφορές δύο-σωμάτων στον τελεστή ηλεκτρομαγνητικού ρεύματος, προερχόμενες από γκλουονικούς και κουάρκ-αντικουάρκ βαθμούς ελευθερίας, οδηγούμαστε επίσης σε παραμορφωμένο πρωτόνιο και Δ , σε συμφωνία με το πείραμα [6]. Ο ρόλος του πιονικού νέφους έχει εξεταστεί σε χειραλικά μοντέλα αδρονικού σάκου [8], όπου η παραμόρφωση οφείλεται στην ασυμμετρία της πιονικής κατανομής ή σε σολιτονικά μοντέλα, όπου οι μη γραμμικές αλληλεπιδράσεις του πιονίου ευθύνονται για την παραμόρφωση. Αναμένεται ότι ο ρόλος του πιονίου είναι σημαντικός αλλά όχι μοναδικός παράγοντας, καθώς μικρή

παραμόρφωση έχει ευρεθεί σε μελέτες πλεγματικής ΚΧΔ χωρίς δυναμικά κουάρκς (quenched QCD) των αδρονικών κυματοσυναρτήσεων σε μεγάλες μάζες πιονίου με χρήση των συσχετίσεων πυκνότητας-πυκνότητας [9]. Οι παράγοντες μετάβασης υπολογίζονται κατευθείαν στην πλεγματική ΚΧΔ. Σε μία πρώτη εργασία [10], αναπτύχθηκε η μέθοδος υπολογισμού των παραγόντων μετάβασης σε ορισμένο q^2 αλλά τα περιορισμένα στατιστικά δεδομένα δεν οδήγησαν σε καθοριστικά αποτελέσματα. Η επόμενη εργασία [11], χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της [10] και ορισμένες βελτιώσεις, οδήγησε σε αρνητικές τιμές του λόγου EMR για μερικές τιμές του q^2 στην ΚΧΔ χωρίς δυναμικά κουάρκς και με δύο γεύσεις δυναμικών κουάρκς για βαριές πιονικές μάζες. Στη συνέχεια, η εξάρτηση των παραγόντων μετάβασης από το q^2 διερευνήθηκε στην ΚΧΔ χωρίς δυναμικά κουάρκς [12]. Υπολογίστηκαν συγκεκριμένοι συνδυασμοί συναρτήσεων τριών σημείων (three-point functions), οι οποίοι, σε συνδυασμό με την ταυτόχρονη υπερορισμένη ανάλυση των δεδομένων, οδήγησαν στον υπολογισμό της q^2 εξάρτησης με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια. Ένας παρόμοιος υπολογισμός στην πλήρη ΚΧΔ, με χρήση πλεγμάτων με 2+1 δυναμικές γεύσεις κουάρκς κατασκευασμένων από την ομάδα MILC (USA) και Domain Wall κουάρκς σθένους, είναι σε εξέλιξη [14]. Στην εργασία αυτή, στοχεύουμε σε μάζες κουάρκς κοντά στις πραγματικές και σε διερεύνηση του ρόλου του πιονικού νέφους. Παρόμοιες τεχνικές εφαρμόζονται ταυτόχρονα στη μελέτη των ελαστικών παραγόντων ηλεκτρομαγνητικής μορφής του πρωτονίου. Κατάλληλες μετρήσεις συναρτήσεων τριών σημείων οδηγούν σε ακριβή υπολογισμό του ηλεκτρικού και του μαγνητικού παράγοντα μορφής μέχρι $-q^2 \sim 3 \text{ GeV}^2$ [13]. Με δεδομένη την πολύ ενδιαφέρουσα συμπεριφορά του λόγου του ηλεκτρικού προς τον μαγνητικό παράγοντα, η οποία μετρήθηκε πρόσφατα σε ακριβή πειράματα στο JLab (USA), ο ακριβής υπολογισμός του ίδιου λόγου στην πλεγματική ΚΧΔ σε υψηλές τιμές q^2 έχει εξίσου ενδιαφέρον.

II. Υπολογισμός του πλάτους μετάβασης στην πλεγματική ΚΧΔ

Το στοιχείο μήτρας για τη γενική ηλεκτρομαγνητική μετάβαση ενός νουκλεονίου σε Δ , με πραγματικά ή εικονικά (virtual) φωτόνια, έχει τη μορφή [16]

$$\langle \Delta(p', s') | J^\mu | N(p, s) \rangle = i \sqrt{\frac{2}{3}} \left(\frac{m_\Delta m_N}{E_\Delta E_N} \right)^{1/2} \bar{u}_\tau(p', s') O^{\tau\mu} u(p, s) \quad (3)$$

όπου p , s και p', s' είναι οι αρχικές και τελικές ορμές και σπιν και $u_\tau(p', s')$ το 3/2 σπιν-διάνυσμα στο φορμαλισμό Rarita-Schwinger. Ο τελεστής $O^{\tau\mu}$ αναλύεται σε σχέση με τους Sachs παράγοντες μορφής

$$O^{\tau\mu} = G_{M1}(q^2) K_{M1}^{\tau\mu} + G_{E2}(q^2) K_{E2}^{\tau\mu} + G_{C2}(q^2) K_{C2}^{\tau\mu} \quad (4)$$

όπου ο μαγνητικός διπολικός G_{M1} , ο ηλεκτρικός τετραπολικός G_{E2} και ο Coulomb τετραπολικός G_{C2} εξαρτώνται από τη μεταφορά τετραορμής $q^2 = (p' - p)^2$. Οι ακριβείς εκφράσεις για τις κινηματικές συναρτήσεις $K^{\tau\mu}$ δίνονται στην [11]. Για τον υπολογισμό των παραγόντων μετάβασης απαιτείται ο υπολογισμός της συνάρτησης τριών-σημείων

$$\langle G_\sigma^{\Delta\mu N}(t_2, t_1; \vec{p}', \vec{p}; \Gamma) \rangle = \sum_{x_2, x_1} e^{-i\vec{p}' \cdot \vec{x}_2} e^{+i(\vec{p}' - \vec{p}) \cdot \vec{x}_1} \Gamma^{\beta\alpha} \langle \Omega | T(\chi_{\Delta\sigma}^\alpha(\vec{x}_2, t_2) j^\mu(\vec{x}_1, t_1) \bar{\chi}_p^\beta(0, 0)) | \Omega \rangle \quad (5)$$

μαζί με τις συναρτήσεις δύο-σημείων για το πρωτόνιο και το Δ

$$\begin{aligned}\langle G^{NN}(t; \vec{p}; \Gamma) \rangle &= \sum_x e^{-i\vec{p}\cdot\vec{x}} \Gamma^{\beta\alpha} \langle \Omega | T(\chi_p^\alpha(\vec{x}, t) \bar{\chi}_p^\beta(0, 0)) | \Omega \rangle \\ \langle G_{\sigma\tau}^{\Delta\Delta}(t; \vec{p}'; \Gamma) \rangle &= \sum_x e^{-i\vec{p}'\cdot\vec{x}} \Gamma^{\beta\alpha} \langle \Omega | T(\chi_{\Delta\sigma}^\alpha(\vec{x}, t) \bar{\chi}_{\Delta\tau}^\beta(0, 0)) | \Omega \rangle.\end{aligned}\quad (6)$$

Η δημιουργία του πρωτονίου γίνεται σε $t = 0$, το φωτόνιο αλληλεπιδρά με ένα κουάρκ σε χρόνο t_1 και η καταστροφή του Δ γίνεται σε χρόνο t_2 . Συνήθεις τελεστές περιγραφής επιλέγονται για το N και το Δ

$$\chi_p(x) = \varepsilon^{abc} [u^a(x) C \gamma_5 d^b(x)] u^c(x) \quad (7)$$

$$\chi_{\Delta\sigma}(x) = \frac{1}{\sqrt{3}} \varepsilon^{abc} \left\{ 2[u^a(x) C \gamma_\sigma d^b(x)] u^c(x) + [u^a(x) C \gamma_\sigma u^b(x)] d^c(x) \right\}. \quad (8)$$

Οι πίνακες Γ προβάλλουν στους δείκτες Dirac και είναι

$$\Gamma_i = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \sigma_i & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \Gamma_4 = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

Το ακριβώς διατηρούμενο στο πλέγμα ηλεκτρομαγνητικό ρεύμα

$$j^\mu(x) = \sum_f Q_f \kappa_f \left\{ \bar{\psi}^f(x + \hat{\mu})(1 + \gamma_\mu) U^{\mu+}(x) \psi^f(x) - \bar{\psi}^f(x)(1 - \gamma_\mu) U^{\mu+}(x) \psi^f(x + \hat{\mu}) \right\} \quad (10)$$

επιλέγεται συμμετροποιημένο στο σημείο x , $j^\mu(x) \rightarrow [j^\mu(x) + j^\mu(x-\mu)]/2$, όπου Q_f το φορτίο του κουάρκ γεύσης f , και κ_f αντίστοιχη παράμετρος μάζας, ώστε να αποφευχθεί η εμφάνιση σταθεράς ανακανονικοποίησης. Για μεγάλες τιμές χρόνων t_1 και $t_2 - t_1$, η χρονική εξάρτηση και οι σταθερές ανακανονικοποίησης των πεδίων ακυρώνονται στο λόγο

$$\begin{aligned}R_\sigma(t_2, t_1; \vec{p}'; \vec{p}; \Gamma; \mu) &= \\ \frac{\langle G_{\sigma}^{\Delta j^{\mu N}}(t_2, t_1; \vec{p}'; \vec{p}; \Gamma) \rangle}{\langle G_{ii}^{\Delta\Delta}(t_2; \vec{p}'; \Gamma_4) \rangle} &\left[\frac{\langle G_{ii}^{\Delta\Delta}(t_2; \vec{p}'; \Gamma_4) \rangle \langle G^{NN}(t_2 - t_1; \vec{p}; \Gamma_4) \rangle \langle G_{ii}^{\Delta\Delta}(t_1; \vec{p}'; \Gamma_4) \rangle}{\langle G^{NN}(t_2; \vec{p}; \Gamma_4) \rangle \langle G_{ii}^{\Delta\Delta}(t_2 - t_1; \vec{p}'; \Gamma_4) \rangle \langle G^{NN}(t_1; \vec{p}; \Gamma_4) \rangle} \right]^{1/2} \\ \xrightarrow[t_1 \gg 1]{t_2 - t_1 \gg 1} &\Pi_\sigma(\vec{p}'; \vec{p}; \Gamma; \mu)\end{aligned}\quad (11)$$

Επιλέγουμε ακίνητο Δ και, συνεπώς, $\mathbf{q} = \mathbf{p}' - \mathbf{p} = -\mathbf{p}$. $Q^2 = -q^2$ είναι η Ευκλείδεια αναλλοίωτη μεταφορά τετραορμής. Ο προσδιορισμός του $\Pi_\sigma(\mathbf{q}; \Gamma; \mu)$, για δεδομένα σ και Γ , γίνεται από προσαρμογή σε σταθερά του $R_\sigma(t_2; t_1; \mathbf{q}; \Gamma; \mu)$ και οδηγεί στους παράγοντες μετάβασης. Στο αδρονικό επίπεδο και με χρήση Dirac και Rarita-Schwinger σπινόρων, ο λόγος στην εξ. (11) δίνει τις σχέσεις

$$\Pi_\sigma(\vec{q}; \Gamma_4; \mu) = iA \varepsilon^{\sigma 4 \mu j} p^j G_{M1}(Q^2) \quad (12)$$

$$\begin{aligned}\Pi_\sigma(\vec{q}; \Gamma_k; j) &= A \left\{ \frac{1}{2} (p_\sigma \delta_{kj} - p_k \delta_{\sigma j}) G_{M1}(Q^2) - \left[\frac{3}{2} (p_\sigma \delta_{kj} + p_k \delta_{\sigma j}) - \frac{3 p_\sigma p_k p_j}{\vec{p}^2} \right] G_{E2}(Q^2) \right. \\ &\quad \left. + \frac{E_N - m_\Delta}{2m_\Delta} p_j \left(\delta_{\sigma k} - \frac{3 p_\sigma p_k}{\vec{p}^2} \right) G_{C2}(Q^2) \right\}\end{aligned}\quad (13)$$

για $j = 1, 2, 3$ και

$$\Pi_{\sigma}(\vec{q}; \Gamma_k; 4) = iB \left(\delta_{\sigma k} - \frac{3p_{\sigma}p_k}{\vec{p}^2} \right) G_{C2}(Q^2) \quad (14)$$

$$\text{με τις κινηματικές σταθερές } A = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{m_{\Delta} + m_N}{4m_N E_N} \sqrt{\frac{E_N}{E_N + m_N}} \quad \text{και } B = \frac{\vec{p}^2}{2m_{\Delta}} A.$$

Μια χρήσιμη τεχνική για τον υπολογισμό της συνάρτησης τριών-σημείων είναι η *σειριακή αντιστροφή μέσω του πεδίου καταστροφής* [17]. Αυτή απαιτεί συγκεκριμένο αδρόνιο (Δ) στο t_2 με δείκτη σ . Οι πίνακες Γ , επίσης, απαιτούνται συγκεκριμένοι. Με μία σειριακή αντιστροφή υπολογίζουμε τη συνάρτηση τριών-σημείων για ένα μεγάλο σύνολο τελεστών $j_{\mu}(\mathbf{q})$, εισερχομένων σε κάθε ενδιάμεσο χρόνο t_1 , καθώς το κόστος υπολογισμού τους είναι μηδαμινό. Οι εξ. (12-14) συνιστούν ένα σύστημα για τα άγνωστα G_{M1} , G_{E2} και G_{C2} σε κάθε τιμή του Q^2 . Ενώ τρεις ανεξάρτητες μετρήσεις του $\Pi_{\sigma}(\mathbf{q}; \Gamma; \mu)$ αρκούν για τον υπολογισμό των αγνώστων παραγόντων, αυξάνοντας τους συνδυασμούς των μ και \mathbf{q} που μετράμε, αυξάνεται η στατιστική ακρίβεια των παραγόντων. Παρατηρούμε ότι οι εξ. (12-14) είναι ταυτοτικά μηδέν για κάποιες τιμές του $\mathbf{q} = -\mathbf{p}$, π.χ. η εξ. (12) είναι μηδέν για $j = \sigma$ ή $j = \mu$. Επιπλέον, για δεδομένο σ , οι δυνατές ισοδύναμες περιστροφές στο πλέγμα του \mathbf{q} δεν δίνουν όλες μη μηδενική τιμή. Αναζητούμε, συνεπώς, γραμμικούς συνδυασμούς των εξ. (12-14), οι οποίοι μεγιστοποιούν τον αριθμό μη μηδενικών συνεισφορών των περιστροφών στο πλέγμα του \mathbf{q} . Οι βέλτιστοι συνδυασμοί είναι

$$S_1(\vec{q}; \mu) = \sum_{\sigma=1}^3 \Pi_{\sigma}(\vec{q}; \Gamma_4; \mu) = iA \left\{ (p_2 - p_3)\delta_{1,\mu} + (p_3 - p_1)\delta_{2,\mu} + (p_1 - p_2)\delta_{3,\mu} \right\} G_{M1}(Q^2) \quad (15)$$

$$S_2(\vec{q}; \mu) = \sum_{\sigma \neq k=1}^3 \Pi_{\sigma}(\vec{q}; \Gamma_k; \mu) = -3A \left\{ (p_2 + p_3)\delta_{1,\mu} + (p_3 + p_1)\delta_{2,\mu} + (p_1 + p_2)\delta_{3,\mu} \right\} G_{E2}(Q^2) \\ - 2 \frac{p_{\mu}}{\vec{p}^2} (p_1 p_2 + p_1 p_3 + p_2 p_3) \left[G_{E2}(Q^2) + \frac{E_N - m_{\Delta}}{2m_{\Delta}} G_{C2}(Q^2) \right] \quad (16)$$

για $\mu = 1, 2, 3$, ενώ για $\mu = 4$ έχουμε

$$S_2(\vec{q}; \mu = 4) = \frac{-i6B}{\vec{p}^2} (p_1 p_2 + p_1 p_3 + p_2 p_3) G_{C2}(Q^2). \quad (17)$$

Επισημαίνουμε ότι οι S_1 και S_2 τύπου παραστάσεις απαιτούν μια *σειριακή αντιστροφή* και δίνουν το μέγιστο δυνατό αριθμό εξισώσεων για τον υπολογισμό των παραγόντων, για όλα τα επιτρεπτά ανύσματα ορμής \mathbf{q} του φωτονίου. Το στοιχείο μήτρας τύπου S_1 οδηγεί στο G_{M1} ενώ το στοιχείο τύπου S_2 δίνει τα G_{E2} και G_{C2} . Η μέθοδος σαφώς υπερέρχει της μεθόδου των [10, 11], γιατί με το ίδιο CPU κόστος επιτρέπει τον υπολογισμό σε όλα τα Q^2 . Ωστόσο, το στοιχείο τύπου S_2 δεν δίνει το G_{C2} στην ελάχιστη ορμή $\mathbf{q} = 2\pi/La (1,0,0)$ (και ισοδύναμες διευθύνσεις). Γι' αυτό κατασκευάζουμε και το λόγο $S_3(\mathbf{q}; \mu) = \Pi_3(\mathbf{q}; \Gamma_3; \mu) - (\Pi_1(\mathbf{q}; \Gamma_1; \mu) + \Pi_2(\mathbf{q}; \Gamma_2; \mu))/2$, ώστε να λαμβάνουμε και τις υπόλοιπες τιμές του G_{C2} . Το πλήρες σύνολο τιμών των S_1 και S_2 στοιχείων μήτρας για όλες τις συνεισφορές των \mathbf{q} και μ σε καθένα Q^2 αναλύονται ταυτόχρονα. Καλώντας $P(\mathbf{q}; \mu)$ τις μετρήσεις των λόγων (15-17) με στατιστικά λάθη w_k και το άγνωστο άνυσμα λύσης

$$F = \begin{pmatrix} G_{M1} \\ G_{E2} \\ G_{C2} \end{pmatrix} \quad (18)$$

οδηγούμαστε στο υπερ-ορισμένο σύστημα εξισώσεων

$$P(\vec{q}; \mu) = D(\vec{q}; \mu) \cdot F(Q^2) \quad (19)$$

Έχοντας N μετρήσεις των λόγων (15-17) από τα διαφορετικά \mathbf{q} και μ , ο πίνακας $D(\mathbf{q}; \mu)$ είναι ένας $N \times 3$ πίνακας γνωστών κινηματικών σταθερών. Η λύση F προκύπτει από την ελαχιστοποίηση του συνολικού χ^2 [18]

$$\chi^2 = \sum_{k=1}^N \left(\frac{\sum_{j=1}^3 D_{kj} F_j - P_k}{w_k} \right)^2 \quad (20)$$

Ορίζοντας $D'_{kj} = D_{kj} / w_k$ και $P'_k = P_k / w_k$, ($k = 1, 2, \dots, N$, $j = 1, 2, 3$), η λύση δίνεται από την ανάλυση απειριζόμενης τιμής (singular value decomposition) του πίνακα $D'_{kj}(\mathbf{q}; \mu)$

$$D' = U \cdot \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) \cdot V^T \quad (21)$$

με U έναν $N \times 3$ πίνακα, V έναν 3×3 πίνακα και τα $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ τις θετικές τιμές απειρισμού του D' . Επομένως, οι παράγοντες μετάβασης δίνονται από την έκφραση

$$F = V \cdot \text{diag}(1/\lambda_1, 1/\lambda_2, 1/\lambda_3) \cdot (U^T \cdot P') \quad (22)$$

Τα στατιστικά σφάλματα w_k των μετρήσεων και τα τελικά σφάλματα των παραγόντων προσδιορίζονται από αλγόριθμο τύπου jack-knife.

