



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ  
ΠΛΩΤΩΝ ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΩΝ ΣΕ ΛΙΜΕΝΙΚΑ ΕΡΓΑ  
ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΛΙΜΕΝΑ ΤΟΥ ΝΕΟΥ ΜΑΡΜΑΡΑ



ΓΑΛΑΝΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Δρ. Θ. ΚΑΡΑΜΠΑΣ

ΒΟΛΟΣ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2003



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ  
ΠΛΩΤΩΝ ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΩΝ ΣΕ ΛΙΜΕΝΙΚΑ ΕΡΓΑ  
ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΛΙΜΕΝΑ ΤΟΥ ΝΕΟΥ ΜΑΡΜΑΡΑ



ΓΑΛΑΝΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Δρ. Θ. ΚΑΡΑΜΠΑΣ

ΒΟΛΟΣ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2003

*Στους γονείς μου.*

**Περιεχόμενα**

**Ευχαριστίες**

**Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup> - Εισαγωγή**.....1

1.1 Εισαγωγή.....1

1.2 Πλωτοί Κυματοθραύστες.....2

1.3 Δομή της εργασίας.....5

1.4 Είδη Πλωτών Κυματοθραυστών.....6

**Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup> – Αναλυτικές Λύσεις**.....10

2.1 Κατάστροση του μαθηματικού προβλήματος.....10

2.2 Εφαρμογές .....16

**Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup> – Ευστάθεια, Στατική και Υδροδυναμική**

**συμπεριφορά Κυματοθραύστη**.....20

3.1 Εισαγωγή.....20

3.2 Πλευστότητα και Ευστάθεια Κυματοθραύστη.....20

3.3 Στατική Επάρκεια.....23

3.4 Υδροδυναμική συμπεριφορά.....25

3.5 Σχεδιασμός Αγκυρώσεων.....28

    3.5.1 Υπολογισμός Αγκυρώσεων.....33

**Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> - Προσομοίωση της επίδρασης των πλωτών**

**κυματοθραυστών σε δισδιάστατα κυματικά μοντέλα**.....36

4.1 Εισαγωγή.....36

4.2 Φυσική και μαθηματική ανάλυση.....36



<b>Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup> - Εφαρμογή μοντέλων γραμμικών κυματισμών για τον υπολογισμό κυματισμών στο λιμένα του Νέου Μαρμαρά.....</b>	
<b>Μαρμαρά.....</b>	<b>41</b>
5.1 Εισαγωγή.....	41
5.2 Περιγραφή υφιστάμενης κατάστασης.....	41
5.3 Κυματικό κλίμα.....	42
5.4 Μοντέλα υπολογισμού.....	43
5.4.1 Πρόγραμμα πρόγνωσης κυματισμών <i>JONSWAP.FOR</i> .....	44
5.4.2 Πρόγραμμα Προσομοίωσης <i>HARBOR.FOR</i> .....	45
5.4.2.1 Αριθμητικό σχήμα επίλυσης.....	48
5.4.2.2 Τυρβώδης συντελεστής ιξώδους για την προσομοίωση της μερικής ανάκλασης από κυματοθραύστες με πρανή.....	51
5.4.2.3 Τυρβώδης συντελεστής ιξώδους για την προσομοίωση της θραύσης τυχαίων κυματισμών.....	53
5.4.2.4 Λογισμικό.....	54
5.5 Εφαρμογή στο λιμένα Νέου Μαρμαρά.....	56
5.5.1 Συγκέντρωση αρχικών στοιχείων.....	57
5.5.2 Επεξεργασία δεδομένων μέσω προγραμμάτων <i>Fortran</i> .....	58
5.5.3 Διαδικασία Προσομοίωσης.....	60
5.5.3.1 Απουσία οποιουδήποτε τεχνικού έργου.....	61
5.5.3.2 Σταθερός κυματοθραύστης.....	62
5.5.3.3 Πλωτός κυματοθραύστης.....	64
5.5.3.4 Διερεύνηση σε ήπιες συνθήκες.....	67
5.5.3.5 Θεώρηση Νοτιοδυτικών ανέμων.....	69
5.5.4 Υπολογισμός Αγκύρωσης στο Λιμένα Νέου Μαρμαρά.....	72
5.5.5 Προϋπολογισμός σταθερού και πλωτού κυματοθραύστη.....	74

<b>Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup> – Συμπεράσματα και Μελλοντική έρευνα.....</b>	<b>77</b>
6.1 Συμπεράσματα.....	77
6.2 Μελλοντική έρευνα.....	79
<b>Παράρτημα Α.....</b>	<b>81</b>
<b>Παράρτημα Β.....</b>	<b>96</b>
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>106</b>

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

---

*Δικαιωματικά και πριν απ'όλους θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Κώστα και Ερρικέττη, για την συμπαράσταση και την υποστήριξη, ηθική και υλική, που μου παρείχαν καθ'όλη την διάρκεια των σπουδών μου και ως ελάχιστο δείγμα της εκτίμησης μου τους αφιερώνω την παρούσα διπλωματική που αποτελεί το επιστέγασμα της πενταετούς φοίτησής μου.*

*Τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Θεοφάνη Καραμπά, με τον οποίο είχαμε αρμονική συνεργασία σε όλο το χρονικό διάστημα εκπόνησης της εργασίας και του οποίου η καθοδήγηση και βοήθεια υπήρξε καθοριστική και πολύτιμη.*

*Επιπλέον, θερμά ευχαριστώ αξίζουν και οι καθηγητές μου, που όλα αυτά τα χρόνια μου μετέφεραν τις γνώσεις τους και την πείρα τους, καθώς και για τις χρήσιμες παρατηρήσεις και την εποικοδομητική κριτική τους.*

*Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους πολύ καλούς μου φίλους και συμφοιτητές Αργύρη Τάσο, Κουφάκη Μιχάλη και Παρδαλίδη Παναγιώτη, αλλά και τη φοιτήτρια Δεληγιάννη Ιωάννα, χωρίς την παρέα και συμπαράσταση των οποίων δε θα αποκόμιζα τις τόσο ευχάριστες αναμνήσεις με τις οποίες συνδέω πλέον τα φοιτητικά μου χρόνια στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.*

*Παναγιώτης Κ. Γαλάνης*

*Βόλος, Μάρτιος 2003*

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## Εισαγωγή



# Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή

## 1.1 Γενικά

Η δραστηριότητα του πολιτικού μηχανικού στον παράκτιο χώρο και την ανοιχτή θάλασσα ξεκίνησε πριν πολλούς αιώνες με την κατασκευή των πρώτων υποτυπωδών λιμενικών έργων, ενώ η κλιμάκωσή τους επήλθε τις τελευταίες δεκαετίες όπου η ανάγκη προστασίας των ακτών απ'τους κυματισμούς, καθώς και η ανάγκη δημιουργίας λιμενολεκανών με ήπιες κυματικές συνθήκες θεωρήθηκαν πρωτίστης σημασίας για την ανάπτυξη των παράκτιων περιοχών.

Αρχικά στο χώρο της Μεσογείου, της Ερυθράς Θάλασσας και του Περσικού, όπου αναπτύχθηκαν και οι πρώτοι μεγάλοι πολιτισμοί, κατασκευάστηκαν οι πρώτοι λιμένες, έργα εντυπωσιακά και αξιοθαύμαστα, που σκοπό είχαν τη δημιουργία ιδανικών συνθηκών για την ανάπτυξη του εμπορίου και την προστασία του πολεμικού στόλου. Εν συνεχεία, ο σκοταδισμός του μεσαίωνα έπληξε και οδήγησε σε ύφεση τη δημιουργία νέων κατασκευών, όπως και όλους τους τομείς της πολιτισμικής ανάπτυξης. Επιτάχυνση στην ανάπτυξη των λιμένων επήλθε, όπως ήταν φυσικό, κατά την εποχή της σύγχρονης αποικιοκρατίας ενώ κορυφώθηκε κατά την βιομηχανική επανάσταση.

Συνοπτικά, οι παράγοντες που επηρέασαν κατά κύριο λόγο την ανάπτυξη των λιμένων, δύναται να συνοψιστούν στους παρακάτω:

- Ανάπτυξη της εμπορικής ναυτιλίας, που συνεπάγεται αύξηση του μεγέθους και του αριθμού των πλοίων καθώς και αύξηση της πυκνότητας και της αποστάσεως των θαλάσσιων διαδρομών.
- Ανάπτυξη της βιομηχανικής παραγωγής καταναλωτικών αγαθών και του διεθνούς εμπορίου.
- Πληθυσμιακή έκρηξη και καταναλωτική αντίληψη που παρατηρείται κατά τις τελευταίες δεκαετίες.
- Ανάπτυξη της πετρελαιοβιομηχανίας .
- Ανάπτυξη της τεχνολογίας και της τεχνογνωσίας στον τομέα του πολιτικού μηχανικού.





