



ΔΠΜΣ

Διοίκηση στη Ναυτική Επιστήμη και Τεχνολογία

Διπλωματική Εργασία

“ Μοντέλα Προσομοίωσης Θαλασσίου Κυματισμού και Εφαρμογές
σε Επιχειρησιακές Δραστηριότητες του Πολεμικού Ναυτικού ”

Γεώργιος Ταυρής

“ΜΝΣΝΔ 20064»

Επιβλέπων:

Γεώργιος Γαλάνης

Πειραιάς

Φεβρουάριος 2022

ΔΗΛΩΣΗ ΑΥΘΕΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ / ΖΗΤΗΜΑΤΑ COPYRIGHT

Το άτομο το οποίο εκπονεί την Διπλωματική Εργασία φέρει ολόκληρη την ευθύνη προσδιορισμού της δίκαιης χρήσης του υλικού, η οποία ορίζεται στην βάση των εξής παραγόντων: του σκοπού και χαρακτήρα της χρήσης, (εμπορικός, μη κερδοσκοπικός ή εκπαιδευτικός), της φύσης του υλικού που χρησιμοποιεί, (τμήμα του κειμένου, πίνακες, σχήματα, εικόνες ή χάρτες), του ποσοστού και της σημαντικότητας των πιθανών συνεπειών αυτής στην αγορά ή στην γενικότερη αξία του υπό copyright κειμένου.

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΜΕΛΟΣ Α΄: Γεώργιος Γαλάνης

ΜΕΛΟΣ Β΄: Κωνσταντίνος Μαμής

ΜΕΛΟΣ Γ΄: Εμμανουήλ Ανδρουλάκης



Γεώργιος Ταυρής
Μοντέλα προσομοίωσης Θαλασσίου Κυματισμού και εφαρμογές σε Επιχειρησιακές
Δραστηριότητες του Πολεμικού Ναυτικού

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε από τον Σημαιοφόρο Ταυρή Γεώργιο ειδικότητας Μάχιμο στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος «*Διοίκηση στην Ναυτική Επιστήμη και Τεχνολογία*», που διεξάγεται από το εκπαιδευτικό έτος 2021-2022. Η ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής αυτής εργασίας θα ήταν αδύνατη χωρίς την συμβολή των καθηγητών μου κυρίων Γεωργίου Γαλάνη και Κωνσταντίνου Μάμη. Τους εκφράζω ένα βαθύ ευχαριστώ για την βοήθεια που μου προσέφεραν, την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν, την άριστη συνεργασία που είχαμε, τον πολύτιμο χρόνο που διέθεσαν για να μου παρέχουν κάθε είδους σημαντικά στοιχεία και εξηγήσεις πάνω στο θέμα, και για το γεγονός ότι μου πρόσφεραν την ευκαιρία να συνεργαστώ μαζί τους στο συγκεκριμένο επιστημονικό τομέα και σε ένα θέμα που πάντα ήθελα να μελετήσω και επέλεξα ο ίδιος. Το αμείωτο ενδιαφέρον, οι στοχευμένες παρατηρήσεις και το μεράκι της δουλειάς τους συνετέλεσαν στην ολοκλήρωση της εργασίας κατά τον μέγιστο δυνατό τρόπο. Η συνεργασία μαζί τους υπήρξε για μένα μοναδική διδακτική εμπειρία, τόσο σε εκπαιδευτικό, όσο και σε επαγγελματικό επίπεδο.

“A wave isn't like a skate ramp or mountain; everything's moving around, and you have to time how to move along with it. That's easier with a slow wave.”

— **Kelly Slater**

“Waves are the practice of water. To speak of waves apart from water, or water apart from waves is a delusion.”

— **Suzuki Roshi**



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικειμενικός σκοπός της διπλωματικής εργασίας αυτής είναι η παρουσίαση των βασικών χαρακτηριστικών του θαλάσσιου κυματισμού, η ανάδειξη της χρησιμότητας της μοντελοποίησης του κύματος και η επιρροή του στις ναυτικές επιχειρήσεις. Αρχικά, γίνεται μία σύντομη εισαγωγή για το τι είναι κύμα και ποιοι είναι οι παράγοντες που το επηρεάζουν. Εν συνεχεία, μέσα από μια μικρή ιστορική αναδρομή παρουσιάζεται ο τρόπος δημιουργίας του μοντέλου WAM, τα δεδομένα που προσφέρει σε τοπική και παγκόσμια κλίμακα, ο τρόπος λειτουργίας και η αριθμητική εξίσωση που επιλύει το μοντέλο. Έτσι, προσφέρεται η δυνατότητα να γίνουν κατανοητά τα προβλήματα που δυσχεραίνουν αλλά ταυτόχρονα καθιστούν αναγκαία την περιγραφή και προσομοίωση της επιφάνειας της θάλασσας. Επιπρόσθετα, σε επιχειρησιακό επίπεδο αναφέρονται οι τομείς των ναυτικών επιχειρήσεων που επηρεάζονται από τον κυματισμό και τον άνεμο. Συμπερασματικά, η εργασία περατώνεται με την πειραματική μελέτη και ανάλυση δεδομένων γεωγραφικής περιοχής του Βορειοανατολικού Αιγαίου για τα έτη 2020-2021.

ABSTRACT

The main objective of this thesis is to present the basic characteristics of the sea wave, to highlight the importance and usefulness of wave modeling and its influence on naval operations. Firstly, a brief introduction is given about waves and the factors that affect it followed by a small but informative historical background on the wave model WAM, the data it offers for regional or worldwide scale areas and lastly the numerical equation the model solves. So, the present study offers the opportunity to understand the problems which make difficult but at the same time a necessity the sea state description and the simulation. Furthermore, at operational level, are analyzed the sectors of the naval warfare impacted by the sea wave and the wind affect are analyzed. In conclusion, the thesis comes to an end with the experimental study and data analysis of a region of the Northeast Aegean Sea for the years 2020-2021.



ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Εισαγωγή	1
1.1 Γενικά	1
1.2 Ορισμός.....	2
1.3 Χαρακτηριστικά Κύματος	2
1.3.1 Κατηγορίες κυμάτων.....	2
1.3.2 Ανεμογενή Κύματα	3
1.3.3 Κύματα Αποθαλασσίας.....	4
1.3.4 Θαλάσσιος κυματισμός και ενέργεια.....	6
<i>Κυματική μοντελοποίηση</i>	<i>8</i>
2.1 Ιστορική αναδρομή.....	8
2.2 Κατηγορίες αριθμητικών μοντέλων.....	8
2.3 Κυματικό Μοντέλο WAM.....	9
2.3.1 Χαρακτηριστικά Μοντέλου.....	9
2.3.2 Φυσικομαθηματική ανάλυση μοντέλου.....	10
<i>Κυματισμός και Πολεμικό Ναυτικό.....</i>	<i>16</i>
3.1 Εισαγωγή.....	16
3.2 Ναυτικές επιχειρήσεις και αποστολές	17
3.2.1 Επιχειρήσεις κυριαρχίας επιφανείας και υποεπιφανείας.....	17
3.2.2 Επιχειρήσεις κυριαρχίας αέρος.....	20
3.2.3 Επιχειρήσεις προβολής ισχύος	21
Πειραματική Μελέτη Κυματισμού	23
4.1 Εισαγωγή.....	23
4.2 Πειραματική Διαδικασία.....	23
4.2.1 Πειραματική μελέτη πρώτης περίπτωσης.....	24
4.2.2 Πειραματική μελέτη δεύτερης περίπτωσης.....	25
Συμπεράσματα	29



ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

<i>Εικόνα 1: Τρόπος διάδοσης των τριών τύπων κυμάτων</i>	<i>3</i>
<i>Εικόνα 2: Τρόπος δημιουργίας των ανεμογενών κυμάτων αποθαλασσίας</i>	<i>4</i>
<i>Εικόνα 3: Περιγραφή μίας πλήρως ανεπτυγμένης θαλασσοταραχής με δεδομένη ένταση ανέμου.....</i>	<i>5</i>
<i>Εικόνα 4: Δημιουργία κυμάτων ενισχυτικής, αποσβεστικής και μικτής συμβολής.....</i>	<i>5</i>
<i>Εικόνα 5: Κατηγοριοποίηση θαλασσιών περιοχών βάση της μέσης κατάστασης κυμάτων αποθαλασσίας</i>	<i>6</i>
<i>Εικόνα 6: Κατανομή της ενέργειας στα θαλάσσια κύματα με το μεγαλύτερο μέρος να κατέχεται από τα κύματα δημιουργούμενα από τον άνεμο</i>	<i>7</i>
<i>Εικόνα 7: Απεικόνιση πρόβλεψης έντασης και κατεύθυνσης κύματος ολόκληρης της Μεσογείου, της Μαύρης Θάλασσας και της περιοχής του Κεντρικού και Νότιου Αιγαίου</i>	<i>13</i>
<i>Εικόνα 8 : Πετρέλευση του US Mitchener κατά τον πλού του με ιδιαίτερα υψηλή κατάσταση θαλάσσης.....</i>	<i>16</i>
<i>Εικόνα 9: Αμερικανικό αεροπλανοφόρο που κατά τον διάπλου του από τυφώνα δέχθηκε τέτοια καταπόνηση από τα κύματα που στράβωσε η πλώρη του και ο διάδρομος απογείωσης.....</i>	<i>18</i>
<i>Εικόνα 10: Σχηματική απεικόνιση των όρων pitch (κατακόρυφη κίνηση) και roll (οριζόντια)</i>	<i>20</i>
<i>Εικόνα 11: Σχηματική απεικόνιση των όρων pitch (κατακόρυφη κίνηση) και roll (οριζόντια) σε πολεμικό πλοίο</i>	<i>20</i>
<i>Εικόνα 12: Ελληνικό Ελικόπτερο εκτελεί εκπαίδευση κατεβάζοντας ειδικό διασώστη στο πλαίσιο εκτέλεσης επιχειρήσεων Έρευνας και Διάσωσης.....</i>	<i>21</i>
<i>Εικόνα 13: Στην εικόνα αυτή παρουσιάζεται ένα αερόστρωμνο (hovercraft) του ΠΝ κατά την οποία εκτελείται προσέγγιση υποδοχής πνευστής λέμβου κατά την διάρκεια άσκησης</i>	<i>22</i>
<i>Εικόνα 14: Ελληνικό Α/Γ εκτελεί προς-γυάλωση στα πλαίσια κάποιας εθνικής άσκησης στο πλαίσιο προενίσχυσης, ενίσχυσης ή ανακατάληψη κάποιας νήσου... ..</i>	<i>22</i>
<i>Εικόνα 15: Πρόβλεψη μέσης κυματικής περιόδου και κατεύθυνσης σε παγκόσμια Κλίμακα</i>	<i>23</i>
<i>Εικόνα 16: Γεωγραφική απεικόνιση περιοχής Βόρειου Αιγαίου.....</i>	<i>24</i>



Γεώργιος Ταυρής
Μοντέλα προσομοίωσης Θαλασσίου Κυματισμού και εφαρμογές σε Επιχειρησιακές
Δραστηριότητες του Πολεμικού Ναυτικού

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

<u>Διάγραμμα 1:</u> Διακύμανση του κυματισμού εντός του χρονικού διαστήματος των 144 ωρών.....	26
<u>Διάγραμμα 2:</u> Διακύμανση Ύψους Κυματισμού σε 24ωρη κλίμακα των 06 και 07 Ιαν 2021.....	27
<u>Διάγραμμα 3:</u> Διακύμανση Ύψους Κυματισμού σε 24ωρη κλίμακα των 08 και 09 Ιαν 2021.....	27
<u>Διάγραμμα 4:</u> Διακύμανση Ύψους Κυματισμού σε 24ωρη κλίμακα των 10 και 11 Ιαν 2021.....	27



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Από τις πρώτες στιγμές, που οι δραστηριότητες του ανθρώπου επεκτάθηκαν στην θάλασσα, το φαινόμενο του κυματισμού αποτέλεσε σημείο ιδιαίτερου ενδιαφέροντος. Ο κυματισμός επηρέασε και επηρεάζει καθοριστικά τα θαλάσσια ταξίδια ακόμα και στις μέρες μας και για αυτό κρίθηκε σημαντική η ανάπτυξη μοντέλων για τον προσδιορισμό και την μελέτη του, τόσο σε μικρή, όσο και σε μεγάλη κλίμακα. Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η κατάδειξη των κυριότερων μοντέλων και εφαρμογών, που χρησιμοποιούνται σήμερα από διάφορους φορείς και υπηρεσίες, τα αποτελέσματα τους για περιοχές ενδιαφέροντος και πώς αυτά μπορούν να αξιοποιηθούν από το Πολεμικό Ναυτικό (ΠΝ).

Θα έλεγε κανείς, ότι λόγω της τεράστιας ανάπτυξης της τεχνολογίας και των οπλικών συστημάτων, ένα φαινόμενο της φύσης, όπως το κύμα, θα επηρέαζε ελάχιστα το θέατρο των επιχειρήσεων και των αποστολών των πολεμικών πλοίων. Κάτι τέτοιο όμως θα ήταν εσφαλμένο. Ο κυματισμός επιδρά καθοριστικά, τόσο την σχεδίαση, όσο και την υλοποίηση των πλοίων. Κάθε πλοίο έχει κάποια όρια, που αν αυτά ξεπεραστούν, τίθεται θέμα ασφαλείας του υλικού και του προσωπικού του. Το ίδιο ισχύει και για τα οπλικά και ηλεκτρικά συστήματα που φέρει. Σήμερα οι επιχειρησιακές ανάγκες και προκλήσεις που καλείται να αντιμετωπίσει το ΠΝ είναι ιδιαίτερα αυξημένες. Αυτός είναι και ο λόγος που το ελληνικό Πολεμικό Ναυτικό πρέπει να δώσει μεγάλη σημασία στις εφαρμογές των συστημάτων μοντελοποίησης του θαλάσσιου κυματισμού, καθώς μπορεί να αποδειχθούν κρίσιμες και καθοριστικές για την εκπλήρωση της αποστολής του. Από την μία, αποφεύγεται η καταπόνηση του υλικού και του προσωπικού των πολεμικών πλοίων και από την άλλη, είναι ένα ακόμα όπλο, καθώς υπό κάποιες συνθήκες, επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό η χρήση των οπλικών συστημάτων και των συστημάτων επικοινωνιών, επηρεάζεται δηλαδή το 'Αξιόμαχο' των πλοίων.

Όπως αναφέρθηκε, αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο προσδιορισμός και η πρόγνωση των θαλάσσιων κυμάτων, σε μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή, με την χρήση κυματικών μοντέλων, καθώς και η μελέτη της δυνατότητας αξιοποίησής τους από το Ελληνικό Πολεμικό Ναυτικό. Για να φτάσουμε σε αυτό το σημείο είναι αναγκαίο να αναλυθούν οι έννοιες του κυματισμού, της λειτουργίας του και των παραγόντων που τον επηρεάζουν.

Οι παράκτιες περιοχές φιλοξενούν διάφορες σύγχρονες ανθρώπινες δραστηριότητες όπως αυτές της ναυσιπλοΐας, της αλιείας και του τουρισμού. Επι-πλέον, σήμερα υπάρχει και το πρόβλημα της μόλυνσης του περιβάλλοντος που αποτελεί μια από τις μεγαλύτερες κρίσεις της εποχής. Η υπερθέρμανση της ατμόσφαιρας είναι επίσης γεγονός και την βιώνει ο άνθρωπος καθημερινά. Πλημμύρες το φθινόπωρο και τον χειμώνα αυξημένη ζέστη, μεταβαλλόμενες συνθήκες θαλάσσης και φυσικά ιδιαίτερη ξηρασία και αέριδες το



καλοκαίρι. Όλα αυτά επηρεάζουν καταλυτικά την ανάπτυξη και την προστασία των περιοχών αυτών. Συνεπώς, κρίνεται πολυσήμαντη η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου συστήματος για την μελέτη και την πρόγνωση των καιρικών και κλιματολογικών συνθηκών σε συνδυασμό με την μελέτη της ναυτιλιακής κίνησης. Τι είναι λοιπόν το κύμα;

1.2 Ορισμός

Επί της ουσίας το θαλάσσιο κύμα, όπως και κάθε άλλο κύμα αποτελεί μία διαταραχή του χώρου. Η διαταραχή αυτή διαχέεται προς όλες τις κατευθύνσεις απελευθερώνοντας ενέργεια. Αξίζει να σημειωθεί ότι στον θαλάσσιο κυματισμό δεν υπάρχει μετατόπιση υδάτινης μάζας αλλά αλλάζει μόνο το σχήμα της επιφάνειας της θάλασσας.