III. Αποτελέσματα από την ΚΧΔ χωρίς δυναμικά κουάρκς

Κουάρκς σθένους με δράση Wilson χρησιμοποιήθηκαν σε 200 σχηματισμούς σε $\beta = 6.0$ θεωρία χωρίς δυναμικά κουάρκς πάνω σε πλέγμα $32^3 \times 64$. Η μάζα του πρωτονίου στο χειραλικό όριο ορίζει τη σταθερά πλέγματος $a = 0.098$ fm. Η χωρική διάσταση $L = 3.1$ fm επιτρέπει ελάχιστη ορμή 400 MeV και αντίστοιχη ελάχιστη τιμή Q^2 κοντά στο σημείο του πειράματος στο Bates [3]. Για να αυξήσουμε την επικάλυψη με τα φυσικά βαρυόνια N και Δ , εφαρμόζουμε αναλλοίωτο μετασχηματισμό Wuppertal smearing στα κουάρκ πεδία

$$\psi_{\text{smear}}(x, t) = \sum_y (1 + \alpha H)^n(x, y) \psi(y, t) \quad (23)$$

όπου H ο πίνακας

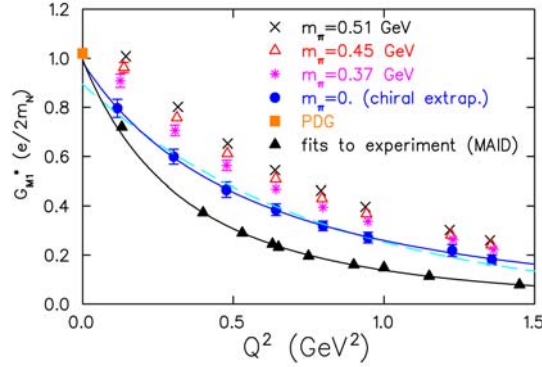
$$H(x, y; U(t)) = \sum_{i=1}^3 (U_i(x, t) \delta_{x, y-i} + U_i^+(x-i, t) \delta_{x, y+i}) \quad (24)$$

και οι παράμετροι $\alpha = 4.0$ και $n = 50$. Επιλέγουμε κουάρκ μάζες σε παράμετρο $\kappa = 0.1554, 0.1558$ και 0.1562 , που δίνουν μάζα πιονίου 0.51, 0.45 και 0.37 GeV, αντίστοιχα. Στο Σχήμα 1 δείχνεται ο μαγνητικός διπολικός παράγοντας, κανονικοποιημένος ως

$$G_{M1}^*(Q^2) = \frac{1}{3} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{Q^2}{(m_N + m_\Delta)^2}}} G_{M1}(Q^2) \quad (25)$$

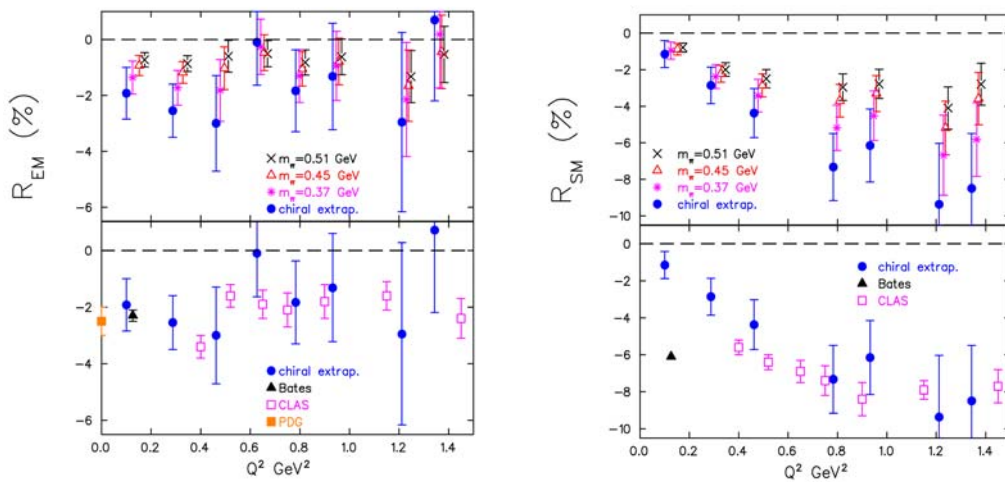
καθώς και το χειραλικό όριο με γραμμική επέκταση στο m_π^2 . Απόκλιση εμφανίζεται με τα πειραματικά σημεία που έχουν εξαχθεί με το μοντέλο MAID. Οι συνεχείς καμπύλες προκύπτουν με προσαρμογή στην φαινομενολογική μορφή, η οποία γενικά περιγράφει ικανοποιητικά τα δεδομένα.

$$(1 + \alpha Q^2) \times \exp(-\gamma Q^2) \times \left(1 + \frac{Q^2}{0.71}\right)^{-2}$$



Σχήμα 1: G_{M1}^* ως συνάρτηση του Q^2 . Οι συμπαγείς κύκλοι είναι τα αποτελέσματα στο χειραλικό όριο και τα συμπαγή τρίγωνα είναι αποτελέσματα από προσαρμογή των πειραματικών ενεργών διατομών στο φαινομενολογικό μοντέλο MAID. Το τετράγωνο είναι το αποτέλεσμα του Particle Data Group. Η διακεκομμένη γραμμή είναι η προσαρμογή των δεδομένων του πλέγματος στην μορφή $\alpha \exp(-\gamma Q^2)$.

Οι λόγοι R_{EM} και R_{SM} παρουσιάζονται στο Σχήμα 2. Όμοια, γραμμική επέκταση στο χειραλικό όριο έχει εφαρμοστεί. Τα σημεία είναι αρκετά ακριβή ώστε να αποκλείουν την τιμή μηδέν ακόμη και για μεγάλες μάζες πιονίου, υποδεικνύοντας έτσι τη σημασία και άλλων μηχανισμών πέραν του πιονικού νέφους στην παραμόρφωση του πιονίου. Ενώ ο λόγος R_{EM} συμφωνεί γενικά με τα πειραματικά σημεία, αποκλίσεις είναι εμφανείς στα σημεία με χαμηλό Q^2 για τον λόγο R_{SM} , καθώς τα σημεία από το πλέγμα τείνουν σε μικρότερες τιμές. Στην πρόσφατη εργασία [19], η μετάβαση $\gamma N \rightarrow \Delta$ μελετήθηκε με φαινομενολογική σχετικιστική χειραλική θεωρία, όπου και δείχτηκε ότι οι μη-αναλυτικές συνεισφορές στους λόγους κάνουν τις τιμές R_{SM} του πλέγματος συνεπείς με τις πειραματικές τιμές. Χειραλικά φαινόμενα παράγουν σημαντικές αποκλίσεις από τη γραμμική σχέση με το m_π^2 και πρέπει να ληφθούν υπόψη για τη σωστή προσέγγιση του χειραλικού ορίου.



Σχήμα 2: R_{EM} και R_{SM} ως συνάρτηση του Q^2 . Στα πάνω γραφήματα δίνονται τα αποτελέσματα για $\kappa=0.1554$ (σταυρός x), $\kappa=0.1558$ (τρίγωνα) και $\kappa=0.1562$ (αστερίσκοι). Οι συμπαγείς κύκλοι είναι τα αποτελέσματα στο χειραλικό όριο. Στα κάτω γραφήματα δίνεται το χειραλικό όριο μαζί με τα πειραματικά δεδομένα. Το τετράγωνο είναι το αποτέλεσμα του Particle Data Group.

IV. Αποτελέσματα από την πλήρη ΚΧΔ

Η μετάβαση $\gamma N \rightarrow \Delta$ μελετάται σε πλέγματα με 2+1 γεύσεις δυναμικών κουάρκς, τα οποία έχουν κατασκευαστεί από την ομάδα MILC. Τα δυναμικά κουάρκς προσομοιώνονται με τη βελτιωμένη δράση τύπου staggered (Asqtad), η οποία εγγυάται καλύτερες ιδιότητες βάθμισης για τη δεδομένη πλεγματική σταθερά $a = 0.125$ fm. Χρησιμοποιήσαμε τις συλλογές με όγκο $20^3 \times 64$ με τη μάζα του παράξενου κουάρκ στην τιμή $am_s = 0.05$ και τις δύο ελαφρές γεύσεις στις τιμές $am_{u,d} = 0.03$ και 0.02 . Επιπλέον, χρησιμοποιήσαμε τη συλλογή όγκου $28^3 \times 64$, δηλαδή χωρικού όγκου $(3.5 \text{ fm})^3$ με τιμές $am_s = 0.05$ και $am_{u,d} = 0.01$. Εφαρμόστηκε HYP smearing στα γκλουονικά πεδία, καθώς είναι γνωστό ότι βελτιώνει τη χειραλική ιδιότητα των κουάρκς. Χρησιμοποιούμε ένα “υβριδικό” σχήμα, όπου τα κουάρκς σθένους έχουν τη Domain Wall δράση. Το σχήμα αυτό θεωρείται ένας λογικός συμβιβασμός δεδομένων των τεχνικών δυσκολιών που εισάγουν τα ελαφρά χειραλικά δυναμικά κουάρκς και έχει ήδη εφαρμοστεί σε φασματοσκοπία βαρέων κουάρκς και υπολογισμούς νουκλεονικής δομής [15]. Η ομάδα LHP έχει συντονίσει την παράμετρο κουάρκ μάζας $(am)^{DW}$ στη δράση Domain Wall, ώστε η μάζα του πιονίου που υπολογίζεται από τα Domain Wall κουάρκς σθένους να συμπίπτει με τη μάζα του ελαφρύτερου πιονίου που υπολογίζεται με την δράση Asqtad. Οι σχετικές παράμετροι και αδρονικές μάζες δίνονται στον Πίνακα 1.

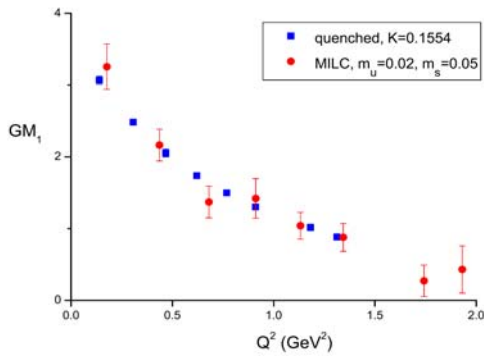
Volume	$(am_{u,d})^{sea}$	$(am_s)^{sea}$	$(am_q)^{DW}$	$m_\pi^{DW}(\text{GeV})$	m_π/m_p	$m_N(\text{GeV})$	$m_\Delta(\text{GeV})$
$20^3 \times 32$	0.03	0.05	0.0478	0.606(2)	0.588(7)	1.392(9)	1.662(21)
$20^3 \times 32$	0.02	0.05	0.0313	0.502(4)	0.530(11)	1.255(19)	1.586(36)
$28^3 \times 32$	0.01	0.05	0.0138	0.364(1)	0.387(7)	1.196(25)	1.643(63)

Πίνακας 1: Παράμετροι μάζας για τα δυναμικά κουάρκς (Asqtad) και τα κουάρκς σθένους (DW) μαζί με τις αντίστοιχες μάζες μεσονίων, από την αναφορά [20]. Στις δύο τελευταίες στήλες δίνουμε τις μάζες νουκλεονίου και Δ από 125 σχηματισμούς για $am_{u,d} = 0.03$, 75 για $am_{u,d} = 0.02$ και 38 για $am_{u,d} = 0.01$.

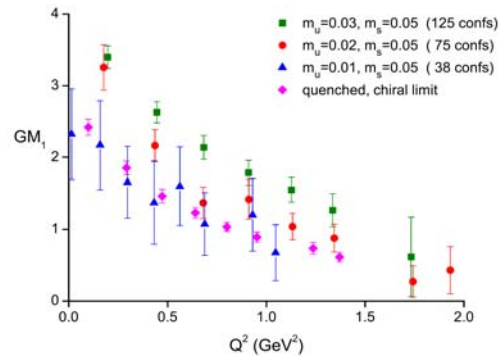
Η παράμετρος ύψους του Domain Wall ορίζεται στο $am_0 = 1.7$. Οριακές συνθήκες Dirichlet επιβάλλονται στο $t/a = 32$, καθώς περιοριζόμαστε στο μισό χρονικό εύρος του πλέγματος. Το εύρος της πέμπτης διάστασης που εισάγει η Domain Wall δράση ορίστηκε στο $L_5 = 16$, καθώς έχειδειχτεί [20] ότι για τα πλέγματα αυτά η υπολειπόμενη κουάρκ μάζα, που υπολογίζεται από την απόκλιση του πενταδιάστατου ψευδοανυσματικού ρεύματος, είναι τουλάχιστον μία τάξη μεγέθους μικρότερη της αρχικής μάζας. Εφαρμόστηκε Wuppertal smearing στα πεδία κουάρκς με παραμέτρους $a \sim 3$ και $n = 30$. Η απόσταση των τελεστών πηγής και καταστροφής των βαρυνίων στον Ευκλείδειο χρόνο είναι 1.25 fm. Σε αυτή την εργασία χρησιμοποιήθηκε ο συνήθης τοπικός τελεστής του ρεύματος $\bar{\psi}(x)\gamma_\mu\psi(x)$. Ο τελεστής αυτός δεν διατηρείται ακριβώς και τα στοιχεία μήτρας του κανονικοποιούνται με έναν παράγοντα Z_V , ο οποίος υπολογίστηκε μη διαταρακτικά από το ηλεκτρικό φορτίο του πρωτονίου, ως η $Q^2 = 0$ τιμή του ελαστικού ηλεκτρικού παράγοντα μορφής.

Προκαταρκτικά αποτελέσματα δίνονται από την ανάλυση 125 σχηματισμών για $am_{u,d} = 0.03$, 75 για $am_{u,d} = 0.02$ και 38 για $am_{u,d} = 0.01$. Στο Σχήμα 3 ο μαγνητικός διπολικός παράγοντας συγκρίνεται για την πλήρη και χωρίς δυναμικά κουάρκς θεωρία. Δεν εμφανίζονται διαφορές για αυτή την πιονική μάζα καθώς και ο στατιστικός θόρυβος στην πλήρη θεωρία είναι μεγάλος, λόγω του μικρού μεγέθους της συλλογής. Στο Σχήμα 4 ο παράγοντας G_M δίνεται για τα πλέγματα που έχουν υπολογιστεί ως τώρα και συγκρίνεται με το χειραλικό όριο της θεωρίας χωρίς δυναμικά κουάρκς. Χειραλικό όριο δεν μπορεί να δοθεί για την πλήρη θεωρία, λόγω του μεγάλου στατιστικού σφάλματος, αλλά ήδη παρατηρείται ότι η τάση στην πλήρη θεωρία είναι προς χαμηλότερες τιμές σε σχέση με την μη πλήρη θεωρία, κάτι που αναμένεται από τις πειραματικές μετρήσεις. Ο σχετικά μικρός όγκος και το πλήθος των σχηματισμών οδηγεί σε αυξημένο στατιστικό θόρυβο. Γι' αυτό και οι τετραπολικό παράγοντες που

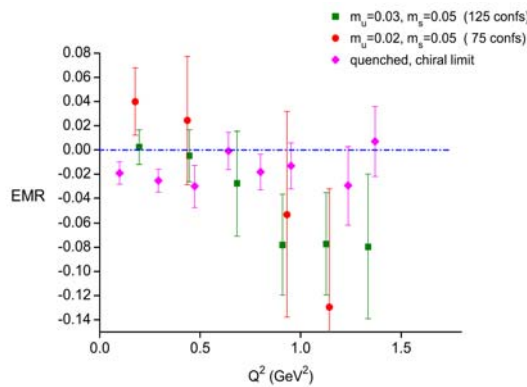
δείχνονται στα Σχήματα 5 και 6 μέσω των αντίστοιχων λόγων EMR και CMR δεν προσδιορίστηκαν επαρκώς ακόμη. Μεγαλύτερο πλήθος σχηματισμών πρέπει να αναλυθεί πριν επιχειρηθούν συγκρίσεις με τη θεωρία χωρίς δυναμικά κουάρκς.



Σχήμα 3: G_{M1} σε μονάδες πυρηνικής μαγνητόνης ($e/2m_N$) στη θεωρία χωρίς δυναμικά κουάρκς και στην πλήρη θεωρία με $N_f = 2+1$ γεύσεις σε μάζα πιονίου $m_\pi \sim 500$ MeV.

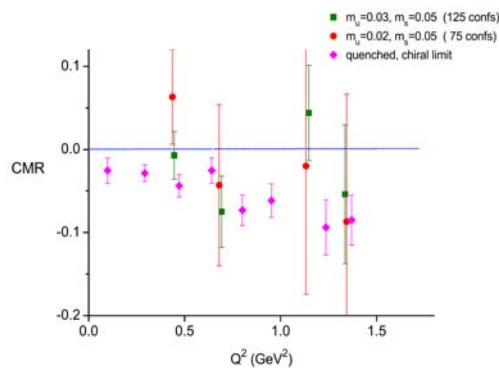


Σχήμα 4: G_{M1} σε μονάδες ($e/2m_N$) για τα πλέγματα του MILC και το χειραλικό όριο της θεωρίας χωρίς δυναμικά κουάρκς.



Σχήμα 5: Ο λόγος EMR για τα πλέγματα του MILC και κουάρκ μάζες $am_{u,d} = 0.03, 0.02$ μαζί με το χειραλικό όριο της θεωρίας χωρίς δυναμικά κουάρκς.

Σχήμα 6: Ο λόγος CMR για τα πλέγματα του MILC και κουάρκ μάζες $am_{u,d} = 0.03, 0.02$ μαζί με το χειραλικό όριο της θεωρίας χωρίς δυναμικά κουάρκς.



V. Συμπεράσματα

Η παραμόρφωση του πρωτονίου είναι ένα ενδιαφέρον φαινόμενο που εξαρτάται από τη δυναμική στην ΚΧΔ. Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν καθαρά την ύπαρξη τετραπολικών πλατών στη μετάβαση $\gamma N \rightarrow \Delta$. Ο υπολογισμός των παραγόντων μετάβασης μέσω της πλεγματικής ΚΧΔ κατέληξε σε μη μηδενικούς, αρνητικούς λόγους R_{EM} και R_{SM} . Για να εξαχθεί αυτό το συμπέρασμα, απαιτούνται ακριβείς μετρήσεις αυτών των λόγων σε πλέγμα. Αυτό κατέστη δυνατό με τη βελτιστοποίηση των βαρυονικών τελεστών και των στοιχείων μήτρας μετάβασης, απαιτώντας τη μέτρηση του μέγιστου δυνατού αριθμού διανυσμάτων ορμής και διεύθυνσης του ρεύματος. Η ύπαρξη μη μηδενικών τιμών για τους λόγους στην ΚΧΔ χωρίς δυναμικά κουάρκ σε σχετικά μεγάλες μάζες πιονίου οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το πιονικό νέφος δεν είναι η μοναδική αιτία της παραμόρφωσης. Ένα σημαντικό βήμα για πρόοδο είναι η κατανόηση της εξάρτησης των παραγόντων μετάβασης από τη μάζα των κουάρκ, η οποία θα επιτρέψει την αξιόπιστη προέκταση των αποτελεσμάτων στην περιοχή των φυσικών τιμών των κουάρκ. Υπολογισμοί με την πλήρη ΚΧΔ με ελαφρά κουάρκ σε μεγάλα πλέγματα αποτελούν το ιδανικό εργαλείο για την κατανόηση αυτών των φαινομένων. Τέτοιοι υπολογισμοί είναι ήδη σε εξέλιξη αλλά πρέπει να σημειωθεί ότι είναι πάρα πολύ απαιτητικοί σε CPU. Γι' αυτό το λόγο, συμβιβασμοί στο μέγεθος του πλέγματος -το οποίο επηρεάζει το στατιστικό θόρυβο λόγω γκλουονικών πεδίων- και στην τιμή της μάζας των Domain Wall Valence κουάρκ -η οποία επηρεάζει το κόστος σε CPU- είναι αναπόφευκτοι. Ωστόσο, οι μακροπρόθεσμες προοπτικές προσβλέπουν ότι μέσω τέτοιων υπολογισμών ο μηχανισμός που προκαλεί την παραμόρφωση του πρωτονίου θα γίνει κατανοητός με την ΚΧΔ.