Οι κυματοθραύστες από λιθορριπή και σκυρόδεμα είναι συνήθως κατασκευές θεμελιωμένες στον πυθμένα με ύψος κατασκευής ίσο και μεγαλύτερο του θαλάσσιου βάθους και επομένως με πολύ μεγάλο κόστος κατασκευής. Επιπλέον, η τοποθέτηση μιας τέτοιας κατασκευής στο θαλάσσιο περιβάλλον, εμποδίζει την ομαλή κυκλοφορία των θαλάσσιων μαζών και των ζωικών και φυτικών πληθυσμών που ζουν και κινούνται στο εν λόγω περιβάλλον και δυσχεραίνει την ανανέωση των νερών της λιμενολεκάνης, ορίζοντας την συμπεριφορά τους ως αντιοικολογική.

Πολλές είναι οι περιπτώσεις που το ζητούμενο περιορίζεται στην ημιπροστασία των ακτών από διάβρωση λόγω της ενέργειας του κύματος, ή στη δημιουργία λιμενολεκανών με περιορισμένη κυματική δράση, περιβαλλοντικά φιλική συμπεριφορά και σε χαμηλό σχετικά κόστος. Ιδανική λύση σε κάθε τέτοια περίπτωση καταδεικνύεται η χρήση ήπιων λύσεων. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν και οι Πλωτοί Κυματοθραύστες, τα βασικά χαρακτηριστικά των οποίων περιγράφονται παρακάτω.

## 1.2 Πλωτοί Κυματοθραύστες.

Όπως είναι κατανοητό οι πλωτοί κυματοθραύστες αποτελούν μια εναλλακτική λύση, έναντι των κλασικών κυματοθραυστών. Η αποτελεσματικότητά τους έγκειται στη μείωση του ύψους του κύματος και της ενέργειάς του σε βαθμό μικρότερο από αυτό των κλασικών φορέων. Ο πλωτός κυματοθραύστης αποτελείται συνήθως από έναν πλωτήρα αγκυρωμένο στον πυθμένα με αλυσίδα ή καλώδιο. Η συνήθης διατομή του είναι ορθογωνική ενώ έχουν μελετηθεί και εφαρμοστεί και άλλες διατομές .

Η εφαρμογή τους ανάγεται χρονικά στο Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο, όπου ο κυματοθραύστης Bombardon χρησιμοποιήθηκε στην απόβαση της Νορμανδίας προκειμένου να εξασφαλίσει μια περιοχή καλά προφυλαγμένη. Στη συνέχεια, κατά τις δεκαετίες 1950-1980, δοκιμάστηκαν σε περιοχές μερικά προφυλαγμένες, διάφορες λύσεις πλωτών κυματοθραυστών από υλικά που ποίκιλαν (από δέσμες επιπλεόντων κορμών δέντρων, συνδεδεμένα ελαστικά αυτοκινήτων σωλήνες πολυαιθυλενίου μεγάλης διαμέτρου ερματισμένους με νερό, κ.τ.λ). Σήμερα, ενώ η χρήση τους διεθνώς είναι ευρέως διαδεδομένη και η αξία τους πλέον αδιαμφισβήτητη, στην Ελλάδα η εφαρμογή τους παραμένει περιορισμένη και η τεχνογνωσία ελλιπής.



Οι πλωτοί μειωτήρες κυματισμών θα πρέπει να προτιμούνται έναντι των συμβατικών κυματοθραυστών μόνο εφόσον προσφέρουν συγκριτικά πλεονεκτήματα, τα οποία μπορούν να συνοψισθούν στα εξής :

1. Σημαντική μείωση του συνολικού κόστους του έργου, μιας και η κατασκευή είναι ανεξάρτητη του θαλάσσιου βάθους αλλά και των γεωλογικών συνθηκών του πυθμένα.
2. Οικολογική συμπεριφορά, συγκριτικά με ένα συμβατικό κυματοθραύστη που ακόμη και στη βέλτιστη διάταξή του σε σχέση με τις προϋπάρχουσες υδροδυναμικές συνθήκες, προκαλεί τον εγκλωβισμό των θαλάσσιων μαζών και των ζωικών και φυτικών πληθυσμών, αποτρέποντας την ανανέωσή τους στον επιθυμητό ρυθμό και βαθμό. Στην περίπτωση των πλωτών κυματοθραυστών η κυκλοφορία των μαζών δεν εμποδίζεται και το θαλάσσιο οικοσύστημα δε διαταράσσεται καθιστώντας έτσι τις εν λόγω κατασκευές *κυριολεκτικά αόρατες από άποψη περιβαλλοντικών επιπτώσεων*.
3. Δυνατότητα μετακίνησης, επέκτασης και αναδιάταξης της κατασκευής ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη προστασία της λιμενολεκάνης αλλά και η εποχιακή χρησιμοποίησή της ανάλογα με τις κυματικές συνθήκες που επικρατούν.
4. Ελαχιστοποίηση του χρόνου κατασκευής στο χώρο εφαρμογής, αφού η τοποθέτηση των πλωτών κυματοθραυστών επιτυγχάνεται εντός λίγων ημερών. Επιπλέον αποφεύγεται η παρακώλυση των καθημερινών δραστηριοτήτων της περιοχής από τις εργοταξιακές διαταράξεις που θα λάμβαναν χώρο εάν επιλέγονταν μόνιμες κατασκευές.
5. Τέλος, επιτυγχάνεται αύξηση του χρόνου ζωής του έργου αλλά και οικονομία στην επισκευή του σε περίπτωση αστοχίας, αφού στη χειρότερη περίπτωση αυτό συνεπάγεται αποσύνδεση και παράσυρση των πλωτήρων, εν αντιθέσει με τις καθολικές καταστροφές στα μόνιμα έργα.



Βασιζόμενοι στα προηγούμενα, μπορούμε να δώσουμε κάποια παραδείγματα εφαρμογής των πλωτών κυματοθραυστών.

- Σε περιοχές ήπιου κυματικού κλίματος (ημιπροστατευμένοι όρμοι, ήδη προστατευμένες λιμενολεκάνες από κλασικούς κυματοθραύστες με αυξημένες απαιτήσεις ελέγχου των κυματικών συνθηκών), όπου επικρατούν κύματα ύψους 1 έως 1,5 μέτρου, με ακραίους κυματισμούς της τάξης των 2-3 μέτρων.
- Σε περιοχές όπου επικρατούν πιο ακραίες κυματικές συνθήκες, αλλά οι απαιτήσεις μας περιορίζονται στην εποχιακή μείωσή τους κατά την περίοδο της χαμηλής κυματικής ενέργειας. Τέτοιες είναι οι τουριστικές ακτές ή οι λιμένες καταφύγια των τουριστικών σκαφών, περιπτώσεις που συναντώνται κατά κόρον στην Ελλάδα τους θερινούς μήνες.
- Αρκετές είναι οι περιπτώσεις που η χρήση των πλωτών κυματοθραυστών μας επιβάλλεται λόγω του μεγάλου θαλάσσιου βάθους (>10-15 μέτρων) στο χώρο εφαρμογής της κατασκευής, έναντι των κλασικών ολόσωμων φορέων που μεγιστοποιούν το κόστος.
- Σε περιοχές που το φαινόμενο της διάβρωσης των ακτών επιβάλλει τη δημιουργία έργων ήπιου χαρακτήρα για την ημιπροστασία τους.
- Σε περιοχές οικολογικά ευαίσθητες και διαφυλακτέες η λύση των πλωτών κυματοθραυστών είναι ουσιαστικά μονόδρομος.

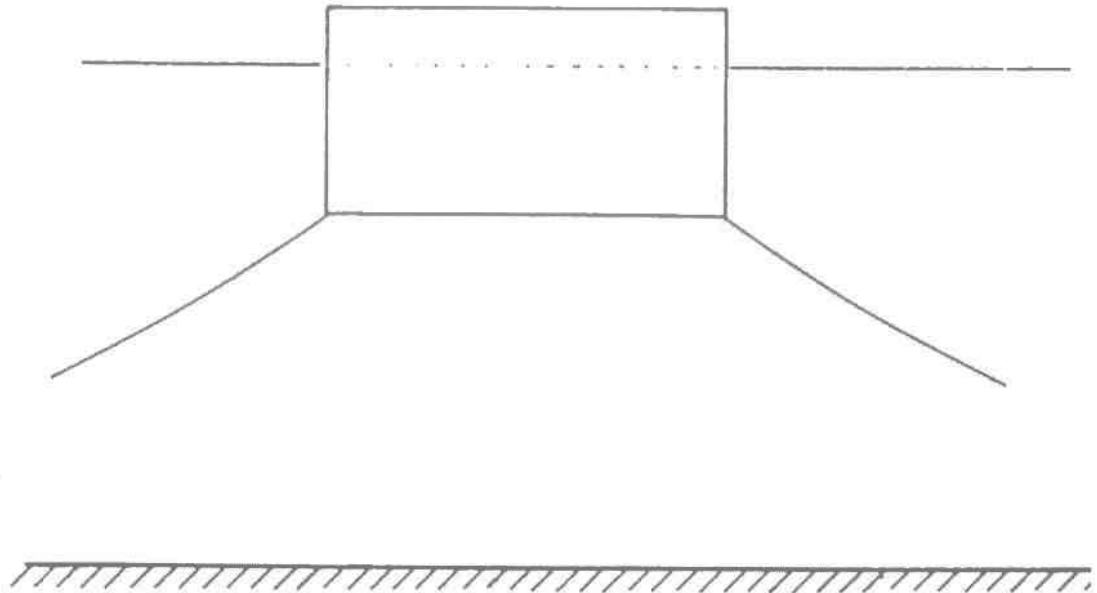
Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι πέραν των κλασικών τύπων πλωτών κυματοθραυστών, έχουν κατά καιρούς διερευνηθεί και δοκιμασθεί πολλές άλλες διατάξεις με χρήση ποικίλων υλικών και με προτίμηση στα οικονομικά προσφορότερα. Η επιτυχία των ερευνών αυτών κυμαίνεται ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της κάθε περίπτωσης χωρίς ποτέ να είναι θεαματική. Ορισμένοι βασικοί και δοκιμασμένοι τύποι δίνονται στα Σχήματα 1.1-1.10.