Πλην εξαιρέσεων, η δημιουργία των θαλάσσιων κυμάτων (**ocean waves**) είναι αποτέλεσμα των ανέμων που με την ροή τους διαταράσσουν την επιφάνεια του νερού. Οι άνεμοι μεταφέρουν στα μόρια του νερού κινητική ενέργεια και έτσι δημιουργούνται κύματα σε πολύ μεγάλη κλίμακα με κατεύθυνση όμοια με την κατεύθυνση των ανέμων. Τέλος, η μετακίνηση υγρών διαφορετικής πυκνότητας έχουν ως απόρροια την δημιουργία κύματος. Πολλά είναι επίσης και τα κύματα που δημιουργούνται από την απελευθέρωση ενέργειας μέσα στον ωκεανό, συμπεριλαμβανομένων και των κυμάτων διαστήματος (**interval waves**), των τσουνάμι, των παλιρροιών, και των κυμάτων που οφείλονται σε ανθρώπινη παρέμβαση, όπως κύματα από την κίνηση πλοίων ή την έκρηξη εκρηκτικών και πυρηνικών συσκευών που εκλύουν τόσο μεγάλα ποσά ενέργειας που δημιουργούν μεγάλα κύματα.¹

1.3 Χαρακτηριστικά Κύματος

1.3.1 Κατηγορίες κυμάτων

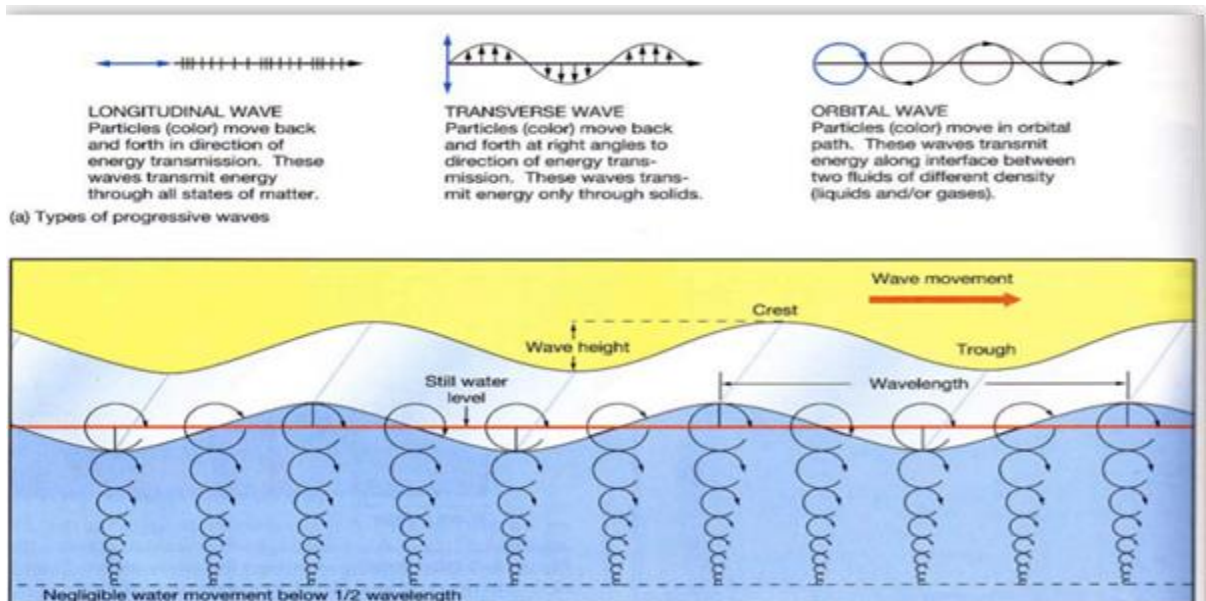
Τα κύματα είναι διαταραχές, δηλαδή ενέργεια σε κίνηση. Την ενέργεια αυτή την μεταφέρουν μέσα από την εκτέλεση κυκλικής κίνησης μέσα στο νερό. Όπως προαναφέρθηκε δεν υπάρχει μετατόπιση μάζας. Τα σωματίδια ταλαντώνονται με τρεις τρόπους: πάνω κάτω, μπροστά και πίσω ή γύρω γύρω μεταδίδοντας την διαταραχή από το ένα στο άλλο. Κάτω από τέλειες συνθήκες, (μηδενικές απώλειες), η διαταραχή αυτή συνεχίζεται εσαεί. Έτσι σύμφωνα με τον τρόπο κίνησης των σωματιδίων των κυμάτων προκύπτουν τρεις βασικές κατηγορίες: τα διαμήκη, τα εγκάρσια και η συμβολή αυτών.

Στην παρούσα διπλωματική μελετάμε δύο κατηγορίες θαλάσσιων κυμάτων. Η πρώτη αφορά τα κύματα που δημιουργούνται από τον άνεμο (**wind-generated waves**) και η δεύτερη τα κύματα αποθαλασσίας (**swell waves**).

¹ Thurman, H.V., Trujillo, A.P., October 2001, “Essentials of Oceanography” (seventh edition), Prentice Hall, σελ 4



1.3.2 Ανεμογενή Κύματα



Εικόνα 1: Τρόπος διάδοσης των τριών τύπων κυμάτων

Ο άνεμος είναι η συχνότερη αιτία δημιουργίας κυμάτων. Ουσιαστικά ένα ανεμογενές κύμα δημιουργείται όταν ο άνεμος περνώντας πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας δημιουργεί πίεση και συνάμα ταραχή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία μικροσκοπικών κυκλικών κυμάτων σχήματος V. Τα κύματα έχουν ως απόρροια την δημιουργία μιας πιο ταραγμένης επιφάνειας, μιας επιφάνειας δηλαδή, που επιτρέπει στον άνεμο να αλληλεπιδρά καλύτερα με την θάλασσα. Με τον τρόπο αυτό μεταφέρεται, από τον άνεμο, συνεχώς ενέργεια. Όταν λοιπόν, προσδοθεί η κατάλληλη κινητική ενέργεια, ξεκινάει η δημιουργία των βαρυτικών κυμάτων, τα οποία έχουν μορφή συμμετρική.

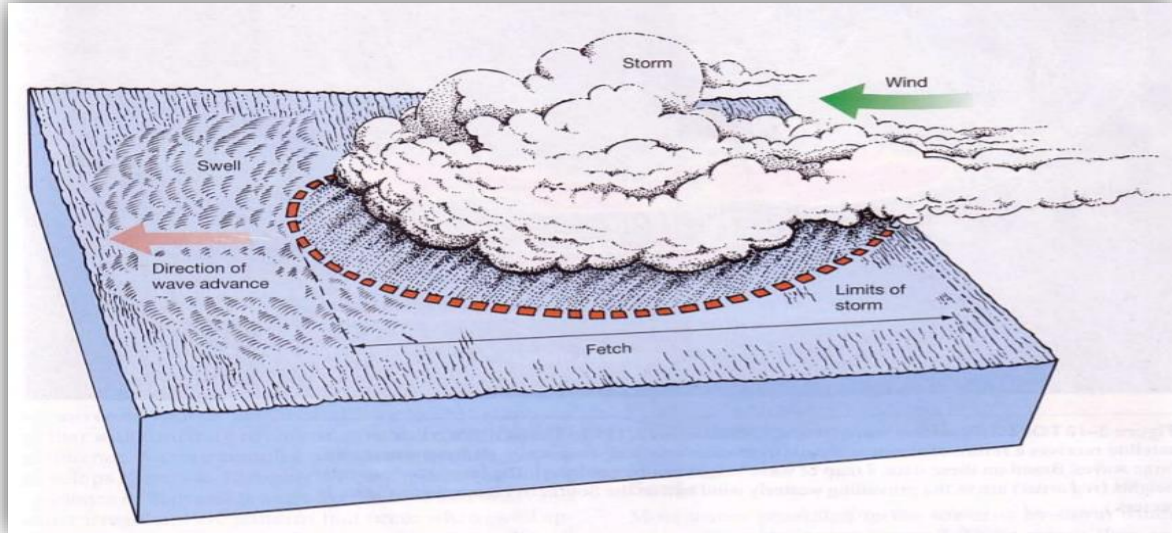
Είναι αντιληπτό ότι όση περισσότερη ενέργεια προσδίδεται στα κύματα τόσο αυξάνεται το ύψος τους και εν συνεχεία το μήκος κύματός τους. Επίσης η προσδιδόμενη από τον άνεμο ενέργεια αυξάνει την ταχύτητα του κύματος. Το κύμα λαμβάνει την μέγιστη ταχύτητα, ύψος και μήκος κύματος όταν η ταχύτητά του είναι ίση με την ένταση του ανέμου, καθώς έτσι δεν υπάρχει ανταλλαγή ενέργειας. Γεωγραφικά τα μεγαλύτερα ανεμογενή κύματα δημιουργούνται στους τυφώνες του Ειρηνικού ωκεανού.

Πρέπει να τονιστεί ότι η ενέργεια που λαμβάνει ένα τέτοιο κύμα εξαρτάται από τρεις βασικούς παράγοντες: την ένταση του ανέμου, το χρονικό διάστημα που κινείται ο άνεμος, προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση και τέλος την απόσταση στην οποία φυσάει ο άνεμος για ένα χρονικό διάστημα. Ένας γρήγορος τρόπος για να καταλάβει κανείς πόση ενέργεια έχει ένα κύμα, είναι το ύψος του κύματος. Τυπικά όσο πιο ψηλό είναι, τόσο μεγαλύτερη ενέργεια έχει λάβει.² Σύμφωνα με τη

² Balasubramanian, A., November 9, 2016, "The Ocean Waves", University of Mysore, σελ 3



θεωρία του Stokes τα κύματα δεν μπορούν να ξεπεράσουν ύψος μεγαλύτερο του $1/7$ του μήκους κύματος τους χωρίς να σπάσουν, γιατί τότε αποκτούν ταχύτητα μεγαλύτερη από αυτή της διάδοσης. Βέβαια αυτό αφορά κατά βάση σε κύματα που διαδίδονται σε ρηχά ύδατα (shallow waters), οπότε αλλάζουν και τα χαρακτηριστικά τους, καθώς πλέον αρχίζει να επηρεάζει και ο βυθός ο οποίος γίνεται αισθητός.³



Εικόνα 2: Τρόπος δημιουργίας των ανεμογενών κυμάτων αποθαλασσίας

1.3.3 Κύματα Αποθαλασσίας

Τα κύματα αποθαλασσίας δημιουργούνται από ανεμογενή κύματα που έχουν λάβει ενέργεια τέτοια που συνεχίζουν να διαδίδονται μακριά από το σημείο δημιουργίας τους. Τα κύματα αυτά διαφοροποιούνται τόσο στην κατεύθυνση όσο και στο μήκος κύματος τους.⁴ Όταν σταματάει ο άνεμος, αποκτούν ταχύτητα μεγαλύτερη από αυτή του ανέμου και αποκτούν μεγάλο μήκος κύματος με αποτέλεσμα την μείωση του ύψους. Επί της ουσίας γίνεται μετατροπή της δυναμικής ενέργειας σε κινητική. Κατά την διάρκεια της πορείας τους, τα κύματα αυτά είναι συμμετρικά και υπάρχει μικρή απώλεια ενέργειας. Στην κατηγορία αυτή τα κύματα με μεγαλύτερο μήκος ταξιδεύουν πιο γρήγορα και στο ενδιάμεσο τους κινούνται πολλά μικρότερα κύματα.

Ένας από τους μεγαλύτερους κινδύνους για την ναυσιπλοΐα είναι η συμβολή κυμάτων αποθαλασσίας που προέρχονται από διαφορετικές καταιγίδες. Κάθε κύμα και κατ' επέκταση τα wave trains έχουν ημιτονοειδή μορφή με συγκεκριμένο μήκος κύματος και πλάτος ανάλογα με την φάση τους. Η συμβολή μπορεί να έχει τα εξής δύο αποτελέσματα: είτε την ενίσχυση είτε την απόσβεση τους. Στην πρώτη περίπτωση, όταν τα κύματα έχουν το ίδιο μήκος κύματος στην ίδια φάση, τότε προκύπτει ένα νέο κύμα («οικοδομής») με ίδιο λ και ύψος ίσο με το άθροισμα των υψών των κυμάτων. Στην δεύτερη περίπτωση δημιουργούνται οι καταστρεπτικές συμβολές κατά τις οποίες προκύπτουν κύματα με το ίδιο μήκος κύματος που συναντιούνται ασύγχρονα, δηλαδή η «κορυφή» (μέγιστο πλάτος) του ενός συναντά την «κοιλιά» (ελάχιστο πλάτος) του

³ Γερμάν, Κ., Απρίλιος 2017, “Waves-Κύματα”, Σχολή Ναυτικών Δοκίμων, Πειραιάς, σελ 7

⁴ Balasubramanian, A., November 9, 2016, “The Ocean Waves”, University of Mysore, σελ 3



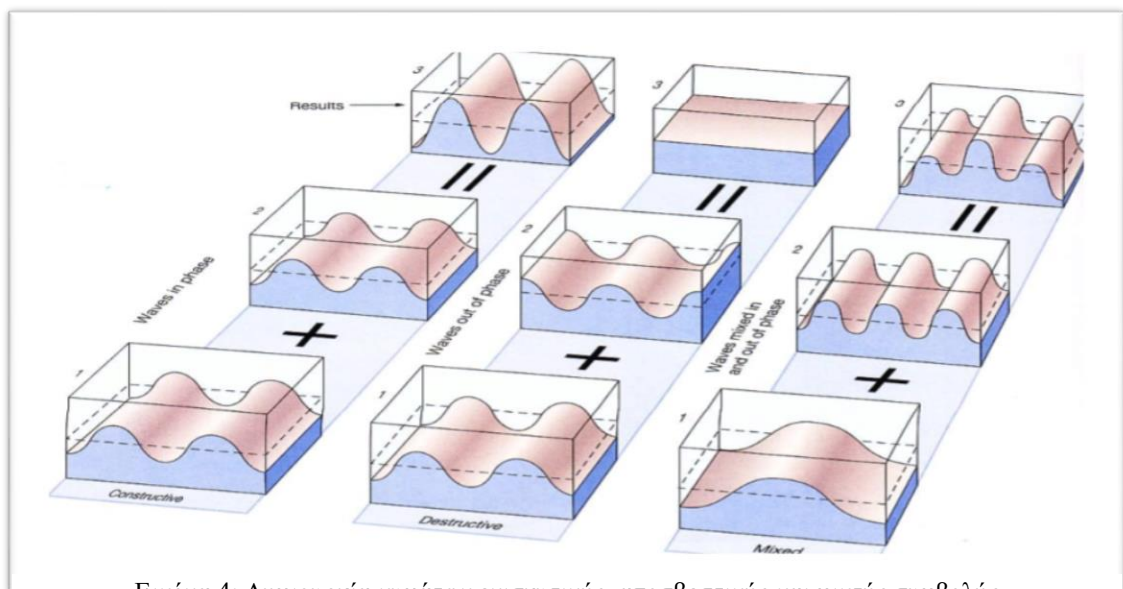
άλλου. Συνεπώς, προκύπτει ένα κύμα με ύψος που προκύπτει από την αφαίρεση των υψών των 2 κυμάτων. Τις περισσότερες όμως περιπτώσεις στην θάλασσα με την μίξη 2 κυμάτων αποθαλασσίας, που όπως αναφέρθηκε αποτελούνται από πολλά κύματα με διαφορετικά ύψη και μήκη, προκύπτουν πολλά και κύματα οικοδομής και κύματα αποσβεστικά και αυτό εξηγεί λοιπόν την ποικίλη αλληλουχία μεγάλων και μικρών κυμάτων.