Αναφορές

1. G. Blanpied *et al.*, Phys. Rev. Lett. **79**, 4337 (1997).
2. R. Beck *et al.*, Phys. Rev. C **61**, 035204 (2000).
3. N. F. Sparveris *et al.*, Phys. Rev. Lett. **94**, 022003 (2005) ; C. Mertz *et al.*, Phys. Rev. Lett. **86**, 2963 (2001).
4. K. Joo *et al.*, Phys. Rev. Lett. **88**, 122001 (2000).
5. C. N. Papanicolas, Eur. Phys. J. **A18**, 141 (2003).
6. A. J. Buchmann and E. M. Henley, Phys. Rev. C **63**, 015202 (2001).
7. N. Isgur, G. Karl and R. Koniuk, Phys. Rev. D **25** (1982) 2394 ; S. Capstick and G. Karl, Phys. Rev. D **41** (1990) 2767.
8. G. Kalbermann and J. M. Eisenberg, Phys. Rev. D **28**, 71 (1982).
9. C. Alexandrou, Ph. de Forcrand and A. Tsapalis, Phys. Rev. D **66**, 094503 (2002) ; Phys. Rev D **68**, 074504 (2003) ; Nucl. Phys. **A721**, 907 (2003).
10. D. B. Leinweber, T. Draper and R. M. Woloshyn, Phys. Rev. D **48**, 2230 (1993).
11. C. Alexandrou *et al.*, Phys. Rev. D **69**, 114506 (2004).
12. C. Alexandrou *et al.*, Phys. Rev. Lett. **94**, 021601 (2005).
13. C. Alexandrou, G. Koutsou, J. W. Negele and A. Tsapalis, in preparation.
14. C. Alexandrou *et al.*, Proc. Sci. LAT2005 (2005) 091.
15. LHP Collaboration, Proc. Sci. LAT2005 (2005) 056.
16. H. F. Jones and M. C. Scadron, Ann. Phys. (N.Y.) **81**, 1 (1973).
17. LHP and SESAM Collaboration, Phys. Rev. D **66**, 034506 (2002).
18. Ph. Hagler *et al.*, Phys. Rev. D **68**, 034505 (2003).
19. V. Pascalutsa and M. Vanderhaeghen, Phys. Rev. Lett. **95** (2005) 232001.
20. LHP Collaboration, Nucl. Phys. (Proc. Suppl.) **140**, 255 (2005).

Σύντομο Βιογραφικό Σημείωμα

Ο Δρ. Αντώνιος Τσάπαλης γεννήθηκε και μεγάλωσε στην Αθήνα. Σπούδασε στο Πανεπιστήμιο Αθηνών, από όπου αποφοίτησε με πτυχίο Φυσικού το 1993. Στη συνέχεια έγινε δεκτός για μεταπτυχιακές σπουδές στο Κέντρο Θεωρητικής Φυσικής του Τμήματος Φυσικής του Τεχνολογικού Ινστιτούτου Μασσαχουσέτης (MIT) στη Βοστώνη (ΗΠΑ) με υποτροφία έρευνας-διδασκαλίας, από όπου αποφοίτησε το 1998 με τον τίτλο του Διδάκτορα (PhD) στη Θεωρητική Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων. Υπηρέτησε στον Ελληνικό Στρατό (1/1999-7/2000), όπου και ειδικεύτηκε στις Διαβιβάσεις και την Πληροφορική. Εργάστηκε ως μεταδιδακτορικός ερευνητής στη Θεωρητική Φυσική στο Πανεπιστήμιο του Wuppertal (Γερμανία) (9/2001-9/2002), στο Πανεπιστήμιο Κύπρου (10/2002-9/2004) και στο Πανεπιστήμιο Αθηνών (Ι.Ε.Σ.Ε.), υποστηριζόμενος από το πρόγραμμα “Πυθαγόρας” του ΥΠΕΠΘ (1/2005-σήμερα). Το ερευνητικό του έργο εστιάζεται στη μελέτη της φυσικής αδρονίων με χρήση της Κβαντικής Χρωμοδυναμικής Πλέγματος, για την οποία και συνεργάζεται με ερευνητές από τα πανεπιστήμια MIT, Κύπρου και το CERN. Έχει διδάξει ως ωρομίσθιος καθηγητής στον Τομέα Φυσικών Επιστημών της Σχολής Ναυτικών Δοκίμων κατά το ακαδημαϊκό έτος 2000-2001 το μάθημα Θεωρητικής Μηχανικής στο Β΄ έτος Μαχίμων και Μηχανικών (Στατική) και Γ΄ έτος Μαχίμων και Μηχανικών (Κινηματική-Δυναμική). Κατά τα έτη 2004-2005 έως και σήμερα διδάσκει το μάθημα Θεωρητικής Μηχανικής στο Γ΄ έτος Μαχίμων και Μηχανικών (Κινηματική-Δυναμική) και το μάθημα Φυσικής Προπαιδευομένων Αλλοδαπών.

Ανάπτυξη νέας μεθοδολογίας για τη σύνθεση ετεροκυκλικών ενώσεων με βιολογική δράση και μελέτη της δομής τους με φασματοσκοπικές μεθόδους

Α. Δέτση και Ό. Ιγγλέση-Μαρκοπούλου

Περίληψη

Τα μικρά ετεροκυκλικά μόρια αποτελούν υψηλά ενεργοποιημένες βασικές μοριακές δομές και το κύριο δομικό χαρακτηριστικό μεγάλου αριθμού φυσικών προϊόντων και συνθετικών παραγώγων με σημαντική βιολογική και φαρμακευτική δράση. Η παρούσα εργασία αναφέρεται στην ανάπτυξη νέων μεθοδολογιών για τη σύνθεση αζωτούχων ετεροκυκλικών ενώσεων, με στόχο τη σύνθεση “βιβλιοθηκών” νέων παραγώγων που φέρουν ποικιλία υποκαταστατών, ώστε να πραγματοποιηθούν μελέτες της σχέσης δομής-βιολογικής δράσης. Οι μεθοδολογίες αναπτύχθηκαν αρχικά στην υγρή φάση και, στη συνέχεια, μεταφέρθηκαν με επιτυχία στη στερεή φάση, με τη χρησιμοποίηση των πλέον σύγχρονων τεχνικών οργανικής σύνθεσης. Επίσης, θα παρουσιαστεί η μελέτη και ο χαρακτηρισμός της δομής των νέων παραγώγων με φασματοσκοπία πυρηνικού μαγνητικού συντονισμού (NMR) και φασματοσκοπία υπερύθρου (FT-IR).

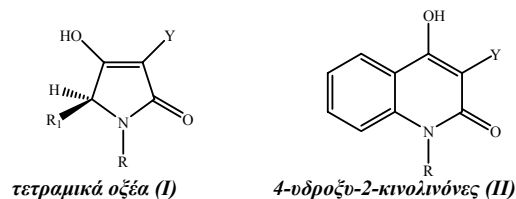
Abstract

Small heterocyclic molecules are highly functionalized molecular scaffolds and constitute the key structural moiety of numerous natural products and synthetic analogues which exhibit a wide variety of biological and pharmaceutical activity. In the present paper we will describe the development of novel methodologies for the synthesis of nitrogen heterocycles bearing various substituents, in order to construct libraries of compounds to be used for structure-activity relationship studies. The synthetic approaches were developed first in solution and then were successfully adapted to the solid phase, using combinatorial chemistry techniques. In addition, structure determination of the synthesized compounds using nuclear magnetic resonance (NMR) and infrared (IR) spectroscopy will be presented.

I. Εισαγωγή

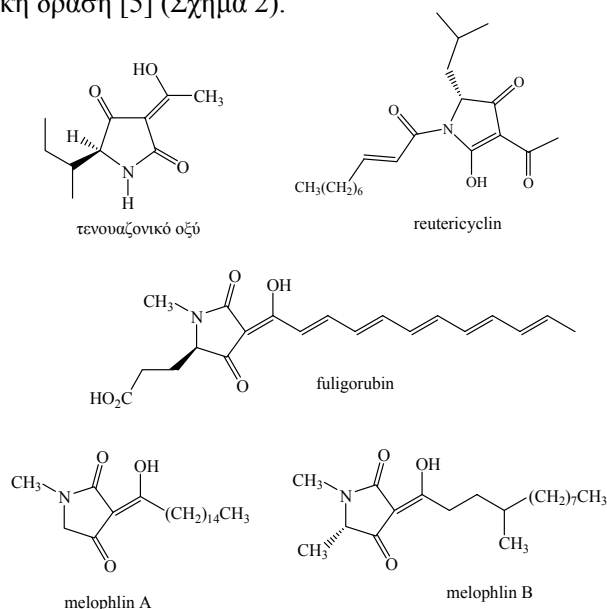
Οι ενώσεις που εμφανίζουν βιολογική δραστηριότητα περιέχουν συχνά ετεροκυκλικές δομές ως δομικές μονάδες. Τα ετεροκυκλικά παράγωγα, φυσικά ή συνθετικά προϊόντα, παρουσιάζουν μεγάλο εύρος φαρμακολογικών ιδιοτήτων και τροποποιήσεις στη βασική τους δομή -με την προσθήκη υποκαταστατών- παρέχουν μεγάλο βαθμό δομικής ποικιλίας, που είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τη μελέτη της σχέσης δομής-βιολογικής δράσης. Ως αποτέλεσμα, η ανάπτυξη μεθοδολογίας σύνθεσης ετεροκυκλικών ενώσεων αποτελεί το αντικείμενο ενασχόλησης πολλών ερευνητικών ομάδων.

Τα τετραμικά οξέα (2,4-πυρρολιдиноδιόνες) (I) και οι 4-υδροξυ-2-κινολινόνες (II) (Σχήμα 1) ανήκουν στην κατηγορία των ετεροκυκλικών αζωτούχων ενώσεων και αποτελούν δομικά χαρακτηριστικά μεγάλου αριθμού φυσικών προϊόντων που εμφανίζουν ευρύ φάσμα βιολογικής δραστηριότητας.



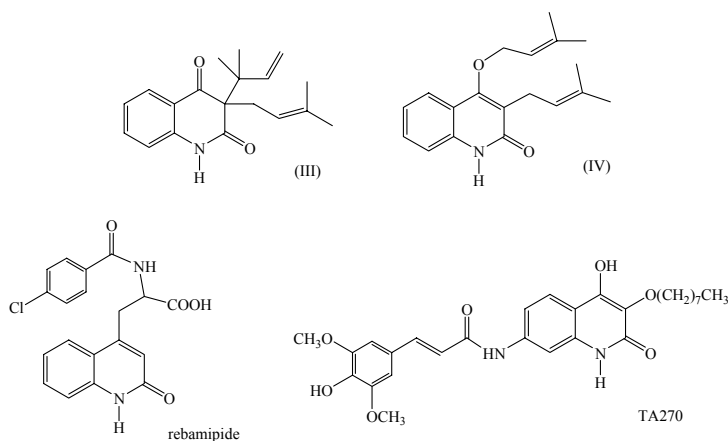
Σχήμα 10

Τα τετραμικά οξέα αποτελούν μια οικογένεια ετεροκυκλικών αζωτούχων ενώσεων πενταμελούς δακτυλίου που φέρουν μεγάλη ποικιλία υποκαταστατών στον ετεροκυκλικό δακτύλιο και εμφανίζουν σημαντική αντιβιοτική, κυτταροτοξική, αντιμυκητιακή, αντιβακτηριακή και αντιοξειδωτική δράση [1]. Χαρακτηριστικά παραδείγματα φυσικών προϊόντων που περιέχουν το δακτύλιο του τετραμικού οξέος είναι το τενουαζονικό οξύ, που εμφανίζει κυτταροτοξική δράση [2], η fuligorubin A, μια χρωστική ουσία που απομονώνεται από το μύκητα *Fuligo septica* [3], το νέο αντιβιοτικό reutericyclin, που απομονώθηκε ως προϊόν μεταβολισμού του μικροοργανισμού *Lactobacillus reuteri* [4], και οι melophlin A και B, που απομονώθηκαν από το θαλάσσιο σπόγγο *Melophlus sarassinorum* και εμφανίζουν αξιόλογη αντικαρκινική δράση [5] (Σχήμα 2).



Σχήμα 2: Χαρακτηριστικά παραδείγματα φυσικών προϊόντων που περιέχουν το δακτύλιο του τετραμικού οξέος.

Οι κινολινόνες απαντώνται ως φυσικά προϊόντα, κυρίως αλκαλοειδή, ως ενδιάμεσα στο βιοσυνθετικό μονοπάτι άλλων φυσικών προϊόντων αλλά και ως συστατικά προϊόντων μεταβολισμού ορισμένων μικροοργανισμών. Πολλά από αυτά τα φυσικά προϊόντα παρουσιάζουν αντιμικροβιακή δράση και σημαντική κυτταροτοξικότητα σε φυτικούς και ζωικούς οργανισμούς [6, 7]. Τα αλκαλοειδή κινολίνης της μορφής (IV) και (V) (Σχήμα 3), που απομονώθηκαν από εκχύλισμα του φυτού *Euodia roxburghiana*, επέδειξαν σημαντική δράση ως αναστολείς της ανάστροφης τρανσκριπτάσης του ιού HIV [8]. Οι 3-υποκαταστημένες-4-υδροξυ-2-κινολινόνες εμφανίζουν σημαντική δράση ως ανταγωνιστές της γλυκίνης στον υποδοχέα του N-μεθυλο-D-ασπαρτικού οξέος και βρίσκουν εφαρμογή στην αντιμετώπιση νευροεκφυλιστικών ασθενειών, όπως η νόσος Alzheimer, η επιληψία, η νόσος Parkinson κ.ά. [9].



Σχήμα 3: Χαρακτηριστικά παραδείγματα κινολινόνων με βιολογική δράση.

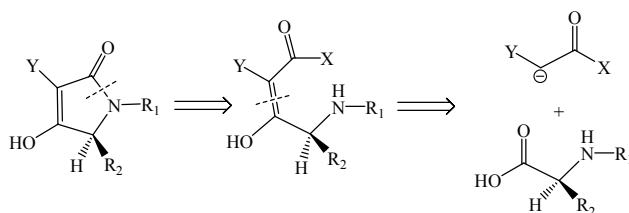
Εξάλλου, οι κινολινόνες εμφανίζουν αξιόλογη αντιφλεγμονώδη δράση και ανήκουν στην κατηγορία των μη στεροειδών αντιφλεγμονωδών φαρμάκων. Αμιδικά τετραζολυλο παράγωγα 4-υδροξυ-2-κινολινόνων έχουν παρασκευαστεί ως δομικά ανάλογα των γνωστών αντιφλεγμονωδών φαρμάκων intrazol και rygoxikam [10], ενώ πρόσφατα παρασκευάστηκαν νέα παράγωγα κινολινόνων που εμφανίζουν αντιοξειδωτικές ιδιότητες σε συνδυασμό με άλλη φαρμακολογική δράση, όπως η rebamipide, αντιοξειδωτικό με ισχυρή δράση κατά του έλκους [11, 12] και η TA-270, που εμφανίζει συνδυασμένη αντιοξειδωτική και αντιφλεγμονώδη δράση και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως φάρμακο για τη θεραπεία του βρογχικού άσθματος [13] (Σχήμα 3).

Στα πλαίσια της ερευνητικής μας δραστηριότητας, που αφορά στη σύνθεση νέων ετεροκυκλικών παραγώγων με βιολογική δράση, αναπτύξαμε νέες μεθοδολογίες για τη σύνθεση τετραμικών οξέων και 4-υδροξυ-2-κινολινόνων που φέρουν ποικιλία υποκαταστατών.

II. Σύνθεση 3-υποκατεστημένων-4-υδροξυ-τετραμικών οξέων

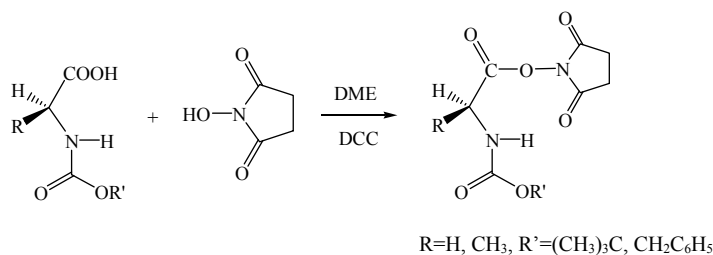
A. Σύνθεση σε υγρή φάση

Ο σχεδιασμός της μεθόδου σύνθεσης τετραμικών οξέων πραγματοποιήθηκε με βάση την παρακάτω ρετροσυνθετική προσέγγιση (Σχήμα 4):



Σχήμα 4

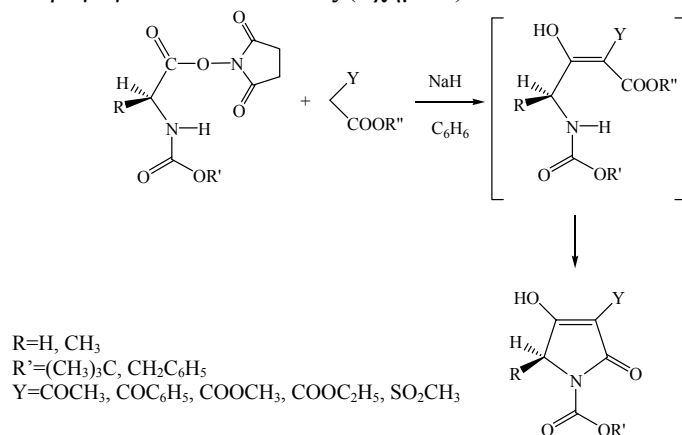
Απαιτούμενες πρόδρομες ενώσεις είναι ένα ισχυρό ακυλιωτικό μέσο και ενώσεις ενεργού μεθυλενίου. Ως ακυλιωτικά μέσα επιλέχθηκαν οι N-υδροξυηλεκτριμιδοεστέρες N-αλκοξυκαρβονυλο-α-αμινοξέων, οι οποίοι παρασκευάζονται με απλό τρόπο μέσω αντίδρασης του N-αλκοξυκαρβονυλο-α-αμινοξέος με N-υδροξυηλεκτριμίδιο σε γραμομοριακή αναλογία 1:1, παρουσία ισομοριακής ποσότητας δικυκλοεξυλοκαρβοδιμιδίου (DCC) σε διαλύτη 1,2-διμεθοξυαιθάνιο (DME) (Σχήμα 5).



Σχήμα 5: Σύνθεση ενεργών εστέρων α-αμινοξέων.

Οι παραγόμενοι εστέρες είναι προϊόντα κρυσταλλικά και λαμβάνονται σε πολύ καλές αποδόσεις και καθαρή μορφή.

