

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΣΥΜΒΟΛΗΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ



Επιβλέπουσα Καθηγήτρια : Ρωσσιάδου Κωνσταντία

Όνομα Φοιτητή : Ευάγγελος Τσωρός

A.M: 4211

**ΑΚΑΔΗΜΙΑ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ
ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ : Ρωσσιάδου Κωνσταντία

ΘΕΜΑ :

<<ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΣΥΜΒΟΛΗΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ >>

Όνομα Φοιτητή : Ευάγγελος Τσωρός

Α.Γ.Μ: 4211

Ημερομηνία ανάληψης της εργασίας : 16/05/2020

Ημερομηνία παράδοσης της εργασίας :

Ο ΔΙΕΥΘΥΝΤΗΣ ΣΧΟΛΗΣ : Τσούλης Νικόλαος

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	4
❖ Κεφάλαιο 1 : Θαλάσσια Κύματα.....	5
1.1 Χαρακτηριστικά Θαλασσίων Κυμάτων.....	6
1.2 Αίτια Σχηματισμού.....	9
1.3 Θεωρία Airy.....	9
1.4 Θεωρία Stokes.....	10
1.5 Γραμμική θεωρία κυματισμών (Stokes 1ης τάξης – Airy).....	11
1.6 Ενέργεια θαλασσίων κυμάτων.....	12
1.7 Η επίδραση που έχουν στα κύματα τα ρεύματα, η ύπαρξη πάγου στη θάλασσα και το βάθος της θάλασσας.....	13
1.8 Τύποι θαλασσίων κυμάτων.....	19
❖ Κεφάλαιο 2 : Συμβολή Θαλασσίων Κυμάτων.....	26
2.1 Αρχή της επαλληλίας – Υπέρθηση.....	27
2.2 Στάσιμα κύματα.....	27
2.3 Συμβολή Θαλασσίων Κυμάτων.....	31
2.4 Θαλάσσια ρεύματα.....	36
❖ Κεφάλαιο 3 : Παραδείγματα συμβολής θαλασσίων κυμάτων στον κόσμο.....	39
3.1 Abnormal waves της Νότιας Αφρικής.....	39
3.2 Βισκαϊκός κόλπος.....	43
Βιβλιογραφία.....	46

Περίληψη

Η πτυχιακή εργασία με τίτλο Φαινόμενα συμβολής θαλασσίων κυμάτων έχει ως αντικείμενο την ανάλυση του φαινομένου της συμβολής των θαλασσίων κυμάτων και την παρουσίαση ορισμένων ιδιόμορφων περιπτώσεων που είναι αποτελέσματα συμβολής..

Αρχικά, ορίζονται τα θαλάσσιο κύματα και αναφέρονται τα αίτια δημιουργίας τους. Επιπλέον αναφέρονται τα χαρακτηριστικά τους, όπως και η πηγή άντλησης της ενέργειας τους. Συνεχίζοντας αναλύονται οι βασικές θεωρίες των Airy και Strokes, οι οποίοι μελέτησαν την κίνηση των μορίων του νερού που σχετίζεται άμεσα με την συμβολή των θαλασσίων κυμάτων. Ακόμη αναλύονται οι τύποι των θαλασσίων κυμάτων και τα ειδικά χαρακτηριστικά τους, όπως και η επίδραση των θαλασσίων ρευμάτων στα θαλάσσια κύματα. Το κεφάλαιο κλείνει με την ερμηνεία της επίδρασης του βάθους της θάλασσας και του πάγου στα θαλάσσια κύματα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, περιγράφεται το φαινόμενο της συμβολής των κυμάτων γενικά, με σκοπό να κατανοήσουμε την σημασία της συμβολής και έπειτα να προχωρήσουμε στην ανάλυση του φαινομένου της συμβολής στην επιφάνεια του υγρού και να παραθέσουμε κάποια μαθηματικά παραδείγματα, τα οποία μας βοηθάνε στην ανάλυση και κατανόηση του φαινομένου. Κλείνοντας το κεφάλαιο, γίνεται μια γενικότερη αναφορά στα θαλάσσια ρεύματα με σκοπό να μπορέσουμε να κατανοήσουμε τον καταλυτικό ρόλο που έχουν στο φαινόμενο της συμβολής των θαλασσίων κυμάτων.

Ολοκληρώνοντας την πτυχιακή εργασία, στο τρίτο και τελευταίο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση του φαινομένου της συμβολής θαλασσίων κυμάτων που συναντάμε στις ακτές της νοτιοανατολικής Αφρικής και του Βισκαϊκού κόλπου, όπως και το φαινόμενο της « σταυρωτής θάλασσας» στη Νήσο Ιλ Ντε Ρε στις Γαλλικές ακτές του Ατλαντικού ωκεανού.

Κεφάλαιο 1 : Θαλάσσια κύματα



Εικόνα 1 : Θαλάσσιο κύμα

Θαλάσσιο κύμα ορίζουμε την « ανύψωση και την ταπείνωση της επιφάνειας του νερού της θάλασσας »^{*1}. Από τον ορισμό λοιπόν βγαίνει το συμπέρασμα, πως ο κυματισμός είναι ένα σύνολο φυσικών φαινομένων που παρουσιάζει η επιφάνεια της θάλασσας, και οφείλονται κυρίως στην απορρόφηση της κινητικής ενέργειας του ανέμου. Τα κύματα που δημιουργούνται από την πνοή του ανέμου, ονομάζονται κύματα βαρύτητας. Όσο η ένταση του ανέμου αυξάνεται, τόσο τα κύματα μεγαλώνουν (δηλαδή η διαταραχή της θάλασσας είναι ανάλογη με την ένταση που έχει ο άνεμος) και η κινητικότητα – διαταραχή αυτή της θάλασσας ονομάζεται κατάσταση της θάλασσας (sea state). Τα θαλάσσια κύματα κατευθύνονται προς την διεύθυνση με την οποία κατευθύνεται και ο άνεμος, αλλά με μικρότερη ταχύτητα από αυτόν. Όταν η πνοή του ανέμου σταματήσει τα κύματα δεν σταματούν να υπάρχουν, αλλά συνεχίζουν να μεταδίδονται έως ότου αποσβεστούν και το φαινόμενο αυτό είναι ευρέως γνωστό ως αποθαλασσία (swell). Υπάρχουν και άλλες κατηγορίες θαλασσίων κυμάτων πολύ μεγαλύτερης κλίμακας, των οποίων η μετάδοση οφείλεται στην δράση της επιτάχυνσης Coriolis λόγω περιστροφής της γης, ή, κύματα ακόμα μεγαλύτερης κλίμακας, που επηρεάζονται από την έλξη άλλων ουρανίων σωμάτων (της σελήνης συγκεκριμένα).

¹ Ορισμός από το βιβλίο ΝΑΥΤΙΚΗ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ Λ.Ν ΚΑΡΑΠΗΠΕΡΗ σελ: 135

Διακρίνουμε δύο μεγάλες κατηγορίες θαλασσίων κυμάτων , τα Θαλάσσια και τα Ωκεάνια κύματα , ανάλογα την γεωγραφική περιοχή στην οποία αυτά εκδηλώνονται .

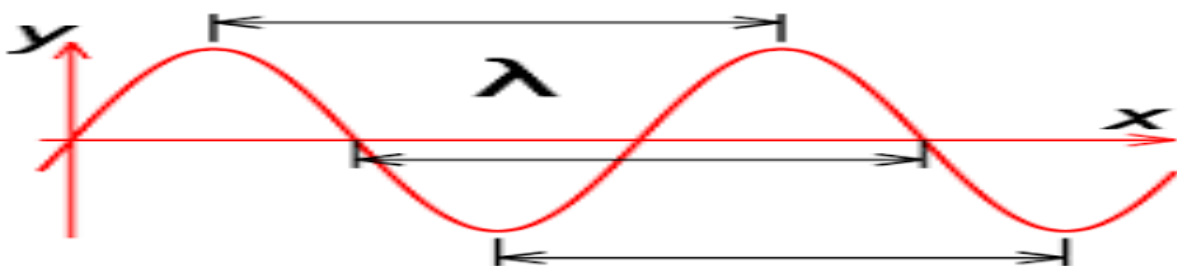
1.1 Χαρακτηριστικά Θαλασσίων Κυμάτων

Τα χαρακτηριστικά των κυμάτων, όπως η ταχύτητα διάδοσης, η περίοδος και το μήκος κύματος, καθώς και το διάστημα μορφοποίησης τους, προσδιορίζονται κυρίως από την ταχύτητα του ανέμου και την διάρκεια αλληλεπίδρασής του με αυτά. Επίσης επηρεάζονται από το βάθος και την μορφολογία του πυθμένα, που μπορεί να εστιάζει ή να διασκορπίζει τον κυματισμό αλλά και από τα θαλάσσια ρεύματα. Τα θαλάσσια κύματα δεν υπάγονται στην κατηγορία των αρμονικών κυμάτων και έχουν σχήμα αντιστρεφόμενου κυκλοειδούς .

Ένα κύμα το περιγράφουν τα εξής χαρακτηριστικά :

- Κορυφή κύματος: Τα ψηλότερα σημεία του κύματος ονομάζονται κορυφές.
- Κοίλο κύματος: Ονομάζεται το χαμηλότερο σημείο του κύματος. Παρατηρούμε πως οι κορυφές των θαλασσίων κυμάτων είναι στενότερες και πιο απότομες από τα κοιλώματα και επίσης η μέση απόσταση μεταξύ κορυφών και κοιλωμάτων είναι μεγαλύτερη από την μέση στάθμη της επιφάνειας της θάλασσας .
- Μήκος κύματος: «Ονομάζεται η οριζόντια απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών»². Συνήθως συμβολίζεται με το γράμμα λ ή L . Όταν το βάθος (B) της θάλασσας είναι μικρότερα από το $L/2$ ενός κύματος ,τότε η κλίση (H/L) του κύματος δεν μπορεί να ξεπεράσει το $1/13$ χωρίς το κύμα να σπάσει.
- Ύψος κύματος (H ή y) : «Ονομάζεται η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ κοιλώματος και κορυφής», είναι το αντίστοιχο πλάτος στην κυματική»². Όσον αφορά το ύψος κύματος δεν συναντάμε μεγαλύτερο από 10 μ. θαλάσσιο κύμα σε ύψος , πόσο μάλλον πάνω από 15 μ. στους ωκεανούς . Υπάρχει περίπτωση να συναντήσουμε θαλάσσιο κύμα πάνω από 25 μ. σε ύψος σε περίπτωση τροπικού κυκλώνα και σε εξαιρετες κακοκαιρίες, όπως και κύματα που φτάνουν έως και τα 40 μ. όταν μιλάμε για κύματα τσουνάμι.

- Ταχύτητα του κύματος: «Ονομάζεται η ταχύτητα με την οποία κινείται η κορυφή του κύματος και εκφράζεται σε κόμβους»². Το κύμα μεταδίδεται στο χώρο. Η ταχύτητα της διαταραχής ονομάζεται ταχύτητα του κύματος. Συνήθως συμβολίζεται με v , και μετριέται ανάλογα με τις μονάδες μέτρησης των μεγεθών μήκος του κύματος και περίοδος, συνήθως σε μέτρα ανά δευτερόλεπτο (m/s). Από τον ορισμό του μήκους κύματος προκύπτει ότι $v=\lambda/T=\lambda f$. Η εξίσωση $v=\lambda f$ ονομάζεται θεμελιώδης εξίσωση της κυματικής και ισχύει σε όλα τα κύματα. Τα κύματα που διαδίδονται σε ένα μέσο διάδοσης έχουν ταχύτητα χαρακτηριστική του συγκεκριμένου μέσου και του συγκεκριμένου είδους κύματος. Αυτό το γεγονός είναι υπεύθυνο για διάφορα φαινόμενα στην κυματική κατά την αλλαγή μέσου διάδοσης ή κατά τη διάδοση στο ίδιο μέσο κυμάτων με ίδια όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά που διαφέρουν στον τρόπο μετάδοσης.²
- Περίοδος κύματος T : «Ονομάζεται το χρονικό διάστημα που απαιτείται για τη διάβαση δυο διαδοχικών κορυφών από σταθερό σημείο»³. Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθούν ορισμένες τιμές της περιόδου που υφίστανται σε κυματισμούς που δημιουργήθηκαν από διαφορετικά αίτια π.χ. όπου επιδρά ο άνεμος με εγκάρσιες και διατμητικές τάσεις (κύματα βαρύτητας), προκαλεί κυματισμούς με περίοδο 0,1 έως 150 sec. Κατά την διάρκεια καταιγίδων οι βαρομετρικές μεταβολές που επιδρούν στο όριο επιφάνειας όπως και οι σεισμικές διαταραχές στο όριο πυθμένα προκαλούν κυματισμούς περιόδου 104-150 sec. Όσον αφορά την παλίρροια (ως μαζική δύναμη), προκαλεί κυματισμούς με περίοδο της τάξης 105 sec. Οι ανεμογενείς κυματισμοί που εμφανίζονται στον παράκτιο χώρο αποτελούν συνισταμένη κυματισμών διαφορετικής προέλευσης με διάφορα χαρακτηριστικά περιόδου T και έχουν τρισδιάστατη μορφή.
- Συχνότητα κύματος: Ονομάζεται ο αριθμός των μηκών κύματος που διέρχονται από ένα σταθερό σημείο, στην μονάδα του χρόνου. Συνήθως συμβολίζεται με το γράμμα N .

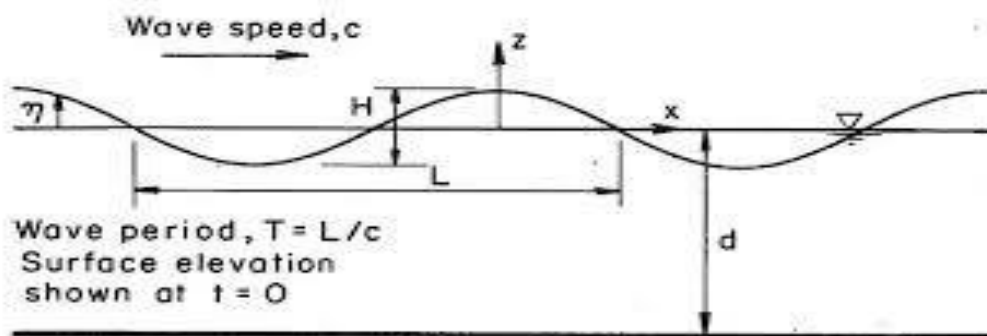


² <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9A%CF%8D%CE%BC%CE%B1>

³ Οι ορισμοί που βρίσκονται σε εισαγωγικά πάρθηκαν από το βιβλίο: ΝΑΥΤΙΚΗ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗΣ Γ. ΨΥΧΑ ΜΗΧΑΗΛ Π. ΜΗΧΑΝΟΓΙΑΝΝΗ σελ: 52

Εικόνα 2 : Χαρακτηριστικά θαλασσίων κυμάτων

Με βάση το παρακάτω σχήμα επίσης μπορούμε να περιγράψουμε και να εξηγήσουμε τα χαρακτηριστικά του κύματος :



Εικόνα 3 :
Χαρακτηριστικά
θαλασσίων
κυμάτων

- Βάθος νερού (B): Η απόσταση από την ελεύθερη επιφάνεια μέχρι τον βυθό

Άλλα μεγέθη που αφορούν ένα κύμα και το περιγράφουν, προκύπτουν από τις παραπάνω ιδιότητες που περιγράψαμε λίγο πιο πάνω :

- Πλάτος κύματος (A) : $A = y/2$
- Συχνότητα κύματος (f) : $f = 1/T$: Συχνότητα f (frequency) ονομάζεται ο αριθμός των διαταραχών που δημιουργήθηκαν ή πέρασαν από ένα συγκεκριμένο σημείο ανά μονάδα χρόνου, δηλαδή ο αριθμός των διαταραχών διά του χρονικού διαστήματος στο οποίο μετρήσαμε τον αριθμό των διαταραχών. Μετριέται σε Hz. Έτσι, ισχύει $f = N/\Delta t$, όπου N είναι ο αριθμός των διαταραχών που πέρασαν σε χρονικό διάστημα Δt . Η συχνότητα είναι αντίστροφο μέγεθος της περιόδου και ισχύει: $fT = (N/\Delta t)(\Delta t/N) = (N\Delta t/\Delta tN) = 1$ »⁴

Κυκλική συχνότητα κύματος (ω) : $\omega = 2\pi/T$

⁴ <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9A%CF%8D%CE%BC%CE%B1>

1.2 Αίτια σχηματισμού

Ο σημαντικότερος λόγος δημιουργίας των θαλασσιών κυμάτων αποτελεί ο άνεμος. Σε κλειστές μάλιστα θάλασσες όπως είναι η Βαλτική, ο Εύξεινος Πόντος και η Μεσόγειος, που είναι θεωρητικά απαλλαγμένες από παλίρροιες, την κατ' εξοχήν αιτία δημιουργίας των παρατηρούμενων κυμάτων αποτελεί ο άνεμος. Γνωρίζουμε ότι στην επιφάνεια ενός ήρεμου υγρού, με την έναρξη του ανέμου, δημιουργούνται ρυτίδες απρόβλεπτου σχήματος. Όσο μεγαλώνει η ένταση του ανέμου μεγαλώνει και η διάρκεια της δράσεως του στην επιφάνεια του υγρού. Ως αποτέλεσμα οι ρυτίδες μετατρέπονται σε κύματα ακαθόριστης διεύθυνσης και σχήματος. Αντίθετα, όταν σταματήσει ο άνεμος τα κύματα παίρνουν συγκεκριμένη μορφή, δηλαδή κανονικό σχήμα με ορισμένο δηλαδή μήκος, ύψος και περίοδο. Αν δεν παρεμβαίνει άλλη περίοδος ή αιτία δημιουργίας του κυματισμού θα διατηρείται μέχρι της πλήρης εξασθένησης του. Αντιθέτως από ότι κοινώς πιστεύεται, κατά τον κυματισμό η μάζα του υγρού δεν μετακινείται αλλά μόνο το σχήμα της κατανομής της επιφάνειας του ύδατος θάλασσας ή λίμνης. Για παράδειγμα συμβαίνει στις κορυφές σταχίων σε ένα χωράφι όταν πνέει ο άνεμος. Το γεγονός ότι η μάζα του ύδατος δεν κινείται γίνεται αντιληπτό με το ακόλουθο πείραμα: αν ριχθεί ένα μικρό ξύλινο τεμάχιο στην επιφάνεια της θάλασσας θα παρατηρήσουμε ότι ενώ τα κύματα προχωρούν, το ξύλο, εφόσον δεν ενεργήσει άλλη δύναμη (για παράδειγμα άνεμος), θα ανέρχεται και θα κατέρχεται στο ίδιο ακριβώς σημείο.