Είναι αντιληπτό ότι για την ναυτιλία εγείρει μεγαλύτερο κίνδυνο και προβληματισμό η δημιουργία θαλάσσιων κυμάτων ενισχυτικής συμβολής. Για την

Wind speed in km/h (milh)	Average height in m (ft)	Average length in m (ft)	Average period in sec	Highest 10% of waves in m (ft)
20 (12)	0.33 (1.0)	10.6 (34.8)	3.2	0.75 (2.5)
30 (19)	0.88 (2.9)	22.2 (72.8)	4.6	2.1 (6.9)
40 (25)	1.8 (5.9)	39.7 (130.2)	6.2	3.9 (12.8)
50 (31)	3.2 (10.5)	61.8 (202.7)	7.7	6.8 (22.3)
60 (37)	5.1 (16.7)	89.2 (292.6)	9.1	10.5 (34.4)
70 (43)	7.4 (24.3)	121.4 (398.2)	10.8	15.3 (50.2)
80 (50)	10.3 (33.8)	158.6 (520.2)	12.4	21.4 (70.2)
90 (56)	13.9 (45.6)	201.6 (661.2)	13.9	28.4 (93.2)

Εικόνα 3: Περιγραφή μίας πλήρως ανεπτυγμένης θαλασσοταραχής με δεδομένη ένταση ανέμου.

καλύτερη κατανόηση του φαινομένου πρέπει να εξηγηθεί το ενεργειακό φάσμα του κύματος.

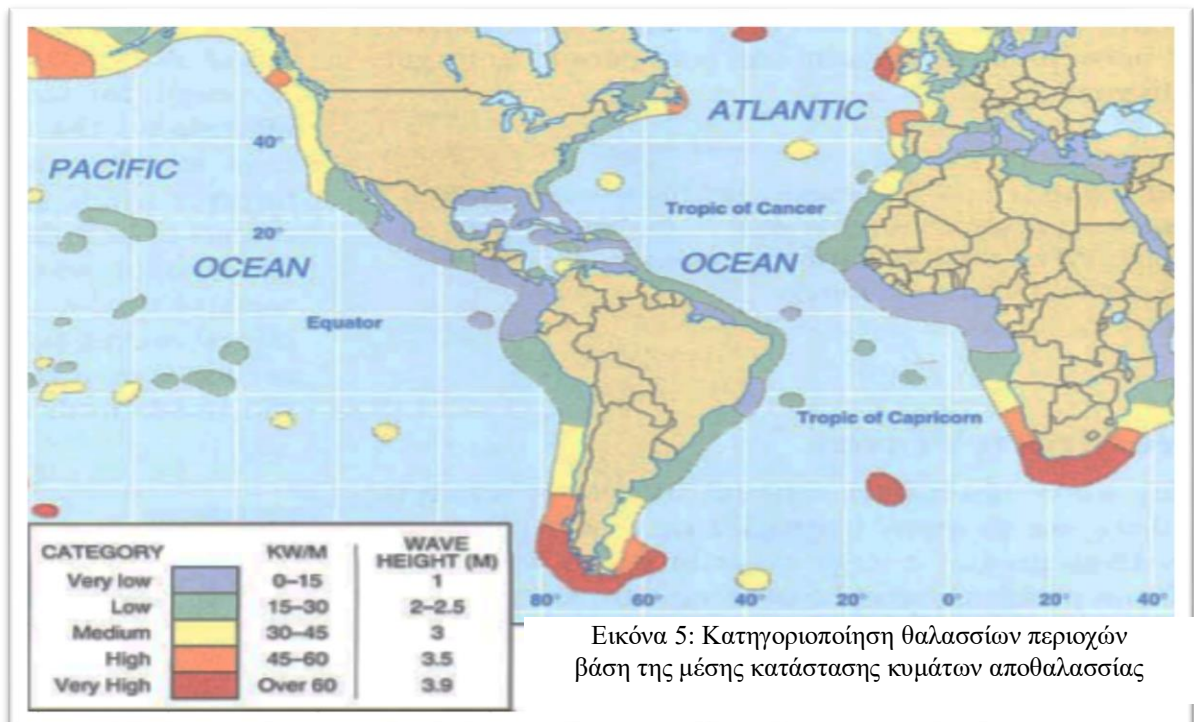


Εικόνα 4: Δημιουργία κυμάτων ενισχυτικής, αποσβεστικής και μικτής συμβολής

1.3.4 Θαλάσσιος κυματισμός και ενέργεια.

Μια κινούμενη μάζα νερού διαθέτει τεράστια ποσά ενέργειας.⁵ Βέβαια η ενέργεια των θαλάσσιων κυμάτων είναι μία διακοπτόμενη πηγή ενέργειας. Ουσιαστικά ποικίλει, ανάλογα με το μέρος και τον χρόνο, καθιστώντας την δύσκολη να ελεγχθεί. Από την άλλη όμως, με τα κατάλληλα μέσα, καθίσταται δυνατή, σε μία γεωγραφική περιοχή και για ένα διάστημα λίγων ημερών,⁶ η ποσοτική πρόβλεψη της ενέργειας αυτής.

Όπως προαναφέρθηκε, κατά την διάδοση ενός κύματος αποθαλασσίας, η ενέργεια που χάνεται είναι πάρα πολύ μικρή. Επί της ουσίας, ένα κύμα ξεκινάει να έχει σημαντικές



ενεργειακές απώλειες, όταν το βάθος ξεκινάει να μικραίνει σε τέτοιο βαθμό, που να είναι μικρότερο από το μισό του μήκους κύματος και τότε ξεκινάει η μετατροπή της κινητικής ενέργειας σε θερμότητα, λόγω της τριβής του ύδατος με τον πυθμένα, με ταυτόχρονη αύξηση του ύψους του.

Από φυσικής άποψης, η ενέργεια του κύματος ορίζεται ως η μέση ισχύς ανά μέτρο (W/m). Το νούμερο αυτό περιγράφει την ενέργεια, ανά δευτερόλεπτο, που διαδίδεται κάτω από ένα μέτρο κορυφής κύματος, ξεκινώντας από την επιφάνεια μέχρι τον πυθμένα. Αυτή

⁵ Thurman, H.V., Trujillo, A.P., October 2001, “ Essentials of Oceanography” (seventh edition), Prentice Hall, σελ 259

⁶ Waters, R., 2008, “Energy From Ocean Waves: Full Scale Experimental Verification of a Wave Energy Converter”, Uppsala University, σελ 16



Γεώργιος Ταυρής

Μοντέλα προσομοίωσης Θαλασσιού Κυματισμού και εφαρμογές σε Επιχειρησιακές Δραστηριότητες του Πολεμικού Ναυτικού

ακριβώς η ενέργεια παίζει καθοριστικό ρόλο στη πρόβλεψη των θαλάσσιων κυμάτων και έχει τεράστιες συνέπειες στις διάφορες επιχειρήσεις ενός σύγχρονου πολεμικού ναυτικού.

Η μελέτη της ενέργειας γίνεται μέσω της κατανόησης του ενεργειακού φάσματος του κύματος. Έτσι λοιπόν και για την κατανόηση του ενεργειακού φάσματος των θαλάσσιων κυμάτων, χρησιμοποιείται ένα σύνολο από παραμέτρους, όπως:

- ✚ **Μήκος κύματος – Wavelength (L)** : Ορίζεται ως η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών σημείων (δηλαδή μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών ή δύο διαδοχικών κοίλων).
- ✚ **Περίοδος – Period (T)** : Είναι ο απαιτούμενος χρόνος για να διέλθουν από ένα σημείο δύο διαδοχικά σημεία ίδιων φάσεων (δύο κορυφές ή δύο κοίλα).
- ✚ **Συχνότητα – Frequency (f)** : Είναι ο αριθμός των κυμάτων που διέρχονται από ένα σημείο, στη μονάδα του χρόνου.
- ✚ **Ύψος κύματος – Height (H)** : Είναι η κάθετος απόσταση μεταξύ της κορυφής και του κοίλου του κύματος.
- ✚ **Ταχύτητα διάδοσης (c)** : Είναι ο λόγος της μεταβολής του κύματος στο χρόνο.
- ✚ **Κλίση (γ)** : Είναι η αναλογία ύψους προς μήκος κύματος.

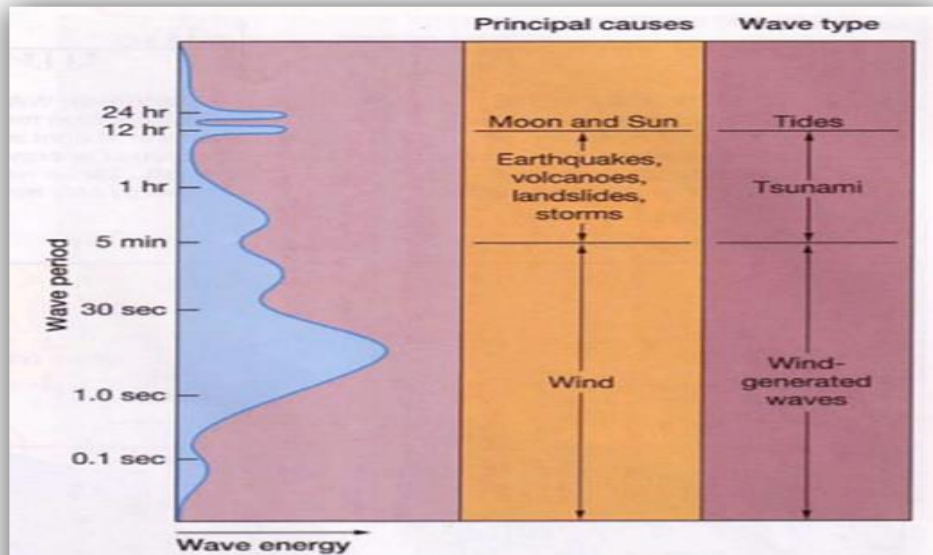


Figure 8-2 Distribution of energy in ocean waves. Most of the energy possessed by ocean waves exists as wind-generated waves while other peaks of wave energy represent tsunami and ocean tides.

Εικόνα 6: Κατανομή της ενέργειας στα θαλάσσια κύματα με το μεγαλύτερο μέρος να κατέχεται από τα κύματα δημιουργούμενα από τον άνεμο. ΠΗΓΗ: Thurman, H.V., Trujillo, A.P., October 2001, “Essentials of Oceanography” (seventh edition), Prentice Hall



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

Κυματική μοντελοποίηση

2.1 Ιστορική αναδρομή

Ο θεμέλιος λίθος και οι αρχές για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των κυμάτων τέθηκαν από τα μέσα ήδη του 20^{ου} αιώνα. Παρόλα αυτά η αδυναμία των υπολογιστικών συστημάτων της εποχής καθιστούσε αδύνατη την πλήρη περιγραφή και ανάλυση του κυματικού φάσματος. Στα πρώτα κυματικά μοντέλα υπήρχε η υπόθεση ότι τα κυματικά στοιχεία σταματούσαν να μεγαλώνουν μόλις είχε επιτευχθεί ένας καθολικού επιπέδου κορεσμός, (Phillips, 1958). Η υπόθεση αυτή ήταν εσφαλμένη, διότι τα πρώτα αυτά κυματικά μοντέλα έδιναν παραπάνω έμφαση στην εισαγωγή των στοιχείων του ανέμου και παρέβλεπαν εκείνα που προσδίδουν οι χαμηλής συχνότητας περιοχές μη γραμμικής μεταφοράς.

Με την κατανόηση της σημασίας των παραπάνω στοιχείων οι ερευνητές οδηγήθηκαν στα κυματικά μοντέλα 2^{ης} γενιάς. Σε αυτά τα μοντέλα στόχος ήταν η προσομοίωση του φαινομένου «Υπέρβασης» και της εξάρτησης που έχουν οι περιοχές μεγάλης συχνότητας του φάσματος από τις περιοχές με χαμηλή συχνότητα. Ωστόσο, και στην περίπτωση αυτή, διάφοροι περιορισμοί στην παραμετροποίηση της μη γραμμικής μεταφοράς είχαν σαν αποτέλεσμα την ανάγκη επεξήγησης του φασματικού σχήματός της. Επομένως, τα κυματικά μοντέλα 2^{ης} γενιάς πάλι αδυνατούσαν να προσομοιώσουν με ακρίβεια την συμπεριφορά πιο περίπλοκων θαλασσοταραχών.

Με περαιτέρω μελέτη στο αντικείμενο της μαθηματικής και φυσικής κυματικής μοντελοποίησης γεννήθηκαν τα κυματικά μοντέλα 3^{ης} γενιάς. Από τα μοντέλα αυτά προέκυψε και το κυματικό μοντέλο WAM. Η σημαντικότερη διαφοροποίηση των μοντέλων αυτών είναι, ότι το φάσμα κυμάτων υπολογίστηκε με ολοκλήρωση της εξίσωσης του ενεργειακού ισοζυγίου, χωρίς κανέναν προηγούμενο περιορισμό στο φασματικό σχήμα.⁷

2.2 Κατηγορίες αριθμητικών μοντέλων

Τα αριθμητικά μοντέλα δίνουν τη δυνατότητα πολλαπλών πειραματισμών μεταβάλλοντας τα δεδομένα εισαγωγής και παρατηρώντας πως συμπεριφέρεται το σύστημα κάτω από διαφορετικές συνθήκες, έχουν τη δυνατότητα να προσομοιώνουν σε σχετικά μικρό χρόνο τα φαινόμενα που θα εξελίσσονταν σε πολύ μεγαλύτερες χρονικές κλίμακες και το φυσικό σύστημα δεν επηρεάζεται από τις διάφορες δοκιμές. Υπάρχουν τρεις βασικές κατηγορίες αριθμητικών μοντέλων:

⁷ Janssen, P., Bidlot, J.R., April 9 2002, “IFS DOCUMENTATION Part VII ECMWF WAVE MODEL”, [Online]. Available from: <https://www.ecmwf.int/node/13283> [accessed 13 Oct 2021], σελ 1-2
January 1998, “The WAM model - a third generation ocean wave prediction model”, [Online]. Available from: https://www.researchgate.net/publication/215722039_The_WAM_model_-_a_third_generation_ocean_wave_prediction_model [accessed 11 Nov 2021], σελ 1775-1777



Μοντέλα μέσης κλίμακας (Limited-area models) περιορίζονται σε περιοχές ενδιαφέροντος μέσης κλίμακας και έχουν μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα της τάξεως των χιλιομέτρων.

Μοντέλα παγκόσμιας κλίμακας (Global models) τα οποία καλύπτουν ολόκληρο τον πλανήτη και προσομοιώνουν μεγάλης κλίμακας διαδικασίες.

Μοντέλα ρευστομηχανικής (Computational fluid-dynamics-CFD models). Είναι τα αριθμητικά μοντέλα όπου η προσομοίωση γίνεται σε πολύ μικρότερη και στοχοποιημένη κλίμακα και χρησιμοποιούνται κατά βάση γύρω από οικοδομήματα, συγκοινωνιακά έργα και στον σχεδιασμό αεροσκαφών, πλοίων κλπ.

2.3 Κυματικό Μοντέλο WAM

2.3.1 Χαρακτηριστικά Μοντέλου

Το κυματικό μοντέλο WAM, όπως αναφέρθηκε, είναι ένα τρίτης γενιάς μοντέλο το οποίο επιλύει την εξίσωση μεταφοράς, χωρίς κανένα περιορισμό για το φάσμα του κύματος. Το μοντέλο αναπαριστά την φυσική της κυματικής εξέλιξης, σύμφωνα με την υπάρχουσα επιστημονική γνώση για όλους τους βαθμούς ελευθερίας ενός φάσματος κύματος δύο (2) διαστάσεων.