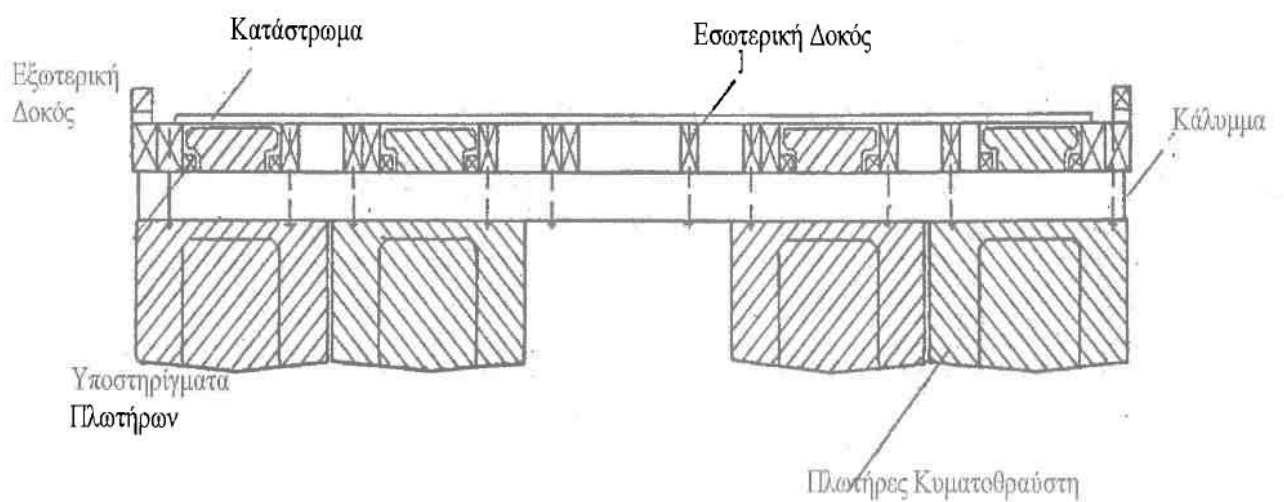
### 1.3 Δομή της εργασίας

Η παρούσα εργασία περιλαμβάνει έξι κεφάλαια. Πιο συγκεκριμένα, στο πρώτο κεφάλαιο δίνονται κάποιες εισαγωγικές έννοιες και σκέψεις όσον αφορά τη χρησιμότητα, τα πλεονεκτήματα και τις εφαρμογές των πλωτών κυματοθραυστών. Το δεύτερο, αναφέρεται στις αναλυτικές λύσεις υπολογισμού των συντελεστών διάδοσης και ανάκλασης σε σταθερούς πλωτούς κυματοθραύστες. Το κεφάλαιο 3 ασχολείται με την ευστάθεια, τον δυναμικό και τον στατικό υπολογισμό των κυματοθραυστών, καθώς και τον υπολογισμό και τη διαδικασία αγκύρωσής τους. Στο τέταρτο κεφάλαιο αναπτύσσεται μία απλή τεχνική εισαγωγής της επίδρασης των πλωτών κυματοθραυστών σε δυσδιάστατα μοντέλα μετάδοσης κυματισμών υπερβολικής μορφής. Ακολουθεί στο πέμπτο κεφάλαιο μια εφαρμογή των παραπάνω στο Λιμένα του Μαρμαρά όπου υπολογίζουμε τη μετάδοση των κυματισμών στο εσωτερικό του και το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την επίτευξη όλων αυτών. Τέλος, το κεφάλαιο 6 περιλαμβάνει συνοπτικά τα συμπεράσματα στα οποία καταλήγουμε μέσω της συνολικής διαδικασίας εκπόνησης της εργασίας.

## 1.4 Είδη Πλωτών Κυματοθραυστών

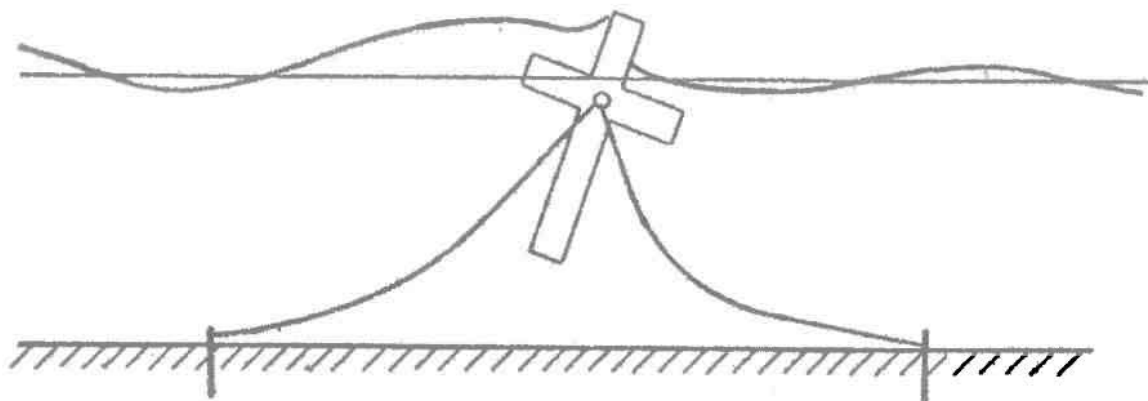


Σχήμα 1.1 Πλωτός κυματοθραύστης ορθογωνικής διατομής.

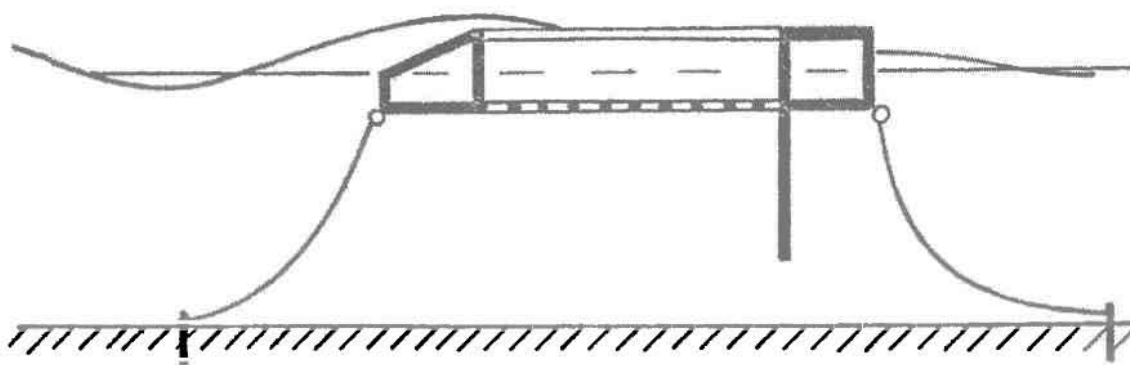


Σχήμα 1.2 Πλωτός κυματοθραύστης του λιμένα "Friday"