1.3 Θεωρία Airy

Σύμφωνα με την θεωρία του Airy, η κίνηση των μορίων του νερού είναι κυκλική και η διάμετρος τους μειώνεται εκθετικά με το βάθος του νερού. Η κίνηση αυτή αρχίζει να μηδενίζεται ως το σημείο που μπορούμε πλέον να θεωρήσουμε ότι παραμένουν ακίνητα. Το φαινόμενο αυτό το συναντάμε σε βάθη μεγαλύτερα από το μισό μήκος του κύματος. Από την άλλη, αν το βάθος του πυθμένα της θάλασσας είναι μικρό, έχει ως αποτέλεσμα η τριβή των μορίων του νερού στον πυθμένα να παραμορφώνει της κυκλική τους κίνηση. Συμπερασματικά, <<η θεωρία αυτή ισχύει όταν το ύψος του κύματος y είναι πολύ μικρό σε σχέση με το βάθος του νερού B και το μήκος κύματος λ .>> .

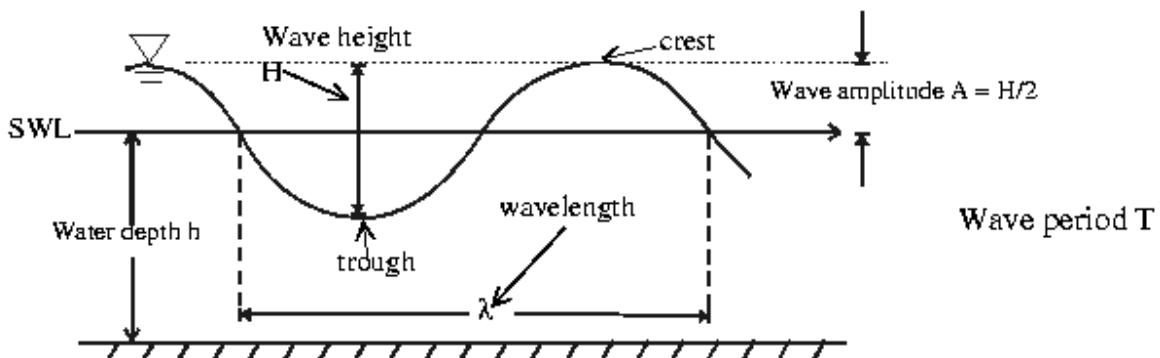
Όλες τις περιπτώσεις του B/λ καλύπτονται από την θεωρία αυτή.

Σύμφωνα λοιπόν με την θεωρία του Airy, το κύμα αποτελεί ημιτονοειδή ταλάντωση και δίνεται από την σχέση :

Όπου η το ύψος του κύματος τη χρονική στιγμή t , σε οριζόντια θέση x

$$\eta = \frac{H}{2} \eta \mu \left(\frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T} \right)$$

Εικόνα 4 : Σχέση της θεωρίας Airy



Εικόνα 5 : Χαρακτηριστικά κύματος για την σχέση της θεωρίας Airy

1.4 Θεωρία του Stokes .

Ο Stokes παρατήρησε ότι η θεωρία του Airy δεν αρκεί ούτως ώστε να μπορούν να ερμηνευτούν όλες οι περιπτώσεις στις οποίες υπάρχει μεταφορά μάζας κατά τη διεύθυνση διάδοσης των κυμάτων. Η αδυναμία της θεωρίας προέρχεται από την απαίτηση ότι το ύψος του κύματος πρέπει να είναι κατά πολύ μικρότερο από το μήκος του. Όμως αντίθετα με την θεωρία, η πράξη απέχει πολύ, έτσι ο Stokes έλαβε υπόψη στους υπολογισμούς του και το ύψος του κύματος. Η προϋπόθεση λοιπόν που έβαλε για να ισχύει η θεωρία του είναι ότι το βάθος πρέπει να είναι μεγάλο σε σχέση με το μήκος κύματος. Συγκεκριμένα έθεσε ότι $B/L > 0.1$ και υπολόγισε την ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων.

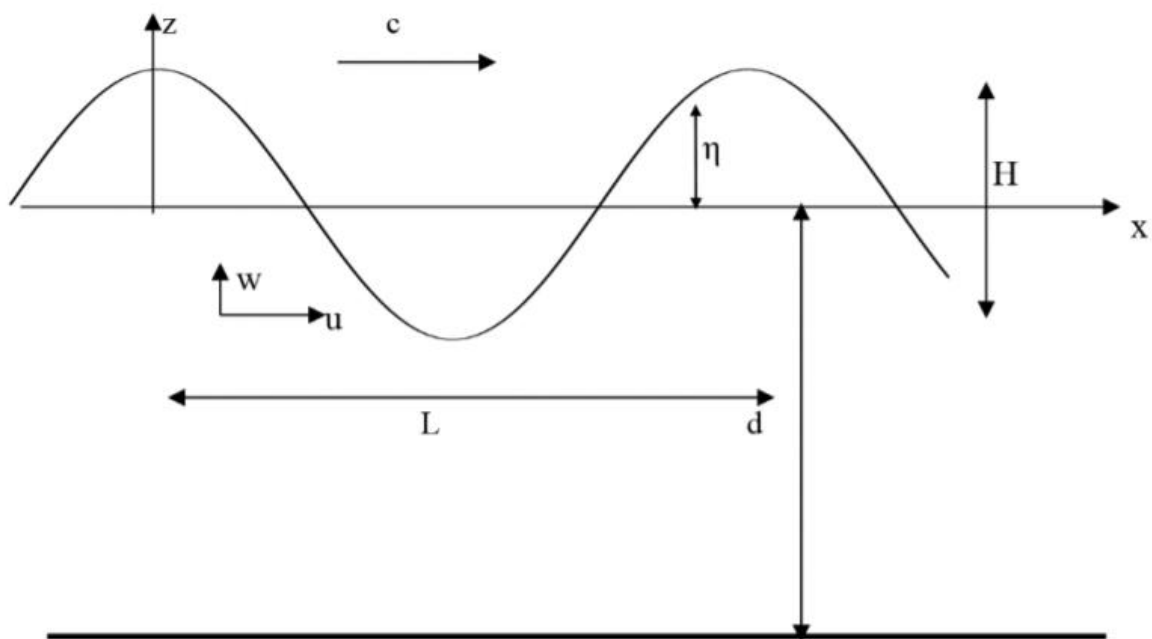
$$C = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \left(1 + \frac{\pi^2 H^2}{2L^2} \right)}$$

Εικόνα 6 : Σχέση της θεωρίας Stokes

Σύμφωνα με τον Stokes οι κινήσεις των μορίων είναι κυκλικές, όπως αναφέρει και ο Airy, τα μόρια όμως δεν διαγράφουν πλήρεις κύκλους σε μία πλήρη περίοδο χρόνου, αλλά τόξα λίγο μικρότερα από 360° . Ως αποτέλεσμα της κίνησης αυτής των μορίων είναι καθώς τα μόρια διαγράφουν μία πλήρη τροχιά ταλάντωσης να σταματάνε λίγο πιο μπροστά από εκεί που ξεκίνησαν. Σύμφωνα με τον Stokes η μορφή της ταλάντωσης μοιάζει με ημιτονοειδή καμπύλη αλλά έχει πεπλατυσμένες κοιλιές και οξύτερες κορυφές.

1.5 Γραμμική θεωρία κυματισμών (Stokes 1ης τάξης – Airy)

Η γραμμική θεωρία κυματισμών βασίζεται στις παραδοχές ότι το ρευστό είναι τέλειο, ο πυθμένας είναι σταθερός, αδιαπέραστος και οριζόντιος (σταθερό βάθος), η ροή είναι αστρόβιλη, η πίεση στην ελεύθερη επιφάνεια είναι μηδέν και το ύψος του κύματος H είναι πολύ μικρότερο του βάθους d και του μήκους L .



Εικόνα 7 : Χαρακτηριστικά κύματος για την σχέση της Γραμμικής θεωρίας κυματισμών

Η παραδοχή αυτή ισχύει όταν $H/d \ll 1$ και $H/L \ll 1$. Στη γραμμική θεωρία η μορφή των κυματισμών προϋποτίθεται ως ημιτονοειδής (μονοχρωματικός γραμμικός κυματισμός). Ορίζοντας τον άξονα x στη στάθμη ηρεμίας*¹ η μορφή της ελεύθερης επιφάνειας η ενός προωθούμενου κυματισμού δίνεται από:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t)$$

Όπου:

η : στιγμιαία ανύψωση της στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας της θάλασσας

H : το ύψος του κύματος ή k : αριθμός κύματος, $k=2\pi/L$

L : το μήκος κύματος

ω : η κυκλική συχνότητα, $\omega=2\pi/T$

T : η περίοδος του κύματος

Η στάθμη ηρεμίας ταυτίζεται με τη Μέση Στάθμη Θάλασσας μόνο στη γραμμική θεωρία κυματισμών.

1.6 Ενέργεια Θαλασσίων Κυμάτων

Ενεργειακή προσέγγιση των κυμάτων

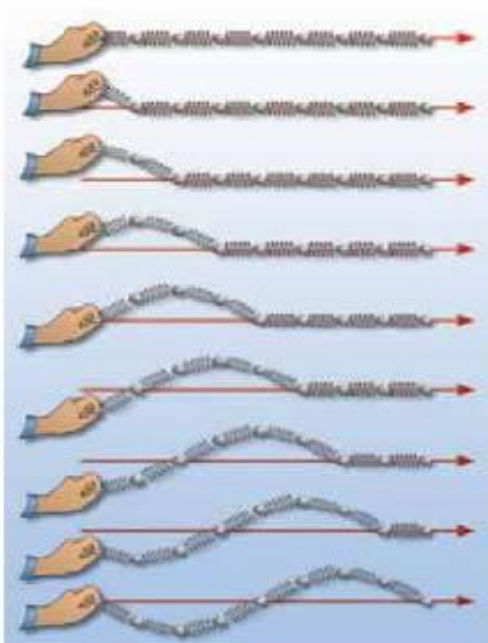
Τα κύματα προκαλούνται από διαταραχές. Τα θαλάσσια κύματα όπως έχουμε προαναφέρει, δημιουργούνται συνήθως εξαιτίας των ανέμων. Η μηχανική τους ενέργεια των κυμάτων προέρχεται από την κινητική ενέργεια του ανέμου (αιολική ενέργεια).

Οι διαταραχές καταστρέφουν κάποιο είδος ισορροπίας, άρα μεταφέρουν ενέργεια, δηλαδή το κύμα μεταφέρει ενέργεια. Η ενέργεια αυτή αξιοποιείται στη μεταβολή του διαταρασμένου μεγέθους, άρα και στη διάδοση του κύματος, και ένα μέρος αποθηκεύεται προσωρινά στην περιοχή διάδοσης. Συνήθως η ενέργεια που υπάρχει σε κάποια περιοχή είναι της μορφής $kA^2/2$, όπου k ένας συντελεστής που εξαρτάται από την περιοχή του μέσου και A το πλάτος του κύματος. Επίσης, παρατηρείται το φαινόμενο η ενέργεια να μετατρέπεται περιοδικά μεταξύ δύο διαφορετικών ειδών ενέργειας, για παράδειγμα κινητική ενέργεια (Όσον αφορά τα θαλάσσια κύματα, η κινητική ενέργεια ενός κύματος σχετίζεται με την ταχύτητα των μορίων και διανέμεται ομοιόμορφα κατά μήκος ολόκληρου του κύματος) και δυναμική ενέργεια ενός κύματος σχετίζεται με την κατακόρυφη απόσταση κάθε μορίου από το μέσο επίπεδο θεωρητικής ηρεμίας του.

Για την κατανόηση των ανωτέρω θα ήταν χρήσιμο να μελετηθεί το κάτωθι παράδειγμα:

<<Κράτησε με το χέρι σου το άκρο ενός ελατηρίου όπως φαίνεται στην εικόνα . Το ελατήριο βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας. Τίναξε απότομα το άκρο και επανάφερε το γρήγορα στην αρχική του θέση. Τότε θα δεις έναν παλμό, μια διαταραχή, να ταξιδεύει από το ένα άκρο του ελατηρίου στο άλλο. Κάθε σφαιρίδιο του ελατηρίου βρισκόταν αρχικά σε ισορροπία. Όταν φθάσει σ' αυτό ο παλμός, τότε μετατοπίζεται από τη θέση όπου ισορροπούσε. Η διαταραχή δεν είναι παρά η μετατόπιση των σφαιριδίων του ελατηρίου από τη θέση ισορροπίας τους. Μεταξύ των γειτονικών σπειρών του ελατηρίου ασκούνται δυνάμεις. Οι δυνάμεις αυτές επαναφέρουν κάθε σφαιρίδιο στην αρχική θέση ισορροπίας του. Ταυτόχρονα μέσω του έργου που παράγουν μεταφέρουν ενέργεια από σφαιρίδιο σε σφαιρίδιο. Έτσι κάθε σφαιρίδιο θα μετατοπιστεί με τη σειρά του από τη θέση ισορροπίας του.>>⁵

Συμπέρασμα: Ο παλμός που ταξιδεύει, μεταφέρει ενέργεια. Τα σφαιρίδια μετατοπίζονται και όταν η ενέργεια που προσέλαβαν μεταφερθεί στα επόμενα επιστρέφουν στην αρχική θέση ισορροπίας τους. Έτσι αυτή η κίνηση διαδίδεται τελικά σε όλα τα σφαιρίδια του ελατηρίου. Το κύμα μεταφέρει ενέργεια σε κάθε σφαιρίδιο του ελατηρίου χωρίς να μεταφέρει ύλη. Η πηγή που ταλαντώνεται μπορεί να παράξει κύμα. Η ενέργεια που μεταφέρει ένα κύμα προέρχεται από την πηγή. Μια βασική αρχή για τα θαλάσσια κύματα είναι η εξής: **Η ενέργεια σε ένα θαλάσσιο κύμα διατηρείται** και αυτός είναι ο λόγος που η μορφή του κύματος αλλάζει ανάλογα την περιοχή εμφάνισής του (βαθιά νερά – ρηχά νερά).