Το σύστημα αυτό αναπτύχθηκε στο Max-Planck-Institut für Meteorologie στο Αμβούργο της Γερμανίας από τους S. και K. Hasselmann, με την αιγίδα του P. Janssen, G. Komen (KNMI, Netherlands), L. Zambreski και H. Günther (GKSS, Germany, ECMWF, Reading, UK). Το μοντέλο λειτουργεί σε πολλά ιδρύματα, κέντρα και υπηρεσίες παγκοσμίως, τόσο για επιστημονικούς, όσο και επιχειρησιακούς λόγους,⁸ όπως επίσης και για διάφορες άλλες εφαρμογές στον κλάδο της παράκτιας και υπερπόντιας ναυτιλίας.⁹ Ένα από τα ιδρύματα αυτά είναι και η Σχολή Ναυτικών Δοκίμων (Σ.Ν.Δ.), που μαζί με την Υδρογραφική Υπηρεσία εξαγάγουν κυματικά στοιχεία και δεδομένα, τόσο για το Αιγαίο πέλαγος όσο και την Αν. Μεσόγειο

Για την περιγραφή και επεξεργασία του δισδιάστατου ωκεάνιου κυματικού φάσματος, το μοντέλο WAM μπορεί να τρέξει και να προσφέρει κυματικά δεδομένα για γεωγραφικές περιοχές τοπικής, περιφερειακής και παγκόσμιας κλίμακας εισάγοντας ένα προκαθορισμένο τοπογραφικό σύνολο δεδομένων. Αξίζει να τονιστεί ότι η επίλυση του συστήματος είναι ανεξάρτητη από τον χρόνο και τον χώρο. Επιπλέον, το μοντέλο μπορεί να λειτουργήσει αποτελεσματικά τόσο για ρηχά όσο και για βαθιά ύδατα. Τα στοιχεία που εισάγονται στο σύστημα πριν την επεξεργασία τους είναι:

- ✚ Το σύστημα συντεταγμένων, είτε καρτεσιανό, είτε σφαιρικό.
- ✚ Το είδος το υδάτων, (βαθύ ή ρηχό).

⁸ Günther, H., Hasselmann, S., Janssen, P.A.E.M., October 1992, "The WAM Model cycle 4 (revised version)", Modellberatungsgruppe, Hamburg, σελ 1

⁹ Τσουτσουράκης, Γ., Μάιος 2014, "Μοντέλα προσομοίωσης θαλάσσιου κυματισμού: Κατηγορίες, Δυνατότητες, Εφαρμογές", Σχολή Ναυτικών Δοκίμων, Πειραιάς, σελ 24



- ✚ Την ύπαρξη ή όχι της διάθλασης κατά βάθος ή κατά ρεύματος.
- ✚ Την χρονική επίδραση του ανέμου.
- ✚ Τα ένθετα πλέγματα.

Μερικά από τα δεδομένα που εξάγονται με την χρήση του μοντέλου αυτού είναι:

- ✚ Το ύψος του κύματος.
- ✚ Τη μέση κατεύθυνση και συχνότητα του.
- ✚ Το ύψος και η μέση κατεύθυνση του κύματος αποθαλασσίας.
- ✚ Ένα δισδιάστατο κυματικό φάσμα σε ένα ορισμένο πλαίσιο.

Μία από τις τελευταίες εκδόσεις του κυματικού μοντέλου WAM, είναι η βελτιωμένη 3η έκδοση WAM-ECMWF, όπου συμπεριλαμβάνει νέες εξισώσεις φυσικής για την καλύτερη και ακριβέστερη επεξεργασία των δεδομένων εισαγωγής ανέμου. Στην επόμενη υποενότητα θα γίνει μία ανάλυση των μαθηματικών και φυσικών εξισώσεων που περιλαμβάνονται στο μοντέλο WAM για την περιγραφή και επεξεργασία του δισδιάστατου ωκεάνιου κυματικού φάσματος.

2.3.2 Φυσικομαθηματική ανάλυση μοντέλου

Σε αντίθεση με τα προγενέστερης γενιάς συστήματα κυματικής μοντελοποίησης το μοντέλο WAM δεν χρησιμοποιεί προκαθορισμένες υποθέσεις στο φασματικό σχήμα. Με την ολοκλήρωση της εξίσωσης μεταφοράς υπολογίζεται το δισδιάστατο φάσμα διακύμανσης του κύματος ως εξής:

$$\frac{dF}{dt} + \frac{\partial}{\partial \phi} (\dot{\phi}F) + \frac{\partial}{\partial \lambda} (\dot{\lambda}F) + \frac{\partial}{\partial \theta} (\dot{\theta}F) = S$$

Τύπος (1)

όπου:

- F Αντιπροσωπεύει την φασματική πυκνότητα ορισμένη ως (f, θ, φ, λ)
- f Αντιπροσωπεύει την συχνότητα
- θ Αντιπροσωπεύει τις κατευθύνσεις
- φ Αντιπροσωπεύει το γεωγραφικό πλάτος
- λ Αντιπροσωπεύει το γεωγραφικό μήκος

Οι παράγωγοι $\dot{\phi}$, $\dot{\lambda}$ και $\dot{\theta}$ εκφράζουν τον ρυθμό μεταβολής της θέσης και της κατεύθυνσης διάδοσης ενός "πακέτου" κύματος κατά την μεταφορά του στην διάρκεια ενός κύκλου λειτουργίας.

$$\dot{\phi} = d\phi / dt = u \cdot R^{-1} \cos \theta$$



$$\begin{aligned}\lambda \cdot &= d\lambda / dt = u \cdot \sin\theta (R \cos\phi)^{-1} \\ \theta \cdot &= d\theta / dt = u \cdot \sin\theta \tan\phi R^{10}\end{aligned}$$

Η συνάρτηση πηγής S περιλαμβάνει την υπέρθεση της δράσης του ανέμου, των μη γραμμικών κυματικών αλληλεπιδράσεων και την κυματική απόσβεση:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds}$$

όπου S_{in} οι όροι της εισερχόμενης ενέργειας (**inputs**), S_{nl} οι όροι της μη γραμμικά μεταφερόμενης ενέργειας (**non-linear**) και S_{ds} οι όροι της κυματικής απόσβεσης (**dissipation**) αντίστοιχα¹¹.

Η συνάρτηση πηγής εισόδου ανέμου υιοθετήθηκε από τον Σνάιντερ το 1981. Η εισαγωγή των δεδομένων του ανέμου στο σύστημα WAM συμβολίζεται ως S_{in} και ορίζεται ως ακολούθως:

$$S_{in} = \gamma * F \quad \text{Τύπος (2)}$$

όπου F το φάσμα και γ ο ρυθμός ανάπτυξης των κυμάτων και εξαρτάται από τις εξής δύο (2) παραμέτρους :

- 1) $X = u \cdot \cos(\Theta - \phi) / C$ Τύποι (3),(4)
- 2) $\Omega = gz_0 / u^2$

όπου u είναι η ταχύτητα τριβής, Θ η διεύθυνση κατά την οποία γίνεται η διάδοση των κυμάτων, ϕ η διεύθυνση του ανέμου, C η φασική ταχύτητα των κυμάτων και z_0 το μήκος της τραχύτητας. Συνεπώς γίνεται πλέον εμφανές ότι, με την βοήθεια της μεταβλητής Ω , ο ρυθμός ανάπτυξης των κυμάτων εξαρτάται από την τραχύτητα z_0 , η οποία με την σειρά εξαρτάται από την κατάσταση θαλάσσης της περιοχής ενδιαφέροντος. Ο ρυθμός ανάπτυξης κανονικοποιείται από την γωνιακή συχνότητα ω , ως εξής:

$$\frac{\gamma}{\omega} = \epsilon \beta x^2 \quad \text{Τύποι (5), (6)}$$

όπου:

$$\beta = \frac{\beta_m}{\kappa^2} \mu \ln^4(\mu), \mu < 1$$

¹⁰ January 1998, "The WAM model - a third generation ocean wave prediction model", [Online]. Available from: https://www.researchgate.net/publication/215722039_The_WAM_model_-_a_third_generation_ocean_wave_prediction_model [accessed 11 Nov 2021]), σελ 1777

¹¹ Τσουτσουράκης, Γ., Μάιος 2014, "Μοντέλα προσομοίωσης θαλάσσιου κυματισμού: Κατηγορίες, Δυνατότητες, Εφαρμογές", Σχολή Ναυτικών Δοκίμων, Πειραιάς, σελ 27
Günther, H., Hasselmann, S., Janssen, P.A.E.M., October 1992, "The WAM Model cycle 4 (revised version)", Modellberatungsgruppe, Hamburg, σελ 3



Για την κατανόηση του ανωτέρου τύπου πρέπει να γίνει ανάλυση των μεταβλητών που τον συγκροτούν, έτσι:

- Το κ αποτελεί την σταθερά φον Κάρμαν. Η σταθερά αυτή εκφράζει την αδιάστατη διάτμηση ανέμου αναφορικά για στατικές και ουδέτερες καταστάσεις - συνθήκες.

- Η σταθερά $\beta_m = 1.2$

- Το μ αποτελεί το αδιάστατο κρίσιμο ύψος, όπου $\mu = \kappa * z_c$ (η μεταβλητή κ είναι ο κυματαριθμός και το z_c το κρίσιμο ύψος ορισμένο ως $U_0(z = z_c) = c$)¹².

Μία ακόμα παράμετρος που πρέπει να αναφερθεί είναι η κυματική απόσβεση (dissipation) S_{ds} που κατά τον Hasselmann ορίζεται ως:

$$S_{ds} = -C_{ds} \langle \omega \rangle (\langle k \rangle^2 m_0)^2 \left[(1 - \delta) \frac{k}{\langle k \rangle} + \delta \left(\frac{k}{\langle k \rangle} \right)^2 \right] N, \quad \text{Τύπος (7)}$$

όπου, δ και C_{ds} είναι δύο σταθερές, m_0 είναι η συνολική διακύμανση κύματος ανά τετραγωνικό μέτρο, k ο κυματικός αριθμός, ενώ $\langle \omega \rangle$ είναι η μέση γωνιακή συχνότητα και $\langle k \rangle$ ο μέσος κυματικός αριθμός. Συνήθως, για την εκτέλεση των υπολογισμών ορίζουμε το $C_{ds} = 4.5$ ενώ το $\delta = 0.5$. Αυτές οι τιμές δεν είναι τυχαίες. Αν υποθέσουμε ότι υπάρχει διαχωρισμός μεγάλος ανάμεσα στα whitecaps και στην κλίμακα του μήκους των κυμάτων, τότε η ισχύς του κυματαριθμού στην διάχυση-απόσβεση είναι ίση με την μονάδα. Κάτι τέτοιο όμως δημιουργεί προβλήματα, καθώς στο τμήμα του φάσματος για τις υψηλές συχνότητες, ένα μεγάλο κενό μεταξύ των whitecaps και των κυμάτων δεν εμφανίζεται και συνεπώς επιτρέπει την πιθανότητα μιας άλλης εξάρτησης της διάχυσης από τον κυματαριθμό. Με τον τρόπο αυτό ολοκληρώνεται ο ορισμός του όρου διάχυσης.

Σε αντίθεση με τον όρο S_{in} όπου υπάρχουν πολλά δεδομένα μέσω απλής παρατήρησης, για την διάχυση κάτι τέτοιο δεν ισχύει. Ο μόνος τρόπος λοιπόν, για να υπάρχει λειτουργική μορφή διάχυσης στην εξίσωση, είναι οι δύο αυτές σταθερές C_{ds} και δ να πάρουν τιμές, ώστε τα παραγόμενα αποτελέσματα να συμβαδίζουν με τα λιγοστά δεδομένα ανάπτυξης και με τα δεδομένα από την εξάρτηση της επιφανειακής τάσης των κυμάτων. Έτσι λοιπόν, ακολουθώντας αυτή τη μέθοδο και ύστερα από πολλές έρευνες οι σταθερές C_{ds} και δ πήραν τιμές 4.5 και 0.5 αντίστοιχα.¹³

¹² Günther, H., Hasselmann, S., Janssen, P.A.E.M., October 1992, "The WAM Model cycle 4 (revised version)", Modellberatungsgruppe, Hamburg, σελ 4

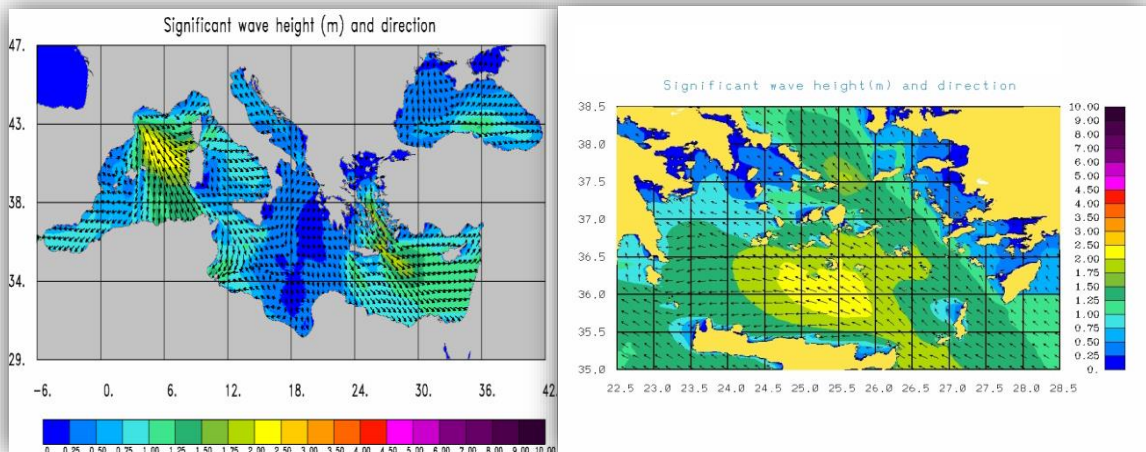
¹³ Janssen, P., Bidlot, J.R., April 9 2002, "IFS DOCUMENTATION Part VII ECMWF WAVE MODEL" [Online]. Available from: <https://www.ecmwf.int/node/13283> [accessed 13 Oct 2021], σελ 15

Τέλος, για την ολική κατανόηση της εξίσωσης της συνάρτησης της πηγής S και κατ'έπекταση τον τρόπο λειτουργίας του μαθηματικού μοντέλου WAM, πρέπει να εξηγηθεί και ο όρος της μη γραμμικής, (non-linear) μεταφερόμενης ενέργειας S_{nl} . Ο όρος αυτός στο μοντέλο εκφράζεται με την παραμετροποίηση DIA (Discrete Interaction Operator).¹⁴

Στα επιφανειακά βαρυτικά κύματα, η περιγραφή της μη γραμμικής μεταφοράς ενέργειας εκτελείται από τέσσερα κύματα, που αλληλεπιδρούν συντονισμένα. Συνεπώς απαιτείται τρομερή υπολογιστική ισχύ καθώς χρειάζεται η επίλυση ενός τρισδιάστατου ολοκληρώματος. Η λύση δόθηκε από τον Hasselmann (1985), όταν δημιούργησε ένα μη γραμμικό τελεστή, από ένα μόνο μικρό αριθμό διαμορφώσεων αλληλεπίδρασης αποτελούμενες από γειτονικές και πεπερασμένες αλληλεπιδράσεις. Σύμφωνα με αυτόν η μη γραμμική συνάρτηση πηγής S αναπαρίσταται με τη διακριτή παραμετροποίηση του τελεστή αλληλεπίδρασης και διατηρεί τη βασική μορφή της ακριβούς έκφρασης της μη γραμμικής μεταφοράς. Έτσι:

$$s_{nl}^{exact}(k_4) = \int \omega_4 \sigma \delta(k_1 + k_2 - k_3 - k_4) \chi \delta(\omega_1 + \omega_2 - \omega_3 - \omega_4) [n_j n_2 (n_3 + n_4) - n_3 n_4 (n_1 + n_2)] dk_1 dk_2 dk_3 \quad \text{Τύπος (8)}$$

Όπου, $n_j = F(k_j)/\omega_j$ συμβολίζει το φάσμα δράσης και ο συντελεστής $\sigma(k_1, k_2, k_3, k_4)$ περιγράφει την ισχύ σύζευξης μιας τετράδας κυμααριθμών k_1, k_2, k_3, k_4 που αλληλεπιδρά με συντονισμό. Ωστόσο, το πενταδιάστατο συνεχές όλων των συντονιζόμενων τετραπλετών (τρεις διαστάσεις ολοκλήρωσης και δύο διαστάσεις για το k_4), μειώνεται σε ένα δισδιάστατο συνεχές, θεωρώντας μόνο ένα (κατοπτρικό συμμετρικό), ζεύγος διακριτών διαμορφώσεων αλληλεπίδρασης.