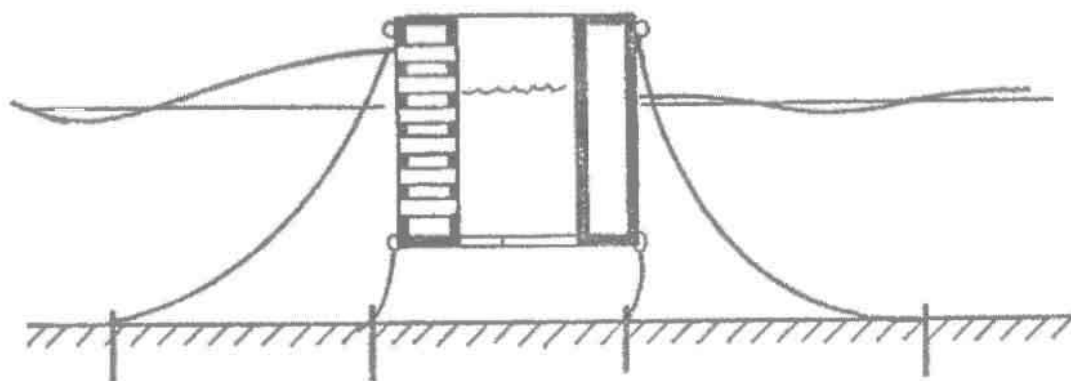




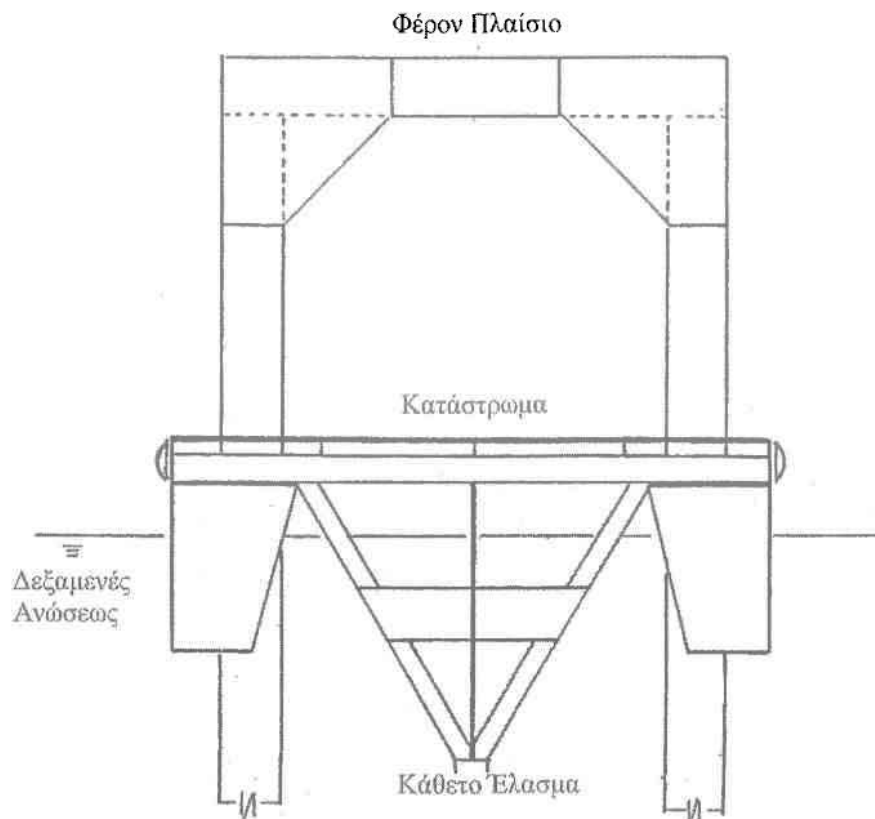
Σχήμα 1.3 Πλωτός κυματοθραύστης τύπου “Bombardon”



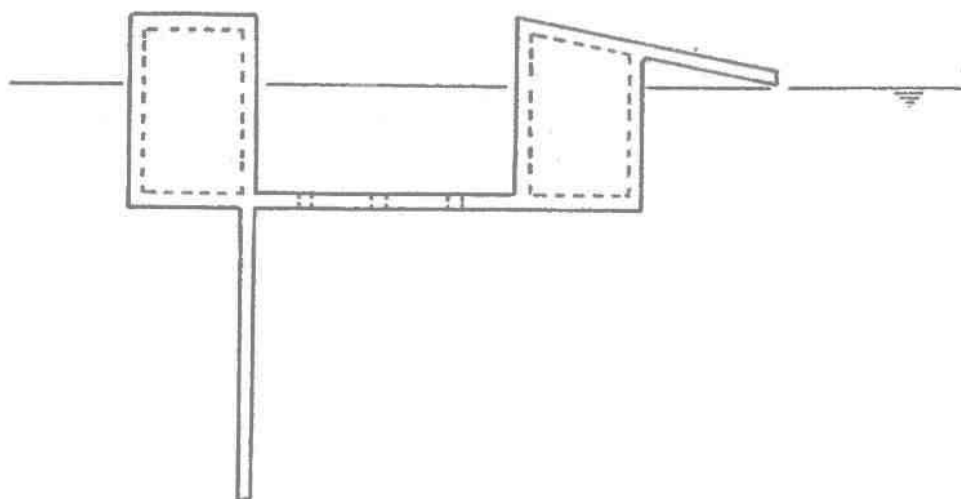
Σχήμα 1.4 Πλωτός κυματοθραύστης με διάτρητο πυθμένα



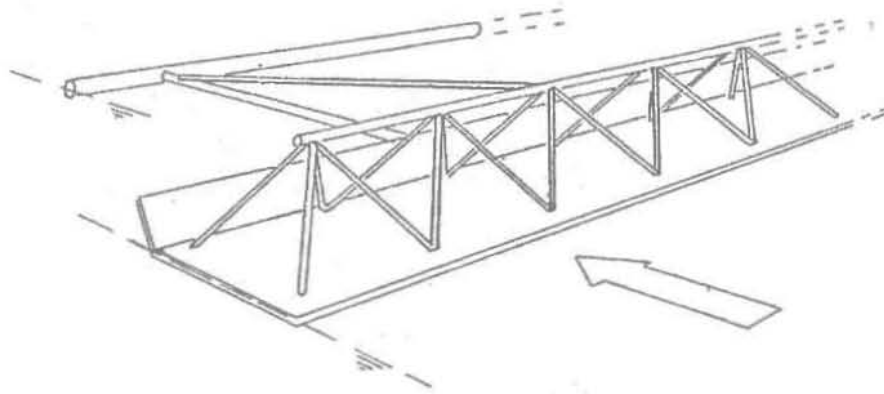
Σχήμα 1.5 Πλωτός κυματοθραύστης με διάτρητα τοιχώματα



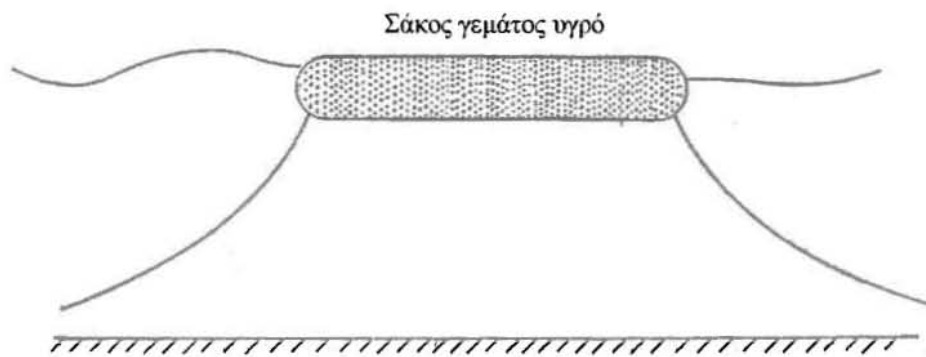
Σχήμα 1.6 Πλωτός κυματοθραύστης τύπου “Winter”



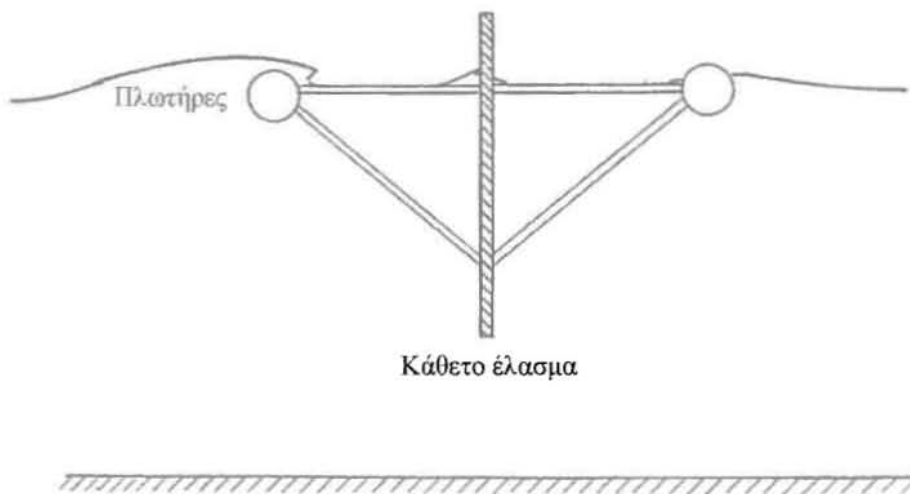
Σχήμα 1.7 Πλωτός κυματοθραύστης τύπου “Reservoir-Marina”



Σχήμα 1.8 Πλωτός κυματοθραύστης τύπου “Seabreaker”



Σχήμα 1.9 Πλωτός κυματοθραύστης τύπου “Hovering”



Σχήμα 1.10 Πλωτός κυματοθραύστης τύπου “Σχήματος -Α-”