Εικόνα 8 : Κατανόηση του παραδείγματος μεταφοράς ενέργειας σε ένα μέσο.

Η ποσότητα της κινητικής ενέργειας που παράγεται από ένα μεσαίο κύμα είναι τεράστια. Μια τυπική ενεργειακή ισχύς φτάνει τα 50 με 70 κιλοβάτ ανά μέτρο πλάτους. Μια αύξηση της θερμοκρασίας στην περιοχή της ζώνης της κυματαγωγής (surf zone), δεν αυξάνει την τιμή της ισχύος , καθώς η οποιαδήποτε αύξηση της θερμοκρασίας μεταφέρετε προς τα βαθύτερα ύδατα.

⁵ Παράδειγμα όπως αναφέρεται στο βιβλίο φυσικής γ' Γυμνασίου ενότητα 5.2

1.7 Η επίδραση των ρευμάτων στα κύματα , η ύπαρξη πάγου στη θάλασσα και το βάθος της θάλασσας.

A. Ρεύματα

Ένα ρεύμα που ακολουθεί το κύμα προκαλεί αύξηση του μήκους του κύματος και μείωσης του ύψους. Όταν όμως εκείνο αντιτίθεται στην κίνηση του κύματος, προκαλεί τη μείωση του μήκους του οχήματος και αύξηση του ύψους του. Επίσης ένα ισχυρό ρεύμα που κινείται αντίθετα από την κατεύθυνση του κύματος μπορεί να προκαλέσει θραύση κυμάτων. Ανάλογα με την ταχύτητα του κύματος στο μέσο επίπεδο θεωρητικής ηρεμίας του νερού και της ταχύτητας του ρεύματος.

Όσον αφορά τον άνεμο και τα ωκεάνια ρεύματα, σχηματίζουν μία οξεία γωνία με την κατεύθυνση του κύματος με αποτέλεσμα να ασκούν μικρή επίδραση καθώς τα ωκεάνια ρεύματα έχουν μέτρια ένταση και κινούνται οριζόντια. Τέλος ισχυρά παλιρροϊκά ρεύματα που κινούνται σε κατεύθυνση κάθετη σε σχέση με αυτή της διεύθυνσης της διάδοσης συστήματος κυμάτων έχει παρατηρηθεί ότι μπορούν να καταστρέψουν εντελώς τα κύματα μέσα σε σύντομο χρονικό διάστημα.

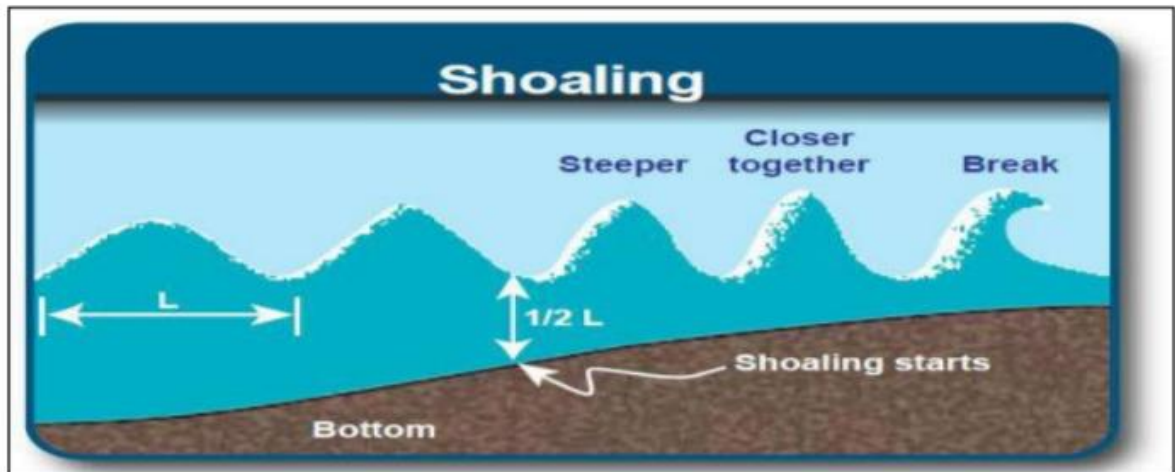
B. Πάγος :

Παρατηρούμε ότι όταν σχηματίζονται παγοκρύσταλλοι στο θαλάσσιο νερό, τότε αυξάνεται εσωτερική τριβή των μορίων του νερού. Αυτή είναι και η αιτία που προκαλείται εξομάλυνση της επιφάνειας της θάλασσας. Πλοία που δραστηριοποιούνται σε πολικές περιοχές όπου η ύπαρξη πάγου είναι πολύ έντονη καλύπτει δηλαδή μεγάλο μέρος της επιφάνειας της θάλασσας, ταξιδεύουν σε ήρεμες θάλασσες ακόμα και αν επικρατεί θύελλα, διότι τα καιρικά αυτά φαινόμενα επιδρούν στο εξωτερικό κυρίως της επιφάνειας του πάγου. Τέλος το χαλάζι επιδρά αποτελεσματικά στην εξομάλυνση της επιφάνειας της θάλασσας, ακόμα και αν επικρατεί σφοδρή θύελλα.

C. Βάθος της Θάλασσας:

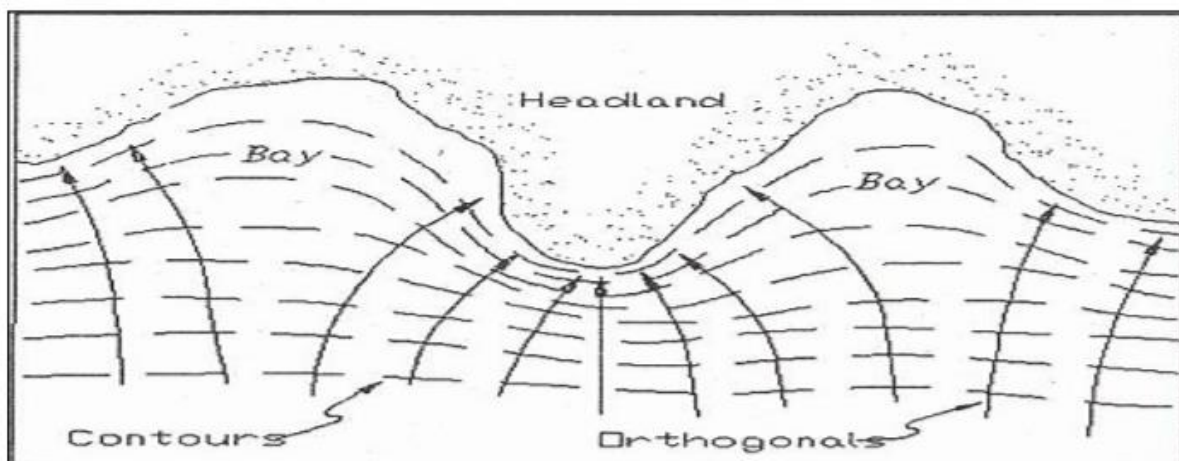
Εκβάθυνση Το βάθος της θάλασσας παίζει σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη και στη μορφή ενός θαλάσσιου κύματος. Όλα ξεκινούν από το σημείο όπου το κύμα θα έρθει σε επαφή με το βυθό της θάλασσας, δηλαδή τα ανεξάρτητα μόρια νερού θα περιοριστούν από τον πυθμένα, προκαλώντας τη μείωση της ταχύτητας του κύματος. Αυτό συμβαίνει, διότι στα βαθιά νερά η ταχύτητα του κύματος εξαρτάται από την περίοδο ενώ στα αβαθή, εξαρτάται από το βάθος της θάλασσας. Όταν η ταχύτητα του κύματος ελαττώνεται, η περίοδος παραμένει ίδια, αλλά το

μήκος κύματος γίνεται μικρότερο. Όλο αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των υψών των θαλάσσιων κυμάτων, καθώς οι ενέργεια σε ένα κύμα παραμένει σταθερή. Έχει αποδειχτεί ότι το ύψος κύματος αρχικά μειώνεται (ενδιάμεσα νερά) και στη συνέχεια αρχίζει να αυξάνεται (ρηγά νερά) μέχρι μία οριακή τιμή οπότε και θραύεται. Οι κορυφές του κύματος γίνονται πιο απότομες, η καμπυλότητα αυξάνει και οι διατομές γίνονται ασύμμετρες όπως φαίνεται στο Σχήμα.



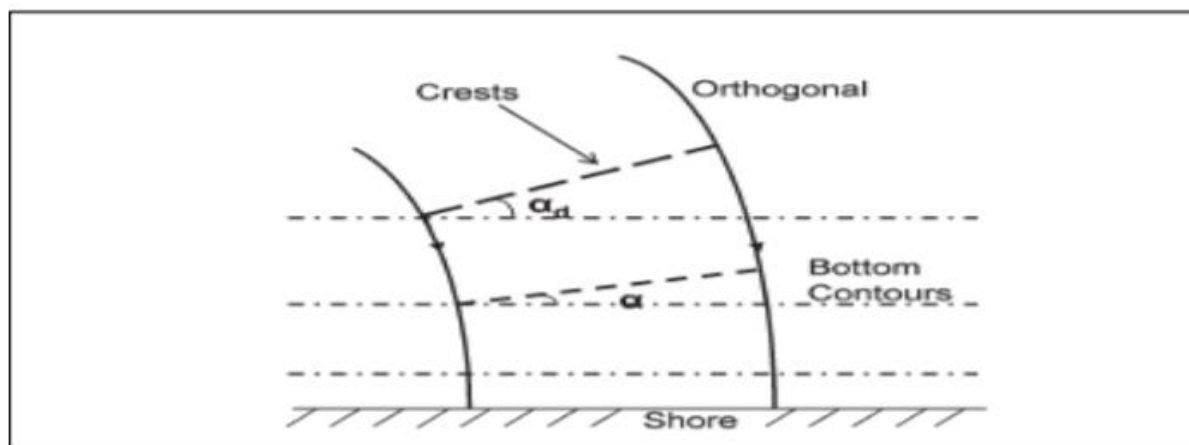
Εικόνα 9 : Ρήγωση κυματισμού

Διάθλαση Διάθλαση (refraction) είναι το φαινόμενο κατά το οποίο σημειώνεται αλλαγή στη διεύθυνση μετάδοσης του κύματος και παρατηρείται σε περιοχές όπου το σχετικό βάθος φτάνει σε τιμές μικρότερες του 0.50. Όπως το κύμα πλησιάζει την ακτή, η ταχύτητα μετάδοσης (ή φάσης) του που είναι συνάρτηση του βάθους ελαττώνεται λόγω τριβής με τον πυθμένα και λόγω της περιόδου, η οποία είναι σταθερή, το μήκος κύματος μειώνεται. Τα διάφορα σημεία στο μέτωπο του κύματος που κινούνται με διαφορετική ταχύτητα, με την κορυφή του κύματος να τείνει να κινηθεί ταχύτερα προς την ακτή. Οι διαφορετικές ταχύτητες που υπάρχουν κατά μήκος του μετώπου έχουν ως συνέπεια το μέτωπο του κύματος να καμπυλώνεται και να πλησιάζει στο να γίνει παράλληλο προς τις ισοβαθείς ταχύτητες. Στο σχήμα διακρίνεται η διάθλαση των κυμάτων σε τυχαία τοπογραφία πυθμένα. Αρχικά η διεύθυνση μετάδοσης του κύματος στα βαθιά είναι ευθύγραμμη. Η επίδραση του πυθμένα γίνεται αισθητή στα ρηχότερα νερά και έτσι το κύμα αλλάζει διεύθυνση μετάδοσης ακολουθώντας τη βαθυμετρία της θαλάσσιας περιοχής. Οι ορθογωνικές (orthogonals) ταχύτητες του κύματος κινούνται κάθετα προς τις ισοβαθείς (contours) και τείνουν να καμπυλωθούν καθώς πλησιάζουν προς την ακτή.



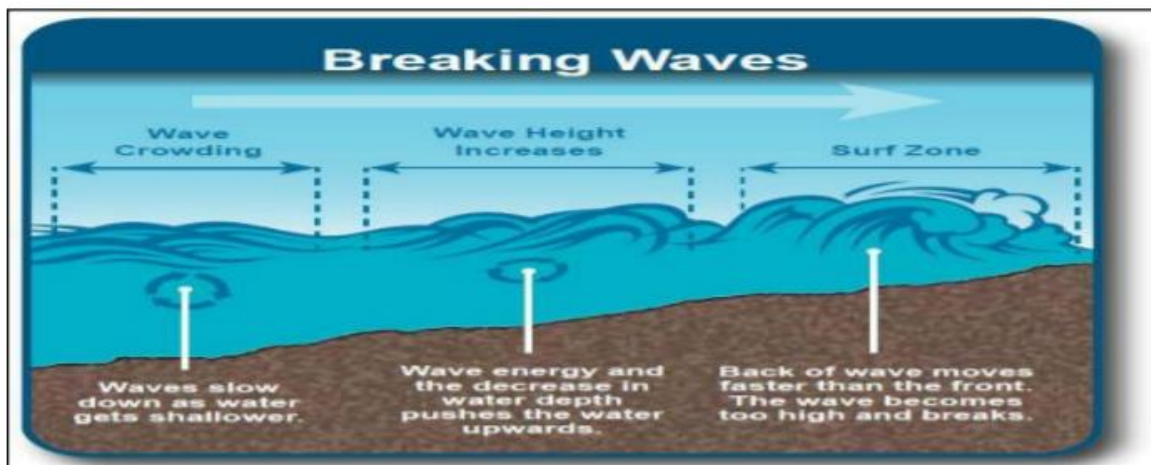
Εικόνα 10 : Διάθλαση κυμάτων

Κατά την διάρκεια της διάθλασης όλη η ενέργεια μεταδίδεται κατά μήκος των ορθογωνικών και δεν υπάρχουν απώλειες ενέργειας.



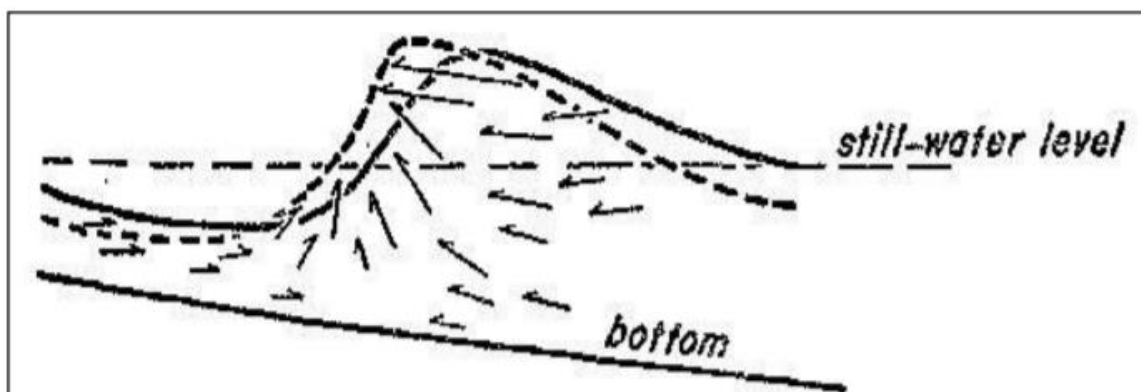
Εικόνα 11 : Σκίτσο διάθλασης κυματισμού

Θραύση Μετά τη ρήγωση και τη διάθλαση του κυματισμού, η διατομή του κύματος αρχίζει να εμφανίζει σημεία αστάθειας, καθώς οι αυξανόμενες παραμορφώσεις προσεγγίζουν ορισμένες οριακές τιμές. Η αύξηση του ύψους κύματος και η αστάθεια της διατομής οδηγεί σε θραύση (breaking), και η ζώνη όπου συμβαίνει η θραύση ονομάζεται ζώνη θραύσης (surf zone). Η θραύση είναι ένας σύνθετος φυσικός μηχανισμός, που εκφράζει τη μεταβολή της κυματικής ροής στη ζώνη πριν τη θραύση σε μία εναλλασσόμενη πλημμυρική ροή διαδοχικά προς την ακτή και τα ανοιχτά . Μέρος της κινητικής ενέργειας του φάσματος μετατρέπεται σε ενέργεια τύρβης (turbulence) και συνοδεύεται από εμφάνιση αφρού στην επιφάνεια της θάλασσας, ενώ ταυτόχρονα η επιφάνεια της θάλασσας χάνει την κυματοειδή μορφή της.