Εικόνα 7: Απεικόνιση πρόβλεψης έντασης και κατεύθυνσης κύματος ολόκληρης της Μεσογείου και της Μαύρης Θάλασσας στα Αριστερά και της περιοχής του Κεντρικού και Νότιου Αιγαίου στα Δεξιά.

¹⁴Τσουτσουράκης, Γ., Μάιος 2014, “Μοντέλα προσομοίωσης θαλάσσιου κυματισμού: Κατηγορίες, Δυνατότητες, Εφαρμογές”, Σχολή Ναυτικών Δοκίμων, Πειραιάς, σελ 28



Η χρήση του τελεστή αυτού κατέστησε δυνατή την προσομοίωση της μη γραμμικής μεταφοράς με ένα μόνο, κατοπτρικής εικόνας, ζεύγος ενδιάμεσου εύρους διαμορφώσεων αλληλεπιδράσεων. Με την μέθοδο αυτή ορίζονται τα $k_1 = k_2 = k$ ενώ τα k_3 και k_4 έχουν άλλο μέγεθος εκφρασμένα υπό γωνία ως προς τον κυματαριθμό k . Με τον τρόπο αυτό επιλύεται το τρισδιάστατο ολοκλήρωμα, με τρόπο όμως όπου η ολοκλήρωση γίνεται σε ένα δισδιάστατο συνεχές και δύο διακριτές αλληλεπιδράσεις, αντί να ληφθεί υπόψη όλη η κυματική συμβολή και των τεσσάρων κυμάτων.

Η αριθμητική εξίσωση της μη γραμμικής μεταφοράς είναι η ακόλουθη:

$$S_{nl}(\text{finite depth}) = R(\bar{k}h)S_{nl}(\text{infinite depth}) \quad \text{Τύπος (9)}$$

Όπου, \bar{k} είναι ο μέσος κυματαριθμός και ισχύει $\bar{k}h > 1$ και:

$$R(x) = 1 + \frac{5.5}{x} \left(1 - \frac{5x}{6}\right) \exp\left(-\frac{5x}{4}\right) \quad \text{Τύπος (10)}$$

με $x = (3/4)\bar{k}h$.



ΚΛΙΜΑΚΑ ΜΠΟΦΟΡ

ΒΑΘΜΟΙ	ΚΟΜΒΟΙ	ΥΨΟΣ ΚΥΜΑΤΩΝ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΘΑΛΑΣΣΗΣ
0	Νηνεμία (0-1 κόμβοι)	0 μέτρα	Θάλασσα «λάδι» ή «καθρέπτης»
1	Υποπνέων (1-3)	0-0,1	Απαλές ρυτίδες με κυματοειδή μορφή
2	Ασθενής (4-6)	0,1-0,6	Μικρά κύματα (με λίγο αφρό στην κορυφή)
3	Λεπτός (7-10)	0,6-1,25	Θάλασσα λίγο ταραγμένη. Μικρά κύματα που οι κορυφές τους αρχίζουν να σπάζουν.
4	Μέτριος (11-16)	1-1,5	Λίγο ταραγμένη έως ταραγμένη. Τα κύματα γίνονται μεγαλύτερα.
5	Λαμπρός (17-21)	1,5-2,5	Ταραγμένη. Μέτρια κύματα με πιο επιμήκη μορφή.
6	Ισχυρός (22-27)	2,5-4	Κυματώδης. Μεγάλα κύματα αρχίζουν να σχηματίζονται με κορυφές λευκού αφρού. Επικίνδυνη για όλα τα σκάφη.
7	Σφοδρός (28-33)	4-5,5	Κυματώδης έως πολύ κυματώδης. Η θάλασσα φουσκώνει και ο λευκός αφρός που προέρχεται από τα κύματα που σπάζουν, αρχίζει να παρασύρεται σε λωρίδες.
8	Θυελλώδης (34-40)	5,5-7,5	Πολύ κυματώδης έως τρικυμιώδης. Μέτρια ψηλά κύματα μεγάλου μάλλον μήκους. Οι άκρες τους σπάζουν και στροβιλίζονται.
9	Θύελλα (41-47)	7-9	Τρικυμιώδης. Μεγάλα και ογκώδη κύματα. Πυκνές λωρίδες αφρού κατά τη διεύθυνση του ανέμου. Οι κορυφές πέφτουν, σπάζουν και κυλάνε.
10	Ισχυρή Θύελλα (48- 55)	9-12,5	Πολύ τρικυμιώδης. Πολύ μεγάλα κύματα με μακριές κορυφές. Ο αφρός συσσωρεύεται και εκτινάσσεται κατά την διεύθυνση του ανέμου, κάνοντας τη θάλασσα άσπρη.
11	Σφοδρή Θύελλα (56-63)	10-14	Μαινόμενη. Κύματα εξαιρετικά ψηλά. Η θάλασσα σκεπάζεται από μεγάλες εκτάσεις αφρού, που παρασύρονται κατά τη διεύθυνση του ανέμου.
12	Λαίλαπα ή Τυφώνας (64 και πάνω)	14μ. και πάνω	Παράφορη. Η θάλασσα είναι αγριεμένη και γεμάτη αφρούς. Η ορατότητα σχεδόν ανύπαρκτη. Επικίνδυνη για όλα τα καράβια.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

Κυματισμός και Πολεμικό Ναυτικό

3.1 Εισαγωγή

Αν ανατρέξει κανείς στην διεθνή βιβλιογραφία, μπορεί να εντοπίσει, στο πέραςμα του χρόνου, περιπτώσεις που η σωστή και αντίστοιχα η λανθασμένη αξιοποίηση των περιβαλλοντικών συνθηκών, έκριναν την τύχη όχι μόνο του πληρώματος του πλοίου, αλλά και συνολικά των επιχειρήσεων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα ίσως αποτελεί η επιλογή της ημερομηνίας και της ώρας της συμμαχικής απόβασης στην Νορμανδία. Μία αποβατική ενέργεια που, όπως θα αναλυθεί παρακάτω, επηρεάστηκε δραματικά από τους υψηλούς ανέμους και τα δυνατά και μεγάλα κύματα. Χρονικά οι σύμμαχοι ήταν περιορισμένοι στις



Εικόνα 8 : Πετρέλευση του US Mitchener κατά τον πλού του με ιδιαίτερα υψηλή κατάσταση θαλάσσης. ΠΗΓΗ Crenshaw, R.S., 1994, "Naval Shiphandling", (4th Edition), Md. Naval Institute Press, Annapolis

ημερομηνίες του D-Day, καθώς μεταξύ των άλλων, ήταν απαραίτητο το σεληνιακό φως για τον εντοπισμό υποθαλάσσιων γερμανικών εμποδίων, όπως και για σημεία προσγείωσης των αλεξιπτωτιστών. Η καλύτερη και εγκυρότερη πρόβλεψη των συνθηκών από τους συμμάχους αξιωματικούς και επιτελείς με την χρήση μοντέρνων και ακριβέστερων μοντέλων έδωσαν το πράσινο φως για τις 6 Ιουνίου του 1944 κάτι που οι Γερμανοί θεωρούσαν αδύνατο καθώς υπολόγιζαν ότι οι άσχημες καιρικές συνθήκες θα καθιστούσαν οποιαδήποτε αποβατική ενέργεια από το στενό της Μάγχης αδύνατη. Ακόμα και στις 6 Ιουνίου οι καιρικές συνθήκες δεν ήταν ιδανικές και παρά τα όποια προβλήματα



υπήρξαν οι Σύμμαχοι κατάφεραν να σπάσουν τις γραμμές και να ξεκινήσει ο αγώνας για την απελευθέρωση της Ευρώπης.¹⁵

Από το παράδειγμα αυτό διαφαίνεται η σημασία της σωστής πρόβλεψης των συνθηκών που πρόκειται να επηρεάσουν μια ναυτική επιχείρηση. Το σύγχρονο θέατρο επιχειρήσεων δεν είναι τόσο απλό όσο ήταν πριν από 50 χρόνια. Μία ναυτική επιχείρηση – αποστολή ομαδοποιείται στις εξής κατηγορίες:

- ✚ Επιχειρήσεις κυριαρχίας επιφανείας και υποεπιφανείας: παραδοσιακές επιχειρήσεις επιφάνειας, επιχειρήσεις ναρκοθέτησης και αποναρκοθέτησης και ανθυποβρυχιακές επιχειρήσεις.
- ✚ Επιχειρήσεις κυριαρχίας αέρος: αεράμυνα, επιχειρήσεις Ε/Π.
- ✚ Επιχειρήσεις προβολής ισχύος: ναυτικός βομβαρδισμός, ειδικές ναυτικές επιχειρήσεις, αποβατικές επιχειρήσεις επιχειρήσεις έρευνας και διάσωσης και σεισμικές έρευνες.¹⁶

Πρέπει να σημειωθεί στο σημείο αυτό, ότι ο άνεμος σε συνδυασμό με τα κύματα που αυτός δημιουργεί είναι δύο παράγοντες που επιδρούν τόσο στην ολική απόδοση της πλατφόρμας του πολεμικού πλοίου, όσο και των οπλικών και λοιπών ηλεκτρονικών συστημάτων που αυτό φέρει. Ύστερα από μελέτες έχει διαπιστωθεί ότι οι πολεμικές δυνατότητες ενός αντιτορπιλικού, που επιχειρεί σε κατάσταση θαλάσσης **5** (θάλασσα **κυματώδης**, πιθανό ύψος κύματος **3.0μ**, μέγιστο ύψος κύματος **2.5–4** μέτρα), είναι κατά 28.5% λιγότερες από αυτές που έχει όταν επιχειρεί σε θαλάσσιο περιβάλλον απόλυτης άπνοιας.¹⁷ Η ανάλυση τους θα γίνει στην επόμενη ενότητα.

3.2 Ναυτικές επιχειρήσεις και αποστολές

3.2.1 Επιχειρήσεις κυριαρχίας επιφανείας και υποεπιφανείας

Ο θαλάσσιος κυματισμός καθαυτός επηρεάζει καθοριστικά, τόσο τον προγραμματισμό, την εκτέλεση και υλοποίηση των διάφορων γυμνασίων, στην προσπάθεια επαύξησης της μαχητικής ικανότητας της ναυτικής δύναμης, όσο και στην περίπτωση πραγματικών επιχειρήσεων. Το κύμα, ο άνεμος και σε μικρότερο βαθμό τα υπάρχοντα ρεύματα επηρεάζουν την δυνατότητα ελιγμών των πολεμικών πλοίων, η οποία εξαρτάται από την τηρηθείσα πορεία, τα ελικτικά στοιχεία του πλοίου και τέλος από τον

¹⁵ Klein, C., June 5 2019, “The Weather Forecast That Saved D-Day”, The History Channel[Online]. Available from: <https://www.ecmwf.int/node/13283> [accessed 23 Oct 2021]

¹⁶ Tobin, P.E., 2003, “Environmental Information for Naval Warfare”, Committee on Environmental Information for Naval Use, The National Academies Press, Washington, σελ 35- 36

¹⁷ Zhang, H., April 2017, “Combat capability evaluation method of surface warship considering impact of wind and waves”, Naval Academy of Armament, Beijing, σελ 26



Γεώργιος Ταυρής

Μοντέλα προσομοίωσης Θαλασσίου Κυματισμού και εφαρμογές σε Επιχειρησιακές Δραστηριότητες του Πολεμικού Ναυτικού

αντίκτυπο των περιβαλλοντικών συνθηκών κατά την διάρκεια πλεύσης.¹⁸ Η επιλογή της ημερομηνίας διεξαγωγής των πάσης φύσεως εκπαιδευτικών δραστηριοτήτων καθορίζεται από το πότε οι επικρατούσες συνθήκες κρίνονται κατάλληλες για την όσο το δυνατόν καλύτερη εκτέλεσή τους. Στην περίπτωση διεξαγωγής πραγματικών επιχειρήσεων, το επιχειρησιακό σχέδιο προσαρμόζεται κατάλληλα με στόχο την μέγιστη εκμετάλλευση των συνθηκών αυτών, για την επιτυχή έκβασή του, την εξασφάλιση της κυριαρχίας και την επίτευξη του δόγματος του Πολεμικού Ναυτικού.

Ένα στοιχείο που καθορίζει την αντοχή μίας ναυτικής πολεμικής πλατφόρμας στον καιρό είναι το σχήμα και το μέγεθος της. Θεωρητικά κάποια πολεμικά πλοία μπορούν να ανταπεξέλθουν σε κατάσταση θαλάσσης μέχρι 12^{ου} βαθμού.¹⁹ Ανάλογα το μέγεθος του πολεμικού πλοίου είναι λογικό να υπάρχει μεγαλύτερη αντοχή στις καιρικές συνθήκες. Διαφορετική αντοχή έχει μία φρεγάτα τύπου "Standard" άλλη έχει μία τορπιλάκατος τύπου "FACM:Fast Attack Craft Missile" του ελληνικού πολεμικού ναυτικού. Επιπρόσθετα μεταξύ πλοίων όμοιου τύπου, που διαφέρουν ως προς το μέγεθος, πάλι υπάρχουν σημαντικές διαφορές. Έτσι, πάλι, οι φρεγάτες τύπου "S" έχουν διαφορετική πλεύση από ότι μία φρεγάτα τύπου "MEKO200HN" όταν και οι δύο μονάδες πλέουν στις ίδιες κυματικές συνθήκες.

Ο άνεμος και το κύμα επιδρούν στο ίδιο το υλικό και στα συστήματα του πλοίου. Χρησιμοποιείται από τους Αμερικάνους η εξής φράση "Secure Ship for Heavy Weather: Ασφαλές πλοίο για δύσκολο καιρό" και εφαρμόζεται κατά κόρον από το ΠΝ. Προ απόπλου με γνώση ότι επίκειται σκληρός καιρός εκτελείται με check of list καλή στερέωση υλικών εντός και εκτός πλοίου. Κατά τον πλου σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες αλλάζει και ο τρόπος ναυτιλίας, καθώς η ταχύτητα και



Εικόνα 9: Αμερικανικό αεροπλανοφόρο που κατά τον διάπλου του από τυφώνα δέχθηκε τέτοια καταπόνηση από τα κύματα που στράβωσε η πλώρη του και ο διάδρομος απογείωσης. ΠΗΓΗ: Crenshaw, R.S., 1984, "Naval Shiphandling"., (4th Edition), Md. Naval Institute Press, Annapolis

¹⁸ Zhang, H., April 2017, "Combat capability evaluation method of surface warship considering impact of wind and waves", Naval Academy of Armament, Beijing σελ 27

¹⁹Tsan, V. "When modern warships confront ... sea storms", [Online]. Available from:<https://azwinn.com/when-modern-warships-confront-sea-storms> [accessed 03 Dec 2021]



η κατεύθυνση πρέπει να καθορίζονται άμεσα από τις εκάστοτε συνθήκες οι οποίες αλλάζουν συνεχώς. Βέβαια πολλές φορές κάτι τέτοιο στην πράξη είναι πολύ δύσκολο και προκαλούνται φθορές τόσο στο υλικό όσο και στο προσωπικό.