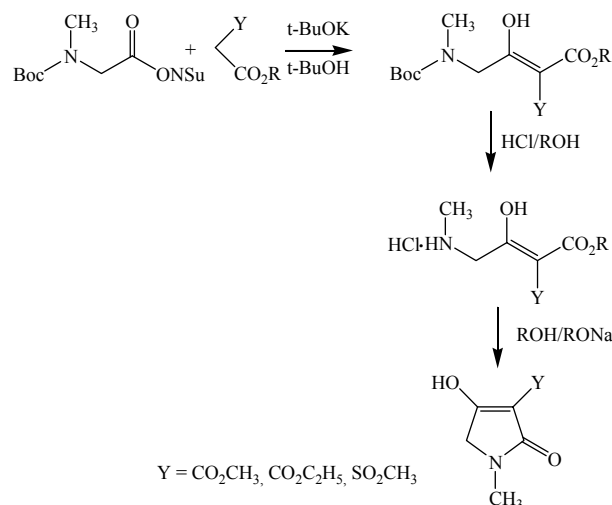
Οι ενώσεις ενεργού μεθυλενίου που χρησιμοποιήθηκαν για τις αντιδράσεις C-ακυλίωσης είναι ενώσεις εμπορικά διαθέσιμες και περιλαμβάνουν μηλονικούς και ακυλοξικούς εστέρες. Οι αντιδράσεις C-ακυλίωσης λαμβάνουν χώρα σε βασικό περιβάλλον (υδρίδιο του νατρίου σε διαλύτη άνυδρο βενζόλιο) και έχουν ως αποτέλεσμα την παραλαβή των N-αλκοξυκαρβονυλο-3-υποκατεστημένων-4-υδροξυ-τετραμικών οξέων, χωρίς απομόνωση των ενδιάμεσων παραγώγων C-ακυλίωσης (Σχήμα 6).



Σχήμα 6: Σύνθεση N-αλκοξυκαρβονυλο-3-υποκατεστημένων τετραμικών οξέων.

Τα προϊόντα κυκλοποίησης λαμβάνονται σε ικανοποιητικές αποδόσεις (40-80%) και καθαρή, στερεή μορφή, και είναι άγνωστα στη βιβλιογραφία. Η μέθοδος εφαρμόστηκε με επιτυχία στη σύνθεση οπτικώς ενεργών N-αλκοξυκαρβονυλο-3-υποκατεστημένων-4-υδροξυ-τετραμικών οξέων. Πράγματι, οι αντιδράσεις των μηλονικών εστέρων με τους N-υδροξυ-ηλεκτριμιδοεστέρες της Z-L-αλανίνης και Boc-L-αλανίνης οδηγούν στην απομόνωση των αντίστοιχων οπτικώς ενεργών τετραμικών οξέων. Η ικανοποιητική επαναληψιμότητα στις μετρήσεις των τιμών ειδικής γωνίας στροφής των οπτικώς ενεργών παραγώγων, που λαμβάνονται από διαφορετικές αντιδράσεις, είναι ενδεικτική της δυνατότητας εφαρμογής της μεθόδου στη σύνθεση τετραμικών οξέων, που διαθέτουν οπτικώς ενεργό κέντρο στη θέση 5 του τετραμικού δακτυλίου. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερος σημαντικό, δεδομένου ότι η ύπαρξη ασύμμετρου κέντρου στη θέση 5 του τετραμικού δακτυλίου αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες εμφάνισης βιολογικής δράσης [14, 15].

Η μέθοδος επεκτάθηκε και στη σύνθεση των αντίστοιχων N-μεθυλο-3-υποκατεστημένων τετραμικών οξέων, με τη χρήση της tert-βουτυλοξυκαρβονυλο-σαρκοσίνη (Boc-σαρκοσίνης) ως πρώτη ύλης (Σχήμα 7).



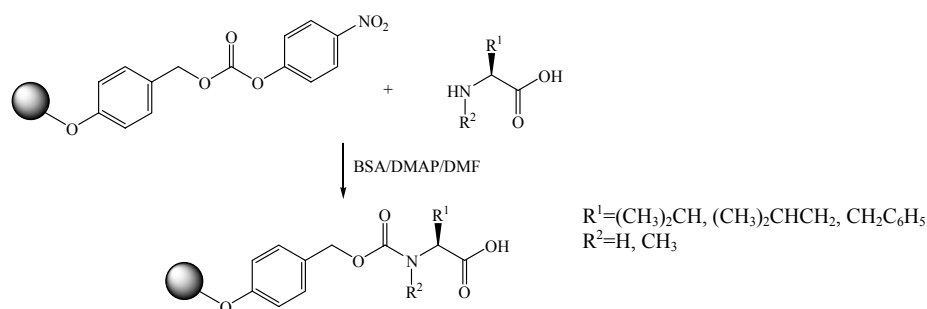
Σχήμα 7: Σύνθεση N-μεθυλο-3-υποκατεστημένων τετραμικών οξέων.

Οι αντιδράσεις C-ακυλίωσης των μηλονικών εστέρων και του μεθυλσουλφονυλοξικού αιθυλεστέρα από τον N-υδροξυηλεκτριμιδοεστέρα της Boc-σαρκοσίνης οδηγούν στην απομόνωση των αντίστοιχων α-υποκατεστημένων-γ-αμινο-β-κετο-εστέρων. Η απομάκρυνση της Boc-ομάδας πραγματοποιείται με επίδραση κορεσμένου διαλύματος HCl στην κατάλληλη αλκοόλη, οπότε απομονώνονται τα αντίστοιχα υδροχλωρικά άλατα, η κατεργασία των οποίων με διάλυμα αλκοξειδίου του νατρίου σε αλκοόλη έχει ως αποτέλεσμα την κυκλοποίηση προς τα αντίστοιχα N-μεθυλο-3-υποκατεστημένα-τετραμικά οξέα [16].

B. Σύνθεση σε στερεή φάση

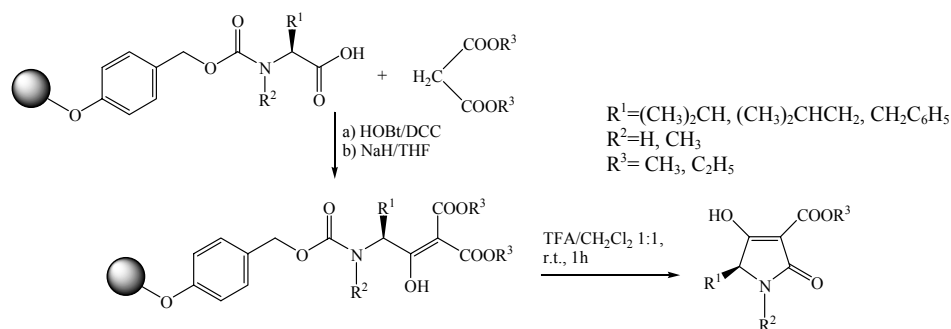
Η οργανική σύνθεση σε στερεή φάση χρησιμοποιείται σήμερα ευρέως για την ανάπτυξη νέων μορίων με φαρμακευτική δράση αλλά και για την επέκταση συνθετικών μεθοδολογιών που μέχρι τώρα εφαρμόζονταν μόνο σε υγρή φάση. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της οργανικής σύνθεσης σε στερεή φάση είναι α) η χρήση περίσσειας αντιδραστηρίων, που συμβάλλει στην ολοκλήρωση της αντίδρασης, β) η εύκολη απομάκρυνση των ουσιών που δεν αντέδρασαν μαζί με τα διαλυτά παραπροϊόντα της αντίδρασης κατά τη διήθηση και την έκπλυση της ρητίνης, και γ) η δυνατότητα αυτοματοποίησης, αφού περιλαμβάνει επαναλαμβανόμενη διαδικασία (προσθήκη αντιδραστηρίων, ανάμιξη, έκπλυση). Η μεταφορά και επέκταση της μεθοδολογίας που αναπτύξαμε από την υγρή στη στερεή φάση αποτέλεσε τον επόμενο στόχο μας, καθώς θα μας επέτρεπε τη σύνθεση “βιβλιοθηκών” ετεροκυκλικών ενώσεων που φέρουν ποικιλία υποκαταστατών, χρησιμοποιώντας τις τεχνικές της “παράλληλης σύνθεσης”.

Η ρητίνη που επιλέχθηκε ήταν η ρητίνη Wang τύπου ουρεθάνης, στην οποία τα α-αμινοξέα μπορούν να προσδεθούν από το αμινο-τελικό άκρο τους ενώ, παράλληλα, το καρβοξύλιο θα παραμένει ελεύθερο για περαιτέρω χημικές τροποποιήσεις. Η πρόσδεση των α-αμινοξέων επιτυγχάνεται με ενεργοποίηση των αμινοξέων σε διάλυμα N,O-δι(τριμεθυλοσιλυλο)ακεταμίδιου (BSA) σε διαλύτη διμεθυλοφορμαμίδιο (DMF) σε θερμοκρασία 55° C για 1 ώρα. Στη συνέχεια, στο διάλυμα προστίθεται διμεθυλαμινοπυριδίνη (DMAP) και το μίγμα προστίθεται στη ρητίνη, η οποία έχει προκατεργαστεί με DMF. Μετά από κατάλληλη επεξεργασία, παραλαμβάνονται τα προσδεδεμένα στη ρητίνη α-αμινοξέα (Σχήμα 8).



Σχήμα 8: Πρόσδεση α-αμινοξέων σε ρητίνη τύπου ουρεθάνης.

Ενεργοποίηση του ελεύθερου καρβοξυλίου των αμινοξέων με μετατροπή σε βενζοτρίαζολυλεστέρα, ακολουθούμενη από πυρηνόφιλη προσβολή από το ανιόν του μηλονικού διαιθυλεστέρα, παρέχει τα αντίστοιχα προϊόντα C-ακυλίωσης, συνδεδεμένα στη ρητίνη. Επίδραση διαλύματος 50% τριφθοροοξικού οξέος (TFA) σε διχλωρομεθάνιο οδηγεί στην απόσπαση των προϊόντων C-ακυλίωσης από το στερεό υπόστρωμα και στην ταυτόχρονη κυκλοποίησή τους προς τα αντίστοιχα τετραμικά οξέα (Σχήμα 9).

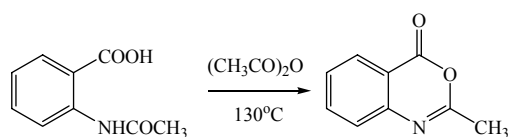


Σχήμα 9: Σύνθεση τετραμικών οξέων σε στερεή φάση.

Η μέθοδος παρέχει τα τετραμικά οξέα σε ικανοποιητικές αποδόσεις και υψηλή καθαρότητα. Σημαντικότερο πλεονέκτημα είναι η υψηλή εναντιομερική περίσσεια των οπτικώς ενεργών προϊόντων, όπως αποδεικνύεται από προσδιορισμό με υγρή χρωματογραφία υψηλής απόδοσης [17, 18].

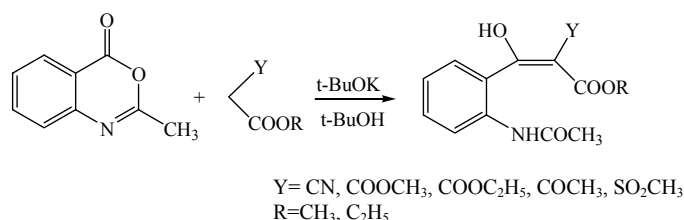
III. Σύνθεση 3-υποκατεστημένων-4-υδροξυ-2-κινολινονών

Η σύνθεση των 3-υποκατεστημένων-4-υδροξυ-2-κινολινονών επιτυγχάνεται με επέκταση της μεθόδου σύνθεσης των τετραμικών οξέων. Ως ακυλιωτικό μέσο χρησιμοποιήθηκε αρχικά η 2-μεθυλο-3,1-βενζοξαζινόνη-4, η οποία παρασκευάζεται με θέρμανση του N-ακετυλο-ανθρανιλικού οξέος με οξικό ανυδρίτη (Σχήμα 10).



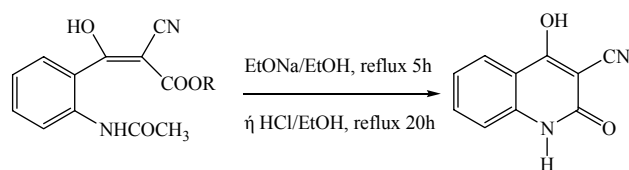
Σχήμα 10: Σύνθεση της 2-μεθυλο-3,1-βενζοξαζινόνης-4.

Οι αντιδράσεις C-ακυλιώσεως ενώσεων ενεργού μεθυλενίου (κυανοξικών, μηλονικών και ακετοξικών εστέρων, μηλονονιτριλίου και μεθυλοσουλφονυλοξικού αιθυλεστέρα) λαμβάνουν χώρα σε βασικό περιβάλλον (tert-βουτυλικό κάλιο σε διαλύτη tert-βουτυλική αλκοόλη), με ανάδευση 1.5-2 ωρών σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Μετά την επεξεργασία του μίγματος της αντίδρασης, απομονώνονται τα αντίστοιχα προϊόντα C-ακυλιώσεως, τα οποία λαμβάνονται σε καθαρή στερεή μορφή και υψηλές αποδόσεις (70-90%) (Σχήμα 11).



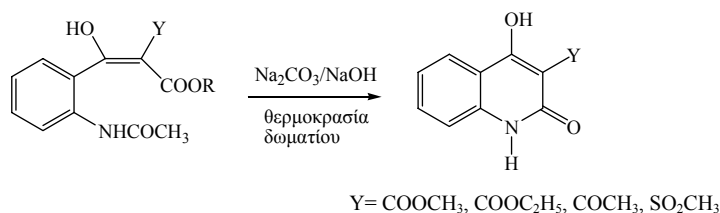
Σχήμα 11: Αντιδράσεις C-ακυλιώσεως ενώσεων ενεργού μεθυλενίου από την 2-μεθυλο-3,1-βενζοξαζινόνη-4.

Εν συνεχεία, πραγματοποιείται η κυκλοποίηση των C-ακυλο-παραγώγων προς τις αντίστοιχες 3-υποκατεστημένες-4-υδροξυ-κινολινόνες-2. Οι αντιδράσεις κυκλοποιήσεως λαμβάνουν χώρα σε όξινο ή/και αλκαλικό περιβάλλον, ανάλογα με το παράγωγο. Συγκεκριμένα, η κυκλοποίηση των προϊόντων C-ακυλιώσεως των κυανοξικών εστέρων επιτυγχάνεται με θέρμανση είτε σε βασικό είτε σε όξινο περιβάλλον (Σχήμα 12). Η κυκλοποίηση έχει ως αποτέλεσμα την απομόνωση της 3-κυανο-4-υδροξυ-κινολινόνης-2, σε ικανοποιητικές αποδόσεις (50-90%, ανάλογα με τη μέθοδο και το προϊόν C-ακυλιώσεως).



Σχήμα 12: Σύνθεση της 3-κυανο-4-υδροξυ-2-κινολινόνης.

Οι αντιδράσεις κυκλοποιήσεως των παραγώγων C-ακυλιώσεως, που προέρχονται από τους μηλονικούς και ακετοξικούς εστέρες και τον μεθυλοσουλφονυλοξικό αιθυλεστέρα, επιτυγχάνονται σε βασικό περιβάλλον (Na₂CO₃/NaOH), με ανάδευση 2 ωρών σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (Σχήμα 13). Οι παραγόμενες 3-υποκατεστημένες-4-υδροξυ-2-κινολινόνες λαμβάνονται σε καθαρή στερεή μορφή και υψηλές αποδόσεις (80-90%) [19].

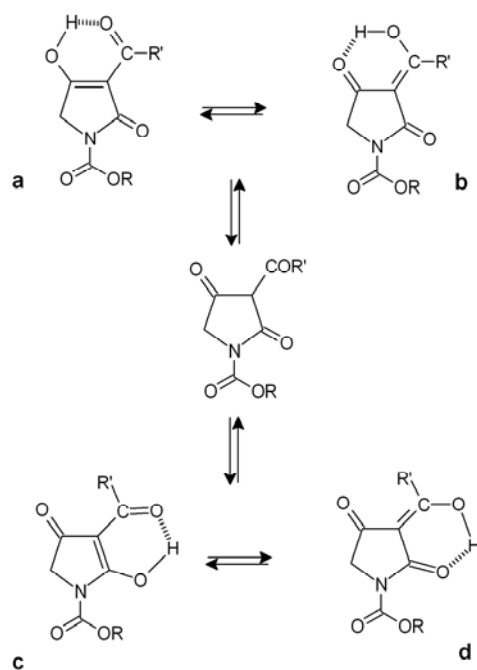


Σχήμα 13: Σύνθεση 3-υποκατεστημένων-4-υδροξυ-2-κινολινονών.

IV. Μελέτη της δομής των N-αλκοξυκαρβονυλο-3-υποκατεστημένων τετραμικών οξέων με φασματοσκοπικές μεθόδους

Τα 3-ακυλο-4-υδροξυ τετραμικά οξέα αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα β-δικαρβονυλικών ενώσεων, που έχουν τη δυνατότητα εμφάνισης κετο-ενολικής και ενολικής-ενολικής ταυτομέρειας και σχηματισμού ενδομοριακών δεσμών υδρογόνου. Η μελέτη της δομής των παραγώγων αυτής της κατηγορίας παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον και πραγματοποιήθηκε με φασματοσκοπία πυρηνικού μαγνητικού συντονισμού (NMR) και υπερύθρου (IR).

Η μελέτη της δυναμικής ισορροπίας μεταξύ των ενολικών μορφών των ασύμμετρων κυκλικών β,β'-τρικετονών (όπως τα 3-ακυλο-τετραμικά οξέα) παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Σε διάλυμα δευτεριωμένου χλωροφορμίου (CDCl₃) τα 3-ακυλο-τετραμικά οξέα υφίστανται σε τέσσερις διαφορετικές ενολικές μορφές **a**, **b**, **c** και **d** (Σχήμα 14). Σε μη πολικούς διαλύτες, όπως το CDCl₃ η αλληλομετατροπή μεταξύ των “εξωτερικών” ταυτομερών **ab** \rightleftharpoons **cd** των 3-ακυλο-τετραμικών οξέων είναι μια διαδικασία αρκετά αργή για την κλίμακα χρόνου του NMR. Αντίθετα, η αλληλομετατροπή μεταξύ των “εσωτερικών” ταυτομερών **a** \rightleftharpoons **b** και **c** \rightleftharpoons **d** είναι ταχεία.



Σχήμα 14: Ταυτομερείς μορφές τετραμικών οξέων.

Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση δύο σειρών σημάτων στα φάσματα ¹H και ¹³C NMR, που αποδίδονται στα δύο ζεύγη “εξωτερικών” ταυτομερών (**ab**) και (**cd**), και οι παρατηρούμενες χημικές μετατοπίσεις και σταθερές σύζευξης αντιπροσωπεύουν το μέσο όρο των αντίστοιχων τιμών των “εσωτερικών” ταυτομερών **a,b** και **c,d**. Ο λόγος των σχετικών εντάσεων των σημάτων στο φάσμα ¹H NMR είναι ενδεικτικός της επικράτησης του ζεύγους ταυτομερών **cd**. Η ερμηνεία του φαινομένου βασίζεται στην ικανότητα του αμιδικού καρβονυλίου της θέσης 2 να σχηματίζει ισχυρότερο ενδομοριακό δεσμό υδρογόνου από ό,τι το καρβονύλιο της θέσης 4, λόγω ενίσχυσης της ηλεκτρονιακής του πυκνότητας από την αλκοξυκαρβονυλο-ομάδα.

Στα φάσματα IR των N-αλκοξυκαρβονυλο-3-υποκατεστημένων τετραμικών οξέων, που λαμβάνονται σε αιωρήματα των στερεών σε nujol, υπάρχει η χαρακτηριστική ταινία

απορρόφησης στα 1765-1720 cm^{-1} , που οφείλεται στο καρβονύλιο της αλκοξυκαρβονυλο-ομάδας. Η απορρόφηση του καρβονυλίου της λακτάμης (2-CO) και του καρβονυλίου της κετονικής μορφής β-κετο-εστέρα ή β-δικετόνης επικαλύπτονται και εμφανίζονται στα 1720-1680 cm^{-1} . Οι απορροφήσεις στα 1680-1630 cm^{-1} είναι χαρακτηριστικές της δόνησης τάσης του καρβονυλίου που συμμετέχει σε δεσμό υδρογόνου. Από τη φασματοσκοπική αυτή μελέτη προκύπτει ότι στη στερεή φάση τα παράγωγα υφίστανται σε ισορροπία μεταξύ κετονικής και ενολικής μορφής [15].