Εικόνα 12 : Θραύση κυματισμού

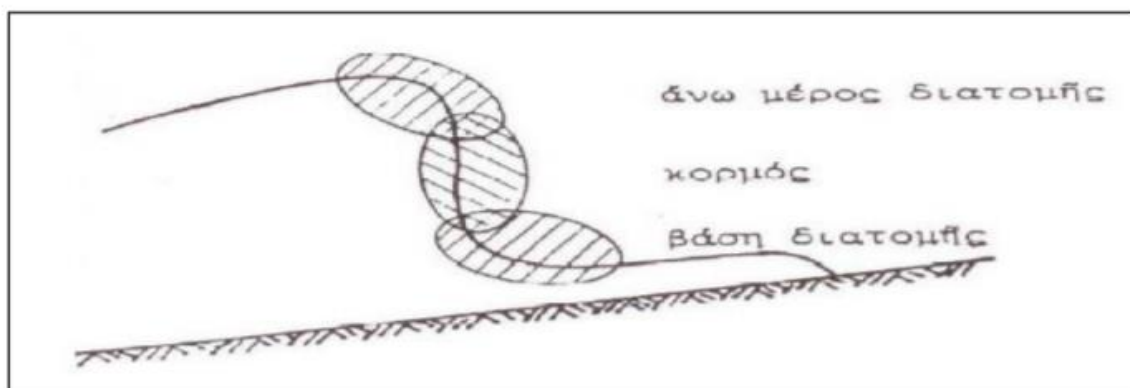
Μετά τη θραύση, το υδάτινο σώμα κινείται προς την ακτή λόγω της ορμής που αποκτά από το θραυσμένο κύμα. Υπό την επίδραση της βαρύτητας και της τριβής στον πυθμένα, η κίνηση του νερού είναι επιβραδυνόμενη. Όταν μηδενιστούν οι ταχύτητες ανόδου των υγρών μορίων και η κινητική τους ενέργεια μετατραπεί σε δυναμική, τότε μηδενίζεται η φάση ανόδου και το υδάτινο σώμα κινείται πάλι προς τα ανοιχτά λόγω της βαρύτητας. Στη φάση καθόδου η κίνηση είναι επιταχυνόμενη ως τη χρονική στιγμή της επόμενης θραύσης. Μέχρι και σήμερα, η αιτία εμφάνισης της θραύσης δεν είναι απόλυτα κατανοητή. Πολλοί ερευνητές συγκλίνουν στην άποψη ότι η θραύση εκδηλώνεται λόγω ιδιόμορφης κατανομής των ταχυτήτων των υγρών σωματιδίων στην κορυφή και την κοιλία του κύματος .



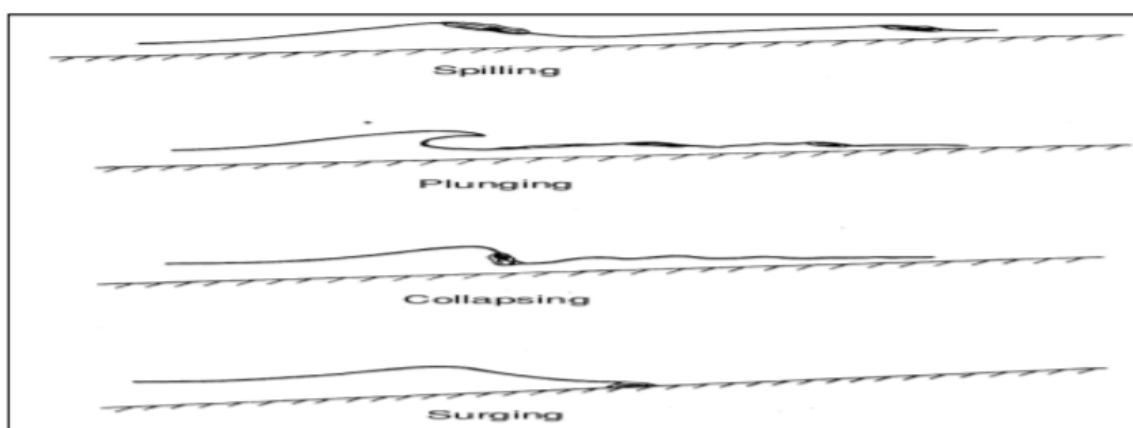
Εικόνα 13 : Κατανομή ταχυτήτων στο θραυόμενο κύμα

Πιστεύεται ότι η ροή στη ζώνη μετά τη θραύση επηρεάζει σημαντικά την ροή στη ζώνη θραύσης, όπως επίσης τον τύπο θραύσης και τα χαρακτηριστικά του κύματος στη θραύση. Η θραύση εκδηλώνεται στο μπροστινό τμήμα της διατομής, είτε στο πάνω μέρος ή στον κορμό

ή στη βάση της. Σε ποιο μέρος της διατομής θα συμβεί η θραύση εξαρτάται από την κλίση του πυθμένα, το βάθος του νερού, το αρχικό ύψος και μήκος του κύματος.



Εικόνα 14 : Περιοχή εκδήλωσης της θραύσης



Εικόνα 15 : Βασικοί τύποι θραύσης

Οι βασικότεροι τύποι θραύσης των κυμάτων είναι η θραύση κύλισης, η θραύση εκτίναξης, η θραύση κατάρρευσης και η θραύση εφόρμησης.

Θραύση κύλισης (spilling) : εμφανίζεται αστάθεια στο πάνω μέρος της διατομής και η κορυφή αρχίζει να κυλά στο μπροστινό μέτωπο ενώ ταυτόχρονα εμφανίζεται αφρός στην επιφάνεια του νερού. Εκδηλώνεται σε κύματα μεγάλης αρχικής καμπυλότητας σε ελαφρά κεκλιμένο πυθμένα και ολοκληρώνεται σε μια σχετικά επιμήκη ζώνη.

Θραύση εκτίναξης (plunging) : υπό την επίδραση μιας οριζόντιας ταχύτητας και της βαρύτητας, η κορυφή του κύματος κινείται προς την ακτή ταχύτερα από τον κορμό του

κύματος. Εκδηλώνεται σε κύματα μέτριας αρχικής καμπυλότητας σε κεκλιμένο πυθμένα και ολοκληρώνεται σε μια σχετικά μικρού μήκους ζώνη θραύσης.

Θραύση κατάρρευσης (collapsing) : εμφανίζεται στη βάση της διατομής. Το μπροστινό μέτωπο της διατομής τείνει να γίνει κατακόρυφο στη βάση και να καταρρεύσει.

Θραύση εφόρμησης (surging) : εμφανίζεται στη βάση της διατομής και εκδηλώνεται σε πολύ κεκλιμένο πυθμένα. Το σύνολο του κύματος συνεχίζει τη μετάδοσή του προς την ακτή και μετά τη θραύση.

1.8 Τύποι θαλασσίων κυμάτων

Στο θαλάσσιο περιβάλλον εξελίσσεται ταυτόχρονα ένα πλήθος κυματικών φαινομένων, αρκετά από τα οποία βρίσκονται σε ουσιώδη σύζευξη μεταξύ τους.

Το γεγονός αυτό γίνεται καλύτερα κατανοητό αν λάβουμε υπ' όψη μας ότι:

1. Το θαλασσινό νερό είναι ένα ελαφρά συμπιεστό, ανομοιογενές και αγώγιμο υγρό, το οποίο εδράζεται πάνω σ' ένα πολυστρωματικό, παραμορφωμένο και στερεό πυθμένα, και παρατάσσεται σε μία ελεύθερη επιφάνεια, δια της οποίας δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία και την επίδραση του υπερκείμενου πεδίου του ανέμου, και
2. Η μάζα του θαλάσσιου νερού βρίσκεται πάνω σε μία ελαφρά μαγνητισμένη, περιστρεφόμενη, περίπου σφαιρική μάζα (Γη), η οποία αλληλοεπιδρά μέσω δυνάμεων βαρύτητας με άλλα ουράνια σώματα (κυρίως με τη Σελήνη και τον Ήλιο).

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω φαινομενολογικά κριτήρια, μπορούμε να χωρίσουμε τα θαλάσσια κύματα στις εξής κατηγορίες (συμβολή και τα στάσιμα κύματα θα αναλυθούν σε άλλο κεφάλαιο) :

1. Ανεμογενείς Οι ανεμογενείς κυματισμοί παρατηρούνται σε συγκεκριμένη περιοχή και η μορφή των κυματισμών είναι έντονα διαταραγμένη – ανακατεμένη και μεταδίδονται προς διάφορες κατευθύνσεις (ειδικότερα αν υπάρχει μια κύρια κατεύθυνση, αυτή θα μεταβάλετε ανάλογα με τον χρόνο και τον τόπο). Σε αυτόν τον τύπο κύματος η ύπαρξη αφρού στην κορυφή του είναι δεδομένη, καθώς ο λόγος ύψους προς μήκος κύματος είναι μεγάλος. Ακόμη, η ροή στο νερό, κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια, είναι ισχυρά στροβιλοειδής λόγω της επίδρασης των διατμητικών τάσεων του τυρβώδους πεδίου του υπερκείμενου ανέμου.



Εικόνα 16 : Ανεμογενείς κυματισμός

Οι ανεμογενείς κυματισμοί ανάλογα με την περιοχή εμφάνισής τους , διακρίνονται σε :

- Κυματισμούς ανέμου (wind waves), με περιόδους $T = 0,5 \text{ sec}$ έως $T = 15 \text{ sec}$
- Αποθαλασσίες (swell) με περιόδους από $T = 10 \text{ sec}$ έως $T = 30 \text{ sec}$

Όσον αφορά το στάδιο ανάπτυξης των ανεμογενών κυματισμών υπάρχει μια διάκριση σε αναπτυσσόμενους (developing seas/waves), πλήρως ανεπτυγμένους (fully developed or fully arisen seas) και τέλος η διάκρισή τους σε αποσβενύμενους (decaying seas). Οι αποσβενυμένοι ανεμογενείς κυματισμοί είναι οι αποθαλασσίες , δηλαδή οι κυματισμοί οι οποίοι έχουν απομακρυνθεί από τον τόπο δημιουργίας τους.

Διακρίνουμε λοιπόν τρεις φάσεις για την δημιουργία των ανεμογενών κυματισμών:

- A. Η φάση της γένεσης και ανάπτυξης (generation of winds waves): Στη διάρκεια αυτής της φάσης, μέσω των διατμηματικών και των ορθών τάσεων που εξασκεί το τυρβώδες πεδίο του ανέμου πάνω στην επιφάνεια του νερού, μεταφέροντας ορμή και ενέργεια από τον άνεμο στο νερό. Σε αυτό το σημείο είναι αξιοσημείωτη η αναφορά κάποιων ερευνών γύρω από την γένεση των ανεμογενών κυματισμών όπως αυτή των Phillips και Miles (1957). Ο πρώτος μελέτησε την επίδραση των ορθών τάσεων του πεδίου του ανέμου στο νερό και διατύπωσε το μμοντέλο του συντονισμού (resonance model, Phillips 1957, 1958), και ο δεύτερος μελέτησε την

επίδραση των διατμηματικών τάσεων του πεδίου του ανέμου στο νερό (μοντέλο της διατμηματικής ροής, (shear-flow model) Miles 1957, 1959, 1962)

- B. Η φάση της πλήρους ανάπτυξης (saturation range): Η φάση αυτή συναντάται πιο σπάνια στο φυσικό περιβάλλον, καθώς υπάρχει μια ενεργειακή ισορροπία μεταξύ του πεδίου του ανέμου και το κυματικό πεδίο η οποία αυτή ισορροπία, έχει ως αποτέλεσμα την μη περεταίρω αύξηση της ειδικής ενέργειας του κυματικού πεδίου.
- C. Φάση απόσβεσης : Είναι η φάση κατά την οποία οι κυματισμοί απομακρύνονται από την περιοχή δημιουργίας τους και τα ανεμογενή κύματα μετατρέπονται σε κύματα αποθαλασσίας. Στα βαθιά νερά διαδίδονται κατά μήκος των μμέγιστων κύκλων της υδρόγειου σφαίρας, και μπορεί να διασχίσουν τεράστιες αποστάσεις πριν υποστούν σημαντική απόσβεση. Μεγάλο ρόλο για τη διαμόρφωση στην απόσβεση των αποθαλασσών, παίζει το φαινόμενο της διασποράς, που οφείλονται στην επίδραση της της ελεύθερης επιφάνειας, η βαθμιαία κατανάλωση της ενέργειας από τις συνεκτικές τάσεις (viscous dissipation), και, ειδικά στις ρηχές θάλασσες, η απόσβεση λόγω της επίδρασης του πυθμένα και η γεωμετρική διασπορά της ενέργειας λόγω της δισδιάστατης διάδοσης (geometric spreading).

2. Παλίρροιες

Παλίρροιες είναι η άνοδος και η πτώση της στάθμης της θάλασσας που προκαλείται από τη βαρυτική έλξη ουρανίων σωμάτων όπως τη Σελήνη και τον Ήλιο και από την φυγόκεντρη δύναμη της γης. Παρατηρούμε λοιπόν έντονα αυτό το φαινόμενο σε ορισμένες περιοχές (το φαινόμενο αυτό δεν είναι αισθητό πολλές φορές στη μεσόγειο, καθώς οι μεταβολές στο ύψος της παλίρροιας δε είναι μεγάλες) όπως στις βόρειες ακτές της Γαλλίας, στο λιμάνι της Χάβρης (LAT: 49° 29' N, LONG: 000° 07' E), όπου υπάρχει μια μέση ημερήσια μεταβολή κατά την διάρκεια της πλημμυρίδας που είναι περίπου 3,5 μ. κατά τον μήνα Ιανουάριο.

Ο Ήλιος και η Σελήνη προκαλούν παλιρροϊκές δυνάμεις που είναι περίπου αντιστρόφως ανάλογες από τον κύβο της απόστασης τους από την Γη. Παίζει σημαντικό ρόλο λοιπόν η απόσταση των δύο αυτών σωμάτων από την Γη και αυτή η απόσταση αυξομειώνεται ανάλογα με την χρονική περίοδο και τον τόπο ως ακολούθως:

Παλίρροιες περιγείου (perigean tides): Παρατηρείται σχετικά μεγάλο εύρος καθώς η Σελήνη περνά το κοντινότερο προς την Γη σημείο της τροχιάς του.

Παλίρροιες απογείου (apogee tides): Σε αυτή τη φάση η Σελήνη περνά από το πιο απομακρυσμένο από την Γη σημείο της τροχιάς της και παρατηρούμε σχετικά μικρό εύρος

Ανάλογη είναι και η επίδραση του Ηλίου όπου κατά τον μήνα Ιανουάριο βρίσκεται στην μικρότερη απόσταση από την Γη (**περιήλιο- perihelion**) και κατά τον μήνα Ιούλιο ,όπου βρίσκεται στην μεγαλύτερη απόσταση από την Γη (**αφήλιο-aphelion**).

Ένα φαινόμενο που απασχολεί τους ναυτιλομένους , είναι το φαινόμενο της κυματανάπλασης (sheiche). Αυτού του είδους οι κυματισμοί είναι αποτέλεσμα των απότομων καιρικών φαινομένων και μπορούν να προκαλέσουν ταλαντώσεις στην επιφάνεια του νερού και επηρεάζουν σημαντικά την παλίρροια στη περιοχή όπου εκδηλώνονται (ένα σημαντικό παράδειγμα αυτού του φαινομένου παρατηρείται στο Nagasaki , όπου η κυματαγωγή έχει περίοδο περί τα 35΄ και εύρος μέχρι τα 0.6μ. Ακόμα αξίζει να αναφερθεί και η επίδραση που έχει ο άνεμος στο φαινόμενο της παλίρροιας καθώς κατά την διάρκεια πνοής σφοδρών ανέμων προς την ξηρά , μάζες νερού κατευθύνονται προς αυτή με αποτέλεσμα την περεταίρω αύξηση της στάθμης του νερού (**positive surge**) , ενώ στην αντίθετη περίπτωση η στάθμη της θάλασσας θα είναι μικρότερη από την αναμενόμενη (**negative surge**).