Το κύμα, όσον αφορά το υλικό, επηρεάζει σημαντικά την απόδοση των οπλικών, των ηλεκτρονικών και των ναυτιλιακών συστημάτων. Σαν ναυτιλιακά βοηθήματα ορίζονται κατά βάση τα ραντάρ ναυτιλίας τα οποία μεταφέρουν την εικόνα τους και στα λοιπά ηλεκτρονικά βοηθήματα, λ.χ. το ECDIS. Στην απεικόνιση του ραντάρ λόγω κυμάτων υπάρχει αυξημένος θόρυβος και πρέπει να γίνεται κατάλληλη ρύθμιση στο GAIN, για την απαλοιφή του. Χάνεται όμως μέρος της διακριβωτικής ικανότητας του. Το κύμα έχει, επίσης, ως απόρροια η κεραία του ραντάρ και ο στόχος να χάνουν στιγμιαία την ταύτιση τους. Ο στόχος λοιπόν αποκλίνει από τον κύριο άξονα της δέσμης της κεραίας και συνεπώς μειώνεται η αποτελεσματικότητα εντοπισμού σε μεγαλύτερες αποστάσεις.²⁰

Η επίδραση στα ηλεκτρονικά συστήματα είναι αρκετά μεγάλη δεδομένου ότι αυξάνεται η υγρασία και η φυσική καταπόνηση στα καλώδια, στους αισθητήρες στις συσκευές και στις κεραίες που βρίσκονται εκτός και πάνω από την γέφυρα και στον ιστό του πλοίου. Δεν είναι λίγες οι φορές που ξεκόλλησαν, έσπασαν ή αλλοιώθηκαν ραντάρ, κεραίες και καλώδια ύστερα από αλληπάλληλες μετωπικές συγκρούσεις πολεμικού πλοίου και θάλασσας. Τέλος κάποια από τα οπλικά συστήματα εξαρτώνται ομοίως από την κατάσταση θαλάσσης. Όσο αφορά τα σύγχρονα ναυτικά πυροβόλα υπάρχουν stabilizers ώστε να περιορίζεται όσο το δυνατόν περισσότερο η επίδραση του κύματος. Υπάρχουν όρια όμως στην γωνία ύψωσης και στην κάθοδο της κάνης οπότε με ένα μεγάλο roll πλοίου ενδέχεται να επηρεαστεί η σωστή εκτέλεση βολών πυροβολικού. Παρομοίως, ο άνεμος, λόγω της τριβής στα μόρια του αέρα, επηρεάζει αφενός την απόσταση δράσης των κατευθυνόμενων βλημάτων αυξάνοντας ή μειώνοντας το δραστικό βεληνεκές και αφετέρου προκαλώντας την απόκλιση τους από τον στόχο.²¹

Ένα πολύ σημαντικό κομμάτι των επιχειρήσεων που επηρεάζει ο κυματισμός, μέχρι ένα βαθμό, είναι και ο εντοπισμός υποβρυχίων από τις μονάδες επιφανείας και αέρος. Καταρχάς είναι ξεκάθαρο ότι μία κατάσταση θαλάσσης αρκετά υψηλή καθιστά πολύ δύσκολο έως αδύνατο τον οπτικό ή με την χρήση ναυτιλιακών βοηθημάτων, όπως λ.χ. το ραντάρ ναυτιλίας, εντοπισμό υποβρυχίων σε περίπτωση που αυτό βρίσκεται σε περισκοπικό βάθος. Στην περίπτωση όμως που το υποβρύχιο βρίσκεται σε κανονικό βάθος η κατάσταση αλλάζει. Ο κυματισμός επηρεάζει την αποτελεσματικότητα της λειτουργίας του Sonar των μονάδων. Αυτό συμβαίνει καθώς γίνεται ανάμιξη των θαλάσσιων στρωμάτων και δημιουργείται θόρυβος και γρήγορες αυξομειώσεις στις θερμοκρασίες του νερού. Η κατάσταση αυτή δυσχεραίνει την διεξαγωγή ανθυποβρυχιακών επιχειρήσεων.

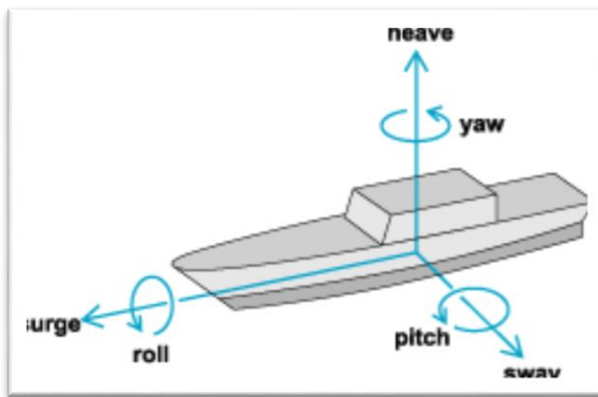
²⁰ Zhang, H., April 2017, "Combat capability evaluation method of surface warship considering impact of wind and waves", Naval Academy of Armament, Beijing σελ 27

²¹ Zhang, H., April 2017, "Combat capability evaluation method of surface warship considering impact of wind and waves", Naval Academy of Armament, Beijing σελ 28



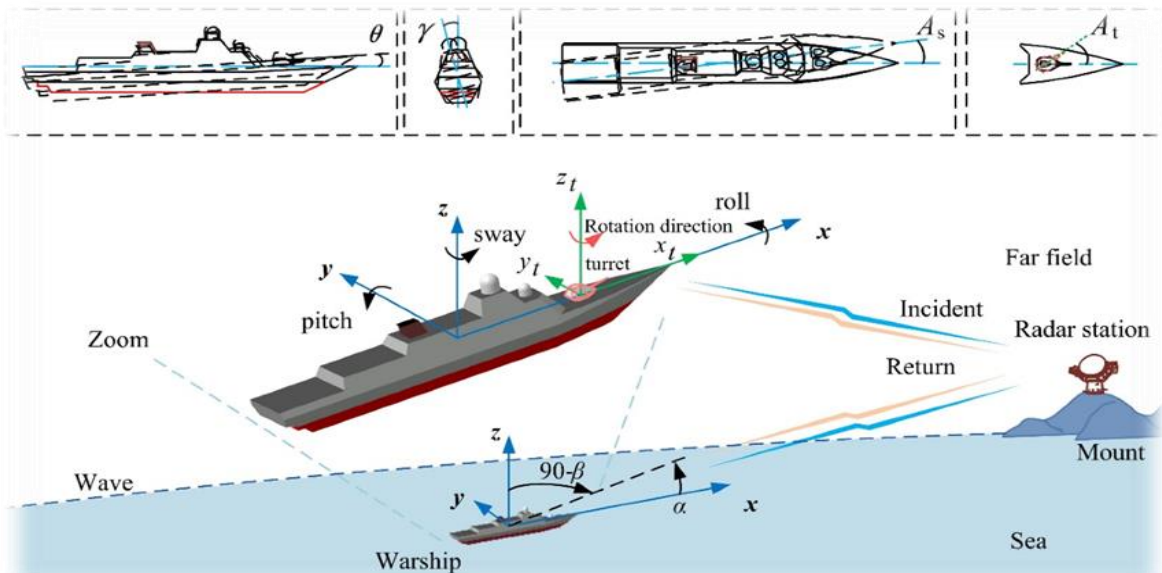
3.2.2 Επιχειρήσεις κυριαρχίας αέρος.

Στην περίπτωση αυτή το κύμα κατά βάση επηρεάζει τις επιχειρήσεις ελικοπτέρων. Ένα πλοίο που φέρει ελικόπτερο ή ένα πλοίο που εκτελεί προετοιμασία υποδοχής ελικοπτέρου προκειμένου να απονηωθεί ή να προσνηωθεί, πρέπει να πληρούνται δύο προϋποθέσεις ανάλογα με τον τύπο του ελικοπτέρου. Ουσιαστικά πρέπει κατά την προσαπονήωση του ελικοπτέρου το πλοίο να έχει συγκεκριμένο pitch και roll, όπου το όριο των τιμών επιτρεπόμενων τιμών καθορίζεται από το εάν η διαδικασία εκτελείται μέρα ή νύχτα. Είναι λογικό, ότι την νύχτα το όριο των τιμών είναι αρκετά μικρότερο από ότι την μέρα. Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει σε ένα βαθμό είναι και η ένταση του σχετικού ανέμου.



Εικόνα 10: Σχηματική απεικόνιση των όρων pitch (κατακόρυφη κίνηση) και roll (οριζόντια)

ΠΗΓΗ: <https://gamedev.stackexchange.com/questions/6502/water-ocean-simulation-and-physics>



Εικόνα 11 Σχηματική απεικόνιση των όρων pitch (κατακόρυφη κίνηση) και roll (οριζόντια) σε πολεμικό πλοίο. ΠΗΓΗ: <https://www.mdpi.com/2304-6732/7/3/64/html>



Η ύπαρξη ισχυρού κατωρέματος είναι από τους μεγαλύτερους κινδύνους για την απονήωση ελικόπτερου. Οι αναγκαίες συνθήκες εξασφαλίζονται σε μεγάλο βαθμό όταν το πλοίο λαμβάνει πορεία προσηώσεως/απονηώσεως, δηλαδή πορεία προς τον άνεμο. Ωστόσο αυτό δεν είναι πάντοτε αυτό εφικτό.²²

3.2.3 Επιχειρήσεις προβολής ισχύος

Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται κυρίως οι επιχειρήσεις για έρευνα και διάσωση, ειδικές ναυτικές και αποβατικές επιχειρήσεις και οι σεισμικές έρευνες. Ο θαλάσσιος κυματισμός επηρεάζει την κάθε επιχείρηση με διαφορετικό τρόπο.

Οι επιχειρήσεις SAR (Search and Rescue) αποτελούνται από δύο τμήματα συνήθως: το πρώτο εκφράζεται από την ναυτική δύναμη επιφανείας που σπεύδει στην περιοχή ερευνών και το δεύτερο από την εναέρια ναυτική δύναμη (Ελικόπτερα, Αεροσκάφη, ΜεΑ). Όταν ο θαλάσσιος κυματισμός είναι έντονος δυσκολεύεται τόσο ο εντοπισμός των στόχων όσο και η διάσωση τους. Ανάλογα με την κατάσταση θαλάσσης και των καιρικών συνθηκών επίλεγχεται και ο πιο πρόσφορος τρόπος διάσωσης των θυμάτων. Σε περιπτώσεις έντονης θαλασσοταραχής ο καλύτερος και ασφαλέστερος τρόπος διάσωσης εφόσον οι συνθήκες το επιτρέπουν αποτελεί η χρήση αυτοδύτη-διασώστη από ναυτικό ελικόπτερο.

Σε περιπτώσεις έντονης θαλασσοταραχής ο καλύτερος και ασφαλέστερος τρόπος



Εικόνα 12: Ελληνικό Ελικόπτερο εκτελεί εκπαίδευση κατεβάζοντας ειδικό διασώστη στο πλαίσιο εκτέλεσης επιχειρήσεων Έρευνας και Διάσωσης.

ΠΗΓΗ:<https://veteranos.gr/apistefto-442-ores-ptiseon-tis-pa-se-mia-mono-imera-ektos-ton-machitikon/>

²² Zhang, H., April 2017, “Combat capability evaluation method of surface warship considering impact of wind and waves”, Naval Academy of Armament, Beijing σελ 28



διάσωσης εφόσον οι συνθήκες το επιτρέπουν αποτελεί η χρήση αυτοδύτη-διασώστη από ναυτικό ελικόπτερο.

Ο θαλάσσιος κυματισμός είναι ο καθοριστικός παράγοντας για την διεξαγωγή αποβατικών και ειδικών ναυτικών επιχειρήσεων. Τα μικρά σκάφη και λέμβοι των ειδικών επιχειρήσεων όπως και τα πολεμικά αρματαγωγά και αποβατικά πλοία απαιτούν μικρή κατάσταση θαλάσσης λόγω μεγέθους και ναυπηγικών χαρακτηριστικών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα όπως αναφέρθηκε είναι η ιστορική απόβαση στην Νορμανδία.



Εικόνα 13: Στην εικόνα αυτή παρουσιάζεται ένα αερόστρωμνο (hovercraft) του ΠΝ κατά την οποία εκτελείται προσέγγιση υποδοχής πνευστής λέμβου κατά την διάρκεια άσκησης



Εικόνα 14: Ελληνικό Α/Γ εκτελεί προς-γυάλωση στα πλαίσια κάποιας εθνικής άσκησης στο πλαίσιο προενίσχυσης, ενί-σχυσης ή ανακατάλυσης κάποιας νήσου.

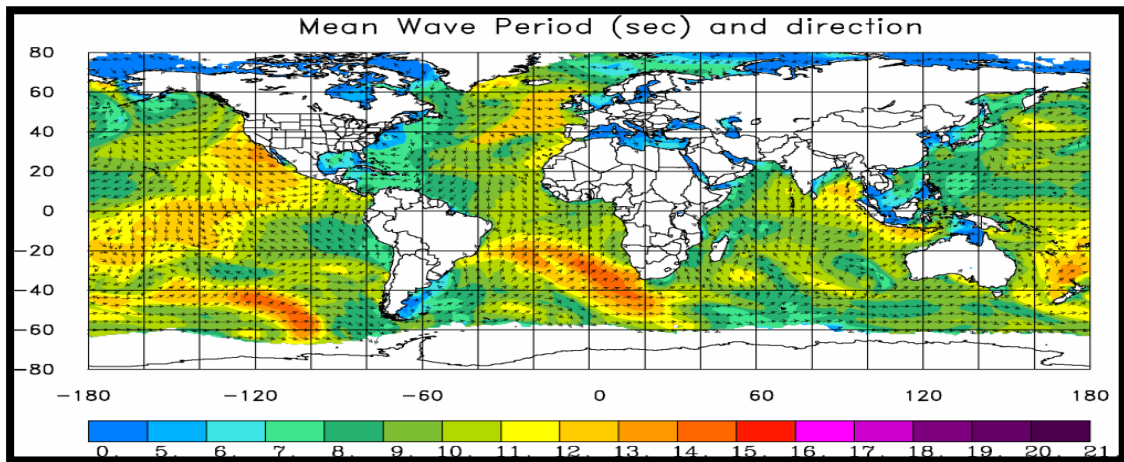
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

Πειραματική Μελέτη Κυματισμού

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μία πειραματική μελέτη διεξαγωγής μίας αμφίβιας και αποβατικής επιχείρησης σε μία νήσο του Βορειοανατολικού Αιγαίου. Η περιοχή διεξαγωγής επιχειρήσεων για την οποία έχουν ληφθεί τα δεδομένα μελέτης είναι ορισμένη με συγκεκριμένες συντεταγμένες σύμφωνα με τον γεωδαιτικό σύστημα συντεταγμένων WGS-84. Τα δεδομένα που έχουν συλλεχθεί αφορούν τα έτη 2020 και 2021 και αφορούν τις βόρειες και νότιες ακτές του νησιού. Περαιτέρω πληροφορίες και στοιχεία για την περιοχή είναι διαθέσιμα στην Σχολή Ναυτικών Δοκίμων.