IV. Συμπεράσματα

Οι νέες μεθοδολογίες σύνθεσης ετεροκυκλικών αζωτούχων ενώσεων που αναπτύχθηκαν παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως οι υψηλές αποδόσεις, ο μικρός χρόνος αντίδρασης, οι ήπιες συνθήκες αντίδρασης και απομόνωσης των προϊόντων (σε σύγκριση με τις μεθόδους που αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία). Παράλληλα, διαθέτουν ευελιξία όσον αφορά την επιλογή των πρόδρομων ενώσεων (α-αμινοξέα, υποκατεστημένα ανθρανιλικά οξέα, ενώσεις ενεργού μεθυλενίου) και μπορούν να εφαρμοστούν στη σύνθεση ενώσεων που φέρουν μεγάλη ποικιλία υποκαταστατών σε διάφορες θέσεις των δακτυλίων. Με αυτό τον τρόπο, οι μεθοδολογίες αυτές καθίστανται ελκυστικές για βιομηχανική εφαρμογή στη σύνθεση νέων ετεροκυκλικών παραγώγων με βιολογική και φαρμακευτική δράση.

Αναφορές

1. B. J. Royles, "Naturally occurring tetramic acids-Structure, isolation and synthesis", Chemical Reviews 95 (6), pp. 1981-2001, 1995.
2. T. Rosset, R. H. Sankhala, C. E. Stickings, M. E. U. Taylor and R. Thomas, "Studies in the biochemistry of micro-organisms. 103. Metabolites of *Alternaria tenuis* auct; culture filtrate products", Biochemical Journal, 67 (3), pp. 390-400, 1957.
3. I. Casser, B. Steffan and W. Steglich, Angewante Chemie International Edition, 26, pp. 586-587, 1987.
4. A. Holtzel, M. G. Ganzle, G. J. Nicholson, W. P. Hammes and G. Jung, "The first low molecular weight antibiotic from lactic acid bacteria: Reutericyclin, a new tetramic acid", Angewante Chemie International Edition, 39(15), pp. 2766-2768, 2000.
5. S. Aoki, K. Higuchi, Y. Ye, R. Satari and M. Kobayashi, "Melophlins A and B, novel tetramic acids reversing the phenotype of ras-transformed cells, from the marine sponge *Melophlus sarassinorum*", Tetrahedron, 56, pp. 1833-1836, 2000.
6. Rodd's Chemistry of Carbon Compounds, 2nd Ed., Vol. IV, Part G.
7. "The Alkaloids", Specialist Periodical Reports, The Chemical Society.
8. J. L. McCormick, T. C. McKee, J. H. Cardellina and M. R. Boyd, "HIV inhibitory natural products .26. Quinoline alkaloids from *Euodia roxburghiana*", Journal of Natural Products, 59 (5), pp. 469-471, 1996.
9. P. Leeson, R. Baker, R. W. Carling, J. J. Kulagowski, I. M. Mawer, M. P. Ridgill, M. Rowley, J. Smith, I. Stansfield, G. I. Stevenson, A. Foster and J. Kemp, "Amino acid bioisosteres: Design of 2-quinolone derivatives as glycine-site N-methyl-D-aspartate receptor antagonists", Bioorganic and Medicinal Chemistry Letters, 3(2)6, pp. 299-304, 1993.
10. K. Faber and T. Kappe, "Non-steroidal anti-inflammatory agents.2.Synthesis of 4-hydroxy-1-methyl-2-oxo-dihydroquinolin-3-yl acetic acid and related tetrazolyl derivatives", Journal of Heterocyclic Chemistry, 21 (6), pp. 1881-1883, 1984.
11. W. S. Hong, H. Y. Jung, S. K. Yang, S. J. Myung, J. H. Kim, Y. I. Min, M. H. Chung, H. S. Lee and H. W. Kim, "The antioxidant effect of rebamipide on oxygen free radical production by *H-pylori*-activated human neutrophils: In comparison with N-acetylcysteine, ascorbic acid and glutathione", Pharmacological Research, 44 (4), pp. 293-297, 2001.

12. B-S Lee and M-H. Chun, PCT Int Appl. (2002) WO 0266436 A1 20020829.
13. Y. Aoki, M. Ishiwara, A. Koda and H. Takagaki, "Inhibitory effect of a novel quinolinone derivative, TA-270, on asthmatic inflammatory responses in sensitized guinea pigs", European Journal of Pharmacology, 409 (3), pp. 325-330, 2000.
14. A. Detsi, J. Markopoulos and O. Igglessi-Markopoulou, "Reactions of N-hydroxysuccinimide esters of N-alkoxycarbonyl- α -aminoacids with active methylene compounds. Synthesis of 3-substituted tetramic acids", Chemical Communications pp. 1323-1324, 1996.
15. A. Detsi, M. Micha-Screttas and O. Igglessi-Markopoulou, "Synthesis of N-alkoxycarbonyl-3-substituted tetramic acids and functionalized enols via C-acylation reactions of active methylene compounds with N-hydroxysuccinimide esters of N-alkoxycarbonyl- α -aminoacids", Journal of the Chemical Society Perkin Transactions 1, pp. 2443-2449, 1998.
16. A. Detsi, A. Afantitis, G. Athanasellis, J. Markopoulos, O. Igglessi-Markopoulou and C. K. Skylaris, "Cyclisation of novel amino oxo esters to tetramic acids - Density functional theory study of the reaction mechanism", European Journal of Organic Chemistry, 23, pp. 4593-4600, 2003.
17. K. C. Prousis, A. Detsi and O. Igglessi-Markopoulou, "A traceless solid-phase approach to functionalized tetramic acids and 2-amino-4-pyrrolinones", Synlett, 18, pp. 2763-2766, 2005.
18. A. Detsi, P. Emirtzoglou, K. Prousis, A. N. Nikolopoulos, V. Skouridou and O. Igglessi-Markopoulou, "Solid phase synthesis of substituted 2-amino-4-pyrrolinones via spontaneous postcleavage cyclization", Synlett, 2, pp. 353-355, 2004.
19. A. Detsi, V. Bardakos, J. Markopoulos and O. Igglessi-Markopoulou, "Reactions of 2-methyl-3,1-benzoxazin-4-one with active methylene compounds: A new route to 3-substituted 4-hydroxyquinolin-2(1H)-ones", Journal of the Chemical Society Perkin Transactions 1, 24, pp. 2909-2913, 1996.

Σύντομα βιογραφικά σημειώματα

Αναστασία Δέτση: Πτυχιούχος του Τμήματος Χημείας του Πανεπιστημίου Αθηνών. Εκπόνησε τη διδακτορική της διατριβή στο Εργαστήριο Οργανικής Χημείας της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου. Διεξήγαγε μεταδιδακτορική έρευνα στο Ινστιτούτο Οργανικής και Φαρμακευτικής Χημείας του Εθνικού Ιδρύματος Ερευνών και στο Πανεπιστήμιο του Amsterdam, ως επιστημονικός συνεργάτης, και στο Εργαστήριο Οργανικής Χημείας του ΕΜΠ, ως μεταδιδακτορική υπότροφος του ΙΚΥ. Έχει δημοσιεύσει 18 ερευνητικές πρωτότυπες εργασίες σε διεθνή περιοδικά με κριτές και έχει περισσότερες από 45 ανακοινώσεις σε διεθνή και ελληνικά συνέδρια. Διδάσκει το μάθημα της Χημείας στη Σχολή Ναυτικών Δοκίμων από το 2000 έως σήμερα. Το Φεβρουάριο 2006 εξελέγη Λέκτορας στη Σχολή Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π.

Όλγα Ιγγλέση-Μαρκοπούλου: Καθηγήτρια Οργανικής Χημείας στη Σχολή Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. Διαθέτει ευρύτατο ερευνητικό έργο στο αντικείμενο της οργανικής σύνθεσης και της μελέτης δομής οργανικών ενώσεων με φασματοσκοπικές μεθόδους και θεωρητικούς υπολογισμούς. Έχει δημοσιεύσει περισσότερες από 60 ερευνητικές πρωτότυπες εργασίες σε διεθνή περιοδικά με κριτές και έχει περισσότερες από 100 ανακοινώσεις σε διεθνή και ελληνικά συνέδρια. Έχει αναπτύξει διεθνείς συνεργασίες με ερευνητικές ομάδες Πανεπιστημίων του εξωτερικού (Πανεπιστήμια Liverpool, Oxford, Loughborough). Διαθέτει ευρύ διδακτικό έργο στο αντικείμενο της Οργανικής Χημείας. Έχει επιβλέψει 8 διδακτορικές διατριβές, άλλες 8 είναι αυτή τη στιγμή σε εξέλιξη στο Εργαστήριο Οργανικής Χημείας, καθώς και μεγάλο αριθμό διπλωματικών εργασιών (38) στη Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ.

ΠΕΜΠΤΗ ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ:
ΔΙΕΘΝΕΙΣ ΣΧΕΣΕΙΣ

Γεωπολιτικές Επιδιώξεις και Στρατηγικές Ασφαλείας στη Μεσόγειο: ο ιδιαίτερος ρόλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης

Δ. Δαλακλής και Π. Σιούσιουρας

Περίληψη

Στη νότια πλευρά της Μεσογείου ευρίσκεται ένας αριθμός κρατών με διαφορετική πολιτισμική ταυτότητα, η οποία πολλές φορές έχει οδηγήσει σε αντιπαραθέσεις και συγκρούσεις. Για τη Ευρωπαϊκή Ένωση (Ε.Ε.), η περιοχή της Μεσογείου ανέκαθεν υπήρξε ένας χώρος ζωτικού ενδιαφέροντος. Τούτο διότι, μεταξύ άλλων, ένας σημαντικός αριθμός των κρατών μελών της Ε.Ε. ευρίσκεται στην εν λόγω περιοχή, διαμορφώνοντας ένα φυσικό σύνορο της Ευρώπης. Το 1995, με βάση τη Διακήρυξη της Βαρκελώνης, η οικονομική κυρίως συνεργασία αποτέλεσε το μοχλό για τη γεφύρωση των διαφορών μεταξύ των χωρών που βρέχονται από τη Μεσόγειο Θάλασσα.

Ένας ενδεχόμενος επαναπροσδιορισμός των προτεραιοτήτων της Ε.Ε., μετά από την τελευταία διεύρυνσή της, πιθανόν να οδηγήσει στην υποβάθμιση της Ευρωμεσογειακής Συνεργασίας. Και αυτό, κυρίως λόγω των υψηλών χρηματικών κονδυλίων αλλά και του μεγάλου χρονικού διαστήματος που θα απαιτηθούν για την πλήρη ενσωμάτωση των νέων κρατών μελών στην Ε.Ε. Η ανάλυση των πιθανών επιλογών της Ε.Ε. απέναντι στις Τρίτες Μεσογειακές Χώρες έχει σκοπό να καταδείξει την καταλληλότερη μέθοδο για τη διασφάλιση των σχέσεων καλής γειτονίας στην ευρύτερη περιοχή. Ορθά η Ε.Ε. κινείται προς την κατεύθυνση της πρόληψης των εντάσεων της περιοχής, μέσω της άμβλυνσης των οικονομικών διαφορών που υπάρχουν μεταξύ της βόρειας και της νότιας πλευράς της Μεσογείου.

Abstract

The Mediterranean Sea is often considered as the natural European physical border. International order is at stake around the specific geographic location, an area of special interest for the European Union (E.U.). The Mediterranean Basin is compromised by a significant large number of states with competitive interests, in an interactive mode that from time to time is resulting into various crisis or even violent conflicts. In the nineties, the Barcelona Process established a wide framework of political, economic and social relations between the Member States of the E.U and Partners of the Southern Mediterranean, in an effort to reduce tensions in the region and narrow the gap between the North and the South. A decade later, the commitment of both partners seems to fade away.

After the latest E.U. enlargement numerous questions about the feasibility of its financial budget were created and the idea that resources should be allocated towards only the new member states appeared regularly in the news. The extremely high geopolitical value of the Mediterranean region indicates that the E.U. should not neglect its neighboring states in the North coast of Africa. The absence of political commitment for military action and the idea that restraining measures can only backfire and alienate the immigrants of North African origin were evaluated during the analysis of available means at the EU disposal in order to create an environment of peace and stability in the region. The final conclusion is that economic collaboration and development still remains the best option of action.

I. Εισαγωγή

Ο γεωγραφικός παράγοντας έχει παίξει σημαντικό ρόλο τόσο για την ανθρώπινη ιστορία όσο και για την πολιτική εξέλιξη. Ειδικά ο ρόλος της Μεσογείου Θάλασσας ήταν ανέκαθεν πολύ ιδιαίτερος.¹⁸ Ο αρχαίος κόσμος γνώριζε μόνο τρεις από τις πέντε ηπείρους του πλανήτη: αυτές που περιβάλλουν τη Μεσόγειο και συναντιούνται στο ανατολικό της τμήμα. Γι' αυτόν ακριβώς το λόγο, όλοι οι αρχαίοι πολιτισμοί καθώς και οι δύο μεγάλες σύγχρονες θρησκείες, η χριστιανική και η ισλαμική, αναπτύχθηκαν εκεί, και δια της θαλάσσης διαχύθηκαν στις ακτές της υπόλοιπης Μεσογείου και του Εύξεινου Πόντου. Στις χώρες που βρέχονται από τη θαλάσσια αυτή λεκάνη τέθηκαν οι βάσεις του σημερινού ευρωπαϊκού πολιτισμού, ο οποίος, χάρη στις εξερευνητικές και αποικιοκρατικές ενέργειες των Ευρωπαίων και στην πρόοδο της τεχνολογίας, διαδραματίζει σήμερα έναν κυρίαρχο ρόλο παγκόσμιου βεληνεκούς. Η Μεσόγειος υπήρξε αλλά και είναι μέχρι σήμερα η σημαντικότερη στη παγκόσμια ιστορία θάλασσα που χώριζε αλλά και ταυτόχρονα ένωνε λαούς και πολιτισμούς [1]. Η κοινή μεσογειακή ιστορία, γεμάτη από πολυπληθείς μετασχηματισμούς και αλλαγές είναι ένα αποτέλεσμα ανάμιξης τόσο της Ανατολής με τη Δύση, όσο και του Βορρά με το Νότο.

Η Μεσόγειος αποτελούσε ανέκαθεν ζώνη αντιπαραθέσεων, προστριβών και συγκρούσεων, αφού πολλοί λαοί (Αραβες, Οθωμανοί, Έλληνες, Βυζαντινοί, Ευρωπαίοι) με παντελώς διαφορετική κουλτούρα (αραβικός, μουσουλμανικός, ευρωπαϊκός πολιτισμός) συνέδεσαν τις ιστορικές τους τύχες με τη θάλασσα αυτή [2]. Το γεγονός ότι οι περισσότεροι απ' αυτούς τους διαφορετικούς μεταξύ τους πολιτιστικά λαούς εξακολουθούν και σήμερα να συναντιούνται, να συνδιαλέγονται και να αντιπαρατίθενται στη νότια πλευρά της Μεσογείου οφείλεται, πέραν των άλλων, και στη γεωπολιτική και γεωστρατηγική σημασία αυτής της περιοχής. Ακόμη και μετά από δύο παγκοσμίους πολέμους που δημιούργησαν μια σταθερότητα στον Ευρωπαϊκό χώρο, όπως αποδεικνύει και η πρόσφατη ενσωμάτωση των χωρών του πρώην Ανατολικού Μπλοκ στους κόλπους της Ε.Ε. [3], η λεκάνη της Μεσογείου συνεχίζει να τέμνεται από σύνορα ανάμεσα σε κόσμους διαφορετικούς και, δυστυχώς, πολλές φορές αντιμαχόμενους. Η αστάθεια και το αίσθημα ανασφάλειας στην περιοχή των χωρών που περικλείουν τη θαλάσσια αυτή λεκάνη έχουν ενταθεί το τελευταίο χρονικό διάστημα, όπως σαφώς καταδεικνύουν οι πρόσφατες κοινωνικές αναταραχές στη Γαλλία, οι οποίες αποδόθηκαν κυρίως σε δυσαρεστημένους μετανάστες αφρικανικής προέλευσης [4]. Επιπρόσθετα, πολιτικές αναταραχές και φαινόμενα βίας (τυφλές βομβιστικές επιθέσεις σε διάφορα θέρετρα της Αιγύπτου που εξυπηρετούν κυρίως ευρωπαϊούς τουρίστες) στη Μέση Ανατολή και τη Βόρειο Αφρική σημειώνονται καθημερινά [5].

Έχει ενδιαφέρον η ομοιότητα των πολιτικών συσχετισμών γύρω από τη Μεσόγειο του σήμερα με την εικόνα που προέβλεψε στα μέσα της δεκαετίας του 1990 ο αμερικανός διεθνολόγος Samuel P. Huntington, και ιδιαίτερα η αναφορά του σ' έναν κόσμο "άναρχο", όπου κυριαρχεί η εντατικοποίηση των φυλετικών, εθνικών και θρησκευτικών συγκρούσεων [6]. Όλα σχεδόν τα ανοιχτά μέτωπα που αφορούν τη διεθνή τάξη και νομιμότητα εμπλεκούνται στη συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή: οι κεντροευρωπαϊκοί εθνικισμοί έναντι της παραδοσιακής σερβικής ιδεολογίας στη Γιουγκοσλαβία, η χριστιανική Κύπρος έναντι της μουσουλμανικής Τουρκίας, ο ριζοσπαστικός Ισλαμισμός έναντι χωρών ευρωπαϊκής ιδεολογίας και κατεύθυνσης, όπως της Αλγερίας και της Αιγύπτου, ο αραβικός κόσμος έναντι της ιουδαϊκής παράδοσης στο Ισραήλ.

¹⁸ Η Μεσόγειος είναι μια μεγάλης εκτάσεως κλειστή θάλασσα, μεταξύ τριών ηπείρων, της Ευρώπης, της Ασίας και της Αφρικής. Περιλαμβάνει έκταση 3 εκατομμυρίων τετραγωνικών χιλιομέτρων, δηλαδή το 1/12 περίπου του Βορείου Ατλαντικού, μήκος 2100 μίλια από το Γιβραλτάρ μέχρι τη Συρία και μέγιστο πλάτος 1000 μίλια μεταξύ Κόλπου Σύρτης και Αδριατικής.