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

**Αναλυτικές λύσεις συντελεστή  
διάδοσης και ανάκλασης**



## Κεφάλαιο 2 - Αναλυτικές λύσεις συντελεστή διάδοσης και ανάκλασης

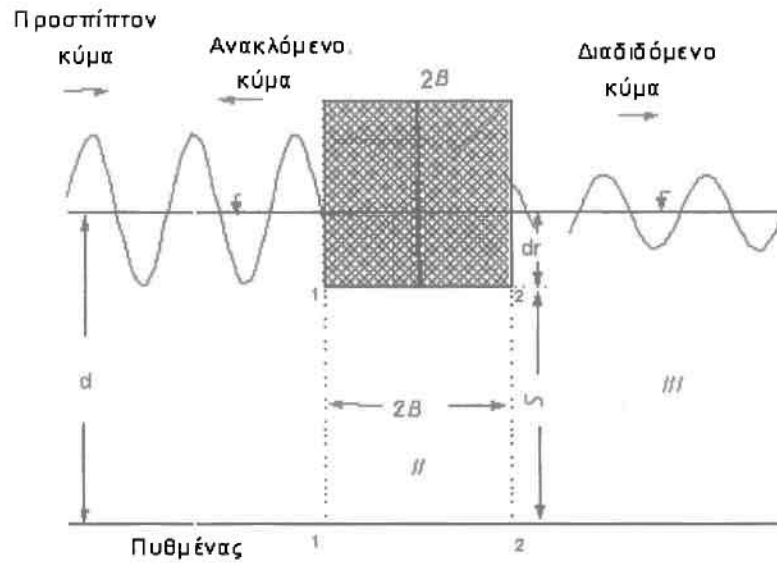
Στο κεφάλαιο αυτό, βασιζόμενοι σε κάποιες αναλυτικές λύσεις και παραδοχές, θα προσπαθήσουμε να υπολογίσουμε το συντελεστή διάδοσης  $C_t$  (transmission coefficient) και το συντελεστή ανάκλασης  $C_r$  (reflection coefficient). Ο πρώτος ορίζεται ως ο λόγος του ύψους του διαδιδόμενου κύματος στα κατάντη προς το προσπίπτων, ενώ ο δεύτερος είναι ο λόγος του ύψους του ανακλώμενου κύματος στα ανάντη προς το ύψος του προσπίπτοντος κύματος.

### 2.1 Κατάστρωση του μαθηματικού προβλήματος.

Για το ολοκληρωμένο πρόβλημα του πλωτού σώματος δεν υπάρχουν ακριβείς αναλυτικές επιλύσεις, αλλά οι λύσεις που προκύπτουν πλαισιώνονται από κάποιες παραδοχές. Στη σημερινή εποχή βέβαια, με τις αλματώδεις τεχνολογικές εξελίξεις και την απεριόριστη υπολογιστική ισχύ που μας προσφέρεται, η εύρεση μιας πολυσύνθετης αναλυτικής λύσης ίσως να μην είναι και απαραίτητη. Η αναλυτική λύση που ακολουθεί αναπτύχθηκε από τους Drimer N., Agnon Y. και Stiassie M. (1991).

Θεωρούμε κυματοθραύστη ορθογωνικής μορφής, άκαμπτο, σταθερό και ακίνητο στο χώρο με πλάτος  $2B$  κατά τον άξονα  $x$ , άπειρο κατά τον άξονα  $y$  και βύθισμα δεδομένο  $d_r$ . Ορίζουμε καρτεσιανό σύστημα με  $x, y$  συντεταγμένες, στην ελεύθερη επιφάνεια και στο μέσο του κυματοθραύστη, ενώ ο  $z$  άξονας είναι κατακόρυφος με φορά προς τα πάνω. Ακόμα θεωρούμε το βάθος του νερού  $d$  και την απόσταση μεταξύ της βάσης του κυματοθραύστη και του πυθμένα της θάλασσας ίση με  $S$ . Για μεγαλύτερη απλούστευση και μεγαλύτερη προσέγγιση του θέματος εξετάζουμε μόνο την κατάσταση όπου ο πλωτός κυματοθραύστης είναι σταθερός και ακίνητος σε μια θέση. Το υπολογιστικό πεδίο χωρίζεται σε τρία τμήματα. Στα δύο τμήματα δεξιά (I) και αριστερά (III) του κυματοθραύστη εφαρμόζεται το ολοκληρωμένο ως προς το βάθος κυματικό μοντέλο (Σχήμα 2.1).





Σχήμα 2.1 Γεωμετρική διάταξη πεδίου και χαρακτηριστικά πλωτού κυματοθραύστη

Χρησιμοποιείται η γραμμική θεωρία μακρών κυματισμών και η ταχύτητα του σώματος καθορίζεται από τη συνάρτηση δυναμικού  $\Phi$ .

$$\Phi(y,z,t) = \text{Re}[\varphi(y,z)e^{-i\omega t}] \quad (2.1)$$

όπου :  $t$  ο χρόνος,  $\omega$  η γωνιακή ταχύτητα και  $i = \sqrt{-1}$

Η χρονικά εξαρτημένη συνάρτηση του δυναμικού  $\varphi$  ικανοποιεί τις ακόλουθες οριακές συνθήκες :

Εξίσωση Laplace :

$$\nabla^2 \varphi = 0 \quad \text{στην περιοχή της ροής} \quad (2.2)$$

Ελεύθερη επιφάνεια :

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} = \sigma \varphi \quad , \quad \text{για } z = 0, y > B \quad (2.3)$$

όπου  $\sigma = \omega^2/g$

Στον πυθμένα :

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0 \quad , \quad \text{για } z = h \quad (2.4)$$

Στερεό σώμα :

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad , \text{ στην επιφάνεια του σώματος} \quad (2.5)$$

όπου  $n$ , μια διανυσματική μονάδα κάθετη στην επιφάνεια του σώματος

Η συνάρτηση του δυναμικού μπορεί να αποσυντεθεί σε τέσσερα μέρη:

$$\Phi(y, z, t) = \text{Re} \{ \phi_1(y, z) * e^{-i\omega t} \} \quad (2.6)$$

όπου  $\phi_1$  είναι η χρονικά ανεξάρτητη συνάρτηση του δυναμικού  $\phi$  (λόγω ενός προσπίπτοντος κυματισμού)

Όσον αφορά την περιοχή II (σχήμα 2.1) η συνάρτηση ροής είναι το άθροισμα μιας συνάρτησης που ικανοποιεί τις εξισώσεις (2.2), (2.4) και (2.5) και μιας ομεγενοούς συνάρτησης που ικανοποιεί :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad -B < y < B, -h < z < -d \\ \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad \text{για} \quad z = -h \quad \text{και} \quad z = -d \end{array} \right\} \quad (2.7)$$

Εφόσον ο πλωτός κυματοθραύστης παρουσιάζει κατακόρυφη συμμετρία, θεωρείται πρόσφορο να αντιμετωπιστούν ξεχωριστά οι συμμετρικές με τις αντισυμμετρικές ροές.

Μια γενική λύση της εξίσωσης (2.7) θα είναι της μορφής :

$$\phi^{\left( \begin{smallmatrix} S \\ A \end{smallmatrix} \right)} = \left[ \begin{array}{l} A_0 \\ B_0 y \end{array} \right]_{E_0} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \begin{array}{l} A_n \\ B_n \end{array} \right]_{E_n} \left[ \begin{array}{l} \cosh(Q_n y) \\ \sinh(Q_n y) \end{array} \right] \quad (2.8)$$



όπου: (S) για συμμετρικές και (A) αντισυμμετρικές ροές αντίστοιχα.

$F_n(n=0,1,\dots)$  είναι ένα ολοκληρωμένο σύνολο ορθοκανονικών συναρτήσεων στο διάστημα  $(-h,0)$  που δίνεται από :

$$F_0 = S^{-1/2}, \quad F_n = \sqrt{2} \cdot S^{-1/2} \cos[Q_n(z+h)], \\ Q_n = n\pi/S, \quad (n=1,2,\dots)$$

### Το πρόβλημα της διασποράς

Η συνάρτηση δυναμικού της διασποράς μπορεί να αποσυντεθεί στα συμμετρικά και στα αντισυμμετρικά στοιχεία. Μια γενική λύση στην περιοχή I που ικανοποιεί την εξίσωση Laplace και τους περιορισμούς της ελεύθερης επιφάνειας και του πυθμένα θα είναι της μορφής :

$$\Phi = \text{Re}[\varphi^{(S)} + \varphi^{(A)} e^{-i\omega t}],$$

$$\varphi^{(S)} = \left\{ \begin{matrix} a_{7,0} \\ b_{7,0} \end{matrix} \right\} f_0 [e^{ik(y+B)} + R^{(A)} e^{-ik(y+B)}] + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \begin{matrix} a_{7,n} \\ b_{7,n} \end{matrix} \right\} f_n e^{k_n(y+B)} \quad y \leq -B \quad (2.10)$$