4.2 Πειραματική Διαδικασία



Εικόνα 15: Πρόβλεψη μέσης κυματικής περιόδου και κατεύθυνσης σε παγκόσμια κλίμακα

Η πειραματική μελέτη με τα δεδομένα που είναι διαθέσιμα σχεδιάστηκε να γίνει σε τρεις φάσεις. Στην πρώτη φάση η μελέτη για το βόρειο και νότιο τμήμα θα γίνει συνολικά για τα δύο έτη υπολογίζοντας ποια είναι η πιθανότητα να είναι δυνατή η απόβαση ή από το νότιο τόσο με μικρά αποβατικά σκάφη όσο και με τα μεγάλα αποβατικά και τα αερόστρωμα. Στην δεύτερη φάση η μελέτη αφορά το παράθυρο διεξαγωγής των δύο επιχειρήσεων κατά τους χειμερινούς μήνες 2020 2021. Στην τρίτη περίπτωση θα γίνει επιλογή ενός χρονικού διαστήματος των πέντε ημερών και εκεί θα γίνει πειραματική μελέτη, ώστε να οριστεί πότε και αν υπάρχει χρονικό παράθυρο που μπορεί να εκτελεστεί η επιχείρηση στο βόρειο και στο νότιο τμήμα. Τα δεδομένα ανάλογα με το έτος, την ημερομηνία και την ώρα, αφορούν τις παρακάτω τιμές:

- ✚ SWHT: Σημαντικό ύψος κύματος σε m
- ✚ MWH: Μέγιστο ύψος κύματος σε m
- ✚ DP: Μοντέλο βαθυμετρίας σε m

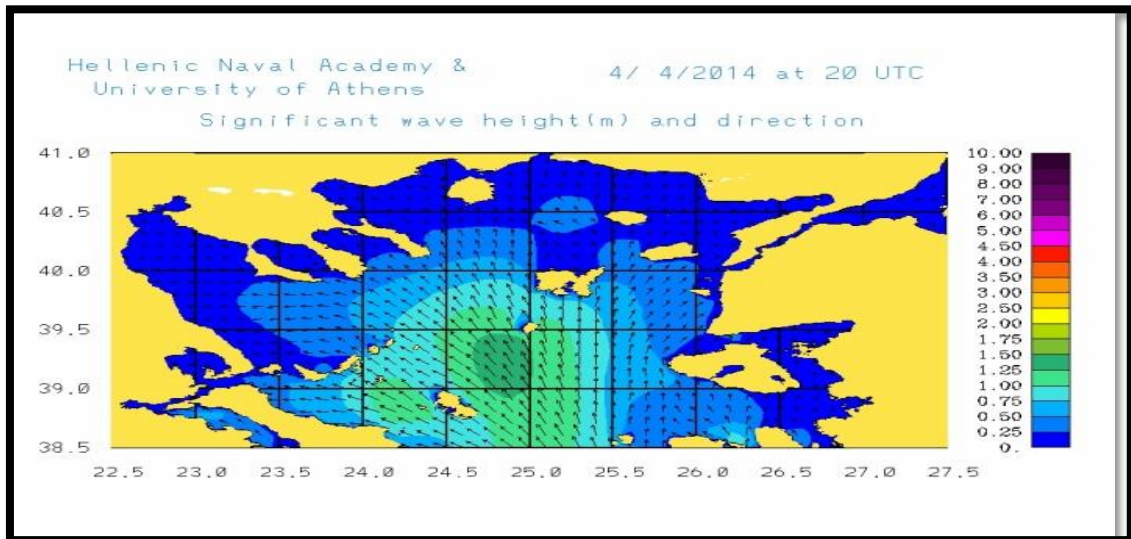


- ✚ PKFR: συχνότητα κορυφής σε Hz
- ✚ MEANFR: μέση συχνότητα σε Hz
- ✚ MWDIR: μέση κατεύθυνση του κύματος σε μοίρες
- ✚ WINSF: ένταση ανέμου στα 10m (m/sec)
- ✚ WIDIR: κατεύθυνση ανέμου σε μοίρες

Στο σημείο αυτό πρέπει να διευκρινιστεί ότι οι τιμές που θα οριστούν θα είναι ενδεικτικές και συμβολικές και σε καμία περίπτωση πραγματικές απλά θα προσεγγίζουν την αληθοφάνεια. Έτσι λοιπόν ορίζεται σαν τιμή $X_1=1.5$ m (όπου X_1 το Μέγιστο ύψος κύματος σε m όπου μπορούν να επιχειρήσουν τα μικρά πνευστά ταχύπλοα των ειδικών δυνάμεων) και σαν τιμή $X_2=3$ m (όπου X_2 το Μέγιστο ύψος κύματος σε m όπου μπορούν να επιχειρήσουν τα αρματαγωγά και τα αερόστρωμνα). Για την ακριβέστερη πειραματική μελέτη ορίζεται ότι οι επιχειρήσεις μπορούν να γίνουν εφόσον η ένταση του ανέμου δεν ξεπερνά την τιμή $Y_1=20$ κόμβοι που με μαθηματική μετατροπή $Y_1=10.3$ m/sec (όπου Y_1 ή μέγιστη ένταση ανέμου όπου μπορούν να επιχειρήσουν τα μικρά πνευστά ταχύπλοα των ειδικών δυνάμεων) και τιμή $Y_2=30$ κόμβοι= 15.43 m/sec (τιμή για τα αρματαγωγά και τα αερόστρωμνα).

4.2.1 Πειραματική μελέτη πρώτης περίπτωσης

Τα διαθέσιμα δεδομένα για την πρώτη περίπτωση είναι περί τα 160.000 για κάθε ένα από τα παραπάνω στοιχεία για κάθε συνδυασμό συντεταγμένων (φ,λ). Η μελέτη θα γίνει συνολικά και για τα δύο χρόνια λαμβάνοντας σαν τιμές τις X_1 , X_2 , Y_1 και Y_2 και



Εικόνα 16: Γεωγραφική απεικόνιση περιοχής Βόρειου Αιγαίου

επεξεργάζοντας κατάλληλα τα δεδομένα στο φύλλο excel του προγράμματος μοντελοποίησης που διαθέτει η ΣΝΔ.



Με την επιλογή των κατάλληλων συνδυασμών (φ,λ) προκύπτουν για το βόρειο κομμάτι της περιοχής επιχειρήσεων σε χρονικό διάστημα όλων των μηνών του 2020 και 2021 τα εξής θετικά αποτελέσματα:

1^η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ	ΤΜΗΜΑ	ΜΙΚΡΑ ΣΚΑΦΗ (ΣΑΠ)	ΑΡΜΑΤΑΓΩΓΑ / ΑΕΡΟΣΤΡΩΜΝΑ	ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΠΙ ΤΟΥ ΣΥΝΟΛΟΥ	
				(ΜΙΚΡΑ)	(ΜΕΓΑΛΑ)
(24ΜΗΝΕΣ) 2020 - 2021	ΒΟΡΕΙΟ	145235	158021	90.82	98.82
	ΝΟΤΙΟ	144973	157992	90.66	98.80

4.2.2 Πειραματική μελέτη δεύτερης περίπτωσης

Η μελέτη της δεύτερης περίπτωσης αφορά μόνο τους χειμερινούς μήνες του Ιανουαρίου, Φεβρουαρίου και του Μαρτίου που κατά κανόνα είναι οι μήνες που οι καιρικές συνθήκες είναι πιο άστατες στο Αιγαίο πέλαγος. Ύστερα από ανάλυση των δεδομένων των παραπάνω μηνών προέκυψε ο κάτωθι πίνακας θετικών αποτελεσμάτων:

2^η ΠΕΡΙΠΤΩ- ΣΗ	ΤΜΗΜΑ	ΜΙΚΡΑ ΣΚΑΦΗ (ΣΑΠ)	ΑΡΜΑΤΑΓΩΓΑ / ΑΕΡΟΣΤΡΩΜΝΑ	ΠΟΣΟΣΤΟ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙ ΤΟΥ ΣΥΝΟΛΟΥ	
				(ΜΙΚΡΑ)	(ΜΕΓΑΛΑ)
ΙΑΝ-ΜΑΡ (6ΜΗΝΕΣ) (2020-2021)	ΒΟΡΕΙΟ	91464	101557	57.20	63.51
	ΝΟΤΙΟ	91322	101555	57.11	63.51

4.2.3 Πειραματική μελέτη τρίτης περίπτωσης

Όπως προαναφέρθηκε στην αρχή του παρόντος κεφαλαίου η πειραματική μελέτη αφορά στη διεξαγωγή μίας αμφίβιας και αποβατικής επιχείρησης σε μία νήσο του Βορειοανατολικού Αιγαίου. Για την δημιουργία αυτού του υποθετικού σεναρίου κρίσεως λαμβάνεται ως παραδοχή η διαμάχη δυο χωρών της περιοχής, τις οποίες ονομάζουμε χώρα Α και Β.

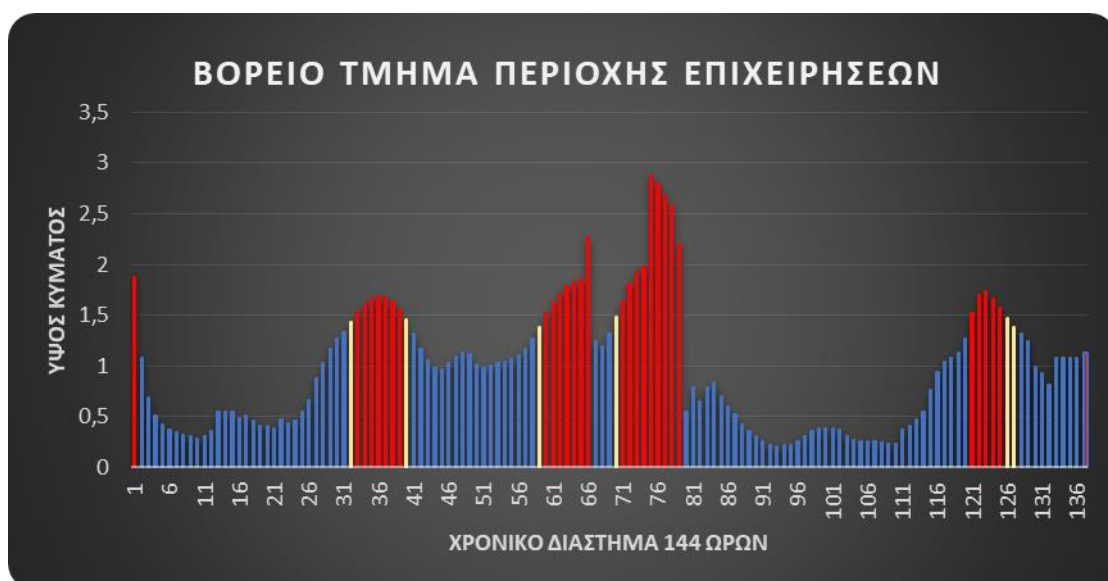
Στο πλαίσιο του παιχνιδιού, οι σχέσεις μεταξύ της χώρας Α και της χώρας Β είναι τεταμένες. Αιτία αντιπαράθεσης είναι η δημιουργία εγκαταστάσεων εκμετάλλευσης υδρογονανθράκων σε νήσο του Βορειοανατολικού Αιγαίου από την Α χωρίς την διακρατική συμφωνία των δύο χωρών, καθώς δεν έχει καθοριστεί η μεταξύ τους ΑΟΖ και Υφαλοκρηπίδα. Η σοβαρότητα της κατάστασης είναι τέτοια που στο διεθνή τύπο αναγράφεται ότι η σύγκρουση είναι αναπόφευκτη. Οι δύο χώρες προκειμένου να διαφυλάξουν τα συμφέροντα τους έχουν κινητοποιήσει τις δυνάμεις τους στα σύνορα και βρίσκονται σε μέγιστη πολεμική ετοιμότητα εν αναμονή των εξελίξεων στο πολιτικό επίπεδο.



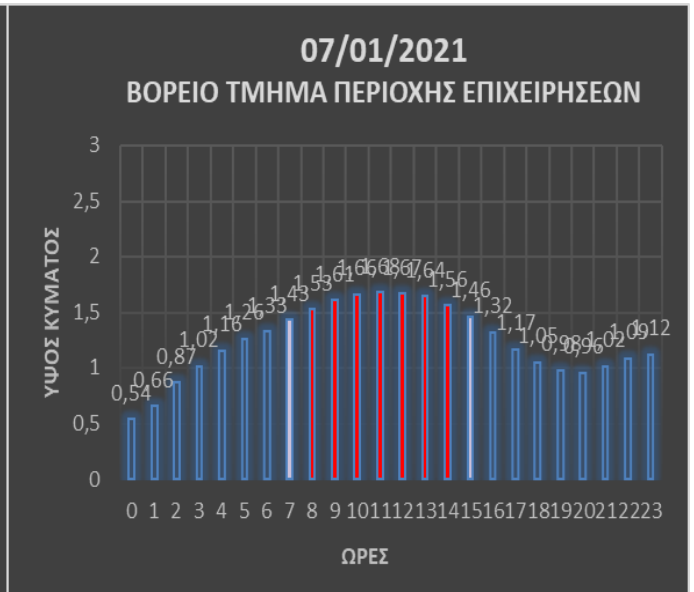
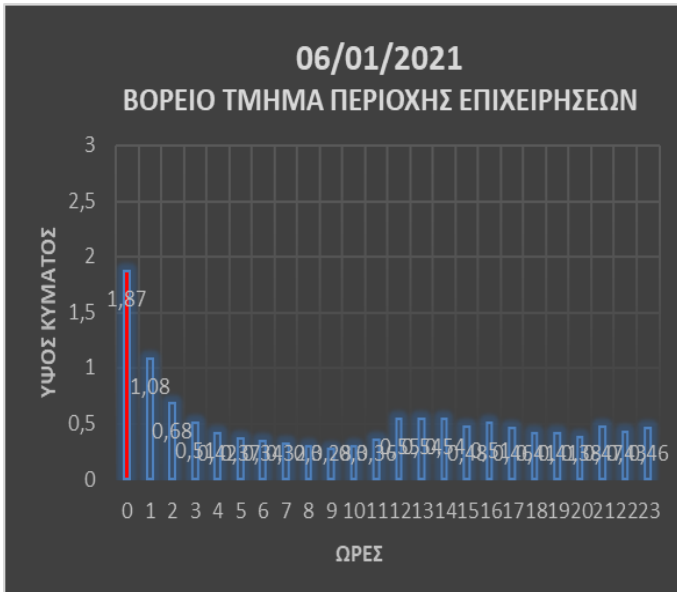
Η κατάσταση επιδεινώνεται περαιτέρω με συνέπεια την πρόκληση μικροεπεισοδίων στα σύνορα των δύο χωρών. Έτσι λοιπόν, η πολιτική και στρατιωτική

ηγεσία της χώρας Β αποφασίζει ότι ένα δυναμικό προληπτικό χτύπημα των εγκαταστάσεων στην νήσο του βορειοανατολικού αιγαίου με την εκτέλεση μίας αεροναυτικής επιχείρησης θα πρόβαλε την δύναμη, το κύρος, και την αποτρεπτική της ισχύ δείχνοντας ότι δεν είναι δέσμια των εξελίξεων. Το χρονικό περιθώριο για την διεξαγωγή της επιχείρησης είναι από τις 6 Ιανουαρίου έως και 11 Ιανουαρίου, καθώς μέχρι τότε μεγάλο μέρος των ναυτικών δυνάμεων της χώρας Α ήταν δεσμευμένο για την διεξαγωγή άλλων εθνικών και διεθνών αποστολών και συνεπώς δεν θα μπορούσαν να αντιδράσουν άμεσα.

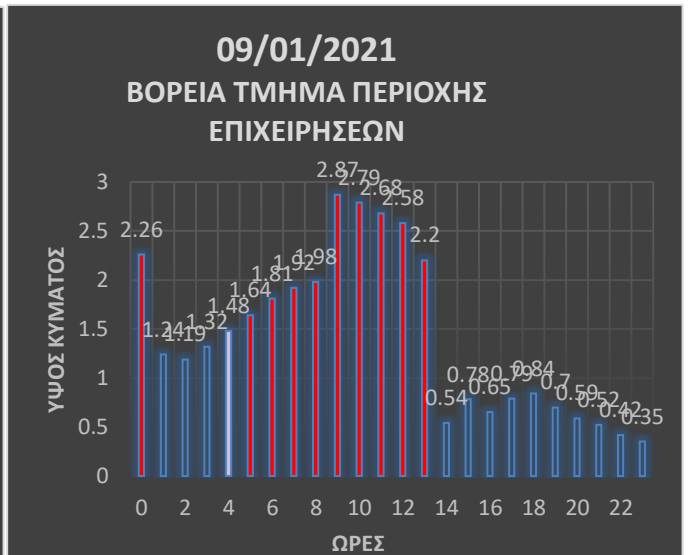
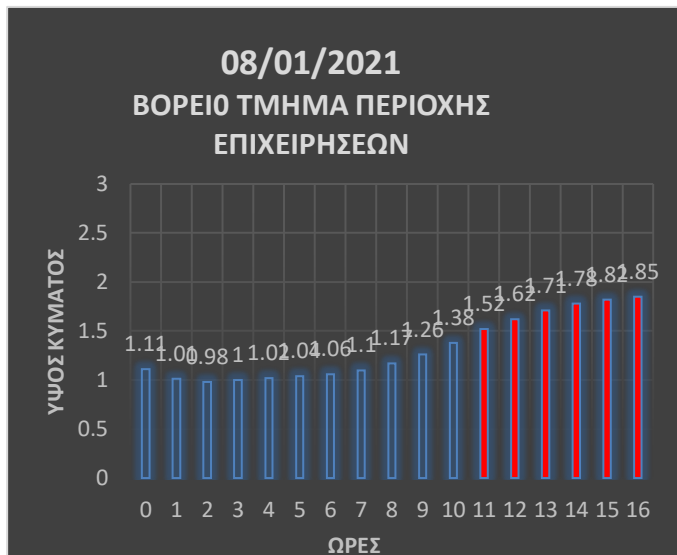
Έχοντας στην διάθεση πληθώρα δεδομένων για τον κυματισμό και τον άνεμο της περιοχής η στρατιωτική ηγεσία πρέπει να αποφασίσει πότε και που είναι προτιμότερη η διεξαγωγή της επιχείρησης. Από τις προηγούμενες δύο περιπτώσεις φαίνεται ότι καλύτερες καιρικές συνθήκες επικρατούν βόρεια της περιοχής επιχειρήσεων. Η αποβίβαση των δυνάμεων των Ειδικών Επιχειρήσεων μπορεί να εκτελεστεί με την χρήση μικρών σκαφών των με τους περιορισμούς στο κύμα και στον άνεμο που έχουν οριστεί ως $X_1=1.5m$ και $Y_1=10.3m/sec$. Στο παρακάτω διάγραμμα που αφορά όλο το χρονικό διάστημα αυτό των 144 ωρών (6 ημέρες) και εν συνεχεία στα επόμενα έξι διαγράμματα ανά 24ωρο φαίνεται με **μπλε** χρώμα πότε μπορεί να διεξαχθεί η επιχείρηση, με **κίτρινο** χρώμα όταν οι συνθήκες είναι οριακές και με **κόκκινο** χρώμα όταν οι συνθήκες είναι απαγορευτικές. Ως ελάχιστος χρόνος για την προσέγγιση της ναυτικής δύναμης στο βόρειο τμήμα της νήσου, την επάνδρωση των ταχέων σκαφών, την καθαίρεση και την αποβίβαση των δυνάμεων σε αυτή ορίζονται ενδεικτικά οι τέσσερις ώρες.