Εικόνα 17 : Mont Saint-Michel στις ακτές της Νορμανδίας

Χιλιάδες τουρίστες συγκεντρώθηκαν στο ιστορικό Mont Saint-Michel στις ακτές της Νορμανδίας, μία νησίδα που επικοινωνεί με τη στεριά , για να παρακολουθήσουν την "παλίρροια του αιώνα" . Οι εικόνες από το σημείο αλλά και άλλες περιοχές είναι εντυπωσιακές και σπάνιες, καθώς η επόμενη super tide αναμένεται στις **3 Μαρτίου του 2033.**(<https://www.digitallife.gr/tide-of-the-century-28141>)

3. Τσουνάμι

Τσουνάμι Με την έννοια του τσουνάμι μπορεί να νοηθεί ένα θαλάσσιο φαινόμενο, το οποίο δημιουργείται κατόπιν της μετατοπίσεως μεγάλων ποσοτήτων νερού σε κάποιο υδάτινο σχηματισμό, όπως είναι ο ωκεανός, ή η θάλασσα, ή μια λίμνη και αυτές οι μετατοπίσεις προκαλούνται από τους κάτωθι παράγοντες :

- Έκρηξη ηφαιστείου σε βάθος ενός ωκεανού.
- Από μεγάλης έντασης υποθαλάσσιου σεισμού.
- Πιο σπάνια από τη πτώση ενός μετεωρίτη στην επιφάνεια της θάλασσας.

Εναλλακτικά για την περιγραφή του φαινομένου χρησιμοποιείται ο όρος παλιρροιακό κύμα ή θαλάσσιο σεισμικό κύμα. Ο πρώτος όρος είναι λανθασμένος ,καθώς το παλιρροϊκό κύμα αναφέρεται στην μεταβολή της στάθμης της θάλασσας που οφείλετε στο φαινόμενο της παλίρροιας που περιγράψαμε παραπάνω. Ουσιαστικά, το φαινόμενο εκδηλώνεται υπό τη μορφή των κυμάτων, των οποίων η μέση ταχύτητα ξεπερνά τα 200 μέτρα ανά δευτερόλεπτο, τεράστια ταχύτητα, λαμβάνοντας υπόψη ότι ξεπερνά το μισό της ταχύτητας του ήχου στην ατμόσφαιρα της Γης. Επίσης, το μήκος κύματος κυμαίνεται μεταξύ 50-400 χιλιομέτρων, ενώ το ύψος αυτών, μπορεί να είναι μερικά εκατοστά, φθάνοντας όμως ακόμα και τα 40 μέτρα .

Ωστόσο, στην περιοχή που βρίσκεται κοντά στην ακτή, η ταχύτητα του κύματος περιορίζεται και κυμαίνεται σε 50-80km/h, με αποτέλεσμα μεγάλο μέρος της ενέργειας να μεταφέρεται στο ύψος τους κύματος, καθώς επίσης και στα ισχυρά ρεύματα ύδατος τα οποία και δημιουργούνται. Τα πιο ισχυρά τσουνάμι συμβαίνουν στην περιοχή του Ειρηνικού Ωκεανού, ενώ άλλες περιοχές όπου έχουν εμφανιστεί τσουνάμι είναι ο Ινδικός Ωκεανός, η Μεσόγειος Θάλασσα, η περιοχή που βρίσκεται στον Βόρειο Ανατολικό Ατλαντικό Ωκεανό, καθώς επίσης και η περιοχή της Καραβαϊκής θάλασσας .Στις περιοχές που βρίσκονται κοντά στις ακτές, τα ισχυρά τσουνάμι δημιουργούν επιπτώσεις στις ανθρώπινες κοινότητες, όπως επίσης και σημαντικές μεταβολές στο φυσικό περιβάλλον. Όσον αφορά το ανθρωπογενές περιβάλλον, το

τσουνάμι προκαλεί καταστροφές στην υποδομή που υπάρχει στην παράκτια ζώνη, στα κτίρια που βρίσκονται στην ίδια περιοχή, στις καλλιέργειες, καθώς επίσης και στα σκάφη, τα οποία πολλές φορές καταστρέφονται ολοσχερώς. Επίσης, είναι πιθανό εφόσον δεν υπάρξει η κατάλληλη προειδοποίηση να συνοδεύονται από θύματα, όπως για παράδειγμα ήταν το τσουνάμι στην Ιαπωνία το 2011, όπου υπήρξαν 15.000 νεκροί περίπου, 5.000 τραυματίες, αλλά και 8.000 περίπου αγνοούμενοι. Επίσης, όσον αφορά το φυσικό περιβάλλον, το τσουνάμι προκαλεί διάβρωση των εδαφών, καθώς επίσης και βλάβες στην χλωρίδα και την πανίδα της παράκτιας περιοχής .

Ιδιαίτερα σημαντικό για την προστασία από το τσουνάμι είναι η πρόβλεψη, ωστόσο προκειμένου να γίνει αυτή ασφαλώς, θα πρέπει να υπάρχουν οι σχετικοί μη επανδρωμένοι σταθμοί παρακολούθησης, οι οποίοι θα βρίσκονται μακριά από την ξηρά. Πέρα από τις προειδοποιήσεις για να υπάρξει αποτελεσματική προστασία, θα πρέπει να υπάρχει σχετική ενημέρωση του πληθυσμού, τόσο για το ίδιο το φαινόμενο, όσο και για το πως θα πρέπει να συμπεριφερθεί σε ανάλογες καταστάσεις, καθώς και τι θα πρέπει να προσέξει. Επίσης, στις περιοχές όπου υπάρχει αυξημένος κίνδυνος εμφάνισης τσουνάμι, θα πρέπει να γίνονται μικροζωνικές μελέτες, προκειμένου να αποτυπώνεται με σαφήνεια ο ακριβής προσδιορισμός της γεωγραφικής διανομής του κινδύνου στην παράκτια ζώνη. Περαιτέρω, θα πρέπει να υπάρχει η κατάλληλη συνεργασία μεταξύ των κεντρικών υπηρεσιών των κρατών και της Τοπικής Αυτοδιοίκησης, όπως επίσης και συνεργασία των κρατών που έρχονται αντιμέτωπα με το ίδιο ζήτημα. Θα πρέπει οι αρμόδιοι φορείς να είναι σε θέση να δράσουν άμεσα και να προστατέψουν αρχικά τις ανθρώπινες ζωές και όπου είναι εφικτό να προστατέψουν και το φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον. Επίσης, θα πρέπει να υπάρχουν τα κατάλληλα σχέδια έκτακτης ανάγκης, τα οποία θα περιγράφουν αναλυτικά τις δράσεις και τον αναγκαίο συντονισμό των επιμέρους φορέων .



Εικόνα 18 : Φωτογραφία από το καταστροφικό τσουνάμι της Ιαπωνίας.

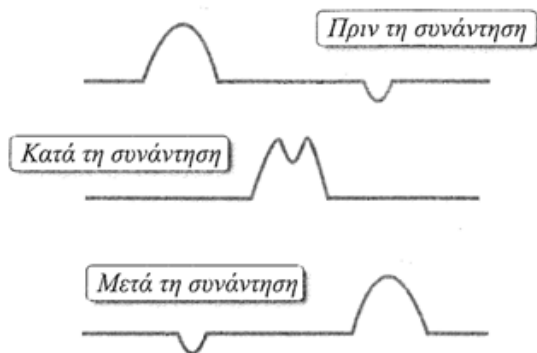
4. Παραγόμενα λόγω πίεσης

Αυτός ο τύπος κύματος είναι λιγότερο σημαντικός , αναπτύσσεται ως πίεση αέρα στα μόρια του νερού που κινούνται πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Το ύψος της επιφάνειας της θάλασσας αυξάνεται ή μειώνεται ελαφρώς, ως τις αλλαγές της ατμοσφαιρικής πίεσης.

Μέσα σε μία καταιγίδα η χαμηλή πίεση του αέρα μπορεί να ανασηκώσει την επιφάνεια των ωκεανών έως και 0,5 μ.

Κεφάλαιο 2 : Συμβολή κυμάτων

« Όταν δύο ή περισσότερα κύματα διαδίδονται ταυτόχρονα στο ίδιο ελαστικό μέσο λέμε ότι συμβάλουν»⁶. Κατά την κίνηση των σωματιδίων του μέσου κάθε κύμα ακολουθεί την αρχή της επαλληλίας η οποία και θα αναλυθεί παρακάτω. Όταν δύο ή περισσότερα κύματα συμβάλουν, η αρχή της επαλληλίας παραβιάζεται με την προϋπόθεση τα κύματα να είναι τόσο ισχυρά, ώστε να υπερνικήσουν και να μεταβάλουν τις ιδιότητες του μέσου στο οποίο διαδίδονται. Στο παρακάτω σχήμα παρατηρούμε το αποτέλεσμα της ταυτόχρονης διάδοσης δύο κυμάτων με αντίθετες κατευθύνσεις σε ένα σχοινί, στο επίπεδο. Κατά την συνάντηση των δύο παλμών, η απομάκρυνση που έχουν τα μόρια του νερού είναι ίση με το αλγεβρικό άθροισμα των απομακρύνσεων στην περίπτωση όπου οι δύο παλμοί διαδίδονταν ξεχωριστά.



Εικόνα 19 : Το αποτέλεσμα της συμβολής ενός κύματος

Οι πηγές που δώσαμε ως παράδειγμα μπορούν να είναι σύμφωνες πηγές, είτε σύγχρονες πηγές, όταν η διαφορά φάσης των ταλαντώσεων είναι σταθερή :

$$\Delta\phi = \text{σταθ.}$$

Βασική προϋπόθεση δύο ταλαντώσεις για να έχουν σταθερή διαφορά φάσης, είναι να έχουν την ίδια συχνότητα.

Παράδειγμα:

Αν θεωρήσουμε ότι δυο πηγές κυμάτων με εξισώσεις :

$$y_1 = A\eta\mu(\omega_1 t), y_2 = A\eta\mu(\omega_2 t + \theta)$$

Η διαφορά φάσης των ταλαντώσεων θα είναι :

⁶ Ορισμός από τις σημειώσεις σελ. 55 του Μιχαήλ Ε. Καραδημητρίου, καθηγητού φυσικής

$$\Delta\varphi = (\omega_2 t + \theta) - \omega_1 t = (\omega_2 - \omega_1)t + \theta$$

Έτσι λοιπόν, όταν οι ταλαντώσεις δύο πηγών έχουν σταθερή διαφορά φάσης, τότε αυτές οι πηγές ονομάζονται **σύμφωνες πηγές**. ($f_2 = f_1$ μόνο όταν: $\omega_2 - \omega_1 = 0 \Rightarrow \omega_2 = \omega_1 \Rightarrow f_2 = f_1$)

Σύγχρονες πηγές ονομάζονται δύο σύμφωνες πηγές τω οποίων η σταθερή φάση ισούται με το μηδέν ($\Delta\varphi=0$). Οι σύγχρονες πηγές δημιουργούν ταυτόχρονα μέγιστα και ελάχιστα.

Φαινόμενα συμβολής μας δίνουν μόνο αρμονικά κύματα που προέρχονται από σύμφωνες ή σύγχρονες πηγές κυμάτων.

2.1 Αρχή της επαλληλίας – Υπέρθωση

Σύμφωνα με την αρχή της επαλληλίας:

«Όταν σε ένα ελαστικό μέσο διαδίδονται δυο ή περισσότερα κύματα η απομάκρυνση ενός σωματιδίου του μέσου από την θέση ισορροπίας του, είναι ίση με τη συνισταμένη των απομακρύνσεων που οφείλονται στα επιμέρους κύματα»⁷, δηλαδή:

$$y = y_1 + y_2 + \dots$$

Η αρχή της επαλληλίας μας λέει πως κάθε κύμα διαδίδεται ανεξάρτητα από τα άλλα και πως κάθε κύμα διαδίδεται σαν να μην υπάρχουν άλλα κύματα, διατηρώντας τα χαρακτηριστικά του αναλλοίωτα. Τέλος, τα υλικά σημεία του μέσου ταλαντώνονται εξαιτίας του κάθε κύματος, που έχει ανεξάρτητα χαρακτηριστικά από τα άλλα κύματα που διαδίδονται ταυτόχρονα.

2.2 Στάσιμα κύματα

Στο παραπάνω κεφάλαιο μελετήσαμε τη συμβολή δύο κυμάτων. Τί γίνεται όμως στην περίπτωση όπου τα δύο αυτά κύματα έχουν ίδιο πλάτος και ίδια συχνότητα, αλλά αντίθετη φορά διάδοσής τους σε ένα μέσο; Τα δύο αυτά κύματα όντως συμβάλουν, αλλά κάπως διαφορετικά. Έτσι λοιπόν:

« **Στάσιμο Κύμα** ονομάζεται το αποτέλεσμα της συμβολής δύο κυμάτων της ίδιας συχνότητας και του ίδιου πλάτους, που διαδίδονται στο ίδιο μέσο με την ίδια ταχύτητα και προς αντίθετες κατευθύνσεις»⁸.

⁷ Ορισμός από τη σελ. 48 του βιβλίου Φυσικής Γ Λυκείου ομάδα προσανατολισμού θετικών σπουδών.

⁸ Ορισμός από τη σελ. 52 του βιβλίου Φυσικής Γ Λυκείου ομάδα προσανατολισμού θετικών σπουδών.

Ένα αίτιο δημιουργίας ενός στάσιμου κύματος είναι η συμβολή ενός κύματος που ανακλά σε ένα σταθερό εμπόδιο και ενός άλλου κύματος.

Παράδειγμα :

«Κρατάμε την ελεύθερη άκρη ενός τεντωμένου σχοινιού , που η άλλη άκρη είναι στερεωμένη σε ακλόνητο σημείο και της δίνουμε μια ώθηση. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται ένας κυματικός παλμός ο οποίος διαδίδεται κατά μήκος του σχοινιού. Όταν η κυματική διαταραχή φτάσει στην άκρη του σχοινιού το σχοινί ασκεί μια δύναμη στο σημείο στήριξης. Η αντίδραση σε αυτή τη δύναμη δημιουργεί έναν ανακλώμενο παλμό που κινείται στην αντίθετη κατεύθυνση. Αν αναγκάσουμε το ελεύθερο άκρο του σχοινιού να κάνει μια αρμονική ταλάντωση το αρμονικό κύμα που δημιουργείται και το όμοιο του που προκύπτει από την ανάκλαση συμβάλουν δημιουργώντας στάσιμο κύμα. Αν φωτογραφίσουμε το σχοινί σε διάφορες χρονικές στιγμές, θα παρατηρήσουμε ότι υπάρχουν σημεία στο σχοινί - οι **δεσμοί** - που παραμένουν διαρκώς ακίνητα ενώ όλα τα άλλα εκτελούν ταλάντωση με την ίδια συχνότητα. Το πλάτος της ταλάντωσης δεν είναι ίδιο για όλα τα σημεία που ταλαντώνονται. Μέγιστο πλάτος έχουν τα σημεία που βρίσκονται στο μέσο της απόστασης μεταξύ δύο διαδοχικών δεσμών -οι **κοιλίες**.

Η ονομασία (στάσιμο = ακίνητο) οφείλεται στο γεγονός ότι εδώ δεν έχουμε να κάνουμε με ένα κύμα, δηλαδή με μια παραμόρφωση που διαδίδεται. Στο κύμα όλα τα σημεία εκτελούν διαδοχικά την ίδια κίνηση ενώ στο στάσιμο δε συμβαίνει το ίδιο»⁹.

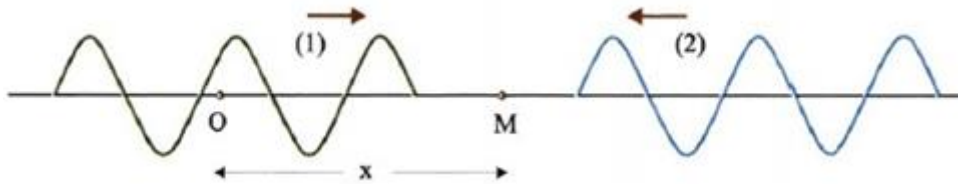
Η εξίσωση του στάσιμου κύματος

Έστω το αρμονικό κύμα με εξίσωση

$$y_1 = A\eta\mu 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \quad (1)$$

που διαδίδεται κατά τη θετική φορά του άξονα x (στο σχήμα, το κύμα 1).

⁹ Παράδειγμα στη σελίδα 52 του βιβλίου Φυσικής Γ' Λυκείου ομάδα προσανατολισμού θετικών σπουδών.