Ο αραβικός κόσμος στο σύνολό του αγκαλιάζει τη Μεσόγειο, καθώς εκτείνεται από τη Μαυριτανία μέχρι και τα βορειοδυτικά σύνορα του Ιράν. Από γεωγραφική άποψη μπορεί να χωριστεί σε δύο υπο-περιοχές: το Μαγκρέμπ, που υποδηλώνει την περιοχή όλης της Βόρειας Αφρικής με εξαίρεση την Αίγυπτο, και το Μασρέκ, που εκτείνεται μεταξύ των ανατολικών ακτών της Μεσογείου και της Μεσοποταμίας. Αρχικά, τον όρο Μαγκρέμπ χρησιμοποίησαν οι Γάλλοι κατά την περίοδο της αποικιοκρατίας, για να προσδιορίσουν τις περιοχές της Αλγερίας, του Μαρόκου και της Τυνησίας που τελούσαν υπό την κυριαρχία τους [7]. Ωστόσο, ο ίδιος όρος εξακολουθεί να υφίσταται και επί των ημερών μας, περιλαμβάνοντας και τη Μαυριτανία. Το Μαγκρέμπ αποτελούν ειδικότερα η Λιβύη, η Τυνησία, η Αλγερία, το Μαρόκο και η Μαυριτανία, ενώ το Μασρέκ η Αίγυπτος, η Συρία, ο Λίβανος, το Ιράκ, η Ιορδανία, η Παλαιστινιακή Αρχή και οι χώρες που συναντιούνται στον Περσικό Κόλπο. Υπό αυτή την έννοια, τώρα που η Κύπρος και η Μάλτα έχουν ήδη ενταχθεί στην Ε.Ε., τον αραβικό κόσμο συνιστούν όλες οι λεγόμενες Νότιες ή Τρίτες Μεσογειακές Χώρες (Τ.Μ.Χ.), με εξαίρεση την Τουρκία και το Ισραήλ. Με βάση την ευρύτερη αναταραχή στο ανατολικό τμήμα της Μεσογείου (Ισραήλ/Παλαιστίνη¹⁹, αμερικανική επέμβαση στο Ιράκ), η ανάλυση των επιλογών σε επίπεδο Ε.Ε. για σταθεροποίηση της περιοχής της Μεσογείου θα προσανατολιστεί μόνο στην περιοχή του Μαγκρέμπ, συμπεριλαμβάνοντας και την Αίγυπτο.

Η Ε.Ε., με βάση τη Διακήρυξη της Βαρκελώνης (1995), θέσπισε ως κύριο μέσο για τη γεφύρωση των διαφορών μεταξύ των χωρών της νότιας Μεσογείου και της Ευρώπης την οικονομική κυρίως συνεργασία. Μετά την τελευταία ένταξη ενός αρκετά μεγάλου αριθμού νέων κρατών μελών, είναι πιθανός ο επαναπροσδιορισμός των προτεραιοτήτων της Ένωσης, ο οποίος θα έχει ως αποτέλεσμα την υποβάθμιση της Ευρωμεσογειακής Συνεργασίας, κυρίως λόγω των εξαιρετικά υψηλών χρηματικών κονδυλίων αλλά και του σημαντικού χρονικού διαστήματος που θα απαιτηθούν για την ενσωμάτωση των νέων χωρών μελών στην Ε.Ε. Η ανάλυση των πιθανών επιλογών της Ε.Ε. απέναντι στις Τ.Μ.Χ. έχει σκοπό να καταδείξει την καταλληλότερη μέθοδο για τη δημιουργία σχέσεων καλής γειτονίας στην ευρύτερη περιοχή, μέσα σε ένα περιβάλλον οικονομικής στενότητας, όπως καταγράφηκε στις πρόσφατες δυσκολίες για την κατάρτιση του νέου οικονομικού προϋπολογισμού που αφορά το διευρυμένο ευρωπαϊκό χώρο. Αρχικά, η μελέτη θα επιχειρήσει να αναδείξει τη γεωπολιτική σημασία του γεωγραφικού χώρου της Μεσογείου και να εστιάσει στα πιθανά προβλήματα ασφαλείας που θα μπορούσαν να απασχολήσουν τόσο τις χώρες της Ε.Ε. όσο και τις Τ.Μ.Χ. στο άμεσο μέλλον.

Πολλοί αναλυτές έχουν προβλέψει εδώ και καιρό ότι οι τελματωμένες οικονομίες σε συνδυασμό με τη ραγδαία αύξηση του πληθυσμού στη βόρεια Αφρική θα αποτελέσουν μακροπρόθεσμες στρατηγικές προκλήσεις για την Ευρώπη, λόγω της παράνομης μετανάστευσης ή εξαιτίας των ακραίων φαινομένων βίας που συνδέονται με την τρομοκρατία. Τούτο, διότι μια τρομοκρατική επίθεση στις ενεργειακές εγκαταστάσεις που βρίσκονται στη Μεσόγειο θα μπορούσε να προκαλέσει σοβαρό πλήγμα στις παγκόσμιες προμήθειες της ενέργειας και κατ' επέκταση στην παγκόσμια οικονομία. Είναι πρόδηλο ότι η ενεργειακή πολιτική βρίσκεται στο επίκεντρο τόσο της μεσογειακής πολιτικής της Ε.Ε. όσο και του ΝΑΤΟ, καθόσον το 65% του πετρελαίου και της βενζίνης που καταναλώνεται στη δυτική Ευρώπη περνά μέσα από τη Μεσόγειο. Η Ευρώπη θα πρέπει να συντονιστεί έγκαιρα στην κατεύθυνση της πρόληψης των εντάσεων στην περιοχή, προκειμένου να αποφύγει την ανάληψη οδυνηρών και αμφίβολης αποτελεσματικότητας μέτρων αντίδρασης και καταστολής, που θα διακυβέυσουν την εξέλιξή της, μέσω της οικονομικής και πολιτικής ενοποίησης, σε πόλο του μελλοντικού διεθνούς συστήματος.

¹⁹ Εκτός της διένεξης Ισραήλ-Παλαιστίνιων, και οι σχέσεις Συρίας-Ισραήλ παραμένουν τεταμένες, λόγω της άρνησης του Ισραήλ να επιστρέψει τα υψίπεδα του Golan, της αποίκησης του Λιβάνου από τη Συρία και της υποστήριξης που προσφέρει η τελευταία στους αντάρτες της Χεσμπολάχ. Οι ομάδες φανατικών Ισλαμιστών που δρουν στην περιοχή αντιτίθενται δυναμικά και αποτελούν σοβαρό ανασταλτικό παράγοντα σε κάθε αραβοϊσραηλινή προσέγγιση.

II. Γεωπολιτική και Μεσόγειος Θάλασσα

Γεωπολιτική είναι η επιστήμη που εξετάζει την αλληλεπίδραση φυσικού περιβάλλοντος και πολιτικού οικοδομήματος, με σκοπό τη διατήρηση ή και επαύξηση της στρατιωτικής (γεωστρατηγικής) ή και οικονομικής (γεωοικονομικής) ισχύος. Οι θεωρητικοί της γεωπολιτικής υποστηρίζουν ότι τα φυσικά πολιτικά σύνορα καθώς και η πρόσβαση σε σημαντικές θαλάσσιες διόδους είναι ζωτικής σημασίας για την επιβίωση ενός έθνους (κράτους). Ο Sir Walford J. Mackinder διατύπωσε τη θεωρία της «κεντρικής χώρας-heartland» ή «καρδιάς της γης» και των περιφερειακών εδαφών ή εσωτερικού δακτυλίου, ως το δρόμο που οδηγεί προς την παγκόσμια κυριαρχία [8]. Ως «κεντρική χώρα» εννοούσε την Ευρασία και ως περιφερειακά εδάφη τα περιβάλλοντα αυτήν νησιωτικά συμπλέγματα και τη βόρεια Αφρική. Κατά την προσέγγιση των γεωπολιτιστών, ενώ τα περιφερειακά εδάφη θα αποτελούν τις αεροναυτικές βάσεις που θα ελέγχουν τις συγκοινωνίες και θα ασκούν οικονομική πίεση στην «κεντρική χώρα», η τελευταία θα προσπαθεί να ελέγχει τα σημεία που θα της επιτρέπουν να επικοινωνεί με τους ωκεανούς και τις άλλες εκτάσεις.

Η γεωπολιτική αξία της Μεσογείου είναι μεγάλη, δεδομένου ότι χαρακτηρίζεται ως η γέφυρα μεταξύ των τριών ηπείρων που την περιβάλλουν, και κατά τους γεωπολιτιστές αποτελεί ένα από τα τρία σημεία που επιτρέπουν στην «κεντρική χώρα» την επικοινωνία με τους ωκεανούς και τις άλλες εκτάσεις, την έξοδο δηλαδή της Ρωσίας προς τη θάλασσα. Ιδιαίτερης γεωπολιτικής σημασίας για την περιοχή της νοτιοανατολικής Μεσογείου είναι και η ύπαρξη της διώρυγας του Σουέζ, μιας από τις βασικότερες συγκοινωνιακές θαλάσσιες οδούς και της συντομότερης μεταξύ Ατλαντικού και Ινδικού Ωκεανού. Εκτός από τα κοιτάσματα πετρελαίου που εικάζεται ότι βρίσκονται στη Μεσόγειο, οι υπό κατασκευή αγωγοί φυσικού αερίου (με προβλεπόμενη διαδρομή Αλγερία, Τυνησία, Σικελία, Ιταλία, Αυστρία και Αλγερία, Γιβραλτάρ, Ισπανία) που θα διασχίσουν τη θάλασσα αυτή περιοχή, καθιστούν τη στρατηγική της αξία ακόμη μεγαλύτερη. Επιπρόσθετα, τα πετρέλαια του Καυκάσου και της Κασπίας, με όποιο τρόπο κι αν τελικά προωθηθούν στις ανατολικές Μεσογειακές ακτές, αποτελούν σημαντικό παράγοντα για τη Μεσόγειο.

Ο καθοριστικός ρόλος που κατέχει η Ελλάδα στην Ε.Ε. οφείλεται στη γεωπολιτική της θέση και στην κομβική της θέση στην ευρύτερη περιοχή. Σύμφωνα με τις υπάρχουσες ναυτικές γεωπολιτικές θεωρίες, ο έλεγχος ολόκληρης της ανατολικής Μεσογείου εξαρτάται από την κατοχή των ακόλουθων τριών γεωστρατηγικών περιοχών: (α) των Στενών Βοσπόρου-Ελλησπόντου, (β) του Αιγαίου Πελάγους και της Κρήτης, και (γ) της Κύπρου. Και αυτό, διότι ο έλεγχος των παραπάνω περιοχών εξασφαλίζει την κυριαρχία στην ανατολική Μεσόγειο, τον έλεγχο των θαλάσσιων επικοινωνιών από και προς τον Εύξεινο Πόντο, στην Ερυθρά Θάλασσα και στην κεντρική και δυτική Ευρώπη. Μετά την είσοδο και της Κύπρου στην Ένωση, ο έλεγχος των προαναφερθέντων γεωστρατηγικών πυλώνων, του Αιγαίου - Κρήτης και της Κύπρου έχει περιέλθει στην Ε.Ε., η οποία, νοούμενη ως ενιαία πολιτική οντότητα, κατ' αυτό τον τρόπο αυξάνει τις γεωπολιτικές δυνατότητές της [9]. Λαμβάνοντας υπόψη τη διεύρυνση της Ε.Ε. προς ανατολάς και την επίσης διευρυμένη στις μέρες μας έννοια της ασφαλείας, θεωρούμε ότι η Μεσόγειος θα αποτελεί ίσως πλέον ένα νέο πεδίο πρόκλησης, που θα απαιτήσει την ιδιαίτερη προσοχή της Ε.Ε., προκειμένου η τελευταία να χαράξει τη μελλοντική της πολιτική, για τους ακόλουθους προσδιορισμούς γεωστρατηγικής:

- Μέσω της Μεσογείου διακινείται το μεγαλύτερο μέρος των ενεργειακών πόρων στον κόσμο, κυρίως σε πετρέλαιο και φυσικό αέριο. Από αυτή τη θάλασσα λεκάνη, είτε μέσω αγωγών είτε μέσω πετρελαιοφόρων πλοίων, διέρχεται το σύνολο των ενεργειακών πόρων τόσο του Περσικού Κόλπου όσο και της Κασπίας θάλασσας και της Ρωσίας, του μεγαλύτερου ενεργειακού ευρωπαϊκού εταίρου [10]. Ενδεικτικά, στο σημείο αυτό αναφέρεται η κατασκευή του πετρελαιοαγωγού Μπακού-Τσειχάν, που κόστισε τέσσερα δισ. δολάρια στον όμιλο της βρετανικής BP. Αν και η συντομότερη οδός για τη μεταφορά του πετρελαίου της Κασπίας στη θάλασσα διέρχεται μέσω του

Ιράν, η αντιδυτική στάση του καθεστώτος της Τεχεράνης υποχρέωσε το Καζακστάν να συνάψει συμμαχία με τη Ρωσία, ώστε ο ορυκτός πλούτος της Κασπίας να μεταφέρεται μέσω αγωγού στο ρωσικό λιμάνι του Νοβοροσίσκ στη Μαύρη Θάλασσα. Ο αγωγός αυτός, κατασκευασμένος από την αμερικανική ChevronTexaco, υπήρξε ο πρώτος ιδιωτικός αγωγός που περνούσε μέσα από το έδαφος της Ρωσίας (το ρωσικό κράτος διαθέτει μερίδιο 24% του αγωγού). Ο αγωγός Μπακού-Τσεϊχάν, αν και ιδιαίτερα δαπανηρός, εξυπηρετεί κυρίως τα αμερικανικά συμφέροντα, γιατί παρακάμπτει τη Ρωσία και μειώνει την εξάρτηση του Καυκάσου και της Κεντρικής Ασίας από τους ρωσικούς αγωγούς πετρελαίου [11].

- Η εξάρτηση της Ε.Ε. από εισαγόμενες πηγές ενέργειας αυξάνει συνεχώς, και υπολογίζεται ότι από 50% σήμερα θα φθάσει το 70% μέχρι το 2030, ίσως και νωρίτερα. Η πρόσβαση στις νέες πηγές φυσικού αερίου στην Κασπία και την Κεντρική Ασία καθώς και στα κοιτάσματα του Ιράν και της νότιας Μεσογείου αποτελούν ζωτικής σημασίας προτεραιότητες για την Ε.Ε. Ειδικά για το φυσικό αέριο, η ζήτηση αναμένεται να αυξηθεί κατακόρυφα τα επόμενα χρόνια. Η Ε.Ε. εξαρτάται αυτή τη στιγμή κατά τα δύο τρίτα των εισαγωγών της σε φυσικό αέριο από τη Ρωσία και την Αλγερία [12]. Συνολικά, η εξάρτηση των κρατών-μελών της Ε.Ε. είναι αρκετά υψηλή σε ενεργειακούς πόρους από τις Τ.Μ.Χ. (κυρίως Αλγερία, Λιβύη, Τυνησία), και μεγθύνεται από την ανασφάλεια που προκαλεί το υφιστάμενο ή διαφαινόμενο πλαίσιο στις πετρελαιοπαραγωγές χώρες της Μέσης Ανατολής.
- Η γεωγραφική διαμόρφωση της Μεσογείου, το πλήθος εθνοτήτων και θρησκευμάτων που επιβιώνουν επί αιώνες στα παράκτια της και τα αντικρουόμενα οικονομικά και στρατηγικά συμφέροντα που συνδέονται με την περιοχή, την έχουν καταστήσει πεδίο έντονου ανταγωνισμού. Η Μεσόγειος αποτελεί ταυτόχρονα το φυσικό και πραγματικό σύνορο δύο κόσμων με διαφορετική πολιτική, πολιτισμική και, κυρίως, οικονομική θέση: του ανεπτυγμένου Βορρά και του αναπτυσσόμενου Νότου, με αποτέλεσμα την ύπαρξη τριγμών και εντάσεων. Μεταξύ των δύο μερών υφίσταται «χάσμα ευημερίας», το οποίο, ήδη το 1992, καθιστούσε το Α.Ε.Π. των Τ.Μ.Χ. συνολικά 20 περίπου φορές μικρότερο από το Α.Ε.Π. των χωρών της Ευρωπαϊκής Ένωσης [13], ενώ ακόμη και η απορρόφηση των δέκα νέων «φτωχότερων» μελών από την Ένωση δεν βελτιώνει σημαντικά την εικόνα αυτή.
- Η κρίση του αραβικού εθνικισμού άφησε το πεδίο ελεύθερο στην παρέμβαση του Ισλάμ. Η επικράτηση φανατικών ισλαμιστών στις Τ.Μ.Χ., εκτός από τον αυξημένο κίνδυνο/δυσχέρειες που θα δημιουργήσει για τους ευρωπαίους πολίτες κατά τη διέλευση και παραμονή τους στις χώρες με ολοκληρωτικά καθεστώτα, θα αποτελέσει αφορμή για ανεξέλεγκτη μετανάστευση με προβλήματα εσωτερικής ασφάλειας των κρατών και εξάπλωση υπερεθνικού εγκλήματος.
- Το ΝΑΤΟ αντιμετωπίζει τον ισλαμισμό (που πολλές φορές συγχέεται με τον αραβικό εθνικισμό των προηγούμενων δεκαετιών) ως αντίπαλο δέος, αντίστοιχο του κομμουνισμού των προηγούμενων δεκαετιών, ικανό να δημιουργήσει νέες εστίες ανάφλεξης και συγκρούσεων στην εύφλεκτη περιοχή της νότιας Μεσογείου. Σύμφωνα με παλαιότερη δήλωση του πρώην γενικού γραμματέα του ΝΑΤΟ Βίλι Κλάες, στον ημερήσιο τύπο:

Μην υποτιμάτε τον κίνδυνο του ισλαμικού φανατισμού (fundamentalism). Είναι το ίδιο αν όχι και πιο επικίνδυνος από τον κομμουνισμό.

Ο Huntington προσδιόρισε μια σειρά από βασικούς παράγοντες που αυξάνουν την πιθανότητα σύγκρουσης του Ισλάμ με τον λεγόμενο Δυτικό-Χριστιανικό κόσμο [14], καθώς σύμφωνα με τις απόψεις του μια βασική αιτία αστάθειας όχι μόνο στη λεκάνη της Μεσογείου αλλά και παγκοσμίως είναι ο ισλαμικός φονταμενταλισμός που συντηρεί τις εθνικιστικές εντάσεις, την τρομοκρατία και τις αυταρχικές κοινωνίες. Οι παράγοντες αυτοί συνοψίζονται ως εξής:

- Η πληθυσμιακή έκρηξη στον μουσουλμανικό κόσμο, η οποία δημιούργησε μια δεξαμενή ανέργων και δυσαρεστημένων νέων που αποτελούν πρώτης τάξης ευκαιρία για στρατολόγηση στους ισλαμιστικούς σκοπούς.
- Η λεγόμενη «Μουσουλμανική Αναγέννηση» στις τελευταίες δεκαετίες του 20^{ου} αιώνα, η οποία ανανέωσε την εμπιστοσύνη των ισλαμιστών στον ιδιαίτερο χαρακτήρα και την αξία των μουσουλμανικών αρχών σε σύγκριση με τις αντίστοιχες της Δύσης.
- Τα φαινόμενα παγκοσμιοποίησης, που ερμηνεύονται ως προσπάθεια εξωτερικής επιβολής δυτικών προτύπων (για παράδειγμα η ρητορική των ανταρτών στο Ιράκ σχετικά με τον «εκδημοκρατισμό» της χώρας).
- Η απομάκρυνση του παλαιού κοινού εχθρού, του κομμουνισμού.
- Οι αυξανόμενες επαφές και μετακινήσεις Δυτικών και Μουσουλμάνων, οι οποίες διευκόλυναν τη διαπίστωση των διαφορών ως προς την πολιτισμική τους ταυτότητα.

III. Προσεγγίσεις στα Θέματα Ασφαλείας

Οι Scott D. Sagan και Kenneth N. Waltz, στο έργο τους *“The Spread of Nuclear Weapons, a Debate renewed”*, όπου εξετάζουν την διάδοση των πυρηνικών όπλων σε σχέση με το αίσθημα ασφάλειας των διαφόρων κρατών [15], διατυπώνουν την άποψη ότι, εφόσον τα κράτη συνυπάρχουν σε ένα καθεστώς αναρχίας, η έννοια της λεγόμενης «αυτοάμυνας» είναι η βασική αρχή δράσης για την εγγύηση της εθνικής ασφάλειας και κυριαρχίας, γεγονός που πιθανώς εξηγεί την τάση των Η.Π.Α. για μονομερή στρατιωτική δράση όταν απειλούνται ζωτικά της συμφέροντα. Οι ίδιοι, όμως, τονίζουν ότι οι πιθανότητες για ειρήνευση αυξάνονται όταν τα κράτη μπορούν να πετύχουν τους πιο σπουδαίους στρατηγικούς σκοπούς τους χωρίς χρήση βίας.