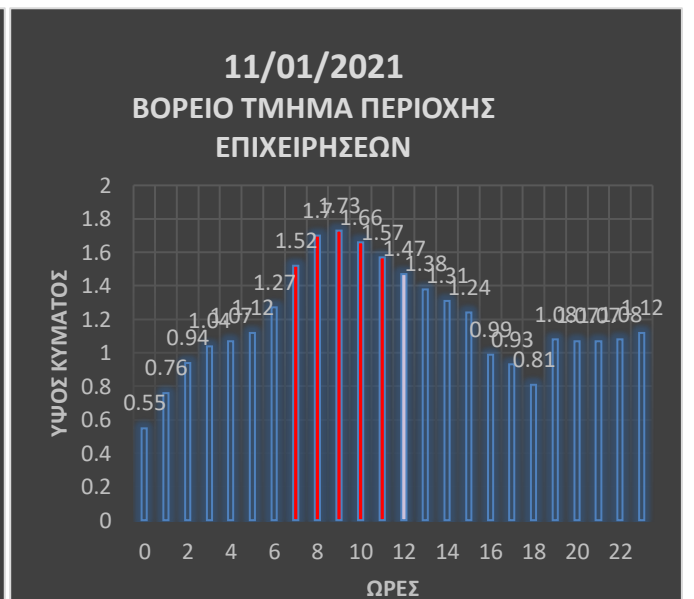
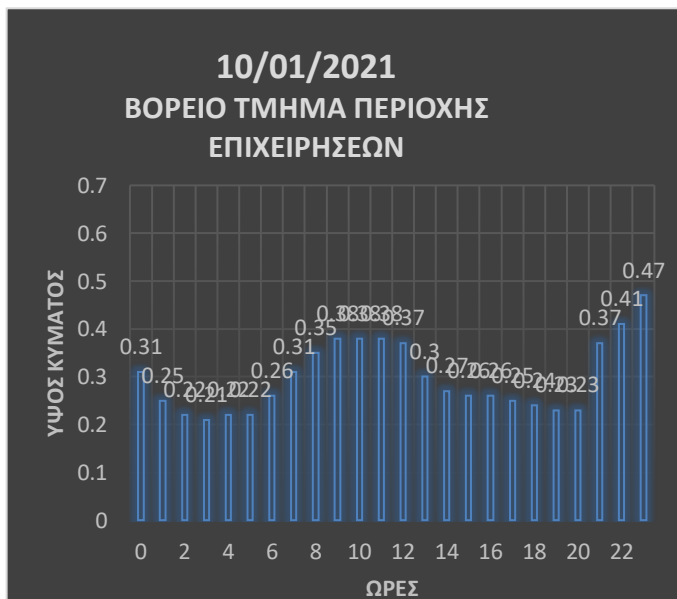
Διάγραμμα 1: Διακύμανση του κυματισμού εντός του χρονικού διαστήματος των 144 ωρών.



Διάγραμμα 2: Διακόμανση Ύψους Κυματισμού σε 24ωρη κλίμακα των 06 και 07 Ιαν 2021 (Αριστερά και Δεξιά αντιστοίχως)



Διάγραμμα 3: Διακόμανση Ύψους Κυματισμού σε 24ωρη κλίμακα των 08 και 09 Ιαν 2021 (Αριστερά και Δεξιά αντιστοίχως)








Διάγραμμα 4: Διακόμανση Ύψους Κυματισμού σε 24ωρη κλίμακα των 10 και 11 Ιαν 2021 (Αριστερά και Δεξιά αντιστοίχως)



Γεώργιος Ταυρής

Μοντέλα προσομοίωσης Θαλασσίου Κυματισμού και εφαρμογές σε Επιχειρησιακές Δραστηριότητες του Πολεμικού Ναυτικού

Υστερά από μελέτη των παραπάνω διαγραμμάτων προκύπτουν τρία μεγάλα ευνοϊκά διαστήματα, ένα οριακά μικρό (της τάξης των 4 με 5 ωρών) και ένα στο τέλος των 144 ωρών.

-  Το πρώτο είναι μεταξύ 060200-070700 τοπική ώρα.
-  Το δεύτερο είναι μεταξύ 071700-081000 τοπική ώρα.
-  Το τρίτο είναι μεταξύ 090100-090400 τοπική ώρα.
-  Το τέταρτο είναι μεταξύ 091400-110600 τοπική ώρα.
-  Το πέμπτο είναι μεταξύ 111300-112359 τοπική ώρα.

Όλα τα άλλα χρονικά παράθυρα είναι κίτρινα ή απογορευτικά. Επομένως, θα μπορούσε να προτιμηθεί το δεύτερο χρονικό διάστημα, καθώς δεδομένου ότι έχει εξασφαλιστεί τοπική υπεροχή αέρος και ακολουθεί σχετικά σύντομα κόκκινο παράθυρο, δεν θα είναι δυνατή η μεταφορά ενισχύσεων με μικρά και ταχέα σκάφη. Τέλος προκύπτει ο κάτωθι γενικός πίνακας.

2^η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ	ΤΜΗΜΑ	ΜΙΚΡΑ ΣΚΑΦΗ (ΣΑΠ)	ΠΟΣΟΣΤΟ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙ ΤΟΥ ΣΥΝΟΛΟΥ (ΜΙΚΡΑ)	ΠΟΣΟΣΤΟ ΑΡΝΗΤΙΚΩΝ ΕΠΙ ΤΟΥ ΣΥΝΟΛΟΥ (ΜΙΚΡΑ)
(6ΗΜΕΡΟ) 060000 - 112359 (IAN 2021)	ΒΟΡΕΙΟ	108	78.83	21.17



Συμπεράσματα

Ο κυματισμός διαχρονικά επηρέασε και επηρεάζει καθοριστικά τις θαλάσσιες δραστηριότητες. Το κλίμα, η κλιματική αλλαγή και το πρόβλημα της μόλυνσης του περιβάλλοντος δημιουργούν μεταβαλλόμενες συνθήκες θαλάσσης που επηρεάζουν καταλυτικά την προστασία της ναυσιπλοΐας.

Πλην εξαιρέσεων, η δημιουργία των θαλάσσιων κυμάτων (ocean/sea waves) είναι αποτέλεσμα των ανέμων που με την ροή τους διαταράσσουν την επιφάνεια του νερού. Ομοίως και η μετακίνηση υγρών διαφορετικής πυκνότητας έχουν ως απόρροια την δημιουργία κύματος. Κύματα δημιουργούνται επίσης από την απελευθέρωση ενέργειας μέσα στον ωκεανό, συμπεριλαμβανομένων και των κυμάτων διαστήματος (interval waves), των τσουνάμι, των παλιρροιών, και των κυμάτων που οφείλονται σε ανθρώπινη παρέμβαση, όπως κύματα από την κίνηση πλοίων ή την έκρηξη εκρηκτικών και πυρηνικών συσκευών που εκλύουν τεράστια ποσά ενέργειας.

Ο άνεμος είναι η συχνότερη αιτία δημιουργίας κυμάτων. Ένα ανεμογενές κύμα δημιουργείται όταν ο άνεμος περνώντας πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας δημιουργεί πίεση και συνάμα ταραχή. Έτσι με την κατάλληλη κινητική ενέργεια, ξεκινάει η δημιουργία των βαρυτικών κυμάτων, τα οποία έχουν συμμετρική μορφή. Η ενέργεια που λαμβάνει ένα τέτοιο κύμα εξαρτάται από τρεις βασικούς παράγοντες: την ένταση, το χρονικό διάστημα που κινείται ο άνεμος προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση και τέλος την απόσταση στην οποία φυσάει ο άνεμος στο ανωτέρω διάστημα.

Η αδυναμία των υπολογιστικών μηχανημάτων, στα μέσα του 20ου αιώνα, καθιστούσε αδύνατη τη πλήρη περιγραφή και ανάλυση του κυματικού φάσματος. Από την εξέλιξη όμως των μοντέλων που αναπτύχθηκαν από τότε, προέκυψαν τα κυματικά μοντέλα 3^{ης} γενιάς τα οποία επιλύουν την εξίσωση μεταφοράς του κύματος, χωρίς κανένα περιορισμό για το φάσμα του κύματος και μπορεί να λειτουργήσουν αποτελεσματικά τόσο για ρηχά όσο και για βαθιά ύδατα.

Η σωστή αξιοποίηση των κυματικών μοντέλων, είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς σε συνδυασμό με τις αυξημένες δυνατότητες που υπάρχουν σήμερα σε υπολογιστική ισχύ είναι κατάλληλα για την πρόβλεψη, την βαθύτερη κατανόηση του θαλάσσιου αυτού φαινομένου και την υποστήριξη έγκαιρης λήψης ορθών αποφάσεων. Τα μοντέλα αυτά είναι σε θέση να επιλύσουν τις πολύπλοκες μαθηματικές εξισώσεις και να δώσουν πληθώρα δεδομένων, με σημαντικότερα την διεύθυνση και την ένταση του θαλάσσιου κύματος.

Σε επιχειρησιακό επίπεδο ο κυματισμός πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη. Η θάλασσα δημιουργεί καταστάσεις και αδιέξοδα που ακόμα και για τα πολεμικά είναι πολλές φορές ανυπέρβλητες. Για τον λόγο αυτό, τόσο κατά την σχεδίαση όσο και κατά την εκτέλεση μίας επιχείρησης, πρέπει να αξιολογούνται και να λαμβάνονται υπόψη οι συνθήκες που επικρατούν στην θαλάσσια περιοχή επιχειρήσεων ως απόρροια των επιπτώσεων που αυτές έχουν στο ίδιο το πλοίο και το προσωπικό του.



Ο άνεμος, σε συνδυασμό με τα κύματα που αυτός δημιουργεί, είναι δύο παράγοντες που επιδρούν τόσο στην ολική απόδοση της πλατφόρμας του πολεμικού πλοίου, όσο και των οπλικών και λοιπών ηλεκτρονικών συστημάτων που αυτό φέρει. Ο βαθμός επιρροής είναι αντιστρόφως ανάλογος του μεγέθους του πλοίου. Συνακόλουθα, το κύμα και ο άνεμος επηρεάζουν τις επιχειρήσεις των υποβρυχίων και των ελικοπτέρων όπως και τις επιχειρήσεις για έρευνα και διάσωση, τις ειδικές ναυτικές και αποβατικές επιχειρήσεις και τις σεισμικές και άλλου είδους έρευνες.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής παρουσιάστηκαν τα βασικά χαρακτηριστικά του θαλασσίου κυματισμού και των σύγχρονων μοντέλων προσομοίωσής του, ενώ μελετήθηκε η επίδραση που έχει σε διάφορες επιχειρησιακές δραστηριότητες του Πολεμικού Ναυτικού. Επιχειρήθηκε επίσης μια πειραματική μελέτη με βάση πραγματικά δεδομένα προσομοίωσης, για μία χρονικά και χωρικά ορισμένη περιοχή επιχειρήσεων ερευνώντας το κατά πόσο μπορεί να επηρεαστεί μια ναυτική επιχείρηση. Με τους επιμέρους τεχνικούς περιορισμούς ενός εκάστου είδους των πλοίων, μέσω της χρήσης μαθηματικών μοντέλων, φάνηκε καθαρά πως η σωστή αξιολόγηση και ανάλυση των κυματικών δεδομένων είναι καθοριστική για την σχεδίαση και εκτέλεση μιας ναυτικής επιχείρησης, καθώς αυτή οφείλει να συνάδει με τις καιρικές συνθήκες που επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό το «Αξίομαχο» και το «Αξίοπλοο» των πολεμικών πλοίων.



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΕΛΛΗΝΙΚΗ

Γερμάν, Κ., Απρίλιος 2017, “Waves-Κύματα”, Σχολή Ναυτικών Δοκίμων, Πειραιάς

Τσουτσουνάκης, Γ., Μάιος 2014, “Μοντέλα προσομοίωσης θαλάσσιου κυματισμού: Κατηγορίες, Δυνατότητες, Εφαρμογές”, Σχολή Ναυτικών Δοκίμων, Πειραιάς.

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ

Thurman, H.V., Trujillo, A.P., October 2001, “ Essentials of Oceanography” (seventh edition), Prentice Hall

Balasubramanian, A., November 9, 2016, “ The Ocean Waves” , University of Mysore

Günther, H., Hasselmann, S., Janssen, P.A.E.M., October 1992, “The WAM Model cycle 4 (revised version)”, Modellberatungsgruppe, Hamburg

Tobin, P.E., 2003, “Environmental Information for Naval Warfare”, Committee on Environmental Information for Naval Use, Washington

Waters, R., 2008, “Energy From Ocean Waves: Full Scale Experimental Verification of a Wave Energy Converter”, Uppsala University

Crenshaw, R.S., 1994, “Naval Shiphandling”, (4th Edition), Md. Naval Institute Press, Annapolis

Zhang, H., April 2017, “Combat capability evaluation method of surface warship considering impact of wind and waves”, Naval Academy of Armament, Beijing

Donas A, Famelis I, Chu PC, Galanis G. Optimization of the Navy’ s three-dimensi-onal mine impact burial prediction simulation model, Impact 35, using high-order numerical methods. The Journal of Defense Modeling and Simulation. July 2021. doiQ10.1177/15485112921 1028 661.

G. Galanis, M. Kafatos, P.C. Chu, N. Hatzopoulos, E. Papageorgiou and Liakatas, Operational atmospheric and wave modeling in the California’ s coastline and offshore area with applications to wave energy monitoring and assessment, Journal of Operational Oceanography, Vol. 10, Issue2, 2017.

George Galanis, Peter C. Chu, George Kallos, Yu-Heng Kuo and C.T.J. Dodson, Wave Height Characteristics in the North Atlantic Ocean: a new approach based on statistical and geometrical techniques, Stoch Environ Res Risk Assess (2012) 26:83-103.



ΠΗΓΕΣ ΣΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ

Janssen, P., Bidlot, J.R., April 9 2002, “IFS DOCUMENTATION Part VII ECMWF WAVE MODEL” [Online]. Available from: <https://www.ecmwf.int/node/13283> [accessed 13 Oct 2021]

January 1998, “The WAM model - a third generation ocean wave prediction model”, [Online]. Available from: https://www.researchgate.net/publication/215722039_The_WAM_model_-_a_third_generation_ocean_wave_prediction_model [accessed 11 Nov 2021]

Klein, C., June 5 2019, “The Weather Forecast That Saved D-Day”, The History Channel [Online]. Available from: <https://www.ecmwf.int/node/13283> [accessed 23 Oct 2021]

Tsan, V. “When modern warships confront ... sea storms”, [Online]. Available from: <https://azwinn.com/when-modern-warships-confront-sea-storms> [accessed 03 Dec 2021]