Ένα δεύτερο κύμα με ίδιο πλάτος και ίδια συχνότητα, που διαδίδεται κατά την αντίθετη κατεύθυνση (στο σχήμα, το κύμα 2), θα περιγράφεται από την εξίσωση

$$y_2 = A\eta\mu 2\pi \left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda} \right) \quad (2)$$

Σύμφωνα με την αρχή της επαλληλίας, η απομάκρυνση ενός σημείου M του μέσου τη χρονική στιγμή t, θα είναι

$$y = y_1 + y_2$$

η οποία γίνεται από τις (1) και (2)

$$y = A \left[\eta\mu 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) + \eta\mu 2\pi \left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda} \right) \right] \quad (3)$$

Κάνοντας χρήση της τριγωνομετρικής ταυτότητας

$$\eta\mu\alpha + \eta\mu\beta = 2\sigma\upsilon\nu \left(\frac{\alpha - \beta}{2} \right) \eta\mu \left(\frac{\alpha + \beta}{2} \right) \quad \text{η σχέση (3) γίνεται}$$

$$y = 2A\sigma\upsilon\nu 2\pi \frac{x}{\lambda} \eta\mu \frac{2\pi}{T} t$$

(4)

$$A' = 2A\sigma\upsilon\nu 2\pi \frac{x}{\lambda} \quad (5)$$

Παρατηρούμε ότι ο όρος

εξαρτάται μόνο από τη θέση x του σημείου και παραμένει σταθερός με το χρόνο.

Η σχέση (4) παίρνει τη μορφή

$$y = A' \eta\mu \frac{2\pi}{T} t \quad \text{ή} \quad y = A' \eta\mu \omega t \quad (6)$$

που είναι η εξίσωση της απλής αρμονικής ταλάντωσης. Επομένως,

- **κάθε σημείο του μέσου εκτελεί απλή αρμονική ταλάντωση. Το πλάτος της ταλάντωσης $|A'|$ δεν είναι ίδιο για όλα τα σημεία αλλά εξαρτάται από τη θέση του [σχέση (5)].**

Τα σημεία τα οποία βρίσκονται σε θέση x τέτοια ώστε

$$A' = 2A \sigma\upsilon\nu 2\pi \frac{x}{\lambda} = 0$$

δηλαδή

$$2\pi \frac{x}{\lambda} = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \dots, (2K+1)\frac{\pi}{2}$$

ή

$$x = \frac{\lambda}{4}, \frac{3\lambda}{4}, \dots, (2K+1)\frac{\lambda}{4} \quad (7)$$

έχουν μηδενικό πλάτος ταλάντωσης, δηλαδή παραμένουν συνεχώς ακίνητα. Είναι οι **δεσμοί του στάσιμου κύματος**.

Τα σημεία τα οποία βρίσκονται σε θέση τέτοια ώστε

$$A' = 2A \sigma\upsilon\nu 2\pi \frac{x}{\lambda} = \pm 2A$$

δηλαδή

$$2\pi \frac{x}{\lambda} = 0, \pi, \dots, K\pi$$

ή

$$x = 0, \frac{\lambda}{2}, \frac{2\lambda}{2}, \dots, \frac{K\lambda}{2}. \quad (8)$$

έχουν μέγιστο πλάτος ταλάντωσης, ίσο με 2 A. Αποτελούν τις **κοιλίες του στάσιμου κύματος**.

Από τις (7) και (8) προκύπτει ότι

- η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών δεσμών, ή κοιλιών είναι ίση με το μισό του μήκους κύματος λ των κυμάτων από τη συμβολή των οποίων προήλθε το στάσιμο κύμα.

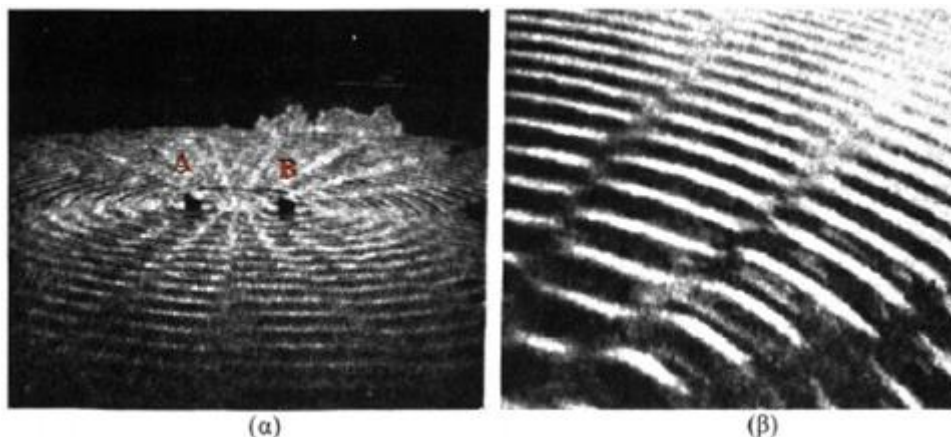
Στην παραπάνω μαθηματική μελέτη, η αρχή μέτρησης των αποστάσεων είναι κοιλία (για $x=0$, έχουμε κοιλία).

Στάσιμα κύματα μπορούν να δημιουργηθούν και σε ένα μέσο του οποίου τα δύο άκρα είναι ακίνητα, όπως σε μια χορδή ενός μουσικού οργάνου. Στην περίπτωση αυτή, αν θέλουμε ως αρχή μέτρησης των αποστάσεων να πάρουμε το ένα άκρο (όπου υπάρχει δεσμός), η σχέση (4) χρειάζεται τροποποίηση ώστε, για $x=0$ να δίνει δεσμό.

2.3 Συμβολή θαλασσιών κυμάτων.

Τα θαλάσσια κύματα όταν συμβάλουν και με τις κατάλληλες προϋποθέσεις, που θα αναλύσουμε παρακάτω, δημιουργούν ένα τρίτο κύμα διπλάσιο σχεδόν σε μέγεθος, που κάνει δυσκολότερη την διαβίωση του ναυτικού όταν τα συναντήσει και θέτουν σε άμεσο κίνδυνο την ασφάλεια του πλοίου και του φορτίου. Υπάρχουν τρία στον αριθμό είδη συμβολής: η **ενισχυτική (constructive interference)**, η **απόσβεση (destructive interference)**, και τέλος η **μικτή συμβολή (mixed interference)**. Η τρίτη περίπτωση είναι και αυτή που συναντάται συνήθως, καθώς οι αποθαλασσίες που έρχονται από διαφορετικές κατευθύνσεις συναντώνται και δημιουργούν συμβολή. Στην παρούσα φάση γεννάται το εξής ερώτημα, ποιος ο ρόλος των θαλασσιών ρευμάτων στη συμβολή; Για να απαντηθεί αυτό το ερώτημα πρέπει πρώτα να γίνει μια γενική αναφορά στα θαλάσσια ρεύματα και έπειτα μέσα από παραδείγματα, (βλέπε παράδειγμα στις νοτιοανατολικές ακτές της Αφρικής), θα κατανοήσουμε τον καταλυτικό ρόλο που παίζουν τα θαλάσσια ρεύματα στην συμβολή των θαλασσιών κυμάτων. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να γίνει μια περεταίρω ανάλυση του φαινομένου της συμβολής των θαλασσιών κυμάτων και να αποδοθούν μαθηματικοί τύποι και εξισώσεις, ώστε να κατανοήσουμε καλύτερα την συμβολή στην επιφάνεια ενός υγρού, χρησιμοποιώντας το παράδειγμα όπως αναφέρεται στο βιβλίο της φυσικής γ λυκείου θετικής κατεύθυνσης το οποίο λέει:

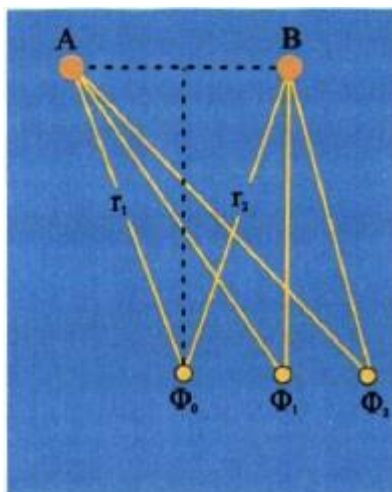
Στα σχήματα α και β της εικόνας 20 δείχνουν το αποτέλεσμα της συμβολής δύο όμοιων κυμάτων στην επιφάνεια νερού. Τα κύματα προκαλούνται στην επιφάνεια νερού από τις πηγές A και B.



Εικόνα 20 : Η συμβολή δύο κυμάτων στην επιφάνεια νερού

Βλέπουμε ότι υπάρχουν σημεία (τα οποία μάλιστα σχηματίζουν γραμμές) που παραμένουν ακίνητα, ενώ άλλα ταλαντώνονται πολύ έντονα.

Στο σχήμα 1 το σημείο Φ_0 είναι ένα σημείο στην επιφάνεια του νερού που απέχει εξίσου από τα σημεία A και B, ($r_1 = r_2$).

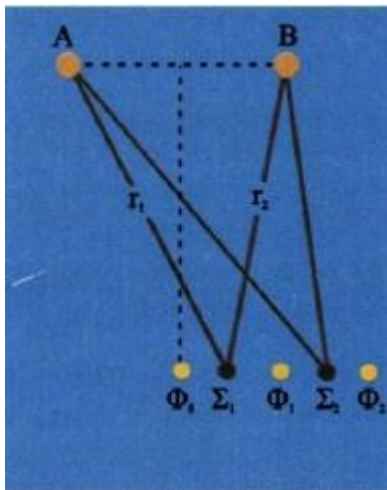


Σχ. 1 Στα σημεία $\Phi_0, \Phi_1, \Phi_2, \dots$ για τα οποία οι αποστάσεις από τις δύο πηγές διαφέρουν ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος έχουμε ενίσχυση.

Επειδή τα δύο κύματα ξεκινούν ταυτόχρονα από τις πηγές και η απόσταση που διανύουν μέχρι να φτάσουν στο Φ_0 είναι ίδια, όταν στο Φ_0 φτάνει "όρος" από τη μια πηγή, θα φτάνει "όρος" και από την άλλη. Σύμφωνα με την αρχή της επαλληλίας, στο Φ_0 θα δημιουργηθεί "όρος" με διπλάσιο ύψος. Μετά από χρόνο $T/2$ στο σημείο Φ_0 θα φτάσουν ταυτόχρονα δύο "κοιλιάδες", έτσι η κοιλιάδα που θα

δημιουργηθεί στο Φ_0 θα έχει διπλάσιο βάθος. Στην περίπτωση αυτή λέμε ότι τα δύο κύματα **συμβάλλουν ενισχυτικά**.

Ενισχυτική συμβολή έχουμε και σε άλλα σημεία. Για παράδειγμα και στο σημείο Φ_1 , στο οποίο $r_1 - r_2 = \lambda$. Όταν στο σημείο Φ_1 φτάνει "όρος" που προέρχεται από την πηγή B, ταυτόχρονα φτάνει "όρος" που προέρχεται από την πηγή A και δημιουργήθηκε μια περίοδο νωρίτερα. Το ίδιο συμβαίνει σε όλα εκείνα τα σημεία στα οποία η διαφορά των αποστάσεών τους από τις δύο πηγές είναι ακέραια πολλαπλάσια του μήκους κύματος.



Σχ. 2 Στα σημεία $\Sigma_1, \Sigma_2, \dots$ για τα οποία οι αποστάσεις από τις δύο πηγές διαφέρουν περιττό πολλαπλάσιο του μισού μήκους κύματος έχουμε απόσβεση.

Ας εξετάσουμε τώρα την περίπτωση ενός σημείου Σ_1 (σχ. 2), στο οποίο οι αποστάσεις r_1 και r_2 από τις πηγές A και B, διαφέρουν κατά $\lambda/2$. Όπως είπαμε τα "όρη" ξεκινούν ταυτόχρονα από τις δύο πηγές. Όταν στο σημείο Σ_1 φτάνει όρος προερχόμενο από την πηγή B, από την πηγή A θα φτάνει κοιλάδα, με αποτέλεσμα τα δύο κύματα να αλληλοαναιρούνται. Μετά από χρόνο $T/2$, στο σημείο Σ_1 , θα φτάσει "κοιλάδα" από το B και "όρος" από το A. Το άθροισμά τους θα είναι πάλι μηδέν. Το σημείο Σ_1 παραμένει διαρκώς ακίνητο. Το ίδιο συμβαίνει με όλα εκείνα τα σημεία, στην επιφάνεια του νερού, στα οποία η διαφορά των αποστάσεών τους από τις δύο πηγές είναι ίση με περιττό πολλαπλάσιο του $\lambda/2$.

Επομένως **Τα σημεία των οποίων οι αποστάσεις r_1 και r_2 , από τις δύο πηγές, διαφέρουν κατά ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος λ** (δηλαδή $r_1 - r_2 = N\lambda$ όπου $N=0, \pm 1, \pm 2, \dots$) ταλαντώνονται με μέγιστο πλάτος. Τότε έχουμε ενίσχυση.

Τα σημεία των οποίων οι αποστάσεις r_1 και r_2 , από τις δύο πηγές, διαφέρουν κατά περιττό πολλαπλάσιο του μισού μήκους κύματος ($\lambda/2$) (δηλαδή $r_1 - r_2 = (2N+1)\lambda/2$ όπου $N=0, \pm 1, \pm 2, \dots$) μένουν διαρκώς ακίνητα. Τότε έχουμε απόσβεση.

Όλα τα υπόλοιπα σημεία κάνουν ταλάντωση με ενδιάμεσο πλάτος

Τα συμπεράσματα αυτά μπορούν να γίνουν πιο πειστικά αν μελετήσουμε μαθηματικά το φαινόμενο. Έστω ότι ένα τυχαίο σημείο του μέσου στο οποίο διαδίδονται ταυτόχρονα κύματα που προέρχονται από τις πηγές A και B, απέχει από αυτές r_1 και r_2 αντίστοιχα. Μια τυχαία χρονική στιγμή t το σημείο αυτό έχει απομάκρυνση,

$$y_1 = A \eta \mu 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{r_1}{\lambda} \right) \quad \text{εξαιτίας του πρώτου κύματος και} \quad (1)$$

$$y_2 = A \eta \mu 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{r_2}{\lambda} \right) \quad \text{εξαιτίας του δευτέρου} \quad (2)$$

Σύμφωνα με την αρχή της επαλληλίας, η απομάκρυνση του σημείου αυτού από τη θέση ισορροπίας του τη χρονική στιγμή t θα είναι:

$$y = y_1 + y_2$$

η οποία βάσει των (1) και (2) γίνεται

$$y = A \left[\eta \mu 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{r_1}{\lambda} \right) + \eta \mu 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{r_2}{\lambda} \right) \right] \quad (3)$$

Κάνοντας χρήση της τριγωνομετρικής ταυτότητας

$$\eta \mu \alpha + \eta \mu \beta = 2 \sigma \upsilon \nu \left(\frac{\alpha - \beta}{2} \right) \eta \mu \left(\frac{\alpha + \beta}{2} \right)$$

η σχέση (3) γίνεται:

$$y = 2A \sigma\upsilon\nu 2\pi \frac{r_1 - r_2}{2\lambda} \eta\mu 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{r_1 + r_2}{2\lambda} \right)$$

Επομένως το αποτέλεσμα της συμβολής είναι ταλάντωση που έχει πλάτος

$$A' = \left| 2A \sigma\upsilon\nu 2\pi \frac{r_1 - r_2}{2\lambda} \right| \quad (4)$$

$$2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{r_1 + r_2}{2\lambda} \right)$$

και φάση

Σύμφωνα με τη (4), το πλάτος της ταλάντωσης γίνεται μέγιστο ($A'=2A$)

$$\sigma\upsilon\nu 2\pi \frac{r_1 - r_2}{2\lambda} = \pm 1$$

όταν

$$2\pi \frac{|r_1 - r_2|}{2\lambda} = N\pi,$$

ή όταν

δηλαδή στα σημεία για τα οποία

$$|r_1 - r_2| = N\lambda \quad \text{όπου } N=0, 1, 2, \dots$$

$$\sigma\upsilon\nu 2\pi \frac{r_1 - r_2}{2\lambda} = 0$$

Όταν

$$2\pi \frac{|r_1 - r_2|}{2\lambda} = (2N + 1) \frac{\pi}{2}$$

δηλαδή

$$\text{ή} \quad |r_1 - r_2| = (2N+1)\lambda/2 \quad \text{όπου } N=0, 1, 2, \dots$$

η (4) δίνει ότι $A' = 0$. Δηλαδή τα σημεία αυτά παραμένουν διαρκώς ακίνητα.