Απ' τον ορισμό της συμμετρίας και της αντισυμμετρίας σε σχέση με τη θέση  $y=0$ , η συνάρτηση δυναμικού στα δεξιά του πλωτού κυματοθραύστη παίρνει τη μορφή :

$$\Phi(+y,z,t) = \text{Re}\{[\varphi^{(S)}(-y,z) - \varphi^{(A)}(-y,z)]e^{-i\omega t}\}, \quad y \geq B \quad (2.11)$$

όπου  $f_n(n=0,1,\dots)$  είναι ένα ολοκληρωμένο σύνολο ορθοκανονικών συναρτήσεων στο διάστημα  $(-h,0)$  που δίνεται από :

$$f_0 = \frac{\sqrt{2} \cosh[k(z+h)]}{[h + \sigma^{-1} \sinh^2(kh)]^{1/2}}$$

$$f_n = \frac{\sqrt{2} \cos[k_n(z+h)]}{[h - \sigma^{-1} \sin^2(k_n h)]^{1/2}}, \quad (n=1,2,\dots) \quad (2.12)$$

όπου :  $k$  είναι ο αριθμός του προσπίπτοντος κυματισμού που ικανοποιεί τη λειτουργία της διασποράς

$$\sigma = k \cdot \tanh(kh) \quad (2.13)$$

$k_n$  είναι οι θετικές ρίζες της εξίσωσης

$$\sigma = -k_n \cdot \tanh(k_n h) \quad (2.14)$$

Εύκολα διαπιστώνουμε απ' τις εξισώσεις (2.10) και (2.11) ότι για  $|y| \rightarrow \infty$  οι διαδιδόμενοι κυματισμοί έχουν τα παρακάτω μιγαδικά εύρη:

- Στα αριστερά του κυματοθραύστη :

$a_{7,0} + b_{7,0}$  που ανταποκρίνονται στην κίνηση του κύματος προς τα δεξιά,

$a_{7,0}R^{(S)} + b_{7,0}R^{(A)}$  που ανταποκρίνονται στο ανακλώμενο κύμα προς τα αριστερά,

- Στα δεξιά του κυματοθραύστη :

$a_{7,0}R^{(S)} + b_{7,0}R^{(A)}$  που ανταποκρίνονται στο μεταδιδόμενο κύμα που κινείται προς τα δεξιά,

$a_{7,0} + b_{7,0}$  που ανταποκρίνονται στο κύμα που κινείται προς τα δεξιά.

Το τελευταίο κύμα δεν ικανοποιεί τη συνθήκη ακτινοβολίας και ως εκ τούτου δε θα ληφθεί υπόψη.

Χρησιμοποιώντας τη γραμμική σχέση ανάμεσα στη συνάρτηση δυναμικού και στην ελεύθερη επιφάνεια :

$$\eta = -g \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad \text{για} \quad z = 0$$

Έχουμε  $a_{7,0} = b_{7,0} = -iag/2\omega f_0(0)$

όπου  $a$  είναι το εύρος του προσπίπτοντος κυματισμού

Οι τιμές για τους συντελεστές ανάκλασης και διάδοσης δίνονται ως

$$\begin{pmatrix} R \\ T \end{pmatrix} = \frac{1}{2} (R^s \pm R^A) \quad (2.16)$$



Σύμφωνα με τις υποθέσεις μας, η συνάρτηση δυναμικού στην περιοχή II θα έχει τη μορφή

$$\Phi = \text{Re}[(uy + \varphi_0)e^{-i\omega t}], \quad -B \leq y \leq 0 \quad (2.17)$$

Εφαρμόζουμε την αρχή της συνέχειας της οριζόντιας ταχύτητας για  $y = -B$

$$\frac{\partial}{\partial y} \phi(y = -B) = \begin{cases} 0 & -d < z < 0 \\ u & -h < z < -d \end{cases} \quad (2.18)$$

Χρησιμοποιώντας την ορθοκανονικότητα της  $\{f_n\}$  μπορούμε να εκφράσουμε τις άγνωστες σταθερές της εξίσωσης (7) σε όρους της  $u$ :

$$R^s = 1, a_{7,0} = 0 \quad (n=1,2,\dots) \quad (2.19)$$

$$R^A = 1 + iU_0u/ka_{7,0}, \quad b_{7,0} = U_nu/k_n, \quad (n=1,2,\dots) \quad (2.20)$$

$$\text{όπου} \quad U_n = \int_{-h}^{-d} f_n dz \quad (n=0,1,2,\dots) \quad (2.21)$$

Η άγνωστη  $u$  θα βρεθεί από την ολοκλήρωση ως προς το βάθος της ισοροπίας της ορμής στην περιοχή II:

$$F = \int_{-h}^{-d} [P(-B, z) - P(B, z)] dz = mV, \quad m = 2\rho BS \quad (2.22)$$

όπου  $P$  είναι η υδροδυναμική πίεση που δίνεται από τη γραμμικοποιημένη εξίσωση

$$\text{του Bernoulli:} \quad P = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (2.23)$$

αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (2.19), (2.20), (2.10) και (2.23) στην (2.22) έχουμε :

$$u = - \frac{2a_{7,0}U_0}{SB + \frac{iU_0^2}{k} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{U_n^2}{k_n}} \quad (2.24)$$





Τελικά, οι τιμές για τους συντελεστές ανάκλασης και διάδοσης μπορούν να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (2.16), (2.19), (2.20) και (2.24) :

$$T = \frac{iU^2 / k}{SB + \frac{iU^2}{k} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{U_n^2}{k_n}} \quad (2.25)$$