Επειδή η έννοια της ασφάλειας έχει προσλάβει πλέον μια νέα πιο διευρυμένη μορφή από εκείνη που είχε στο παρελθόν, κάθε προσπάθεια θεμελίωσης της συλλογικής ασφάλειας θα πρέπει να ακολουθήσει μια σύνθετη δράση και μορφή, προκειμένου να επιλύσει το πρόβλημα στη βάση της συνεργασίας των εμπλεκόμενων -κρατικών και μη- δρώντων, με αποφυγή (μονομερούς) στρατιωτικής δράσης, η οποία θα είχε ως αποτέλεσμα κυρίως τη συνέχιση του κύκλου της βίας, όπως αποδεικνύει η αμερικάνικη εμπλοκή στο Ιράκ. Η Ε.Ε., λαμβάνοντας υπόψη ότι η πολιτική ολοκλήρωσή της δεν έχει προχωρήσει σε βάθος, ότι παρουσιάζει μια ευρύτατη συνοριακή εγγύτητα με τον μουσουλμανικό κόσμο καθώς και την ύπαρξη μιας πανσπερμίας μουσουλμανικών μειονοτήτων στις διάφορες ευρωπαϊκές χώρες, πρέπει να ακολουθήσει μια διαφορετική προσέγγιση από εκείνη των Η.Π.Α. στα θέματα ασφαλείας. Η Ε.Ε. υποχρεούται να προάγει και να προστατεύει τα ανθρώπινα δικαιώματα και τις θεμελιώδεις ελευθερίες και να εγγυάται στους ευρωπαίους πολίτες ότι θα διατηρήσει και θα αναπτύξει τις ιδέες της ελευθερίας και δικαιοσύνης.

Ο Huntington υποστηρίζει ότι τα αμερικανικά συμφέροντα στον μετα-ψυχροπολεμικό κόσμο εξυπηρετούνται με τη διατήρηση των Η.Π.Α. ως κυρίαρχης παγκόσμιας δύναμης και την αποτροπή εμφάνισης πολιτικο-στρατιωτικής ηγεμονικής δύναμης στην Ευρασία. Η ιστορική εμπειρία, βεβαίως, δείχνει ότι η διατήρηση του μονοπολικού συστήματος επί μακρόν είναι ανέφικτη, καθώς οι υπόλοιπες δυνάμεις αργά ή γρήγορα αναγκάζονται να «εξισορροπήσουν» την ηγέτιδα δύναμη, είτε με δικά τους μέσα είτε μέσω συμμαχιών. Όσον αφορά στην περιοχή της Μεσογείου, μια πιθανή λύση στο συνολικό πρόβλημα ασφαλείας θα μπορούσε να δοθεί από την συνεργασία-σύγκλιση Ε.Ε. και Ρωσίας.

Δυστυχώς, το ενδεχόμενο μιας τέτοιας συνεργασίας συνεχώς απομακρύνεται, καθώς υπάρχει ήδη τεράστια απόκλιση σε σχέση με τις ρωσικές αντιλήψεις και προθέσεις. Σύμφωνα με τις δηλώσεις του προέδρου Πούτιν περί «διατήρησης του δικαιώματος ανάληψης μονομερούς δράσης κατά τρομοκρατών», μετά από την τελευταία πολύνεκρη τρομοκρατική ενέργεια από τους Μουσουλμάνους Τσετσένους αυτονομιστές στο Μπεσλάν της Ρωσίας, η ρωσική προσέγγιση του πολέμου κατά της τρομοκρατίας και της Al-Qaeda παρουσιάζει πολλές

ομοιότητες με την αντίστοιχη αμερικανική, όπως αυτή αποτυπώθηκε μετά από την άλλη τρομοκρατική επίθεση στους δίδυμους πύργους της Νέας Υόρκης, την 11^η Σεπτεμβρίου 2001, που συγκλόνησε την υφήλιο. Οι παραπάνω ομοιότητες προδιαθέτουν για νέα αιματοκυλίσματα, καθιστώντας επιτακτική την αυτόνομη δράση της Ε.Ε., ως του μόνου πόλου παγκόσμιας ισχύος που επιλύει τις διαφορές μέσα σε πνεύμα συνεργασίας αντί για την προσφυγή στα στρατιωτικά μέσα.

IV. Νέα Δεδομένα για την Ευρωπαϊκή Ασφάλεια

Επί των ημερών μας, η δυνητική αστάθεια και το αίσθημα ανασφάλειας στην περιοχή της νότιας Μεσογείου έχουν ενταθεί. Η μετα-ψυχροπολεμική περίοδος που ακολούθησε μοιραία τη διάσπαση του Συμφώνου της Βαρσοβίας και της Σοβιετικής Ένωσης, στο τέλος της δεκαετίας του '80 και στις αρχές της δεκαετίας του '90, ανέτρεψε υπέρ των Η.Π.Α. την ισορροπία δυνάμεων στο παγκόσμιο γίγνεσθαι. Η έλλειψη ασφάλειας που σε πρώτο στάδιο έγινε ορατή στην κεντρική και ανατολική Ευρώπη, λίγο αργότερα εμφανίστηκε και στην περιοχή της νότιας και ανατολικής Μεσογείου. Οι χώρες της Ε.Ε., με τα δημοκρατικά τους πολιτεύματα, το δυτικό τους πολιτισμό, το υψηλό βιοτικό τους επίπεδο καθώς και με την προοπτική της ενοποίησης, αναζητούν την ασφάλειά τους μέσα από ένα πλέγμα συμμαχιών, συμφωνιών και συλλογικών οργάνων, παράλληλα με τις ισχυρές και σύγχρονες Ένοπλες Δυνάμεις τους. Στον αντίποδα των ευρωπαϊκών χωρών, οι αραβικές χώρες της βόρειας Αφρικής (και Μέσης Ανατολής) υποφέρουν από συμπτώματα τριτοκοσμικά, όπως δημογραφικό πλεόνασμα, προβληματική οικονομία, αυταρχικά καθεστώτα, ελλιπή παιδεία, πλημμελές σύστημα υγείας, μεγάλη ανεργία κ.λπ., τα οποία αποτελούν αντικείμενο εκμεταλλεύσεως εκ μέρους των Ισλαμιστών. Στις απέναντι ακτές της Μεσογείου παρατηρούνται η χαμηλότερη και υψηλότερη γεννητικότητα (1,5 και 6 παιδιά ανά γυναίκα αντίστοιχα) και, κυρίως, η μεγαλύτερη παγκοσμίως έλλειψη οικονομικής ισορροπίας καθώς και τεράστιες αποκλίσεις ανάπτυξης.

Τα νέα δεδομένα που δυναμιτίζουν την ασφάλεια στην περιοχή της Μεσογείου μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- Η ραγδαία πληθυσμιακή μεγέθυνση των χωρών της Αφρικής και της Μέσης Ανατολής θα επιφέρει σημαντικά πλήγματα στο παγκόσμιο οικολογικό σύστημα, τα οποία λόγω ανεπάρκειας και έλλειψης προετοιμασίας δεν θα είναι δυνατόν να αντιμετωπιστούν, και θα ενισχύσει τα μεταναστευτικά ρεύματα που κινούνται από τις χώρες αυτές προς τις χώρες της Δύσης, με τις γνωστές συνέπειες που αυτό συνεπάγεται. Για την έκρηξη του πληθυσμού προβλέπονται τα εξής στοιχεία: μέχρι το 2025 προβλέπεται συνολική αύξηση του πληθυσμού των χωρών της Ε.Ε. κατά 5 εκατομμύρια κατοίκους ενώ η αντίστοιχη αύξηση στα κράτη της βόρειας Αφρικής θα φτάσει τα 108 εκατομμύρια κατοίκους.
- Η συνεχής διεύρυνση της επιρροής των κινημάτων των **φανατικών μουσουλμάνων**. Στην περίπτωση αυτή, την ανασφάλεια επιτείνει το γεγονός ότι περαιτέρω αποσταθεροποίηση της Μεσογείου θα προκληθεί από τον έντονο ισλαμικό φονταμενταλισμό, που έχει άτυπα αντικαταστήσει τον «αραβικό εθνικισμό» τύπου Νάσερ ή Καντάφι. Μάλιστα, αυτά τα κινήματα κατόρθωσαν να αποκτήσουν ερείσματα σε κρατικές δομές με στόχο την ανατροπή των καθεστώτων δυτικής επιρροής.
- Οι μείζονες διαμάχες θρησκευτικού χαρακτήρα.
- Η εξάπλωση της τρομοκρατίας.
- Η διασπορά όπλων μαζικής καταστροφής σε χώρες με ασταθείς πολιτικές ηγεσίες.
- Η παρασκευή και παράνομη διακίνηση των ναρκωτικών.
- Η περιβαλλοντική απάθεια έως εγκληματικότητα των Τ.Μ.Χ. Σημαντική απειλή για τη ζωή στη Μεσόγειο αποτελεί η αύξηση της ρύπανσης και η υποβάθμιση του περιβάλλοντος, λόγω της «άναρχης» εκβιομηχάνισης, της παντελούς έλλειψης κεντρικού κρατικού σχεδιασμού και της υπερσυγκέντρωσης των πληθυσμών στις ακτές.

- Τα προβλήματα των μειονοτήτων που υπάρχουν σε ορισμένες χώρες της Μεσογείου. Τα πρόσφατα γεγονότα στη Γαλλία προβάλλουν πλέον καθαρά την πολιτική, οικονομική, κοινωνική και βαθιά ανθρώπινη διάσταση της μετανάστευσης, και αποδεικνύουν περίτρανα ότι καμία χώρα δεν μπορεί να διαχειριστεί τη μετανάστευση μόνο ως θέμα διοικητικής φύσης.

Η μετα-ψυχροπολεμική περίοδος κληρονόμησε στην περιοχή της βόρειας Αφρικής περισσότερη αστάθεια από αυτή που επικρατούσε κατά την ψυχροπολεμική περίοδο ανάμεσα στις δύο Υπερδυνάμεις. Πράγματι, παρότι η ισορροπία της ψυχροπολεμικής περιόδου θα λέγαμε ότι ήταν υπό μία έννοια εύθραυστη και δυνητικά ασταθής, εντούτοις δεν επέτρεπε - και δεν επέτρεψε τελικά- τη δημιουργία εντάσεων που θα μπορούσαν να διαταράξουν το παγκόσμιο σύστημα ασφαλείας και την ειρήνη, καθόσον υπήρχε έντονη η αίσθηση του μέτρου, λόγω αυτής ακριβώς της διπολικής ισορροπίας.

Η δυναμική που μέχρι σήμερα έχει αναπτύξει η Ε.Ε. δεν μπορεί να αποτελέσει το αντίπαλο δέος απέναντι στις Η.Π.Α. και να αποκαταστήσει την αναγκαία ισορροπία στην περιοχή. Παρότι μέχρι σήμερα η Ε.Ε. έχει κάνει σημαντικά βήματα για την εδραίωση της ασφάλειας στη νοτιοανατολική Μεσόγειο, είναι δεδομένο ότι απαιτείται η περαιτέρω πολιτική της χειραφέτηση προς αυτή την κατεύθυνση και η ανάδειξη πρωτοβουλιών υπέρ των Τ.Μ.Χ και του ευρύτερου περιβάλλοντος της νότιας Μεσογείου. Σκοπός θα πρέπει να είναι η βελτίωση της οικονομικής δραστηριότητας των Τ.Μ.Χ., ώστε να περιοριστεί το φαινόμενο της μετανάστευσης προς την Ε.Ε. Επιπλέον, η εξάλειψη της ανεργίας και της φτώχειας θα μειώσει τις κοινωνικές τριβές και τα λαϊκά ερείσματα των φανατικών μουσουλμάνων, δίνοντας νέα πνοή στη νομιμότητα των κυβερνήσεων των χωρών της βόρειας Αφρικής.

V. Ευρωπαϊκή Προσέγγιση Συνεργασίας-Ασφάλειας

Οι ταχύτατες αλλαγές που συντελούνται σε παγκόσμιο οικονομικό, κοινωνικό και πολιτιστικό επίπεδο, οι οικονομικές ανισότητες που αναδύονται, καθώς και οι πολιτικές διεκδικήσεις και αντιπαραθέσεις δημιουργούν σε ορισμένες περιοχές κλίμα έντασης και πέσεων. Ο 21^{ος} αιώνας άρχισε με δύο μεγάλες παγκόσμιες κρίσεις / πολέμους, στο Αφγανιστάν και Ιράκ, και έφερε στο προσκήνιο τις νέες, ασύμμετρες, όπως χαρακτηρίστηκαν, απειλές, κύριος εκφραστής των οποίων είναι η διεθνής τρομοκρατία. Οι κυριότερες μορφές των ασύμμετρων απειλών είναι η δημιουργία εθνικο-θρησκευτικού φανατισμού και ριζοσπαστισμού, το διεθνές οργανωμένο έγκλημα, η διακίνηση ναρκωτικών, το παράνομο εμπόριο όπλων και η διασπορά πυρηνικών όπλων και όπλων μαζικής καταστροφής. Οι εκδηλώσεις τρομοκρατίας ενδέχεται να βασίζονται τόσο εκτός Ευρώπης - όπως στην περίπτωση της ισλαμικής τρομοκρατίας- όσο και στο εσωτερικό της. Παρόλο που δεν είναι σαφές αν υπάρχουν ή όχι διασυνδέσεις μεταξύ των δύο, ωστόσο επιτίθενται αμφότερες κατά των αξιών στις οποίες εδράζεται η Ε.Ε. και αποτελούν την ίδια απειλή για όλους τους Ευρωπαίους. Για την Ελλάδα, όλες οι μορφές των ασύμμετρων απειλών είναι υπαρκτές, ανεξάρτητα εάν είναι άμεσες ή όχι. Ειδικότερα το θέμα της λαθρομετανάστευσης που επιτείνεται από την ελλιπή φύλαξη των συνόρων, σε συνδυασμό με το δημογραφικό πρόβλημα της χώρας μας, αποτελεί μία άμεση απειλή.

Η Ε.Ε. θα πρέπει να συντονιστεί έγκαιρα στην κατεύθυνση της πρόληψης, προκειμένου να αποφύγει την ανάληψη οδυνηρών και αμφίβολης αποτελεσματικότητας μέτρων αντίδρασης και καταστολής, που θα διακυβεύσουν την εξέλιξή της, μέσω της οικονομικής και πολιτικής ενοποίησης, σε πόλο του μελλοντικού Διεθνούς Συστήματος. Η κοινή προσπάθεια για την επίτευξη σταθερότητας και ευημερίας τόσο εντός των γεωγραφικών ορίων της Ε.Ε., όσο και στους γειτονικούς με αυτά χώρους, αποτελεί χρέος όλων των μελών της. Είναι δεδομένο ότι η δυναμική που μέχρι σήμερα έχει αναπτυχθεί στις εξεταζόμενες χώρες απαιτεί από την Ε.Ε. να υπερβεί τον εαυτό της, προκειμένου να επιτύχει τα ζητούμενα αποτελέσματα. Πολιτικές που είτε βασίζονται σε συμμαχίες και σφαίρες επιρροής είτε καθιστούν την Ε.Ε. μέρος των

εξελισσόμενων διαφορών θα πρέπει να παραμερισθούν στο πλαίσιο οικοδόμησης ενός ειρηνικού περιβάλλοντος. Μόνο με πολιτικές που θεμελιώνονται στην αμοιβαία εμπιστοσύνη, τη συνεργασία και τις συναινετικές διαδικασίες μπορεί να επιτευχθεί το ζητούμενο, επειδή είναι πλέον δεδομένο ότι η ανισόρροπη ανάπτυξη εγκυμονεί τελικά πολλούς κινδύνους. Οι μεγάλες αλλαγές που συντελέστηκαν με την κατάρρευση του διπολικού συστήματος και συνεχώς μετεξελίσσονται επιβάλλουν τη διεύρυνση της συνεργασίας των κρατών μελών της Ε.Ε. και του αραβικού κόσμου.

VI. Ανάλυση

Προκειμένου να εξετάσουμε τις πιθανές επιλογές δράσης της Ε.Ε., θα χρησιμοποιήσουμε τη διάκριση του Joseph Nye [16] περί ήπιας ισχύος που περιλαμβάνει τον πολιτικό-πολιτιστικό άξονα, και σκληρής ισχύος που περιλαμβάνει τη στρατιωτική και οικονομική δραστηριότητα. Τουλάχιστον οι σχεδιαστές της επίθεσης της 11^{ης} Σεπτεμβρίου 2001 στους δίδυμους πύργους της Νέας Υόρκης φαίνεται ότι χρησιμοποίησαν τη διάκριση αυτή, καθόσον οι στόχοι τους αφορούσαν [17]:

- Τη στρατιωτική ισχύ των Η.Π.Α., μέσω του πλήγματος του Αμερικανικού Πενταγώνου.
- Την οικονομική ισχύ των Η.Π.Α., μέσω της καταστροφής του κατεξοχήν συμβόλου του καπιταλισμού και της παγκοσμιοποιημένης οικονομίας, δηλαδή των πύργων του Διεθνούς Κέντρου Εμπορίου της Ν. Υόρκης.
- Την πολιτική-πολιτισμική αμερικάνικη ισχύ, αφού εικάζεται ότι το αεροπλάνο που έπεσε στην Πενσυλβάνια είχε στόχο τον Λευκό Οίκο ή το Αμερικάνικο Κογκρέσο.

Σε πολιτικό και πολιτισμικό επίπεδο υπάρχουν μικρά περιθώρια συνεργασίας, καθώς το σύνολο των καθεστώτων στις αραβικές χώρες έχουν απολυταρχικό-προσωποπαγή χαρακτήρα που βρίσκεται μακριά από τη δημοκρατική παράδοση των χωρών της Ε.Ε. Επιπρόσθετα, ο μουσουλμανικός πολιτισμός διατηρεί ακέραιη τη δυναμικότητά του και είναι αμφίβολο κατά πόσο θα επιτρέψει τη διείσδυση των ευρωπαϊκών ιδεών και αξιών στη σφαίρα επιρροής του.

Με περιορισμένη ισχύ στρατιωτικού βραχίονα, η Ε.Ε. έχει μικρές δυνατότητες να επέμβει στρατιωτικά στη Μεσόγειο, με βάση το αντίστοιχο αμερικανικό παράδειγμα στο Αφγανιστάν και Ιράκ, παρά τον σχετικά πρόσφατο σχηματισμό στρατιωτικών δυνάμεων μεσογειακού προσανατολισμού, όπως οι EUROFOR και EYROMARFOR. Υπό το πρίσμα ότι μια στρατιωτική αντιπαράθεση με τις χώρες της βόρειας Αφρικής φαντάζει σαν εξαιρετικά απίθανο ενδεχόμενο, το NATO έχει ήδη ξεκινήσει μια διαδικασία προσέγγισης με το μεσογειακό Νότο²⁰, στα πλαίσια της σύσφιξης στρατιωτικών σχέσεων. Με δεδομένη την παραδοσιακή δυσπιστία των αραβικών κρατών απέναντι στη Δύση, εξακολουθεί να υφίσταται έντονη η ανάγκη ενίσχυσης του σχετικού διαλόγου αυτόνομα της Ε.Ε. με τους Μεσογειακούς εταίρους επί θεμάτων Ευρωπαϊκής Πολιτικής Αμυνας και Ασφαλείας (ΕΠΑΑ), με στόχο την ενίσχυση της αμοιβαίας κατανόησης και τη συνεργασία σε θέματα πρόληψης συγκρούσεων και διαχείρισης κρίσεων. Διευκρινίζεται ότι η Ε.Ε. έχει συμφωνήσει στη δημιουργία 18 διαφορετικών σχηματισμών μάχης (Battle Groups), με στόχο την ανάληψη ειρηνευτικών και ανθρωπιστικής βοήθειας αποστολών αλλά γενικά υφίσταται απροθυμία στην ενεργοποίηση των εν λόγω συμφωνιών [18].