Ο γεωμετρικός τόπος των σημείων για τα οποία ισχύει $r_1 - r_2 = \text{σταθ.}$ είναι υπερβολή. Επομένως τα σημεία στα οποία έχουμε ενισχυτική συμβολή και τα σημεία στα οποία έχουμε απόσβεση, βρίσκονται πάνω σε υπερβολές.

Σημείωση : Η μελέτη του φαινομένου της συμβολής, όπως έγινε, αφορούσε στη συμβολή δύο κυμάτων των οποίων οι πηγές βρίσκονται **σε φάση** (δηλαδή δημιουργούν ταυτόχρονα μέγιστα και ελάχιστα). Τέτοιες πηγές ονομάζονται σύγχρονες, όπως προαναφέρθηκε. Συμβολή, όμως, έχουμε κάθε φορά που δύο κύματα διαδίδονται στο ίδιο μέσο.

2.4 Θαλάσσια ρεύματα

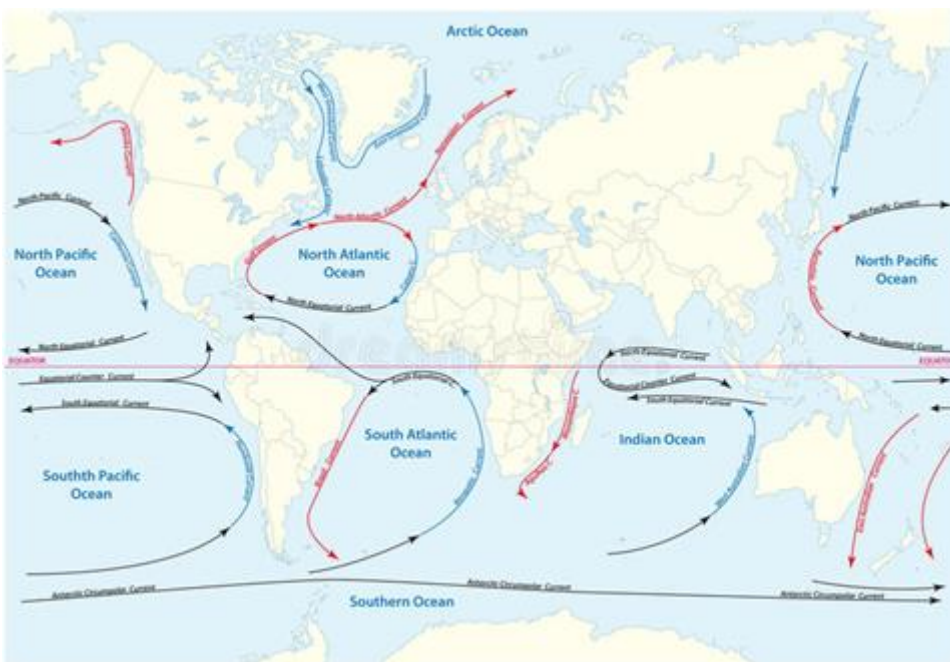
Τα θαλάσσια ρεύματα είναι οριζόντιες κινήσεις υδάτων σε θάλασσες και ωκεανούς, οι οποίες δεν φαίνονται, αλλά μετακινούν τεράστιες υδάτινες μάζες, οι οποίες με την σειρά τους επηρεάζουν την ανάπτυξη της ζωής στην θάλασσα και στην στεριά, καθώς μαζί με τις υδάτινες μάζες μεταφέρουν θερμότητα ή ψύχος(ανάλογα με το είδος του ρεύματος).

Τα θαλάσσια ρεύματα ανάλογα με την περιοχή που κινούνται διακρίνονται σε **επιφανειακά** και σε **βαθιά**.

Επιφανειακά ρεύματα : Κινούνται στην επιφάνεια της θάλασσας σε όχι μεγαλύτερο βάθος, από τα 400 μέτρα από αυτήν.

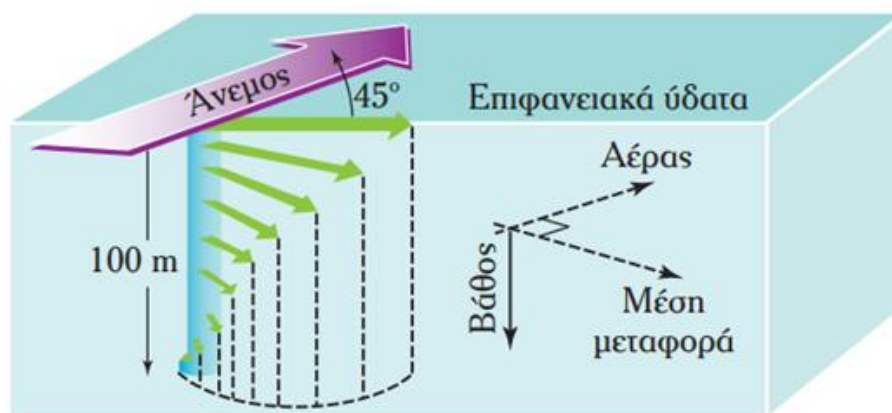
Βαθιά ρεύματα : Κινούνται στο εσωτερικό της θάλασσας, από τα 400 μέτρα και κάτω. Στη συνέχεια, μπορούμε να διακρίνουμε τα θαλάσσια ρεύματα σε **θερμά** ή **ψυχρά**. Τη κύρια πηγή θερμότητας αποτελεί ο ήλιος. Τα ρεύματα λοιπόν θερμαίνονται σε μικρά πλάτη κοντά στον Ισημερινό και έπειτα περνάνε σε μεγαλύτερα πλάτη, όπου και μεταφέρουν αυτή την θερμότητα. Τέλος όσο αφορά την διάκριση των θαλασσίων ρευμάτων, τα διακρίνουμε επίσης σε **ανεμογενή** και **γεωστροφικά**.

Μεγάλη ζώνη μεταφοράς : Ονομάζεται η επίδραση όλων των ρευμάτων, επιφανειακών και βαθιών, που έχουν συγχωνευτεί, προκειμένου να δημιουργήσουν ένα κύριο ρεύμα, έτσι ώστε να απεικονιστεί η γενική κυκλοφορία των ρευμάτων.



Εικόνα 21 : Απεικόνιση των βαθιών ρευμάτων

Τα **ανεμογενή** ρεύματα (**wind driven currents**), εμφανίζονται όταν θάλασσα και άνεμος βρίσκονται σε ισορροπία, η ταχύτητα του ρεύματος είναι ανάλογη με αυτή του ανέμου του οποίου πνέει σε μία περιοχή (αρχικά το επιφανειακό ρεύμα κινείται με επιτάχυνση, μέχρι να αποκτήσει μέγιστη ταχύτητα). Στο βόρειο ημισφαίριο η δύναμη Coriolis έχει την τάση να εκτρέψει το επιφανειακό νερό δεξιόστροφα, αλλά ο άνεμος προσπαθεί να το επαναφέρει στην ίδια διεύθυνση με εκείνο (εδώ αξίζει να αναφερθεί ότι ο άνεμος έχει διεύθυνση, δηλαδή παίρνει την ονομασία του ανάλογα από το μέρος του ορίζοντα από το οποίο έρχεται, ενώ σε αντίθετη περίπτωση το ρεύμα έχει κατεύθυνση, πράγμα που σημαίνει ότι παίρνει ονομασία ανάλογα με το σημείο του ορίζοντα στο οποίο κατευθύνεται). Το αποτέλεσμα αφού επιτευχθεί η ισορροπία δυνάμεων, η διεύθυνση του επιφανειακού ρεύματος είναι 45° δεξιόστροφα με την διεύθυνση με την οποία πνέει ο άνεμος. Τέλος σύμφωνα με την **σπείρα του Eckman** (για σχηματισμό επιφανειακών ρευμάτων σε στρώμα πάχους 100 μέτρων) το επιφανειακό ρεύμα όσο μεταβαίνει σε μεγαλύτερα βάθη λόγω τριβής μειώνεται η ταχύτητα του και αυξάνεται η γωνία της κατεύθυνσής του προς τα δεξιά του ανέμου.



Εικόνα 22 : Σπείρα του Έκμαν

Τα γεωστροφικά ρεύματα ή ρεύματα βαροβαθμίδας ή ρεύματα κλίσεως (geostrophic currents) δημιουργούνται όταν υπάρχει ισορροπία ανάμεσα σε δυνάμεις βαροβαθμίδας και Coriolis. Λόγω της δυνάμεως Coriolis, συμβαίνει κάποια μετατόπιση των θερμών και μικρής πυκνότητας υδάτων στο Βόρειο ημισφαίριο. Η μετατόπιση αυτή έχει κατεύθυνση προς την δεξιά πλευρά της ροής, ενώ από την αριστερή έρχονται ψυχρές μάζες για να τις αντικαταστήσουν. Οι αντικαταστάσεις δημιουργούν μία κλίση στην επιφάνεια τη θάλασσας, η οποία δημιουργεί εγκάρσιες μεταβολές στην υδροστατική

πίεση. Ως αποτέλεσμα, το νερό κατευθύνεται από την υψηλή πίεση προς την χαμηλή εξαιτίας της δυνάμεως βαροβαθμίδας. Αντίθετα, όταν το νερό κινηθεί προς χαμηλή πίεση, εκτρέπεται από την δύναμη Coriolis προς τα δεξιά στο Βόρειο ημισφαίριο. Όταν λοιπόν επιτευχθεί η ισορροπία δυνάμεων, η ροή είναι βόρεια.

Κεφάλαιο 3 : Παραδείγματα συμβολής θαλασσίων κυμάτων στον κόσμο.

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναπτύξουμε δύο βασικά παραδείγματα συμβολής θαλασσίων κυμάτων που συναντάμε στον κόσμο. Το φαινόμενο της συμβολής των κυμάτων μπορεί να εμφανιστεί σε οποιοδήποτε περιοχή του κόσμου, εάν πληρούνται οι απαραίτητες προϋποθέσεις που έχουν αναλυθεί λεπτομερώς σε προηγούμενα κεφάλαια. Όταν μιλάμε για συμβολή κυμάτων δε μπορούμε να παραλείψουμε να αναφέρουμε τα «**Abnormal waves**» που δημιουργούνται στις Νοτιοανατολικές ακτές της **Αφρικής**. Όπως και για την συμβολή των θαλασσίων κυμάτων στον **Βισκαϊκό κόλπο** και για το φαινόμενο της σταυρωτής θάλασσας στη νήσο Ιλ ντε Ρε (Ile de Re) στη Γαλλία.

3.1 Abnormal waves



Εικόνα 23: Ιστιφόρο Συναντά abnormal waves στις Νοτιοανατολικές ακτές της Αφρικής.

Abnormal waves μπορεί να εμφανιστούν οπουδήποτε στον κόσμο, δηλαδή όπου οι συνθήκες ευνοούν την δημιουργία τους. Σε μέρη όπου εμφανίζονται μεγάλη κυματισμοί το μέγεθος των abnormal waves μπορεί να ξεπεράσει και τα 20 μέτρα σε ύψος και είναι ικανά να προκαλέσουν σοβαρή δομική ζημία ακόμα και σε μεγαλύτερα πλοία ή ακόμα και να οδηγήσουν στην καταστροφή των πλοίων. Σε μέρη όπου θεωρείται ότι επικρατούν συνθήκες που όταν συνδυάζονται παράγονται ανώμαλα κύματα, τα οποία ενδέχεται να θέσουν σε κίνδυνο σκάφη και επιβάτες, εκδίδεται μία προειδοποίηση στο Admiralty Sailing Directions και στο Ocean Passages for the World.

Αναφορές τέτοιων περιστατικών, πόσο μάλιστα και μετρήσεις αυτών, είναι πολύ λίγες και αναφέρονται σε πολλά μέρη του κόσμου. Ωστόσο στα ανοικτά των ακτών της νοτιοανατολικής Αφρικής, έχει γίνει κάποια έρευνα για τα ανώμαλα κύματα που δημιουργούνται σε αυτή την περιοχή.

Αρκετές θεωρίες έχουν προταθεί για τις αιτίες της δημιουργίας των κυμάτων αυτών, στα οποία οφείλονται σημαντικές ζημιές σε σκάφη που βρίσκονται στην ανατολική ακτή μεταξύ Durnford Point και Great Fish Point. Θα μπορούσαμε με ασφάλεια να πούμε ότι πολλά άλλα πλοία έχουν βιώσει abnormal waves στις ακτές μεταξύ Durnford Point και Great Fish Point της Νότιας Αφρικής, όμως επειδή η ταχύτητα του σκάφους είχε μειωθεί καταλλήλως και το πλοίο δεν υπέστη ζημιά. Ως εκ τούτου δεν υπήρχε συγκεκριμένος λόγος αναφοράς ενός τέτοιου συμβάντος εκτός από ενδιαφέρον.

Τα abnormal waves στις Νοτιοανατολικές ακτές της Αφρικής, όπως ήδη αναφέραμε είναι η αιτία για τη πρόκληση σοβαρών και εκτεταμένων καταστροφών στις υπερκατασκευές των πλοίων που τα συναντούν, ακόμα και για την βύθισή τους. Ένα από τα πολλά πλοία που έχουν αντιμετωπίσει τέτοια πελώρια κύματα και έχουν χάσει την μάχη μαζί τους είναι και το World Glory το οποίο κόπηκε στα δύο την 13 Ιουνίου 1968 στοιχίζοντας την ζωή σε είκοσι τέσσερις ανθρώπους.



Εικόνα 24 : World Glory, 1968

Τα κύματα αυτά είναι αποτέλεσμα δύο περιπτώσεων συμβολής:

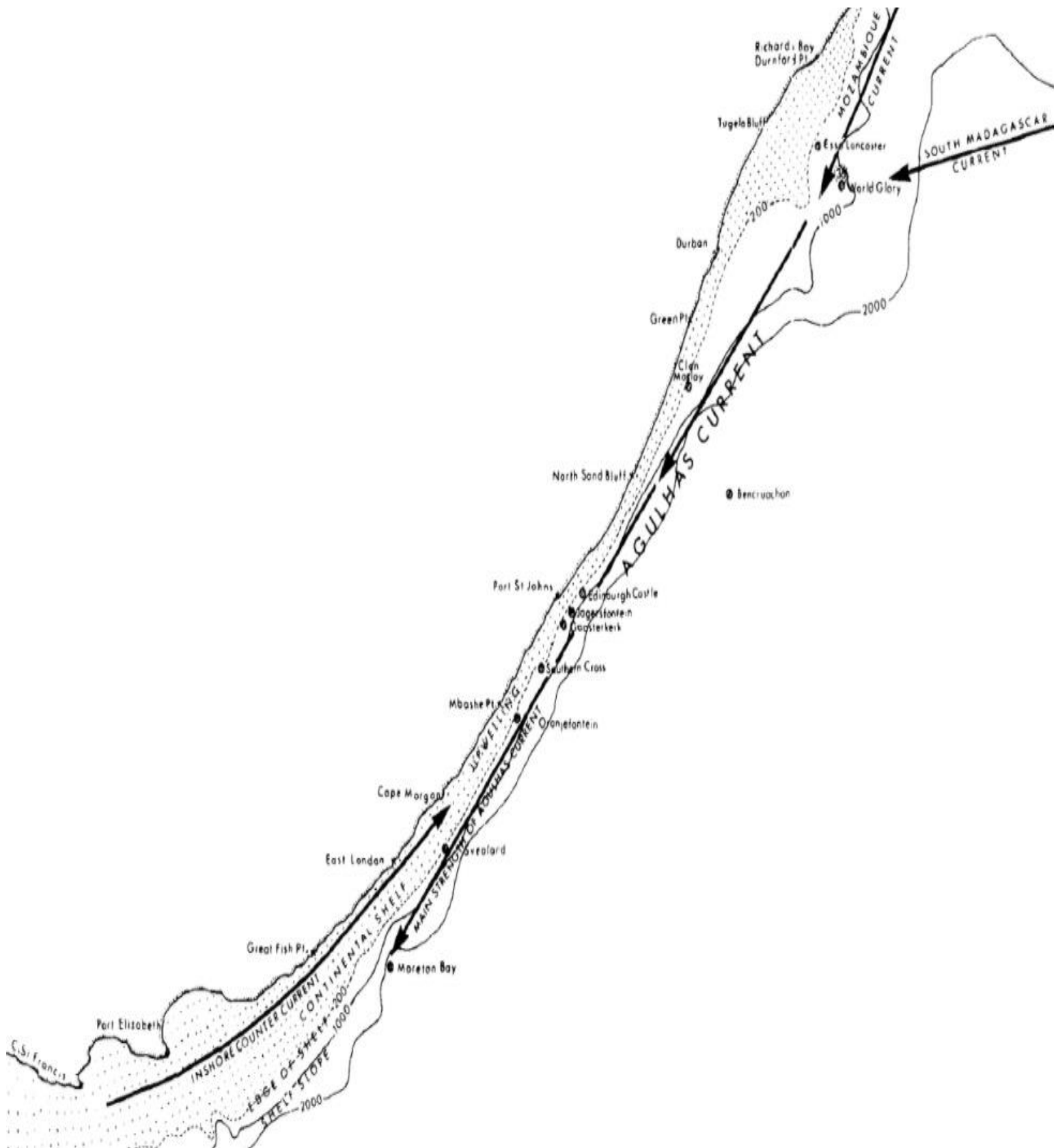
1. Στην πρώτη περίπτωση συμβάλουν swell waves (κύματα αποθαλασσίας) που οφείλονται σε καταγίδες μεγαλύτερων πλατών, που έχουν δημιουργηθεί ως και 1200 νμ μακριά και κινούνται προς τα ΒΑ με θαλάσσια κύματα που επίσης κινούνται ΒΑ και οφείλονται σε υφέσεις της περιοχής ή με αποθαλασσία ΒΑ κατεύθυνσης που παράγεται κοντά στις ακτές των Prince Edward Islands (47 S, 38 E). Έτσι έχουμε ως αποτέλεσμα να δημιουργούνται τρεις ή και περισσότερες σειρές κυματισμών οι οποίες έχουν την ίδια σχεδόν κατεύθυνση. Όταν αυτές