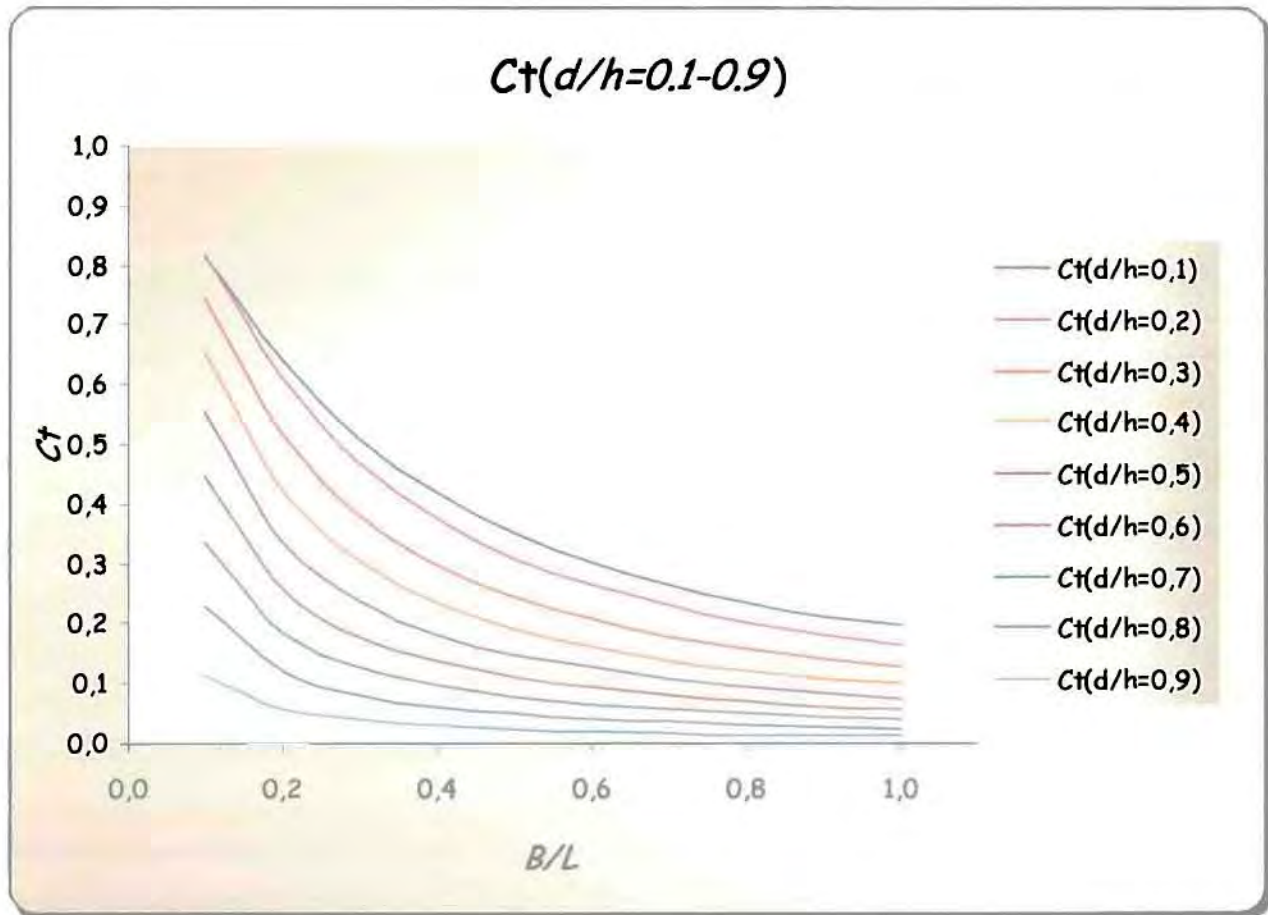
$$R = 1 - T$$

## 2.2 Εφαρμογές

Βασισμένοι στις παραπάνω αναλυτικές λύσεις των Drimer N., Agnon Y. και Stiassie M. για τον υπολογισμό των συντελεστών διάδοσης  $C_t$  (transmission coefficient) και ανάκλασης  $C_r$  (reflection coefficient) καταστρώνουμε στη Fortran το πρόγραμμα RandT.for (Παράρτημα Α) στο οποίο εισάγουμε ως δεδομένα την περίοδο κύματος  $T_s$  σε sec, το μήκος του κυματοθραύστη  $L$  σε m, το βύθισμα του κυματοθραύστη  $a$  σε m και το βάθος του πυθμένα σε m, και ως αποτέλεσμα παίρνουμε την τιμή του συντελεστή διάδοσης  $C_t$ . Το συγκεκριμένο πρόγραμμα αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο στην διεκπεραίωση της εργασίας μας εφόσον δυνάμεθα να υπολογίσουμε, για διαφορετικές τιμές γεωμετρικών συνθηκών του κυματοθραύστη αλλά και διαφορετικών κυματικών και γεωμορφολογικών συνθηκών της υπό εξέταση λιμενολεκάνης, την εκάστοτε αποτελεσματικότητα του τεχνικού έργου, που συνοψίζεται στην τιμή  $C_t$ .

Για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων τρέχουμε το πρόγραμμα για ένα μεγάλο εύρος τιμών, αφού προηγουμένως έχουμε αδιαστατοποιήσει τα διάφορα μεγέθη. Έτσι, θέτοντας στο λόγο του βυθίσματος του κυματοθραύστη προς το βάθος της θάλασσας ( $d/h$ ) τιμές από 0,1 έως 0,9 και υπολογίζοντας τις περιόδους κύματος  $T_s$  για κάθε ένα λόγο του μήκους του κυματοθραύστη προς το μήκος κύματος ( $B/L$ ) από 0,1 έως 1, παίρνουμε τελικά τους αντίστοιχους συντελεστές διάδοσης  $C_t$ . Όλα τα παραπάνω μεταφέρονται σε φύλλα εργασίας του Excel υπό μορφή διαγραμμάτων ώστε τα συμπεράσματα να είναι άμεσα και η ανάλυσή τους διεξοδική.

Συγκεντρωτικά, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα, ενώ μια πιο αναλυτική προσέγγιση υπάρχει στο παράρτημα της εργασίας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε μορφή νομογραφημάτων για μια άμεση και πρόχειρη εκτίμηση της αποτελεσματικότητας του πλωτού κυματοθραύστη, σε κάθε περίπτωση.

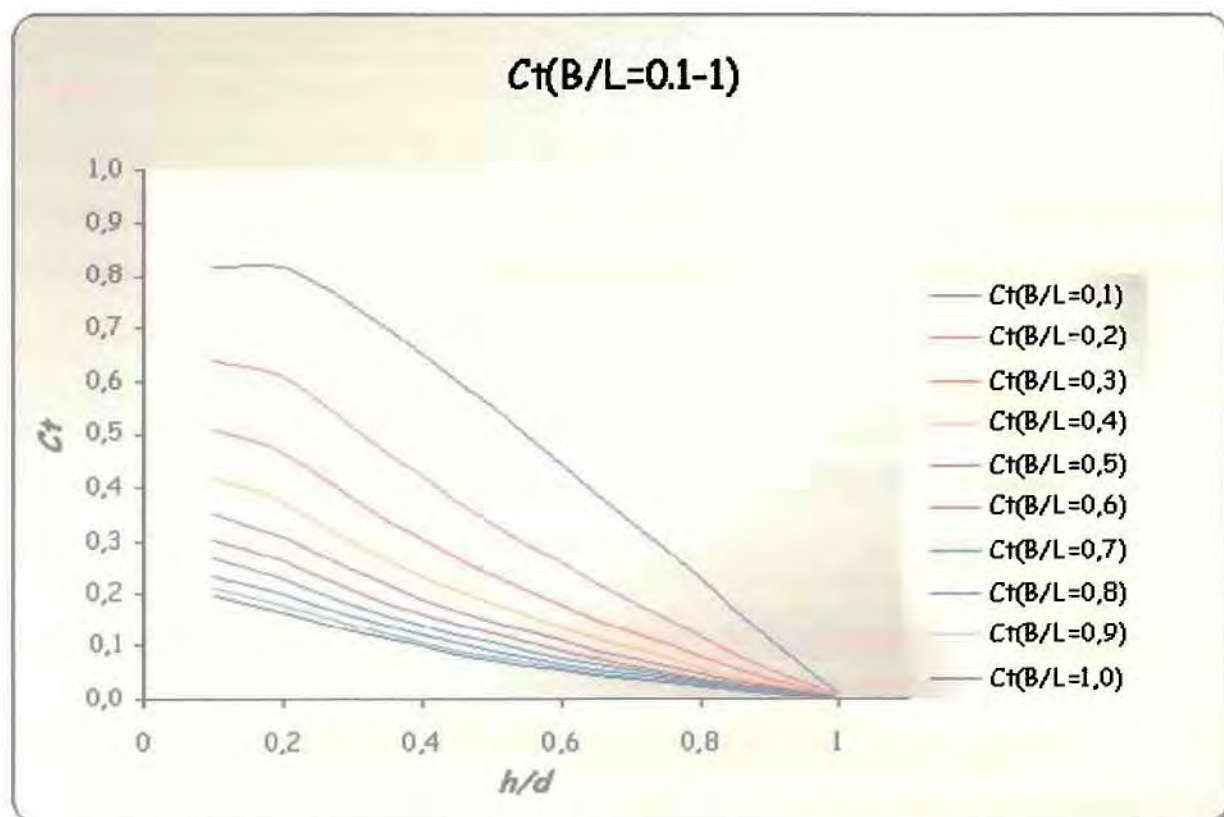


**Γράφημα 2.1**

Από το γράφημα αυτό δυνάμεθα να βγάλουμε κάποια πολύ σημαντικά συμπεράσματα -όσον αφορά τη λειτουργία του πλωτού κυματοθραύστη-. Παρατηρούμε αρχικά, ότι διατηρώντας σταθερό το αδιάστατο μέγεθος  $d/h$  (βύθισμα κυματοθραύστη προς βάθος της θάλασσας) και αυξάνοντας το  $B/L$  (μήκος του κυματοθραύστη προς μήκος κύματος  $L$ ), ο συντελεστής διάδοσης  $C_t$  μειώνεται μέχρι ενός σημείου όπου σταθεροποιείται. Αν θεωρήσουμε δηλαδή ότι το μήκος κύματος δε μεταβάλλεται, συμπεραίνουμε ότι *όσο μεγαλύτερο το μήκος του κυματοθραύστη, τόσο μικρότερο το διαδιδόμενο κύμα*. Όμοια, αν διατηρήσουμε τα γεωμετρικά

χαρακτηριστικά του κυματοθραύστη σταθερά και μεταβάλλουμε το μήκος κύματος και κατ'επέκταση την περίοδο του κύματος  $T_s$ , παρατηρούμε ότι όσο μειώνεται η περίοδος τόσο μειώνεται και ο συντελεστής διάδοσης, συνεπώς ο κυματοθραύστης θεωρείται πιο αποτελεσματικός. Επιπλέον, παρατηρούμε ότι η γραμμή τάσης των δεδομένων μας είναι η λογαριθμική, η οποία προσεγγίζει το γράφημα σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό και τείνει στο τέλος να αποκτήσει σταθερή τιμή.

Για την εξαγωγή επιπρόσθετων συμπερασμάτων θέσαμε στο λόγο του μήκους του κυματοθραύστη προς το μήκος κύματος ( $B/L$ ) τιμές από 0,1 έως 1 και για κάθε μια υπολογίσαμε το συντελεστή διάδοσης  $C_t$  για τιμές ( $d/h$ ) από 0 έως 1. Τα αποτελέσματα της εργασίας αυτής απεικονίζονται στο παρακάτω γράφημα.