Για την Ε.Ε., η επίτευξη της ασφάλειας και η επίλυση των προβλημάτων που αντιμετωπίζουν οι νότιες χώρες της Μεσογείου αποτελούν αναγκαίους όρους για τη θεμελίωση της νέας, μετά

²⁰Ο λεγόμενος “Μεσογειακός Διάλογος Ασφαλείας” πραγματοποιείται μεταξύ της Συμμαχίας και της Αιγύπτου, της Αλγερίας, του Μαρόκου, της Τυνησίας, της Μαυριτανίας, της Ιορδανίας και του Ισραήλ. Επίσης, έχει παραχωρηθεί το καθεστώς “special non-NATO ally status” σε Αίγυπτο και Ιορδανία, που σημαίνει ότι αυτές οι χώρες απολαμβάνουν όλα τα προνόμια της Συμμαχίας πλην της ενεργοποίησης της στρατιωτικής συνδρομής.

τη Βαρκελώνη, εταιρικής σχέσης μεταξύ της Ένωσης και των χωρών αυτών. Σύμφωνα με αυτή τη προσέγγιση, η επίλυση των προβλημάτων που απασχολούν τις χώρες του μεσογειακού Νότου αλλά και η επίτευξη της σταθερότητας, της πολιτικής ασφάλειας και της οικοδόμησης ενός ειρηνικού περιβάλλοντος στο νότιο τμήμα της Μεσογείου, συνδέονται άρρηκτα με την οικονομική τους ανάπτυξη. Η ασφάλεια στο χώρο της Μεσογείου δεν πρέπει να εστιάζεται στη στρατιωτική ισχύ αλλά στη συνεργασία, την υγιή οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη, την περιβαλλοντική ασφάλεια και το σεβασμό των ανθρωπίνων δικαιωμάτων.

A. Η Διακήρυξη της Βαρκελώνης

Η Διακήρυξη της Ε.Ε. στη Βαρκελώνη, το 1995, ήταν η πρώτη ολοκληρωμένη παρέμβαση της στο χώρο της Μεσογείου. Η ασφάλεια, στη σημερινή εποχή, είναι μία πολυδιάστατη έννοια η οποία δεν κατοχυρώνεται με στρατιωτικά μέσα, αλλά προϋποθέτει διεύρυνση και εκδημοκρατισμό. Προκειμένου η Ένωση να προωθήσει την ειρήνη και τη σταθερότητα στην περιοχή της Μεσογείου και της Μ. Ανατολής, ξεκίνησε την Ευρωμεσογειακή Συνεργασία, κατά την Κοινή Σύνοδο των ΥΠΕΞ της Μεσογείου και των ΥΠΕΞ της Ε.Ε. Στη Διάσκεψη που πραγματοποιήθηκε στις 27 και 28 Νοεμβρίου 1995 είκοσι επτά Υπουργοί Εξωτερικών, που αντιπροσώπευαν τα (τότε) κράτη μέλη της Ε.Ε. και τους δώδεκα Μεσογειακούς εταίρους της, αποδέχτηκαν ομόφωνα την Ανακοίνωση της Βαρκελώνης που εγκαθίδρυσε μια Ευρωμεσογειακή Εταιρική Σχέση [19]. Η Διακήρυξη της Βαρκελώνης δρομολογεί τρεις τομείς δράσης:

- (α) τον πολιτικό και ασφάλειας (μεταξύ άλλων, αναφορές στα δικαιώματα του ανθρώπου, τη δημοκρατία, το κράτος δικαίου, την ανάγκη σχέσεων καλής γειτονίας κ.λπ.),
- (β) τον οικονομικό-χρηματοδοτικό,
- (γ) τον ανθρώπινο, κοινωνικό και πολιτιστικό (ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην ανάπτυξη της «κοινωνίας των πολιτών», που αποτελεί μοχλό της ουσιαστικής υλοποίησης της Ευρωμεσογειακής εταιρικής σχέσης).

Η Ευρωμεσογειακή Συνεργασία περιλαμβάνει:

- Τη δημιουργία κοινής Ευρωμεσογειακής περιοχής, μέχρι το 2020, με σκοπό τη σταδιακή δημιουργία περιοχής ελεύθερου εμπορίου και τη μεγιστοποίηση των κοινών ωφελειών, μέσα σε μια διευρυμένη, καλύτερα οργανωμένη και με περισσότερες ευκαιρίες για συνεργασία μεσογειακή αγορά.
- Πολιτική συνεργασία και συνεργασία σε θέματα ασφαλείας.
- Κοινωνική και πολιτισμική συνεργασία.
- Οικονομική συνεργασία και συνεργασία σε θέματα ανάπτυξης.
- Ανάπτυξη των ανθρωπίνων δυνατοτήτων και της συνεργασίας.

Η σύναψη διμερών Ευρωμεσογειακών Συμφωνιών Σύνδεσης, που αντικαθιστούν τις από το 1976 διμερείς Συμφωνίες Συνεργασίας Ε.Ε.-Τ.Μ.Χ., παρουσιάζει αξιοσημείωτη πρόοδο. Το 1995 η Τυνησία έγινε η πρώτη χώρα στη νότια ακτή της Μεσογείου που υπέγραψε συμφωνία σύνδεσης και συμφωνία ελεύθερου εμπορίου με την Ε.Ε. Έχουν ήδη υπογραφεί Ευρωμεσογειακές Συμφωνίες Σύνδεσης με το Ισραήλ, το Μαρόκο, την Ιορδανία, την Αίγυπτο, την Παλαιστινιακή Αρχή, το Λίβανο και την Αλγερία, ενώ δεν έχουν ακόμη ολοκληρωθεί οι διαπραγματεύσεις με τη Συρία. Η Λιβύη δεν συμμετέχει στην Ευρωμεσογειακή Συνεργασία. Επισημαίνεται ότι η Λιβύη επίσημα είναι σε καθεστώς επιβολής οικονομικών κυρώσεων από την Ε.Ε. αλλά εκτιμάται ότι η πρόσφατη μεταστροφή του Μουαμάρ Καντάφι θα επιτρέψει την ομαλοποίηση των σχέσεων.

Η οικονομική υποστήριξη της Ε.Ε. (Προγράμματα MEDA, PHARE και TACIS) για την αναμόρφωση των οικονομικών και κοινωνικών δομών της περιοχής ανέρχεται σε 5,35 δις ευρώ (2000-2006) [3]. Στο τελευταίο αυτό ποσό προστίθεται η συνεισφορά της Ευρωπαϊκής

Τράπεζας Επενδύσεων (ΕΤΕπ), ύψους 7,4 δις ευρώ, για έργα υποδομών, ανάπτυξης, ανοικοδόμησης και στήριξης του ιδιωτικού τομέα στις Τ.Μ.Χ. [20].

B. Η Διακήρυξη της Βαρκελώνης Μετά από Δέκα Χρόνια

Η διαδικασία της Βαρκελώνης συνέβαλε, από το 1995, στην ειρήνη, τη σταθερότητα και την ανάπτυξη στην περιοχή της Μεσογείου. Τιμώντας τη συμπλήρωση των δέκα χρόνων συνεργασίας και από κοινού δράσης, αρχηγοί κρατών και κυβερνήσεων συναντήθηκαν εκ νέου το Νοέμβριο του 2005 κατά τις εργασίες της Ευρωμεσογειακής Διάσκεψης στη σύνοδο κορυφής στη Βαρκελώνη. Στο πλαίσιο της συνεργασίας των δύο πλευρών, η Ε.Ε. έχει προσφέρει περισσότερα από 11 δις δολάρια για βοήθεια χωρών της Μεσογείου και της βόρειας Αφρικής. Ορισμένες κοινοτικές κυβερνήσεις ασκούν πιέσεις προκειμένου η οικονομική βοήθεια να συνδέεται με την προώθηση δημοκρατικών μεταρρυθμίσεων και την υπεράσπιση των ανθρωπίνων δικαιωμάτων. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στο θέμα της τρομοκρατίας, το οποίο και απασχόλησε έντονα το σύνολο των μετεχόντων στην τελευταία Ευρωμεσογειακή Διάσκεψη. Από τη Διάσκεψη απείχαν σχεδόν όλοι οι ηγέτες αραβικών χωρών καθώς και ο πρωθυπουργός του Ισραήλ Αριέλ Σαρόν, γεγονός που καταδεικνύει ότι το χάσμα μεταξύ των δύο πλευρών παραμένει [21].

VII. Συμπεράσματα

Η Ευρωμεσογειακή Συνεργασία που θεσπίστηκε με την διακήρυξη της Βαρκελώνης προσφέρει ένα επαρκές θεσμικό πλαίσιο για την λήψη πρωτοβουλιών που συμβάλλουν στην απάλειψη των εστιών εντάσεως στην περιοχή. Προσοχή πρέπει να δοθεί στην ιδέα της εμπάθυνσης του Μεσογειακού Διαλόγου στα πλαίσια του ΝΑΤΟ, ώστε να μην οδηγήσει αβασάνιστα σε αντιπαραγωγική επικάλυψη των αντίστοιχων θεσμών της Ε.Ε. (π.χ. πολιτισμικά προγράμματα συνεργασίας και θρησκευτικού διαλόγου), που μέχρι στιγμής έχουν δοκιμαστεί με επιτυχία, εξασφαλίζοντας με πολιτικά μέσα και εργαλεία τη συστράτευση του αραβικού κόσμου στον αντιτρομοκρατικό αγώνα. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι πατροπαράδοτα καλές σχέσεις της Ελλάδας με τον αραβικό κόσμο μπορούν να αποτελέσουν το βασικό μοχλό για την ανάπτυξη και την ενδυνάμωση των σχέσεων μεταξύ των λαών και των κυβερνήσεων των μελών της Ε.Ε. και του αραβικού κόσμου, με βάση το σεβασμό στις διαφορετικές πολιτισμικές πτυχές των λαών που συνωστίζονται στη λεκάνη της Μεσογείου. Η εμπλοκή της χώρας μας στα ευρωπαϊκά δρώμενα πρέπει να αντικατοπτρίζει τόσο τη σημασία της γεωγραφικής της θέσης όσο και την περιφερειακή της ισχύ.

Η μεσογειακή πολιτική της Ένωσης πρέπει να είναι δραστική, μεγαλόπνοη και ομόθυμη. Όχι μόνο γιατί η Μεσόγειος είναι η κοιτίδα της Ευρώπης από ιστορική, πολιτισμική και εθνολογική άποψη, αλλά και γιατί και με σύγχρονα γεωπολιτικά και οικονομικά κριτήρια η Μεσόγειος έχει δεσπόζουσα παγκόσμια σημασία. Για να είναι αποτελεσματική η δράση στον τομέα αυτό, πρέπει να είναι εστιασμένη σε συγκεκριμένους τομείς, με ιδιαίτερη έμφαση στην οικονομική ανάπτυξη και συνεργασία με τις Τ.Μ.Χ. Προβληματισμούς δημιουργεί η δυνατότητα αξιοποίησης της χρηματοδοτικής βοήθειας που παρέχει η Ε.Ε.²¹ Η Ένωση πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις ιδιαιτερότητες των μεσογειακών χωρών και να εξορθολογεί τις εκτιμήσεις της αναφορικά προς τις δυνατότητες των Αράβων στη δημιουργία / εκμετάλλευση νέων αγορών. Η έννοια της διευρυμένης οικονομικής συνεργασίας είναι πάντα ένα αξιόπιστο πεδίο συνάντησης ανθρώπων, επιχειρήσεων, κρατών και πολιτισμών. Επομένως, η χρήση του οικονομικού βραχίονα προβάλλει ως η μόνη λύση για την απάλειψη των εντάσεων και τη βελτίωση του κλίματος ασφάλειας στην περιοχή της νότιας Μεσογείου. Ως χαρακτηριστικό

²¹ Η χρηματοδοτική βοήθεια της Ε.Ε. για τη στήριξη των προσπαθειών που καταβάλλουν οι Τ.Μ.Χ. για τη μεταρρύθμιση των οικονομικών, κοινωνικών και διοικητικών τους δομών περιλαμβάνει 3.424,5 εκατ. ecus με το χρηματοδοτικό Κανονισμό MEDA I, από τα οποία απορροφήθηκαν μόλις 890 εκατ. ecus, ήτοι το 26%, μεταξύ 1995-99 και 5,35 δις ευρώ με το MEDA II για την περίοδο 2000-2006.

παράδειγμα μπορεί να χρησιμεύσει το παράδειγμα της Λιβύης, όπου είναι πλέον επιβεβλημένη η αποκατάσταση των εμπορικών σχέσεων της με την Ε.Ε.

Οι κοινοί στόχοι της Ευρωπαϊκής πολιτικής συνοψίζονται ως εξής:

- Ανάπτυξη, προώθηση και προβολή της φιλίας, της συνεργασίας και της αλληλεγγύης μεταξύ των λαών της Μεσογείου.
- Ενθάρρυνση και ανάπτυξη της επικοινωνίας μεταξύ των λαών, με την βοήθεια μη κυβερνητικών οργανώσεων, πολιτιστικών φορέων και συλλόγων, είτε ακόμα και οικονομικών φορέων, επαγγελματικών οργανώσεων ή φορέων τοπικής αυτοδιοίκησης κάθε επιπέδου.
- Συμβολή στην υπεράσπιση των ανθρωπίνων δικαιωμάτων, της κοινωνικής δικαιοσύνης, των διαδικασιών εκδημοκρατισμού, της προστασίας του περιβάλλοντος και της παγίωσης της ειρήνης, της συνεργασίας και της σταθερότητας μεταξύ των λαών.
- Ανάδειξη και αξιοποίηση του οικονομικού, κοινωνικού και πολιτιστικού δυναμικού των χωρών της Μεσογείου.

Η Μεσόγειος ήταν πάντοτε ένας χώρος φορτισμένος ιδεολογικά και με πολλές αντιθέσεις, οι οποίες συχνά οδηγούσαν σε σκληρές συγκρούσεις. Παρά ταύτα, λειτούργησε συνθετικά σε λαούς, πολιτισμούς και θρησκείες. Η διαμόρφωση μιας μεσογειακής πολιτικής με οικονομικό και κοινωνικό χαρακτήρα ανάπτυξης για το ξεπέρασμα των ανισοτήτων συνιστά αναγκαίο όρο. Αναφέρεται χαρακτηριστικά το παράδειγμα της ρύθμισης / διαχείρισης της μετανάστευσης με προγράμματα υποστήριξης. Τα εν λόγω προγράμματα βασίζονται στη δημιουργία κινήτρων παραμονής στις χώρες προέλευσης. Η ανάπτυξη, η εξασφάλιση ανθρωπίνων συνθηκών αξιοπρέπειας και εν γένει συνθηκών που συμβάλλουν στην ευημερία είναι σε γενικές γραμμές η απάντηση στο πρόβλημα της μετανάστευσης. Το ζητούμενο είναι η διαμόρφωση μεσογειακών πολιτικών που θα επιδιώκουν την ειρήνη, την ασφάλεια, τη σταθερότητα, τη συνεργασία και τη φιλία των λαών. Είναι βέβαιο ότι η εμπέδωση ενός αισθήματος ασφάλειας στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου περνά μέσα από την οικονομική ανάπτυξη του ευρωπαϊκού νότου. Είναι επίσης βέβαιο ότι η πολυδιάστατη συμβολή της Ε.Ε. προς τις χώρες της νότιας Μεσογείου θα αποβεί πολλαπλά χρήσιμη στην ίδια την Ε.Ε. Έχει αποδειχθεί στην πράξη ότι οι καλές σχέσεις στο διεθνές πεδίο ωφελούν πρώτα τους διεθνείς δρώντες (εδώ βλ. Ε.Ε.) που προωθούν τη δημιουργία τους.

Αναφορές

1. Ιστοσελίδα www.el.wikipedia.org (Μεσόγειος Θάλασσα).
2. Ι. Α. Σεϊμένη και Π. Π. Σιούσιουρα, “Ευρωμεσογειακές Σχέσεις”, εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, σελ. 39, 2003.
3. Ιστοσελίδα www.in.gr/news/reviews (Οι Αλληπάλληλες Διευρύνσεις της Ε.Ε.).
4. Ιστοσελίδα www.in.gr/news (Ταραχές στη Γαλλία).
5. Ιστοσελίδες www.news.bbc.co.uk (Middle East Conflict) και www.news.bbc.co.uk (Violence mars Egyptian elections).
6. S. P. Huntington, “The Clash of Civilizations and the Remaking of World Order”, Simon-Schuster, New York, σελ. 35, 1996.
7. Σεϊμένη και Σιούσιουρα, σελ. 40, 2003.
8. Ιστοσελίδα www.en.wikipedia.org/wiki/Geopolitics.
9. Γ. Παρασκευάς, άρθρο “Ελλάς - Κύπρος – Τουρκία. Μια σύγχρονη Γεωπολιτική Επισκόπηση”, ηλεκτρονικό έντυπο Συνδέσμου Επιτελών Εθνικής Αμύνης, 4 Νοεμβρίου 2005.
10. Η. Αλεξόπουλος, “Η Ανατολική Μεσόγειος και ο Ρυθμιστικός της Ρόλος στην Εξασφάλιση Ενεργειακών Πόρων από την Κασπία”, Πανεπιστήμιο Αιγαίου (Εργαστήριο Μεσογειακής Πολιτικής-έκδοση: Η Μεσόγειος στον 21^ο Αιώνα. Προβλήματα και Προοπτικές), Ρόδος, σελ. 117, 2002.

11. Ιστοσελίδα www.news.kathimerini.gr | Όταν οι επιχειρήσεις συναντούν τη γεωπολιτική.
12. Ιστοσελίδα www.mfa.gr (Ελληνική Δημοκρατία-Υπουργείο Εξωτερικών).
13. Σειμένη και Σιούσιουρα, σελ. 57, 2003.
14. Huntington, σελ. 211, 1996.
15. Scott D. Sagan και Kenneth N. Waltz, “*The Spread of Nuclear Weapons, a Debate renewed*”, W. W. Norton & Company Inc., New York, σελ. 4-5, 2003.
16. Ιστοσελίδα www.observer.guardian.co.uk (Joseph Nye: Why military power is no longer enough).
17. G. Kepel, “*Jihad-The Trail of Political Islam*”, μεταφρασμένο στην Αγγλική γλώσσα από τον Anthony F. Roberts, The Belknap Press of Harvard University Press, Massachusetts, σελ. 2-11, 2002.
18. Ν. Μπέλλος, άρθρο “*Ευρωστρατός στην Ελλάδα*”, εφημερίδα *Ελεύθερος Τύπος*, 22 Νοεμβρίου 2005.
19. Ιστοσελίδα www.europa.eu.int (The Euro-Mediterranean Partnership - Overview).
20. Ιστοσελίδα www.mfa.gr (Ευρωμεσογειακή Συνεργασία).
21. Ιστοσελίδα <http://www.in.gr/news/article.asp?lngEntityID=666617>.

Σύντομα βιογραφικά σημειώματα

Ο **Δημήτριος Δαλακλής** κατέχει μεταπτυχιακή εξειδίκευση Master in Science of Defense Analysis από το Naval Postgraduate School (Monterey-California-USA).

Ο **Πέτρος Σιούσιουρας** είναι Επίκουρος Καθηγητής στο Πανεπιστήμιο Αιγαίου, όπου διδάσκει «Γεωπολιτική και θαλάσσιες μεταφορές».