οι σειρές κυματισμών συμβάλουν μεταξύ τους, δημιουργούν ένα κύμα μεγάλου ύψους και με μικρή περίοδο το οποίο έχει κατεύθυνση Βορειοανατολική

- II. Στην δεύτερη περίπτωση μια ύφεση κινείται κατά μήκος της ΝΑ ακτής της Ν. Αφρικής και δημιουργεί ισχυρό ΒΑ άνεμο που ενισχύει το ρεύμα Agulhas έως και την ταχύτητα των 5knots. Όταν περνά το ψυχρό μέτωπο της ύφεσης, ο άνεμος αλλάζει κατεύθυνση και γίνεται ΝΔ, με αποτέλεσμα να προκαλεί κυματισμό αντίθετης κατεύθυνσης από το ρεύμα Agulhas και από την προϋπάρχουσα ισχυρή αποθαλασσία από τα ΒΑ.

Ακόμα σημαντικός παράγοντας είναι και η υποβρύχια τοπογραφία, καθώς έχει άμεση επιρροή στην κίνηση των υδάτινων μαζών στην περιοχή. Βλέποντας την εξέταση των βαθυμετρικών γραφημάτων που καταρτίστηκαν τα τελευταία 10 χρόνια, ότι γενικά η υφαλοκρηπίδα είναι σχετικά στενή. Μεταξύ του Durnford Point και του Bluff, Durban, έχει πλάτος περίπου 20 μίλια αλλά στη συνέχεια στενεύει απότομα και παραμένει στα 5 μίλια μέχρι το λιμάνι του St. Johns, από όπου διευρύνεται σταδιακά μέχρι το Great Fish Point να έχει πλάτος 20 μίλια, παραμένοντας σε αυτό το πλάτος μέχρι τα δυτικά του Cape Recife.

Κατά μήκος της ακτής μεταξύ του Port St. Johns και του Ανατολικού Λονδίνου η ηπειρωτική κλίση, αυτό είναι το άκρο της ακτής της ηπειρωτικής υφαλοκρηπίδας, είναι πολύ πιο απότομο συνήθως, η γραμμή 2 000 m βρίσκεται εντός 15 μιλίων από την άκρη της υφαλοκρηπίδας. Πολλά βαθιά φαράγγια βρίσκονται κατά μήκος της έκτασης της ηπειρωτικής πλαγιάς, αλλά λόγω αδυναμίας εντοπισμού από τα ηχοβολιστικά συστήματα έξω από τη γραμμή 200 m, η πλήρης έκταση αυτών των φαραγγιών δεν έχει ακόμα έχει χαρτογραφηθεί. Έτσι λοιπόν όταν τα abnormal waves φτάσουν κοντά στην υφαλοκρηπίδα δεν θα είναι πλέον ημιτονοειδές αλλά εξαιρετικά απότομα και προηγείται από ένα πολύ βαθύ αυλάκι.



Εικόνα 25 : Πλήρης αναπαράσταση της ακτογραμμής της Νοτιοανατολικής Αφρικής.

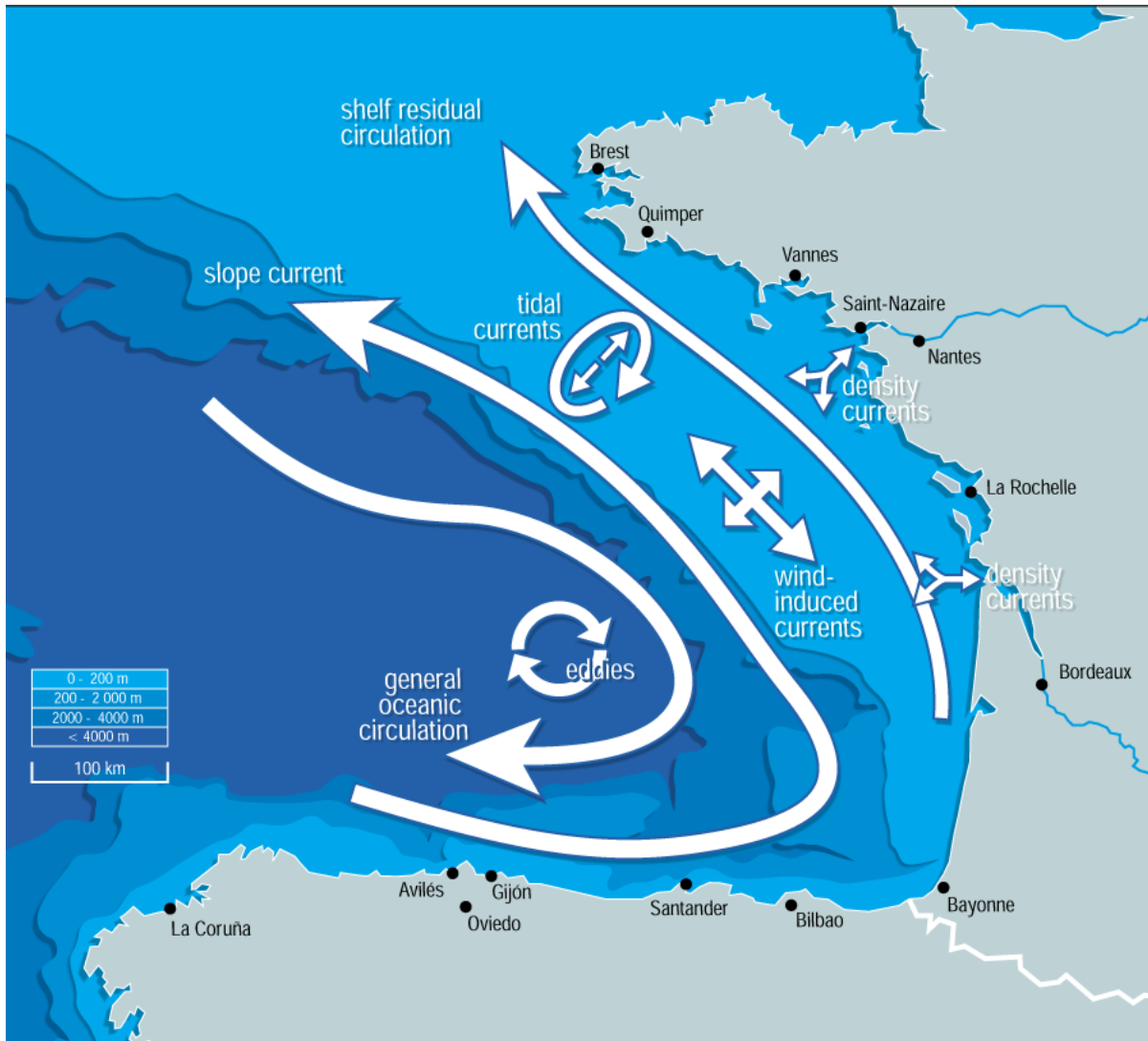
3.2 Βισκαϊκός κόλπος

Ο κόλπος του Βισκαϊκού (Biscay) βρίσκεται στο βορειοανατολικό Ατλαντικό Ωκεανό και οριοθετείται από το δυτική ακτή της Γαλλίας και τη βόρεια ακτή της Ισπανίας. Είναι γνωστός για τις δυσμενείς καιρικές συνθήκες που επικρατούν σε αυτόν, καθώς θεωρείται ως ένας ανοιχτός κόλπος που γειτνιάζει με τον Ατλαντικό ωκεανό. Η μορφολογία του βυθού στον Βισκαϊκό κόλπο δεν είναι ομοιόμορφη, αλλά δύσμορφη και πιο συγκεκριμένα στην βορειοανατολική ζώνη του κόλπου η υφαλοκρηπίδα έχει πλάτος μεγαλύτερο των 140 χιλιομέτρων και έχει ομαλές πεδιάδες, έπειτα στενεύει στα 50 χιλιόμετρα στη Νότια ζώνη, κοντά στα σύνορα Ισπανίας και Γαλλίας και τέλος στη Νοτιότερη ζώνη της Ισπανίας η υφαλοκρηπίδα εκτείνεται στα 12 χιλιόμετρα. Η μορφολογία της υφαλοκρηπίδας επηρεάζει την κατεύθυνση των ρευμάτων και την ταχύτητα των ρευμάτων με τρόπο τέτοιο που τα ρεύματα συμβάλουν με τις αποθαλασσίες που έρχονται από τον Ατλαντικό ωκεανό.



Εικόνα 26 : Χάρτης απεικόνισης στο Βισκαϊκού Κόλπου

Ο κόλπος τροφοδοτείται με το Ρεύμα του κόλπου ή αλλιώς το ρεύμα του Βόρειου Ατλαντικού. Στο σχήμα που ακολουθεί αναπαρίσταται η κυκλοφορία των ρευμάτων μέσα στον Βισκαϊκό Κόλπο και το πώς αλλάζει η κατεύθυνση του ρεύματος λόγω της μορφολογίας του θαλάσσιου βυθού και της ύπαρξης γλυκού νερού που προέρχεται από τις εκβολές των ποταμών Loire, Gironde και Adour.



Εικόνα 27 : Χάρτης απεικόνισης θαλασσιών ρευμάτων του Βισκαϊκού Κόλπου

Υπήρξε σημαντική μελέτη για τη συμβολή θαλασσιών κυμάτων στον κόλπο του Βισκαϊκού. Τόσο αυτών κατά μήκος της ηπειρωτικής υφαλοκρηπίδας όσο και εκείνων στον κεντρικό κόλπο περίπου 120 έως 150 χλμ. από την άκρη της υφαλοκρηπίδας. Οι Βορειοδυτικοί και οι Νοτιοδυτικοί άνεμοι που έρχονται από τον Βορειοανατολικό Ατλαντικό ωκεανό και τα συστήματα αποθαλασσίας από τον ίδιο συμβάλουν με το ρεύμα του κόλπου το οποίο έχει κατεύθυνση αντίθετη. Έχουν παρατηρηθεί κύματα που περνάνε τα 30 μ. σε ύψος και εμφανίζονται ξαφνικά.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφερθούμε σε ένα σπάνιο φαινόμενο που εμφανίζεται στο νησί Ιλντε Ρε (Ile de Re) το οποίο βρίσκεται στις Γαλλικές ακτές του Ατλαντικού ωκεανού, το φαινόμενο των σταυρωτών κυμάτων «cross sea». Αυτό το φαινόμενο συμβαίνει στις ακτές του νησιού με δύο τρόπους:

- Πρώτον κατά την διάρκεια συμβολής δύο συστημάτων κυματισμού που συνυπάρχουν την ίδια στιγμή και διασταυρώνονται σχεδόν κάθετα. Τα κύματα αυτά έρχονται από διαφορετικές διευθύνσεις και μπορεί να έχουν δημιουργηθεί από κάποιο μετεωρολογικό σύστημα (π.χ. Καταιγίδες , δυνατοί άνεμοι κ.α.). Ουσιαστικά τα δύο αυτά συστήματα κυμάτων συμβάλουν και δημιουργούνται κορυφές διπλάσιες σε ύψος.
- Δεύτερον το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται και κατά την διάρκεια της πλήμμης και ρηχίας (φαινόμενο της παλίρροιας). Το φαινόμενο της παλίρροιας στις ακτές της Γαλλίας είναι πολύ έντονο. Έτσι λοιπόν, εάν κατά την άνοδο της στάθμης της θάλασσας ,υπάρχει αποθαλασσία της οποίας η κατεύθυνση είναι σχεδόν κάθετη στο παλιρροϊκό κύμα τότε έχουμε εμφάνιση του φαινομένου. Πρόκειται για ένα πολύ επικίνδυνο φαινόμενο το οποίο αποτελεί πόλο έλξης για εκατομμύρια επισκέπτες που όμως όταν βρεθούν μέσα στις δίνες των κυμάτων αυτών , είτε είναι με πλοίο ή όχι, θα παγιδευτούν.



Βιβλιογραφία

- ❖ <http://www.seafriends.org.nz/oceano/waves.htm>
- ❖ Ναυτική Μετεωρολογία Λ.Ν. Καραπιπέρη
- ❖ Ναυτική Μετεωρολογία ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗΣ Γ. ΨΥΧΑ ΜΙΧΑΗΛ Π. ΜΗΧΑΝΟΓΙΑΝΝΗ
- ❖ Παλιρροϊκοί Πίνακες Εκπαιδευτικό κείμενο ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ
- ❖ Βιβλίο Φυσικής Γ΄ Γυμνασίου Νικόλαος Αντωνίου, Παναγιώτης Δημητριάδης, Κωνσταντίνος Καμπούρης, Κωνσταντίνος Παπαμιχάλης, Λαμπρινή Παπασίμπα
- ❖ ABNORMAL WAVES ON THE SOUTH EAST COAST OF SOUTH AFRICA by J. K. Mallory
- ❖ Government of Canada. Environment Canada. [Ηλεκτρονικό] 16 5 2014. [Παραπομπή: 17 9 2014.]<https://ec.gc.ca/meteoweather/default.asp?lang=En&n=279AC7ED-1&offset=3&toc=show>.
- ❖ NGA. National Geospatial-Intelligence Agency. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 16 9 2014.]
http://msi.nga.mil/MSISiteContent/StaticFiles/NAV_PUBS/APN/Chapt33.pdf.
- ❖ U.S Department of Transportation. [Ηλεκτρονικό] 4 7 2011. [Παραπομπή: 4 10 2014.]
<http://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/pubs/07096/4.cfm>.
- ❖ Xiaoming, Lehner, Rosenthal. Investigation of Ocean Surface Wave Refraction. s.l. : IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing, 2010. Vol.48, No. 2.
- ❖ Μουτζούρης, Κ.Ι. Εισαγωγή στην Ακτομηχανική. Αθήνα : Ε.Μ.Π, 2005.
- ❖ Iverson. Waves and breakers in shoaling water. s.l. : American Society of Civil Engineers, 1952.
- ❖ C.J Galvin. Breaker type classification on three laboratory beaches. Journal of Geophysical Research. 12, 1968, Τόμ. 73.
- ❖ WIKIPEDIA
- ❖ Nautical Publications- Mariners - Handbook
- ❖ <https://www.philenews.com/koinonia/syzitountai-sto-diadiktyo/article/614397>
- ❖ <https://rwu.pressbooks.pub/webboceanography/chapter/10-2-waves-at-sea/>
- ❖ <https://www.eoearth.org/view/article/150448/>