**Γράφημα 2.2**

Είναι εύκολα αντιληπτό ότι για σταθερό  $B/L$ , όσο αυξάνεται η βύθιση του πλωτού κυματοθραύστη τόσο αποτελεσματικότερα λειτουργεί αυτός. Επιπλέον, μπορούμε να συμπεράνουμε –βασισόμενοι και στα δύο γραφήματα–, ότι με τη μείωση



του μήκους κύματος ή της περιόδου, κάτι που συνεπάγεται την αύξηση του βάθους των νερών στο οποίο τοποθετείται ο πλωτός κυματοθραύστης, τόσο μικρότερος είναι ο συντελεστής διάδοσης και άρα η επιτυγχάνεται ικανοποιητικότερη μείωση των κυματισμών.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

**Ευστάθεια, Στατική και  
Υδροδυναμική συμπεριφορά του  
Πλωτού Κυματοθραύστη**





## Κεφάλαιο 3 –Ευστάθεια, Στατική και Υδροδυναμική συμπεριφορά του Πλωτού κυματοθραύστη

### 3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα εξεταστεί η ευστάθεια ενός πλωτού κυματοθραύστη για τα φορτία λειτουργίας και θα δοθεί μια σύντομη ερμηνεία της υδροδυναμικής και της στατικής συμπεριφοράς των πλωτών κυματοθραυστών. Για μεγαλύτερη διευκόλυνση των υπολογισμών γίνεται η απλουστευμένη θεώρηση ενός ορθογωνικού ανεξάρτητου κυματοθραύστη με μοναδική αγκύρωση στον πυθμένα της λιμενολεκάνης. Εν συνεχεία θα γίνει υπολογισμός των δυνάμεων που ασκούνται στις αλυσίδες αγκύρωσης, προκειμένου να αποκτήσουμε μια εκτίμηση για τη δυνατότητα ή μη, ασφαλούς πρόσδεσης των κυματοθραυστών στις πιο ακραίες κυματικές συνθήκες.

### 3.2 Πλευστότητα και ευστάθεια κυματοθραύστη

Η πλευστότητα και η ευστάθεια είναι πρωταρχικής σημασίας ιδιότητες ενός επιπλέοντος σώματος. Η πρώτη εξαρτάται απ'την ύπαρξη ισορροπίας ανάμεσα στη δύναμη άνωσης  $A$  που ασκείται στον πλωτό κυματοθραύστη και στο συνολικό βάρος του  $W$  (χωρίς να συνυπολογίζεται το επιπλέον φορτίο). Στην πιο απλή περίπτωση θεωρούμε ότι και οι δύο δυνάμεις δρουν ως συγκεντρωμένα φορτία στο κέντρο άνωσης και στο κέντρο βάρους αντίστοιχα. Ο άξονας που διέρχεται απ'τα δύο αυτά σημεία ονομάζεται άξονας της επίπλευσης  $OO'$  σύμφωνα με το σχήμα 3.1. Απ'την κατάσταση ισορροπίας έχουμε:

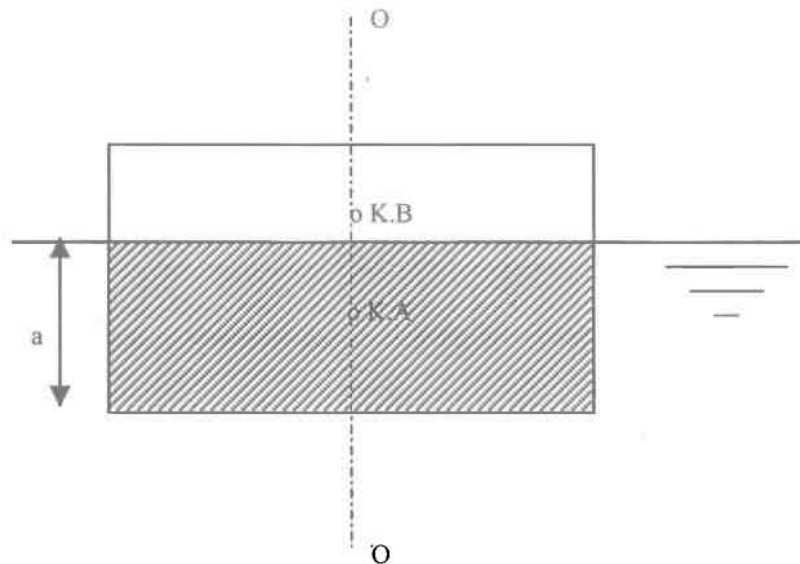
$$W = A$$

$$W = \gamma * b * \alpha$$

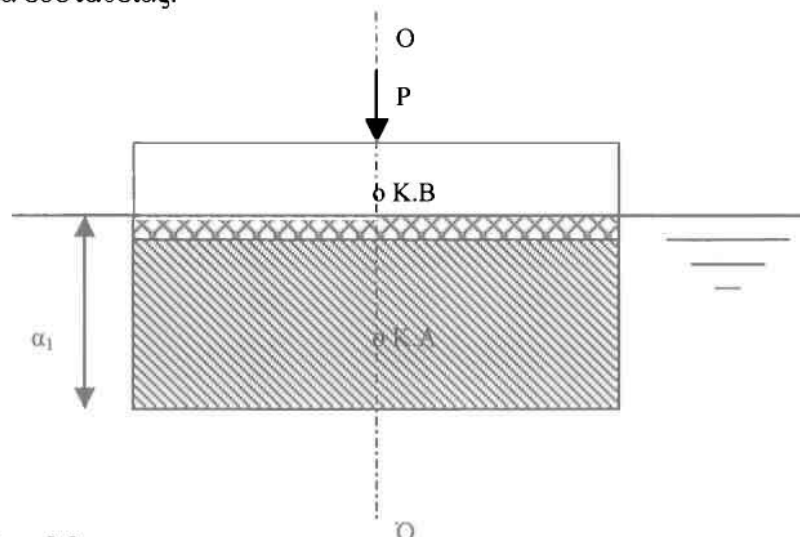
όπου  $\gamma$ :ειδικό βάρος του νερού

$b$ :το πλάτος του κυματοθραύστη

$\alpha$ :το βύθισμα του κυματοθραύστη

**Σχήμα 3.1**

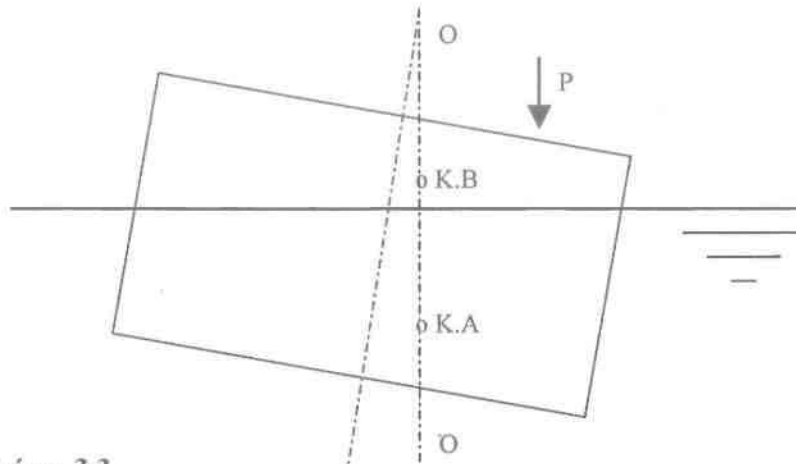
Ευστάθεια του πλωτού κυματοθραύστη, ορίζεται η ιδιότητα του σώματος να εξισορροπεί τις στιγμιαίες δράσεις που τείνουν να το ανατρέψουν. Αν στον υπολογισμό της δύναμης του βάρους προστεθεί και ένα επιπλέον μη μόνιμο φορτίο  $P$  και εφόσον θεωρηθεί ότι αυτό ασκείται στον άξονα επίπλευσης  $OO'$ , τότε η δύναμη της άνωσης αυξάνεται προκειμένου να επιτευχθεί η απαιτούμενη ισορροπία, αλλά δεν τίθεται θέμα ευστάθειας.

**Σχήμα 3.2**

Στη δυσμενή όμως περίπτωση που το επιπλέον φορτίο  $P$  εφαρμόζεται αντί του άξονα επίπλευσης  $OO'$ , στη μία πλευρά του επιπλέοντος σώματος, τότε δημιουργείται τάση ανατροπής. Εφόσον το συνολικό βάρος του κυματοθραύστη παραμένει σταθερό σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση, η πλευστότητα δε



μεταβάλλεται. Παρά ταύτα, το νέο κέντρο βάρους του συστήματος μετατοπίζεται προς τη μεριά που προστέθηκε το επιπλέον φορτίο και προκειμένου να ικανοποιηθούν οι συνθήκες ισορροπίας το ίδιο συμβαίνει και με το κέντρο άνωσης Σχήμα 3.3. Επομένως, κάθε αύξηση του φορτίου  $P$  αυξάνει και την τάση ανατροπής έως ότου για κάποια τιμή του θα αναποδογυρίσει.



Σχήμα 3.3

Έστω ότι το φορτίο  $P$  επιδρά στο ήμισυ της επιφάνειας και το σώμα βυθίζεται στη μια πλευρά του έως την ακμή. Τότε :

$$P+W=A$$

$$W=\gamma_{\sigma} \cdot h^2 \cdot b$$

$$A=\gamma \cdot b/2 \cdot (a+h) \cdot h$$

όπου :  $h$  το ύψος του σώματος

$\gamma$  το ειδικό βάρος νερού

$\gamma_{\sigma}$  το ειδικό βάρος του σώματος

Αν η απόσταση του σημείου εφαρμογής του φορτίου από την ακμή είναι  $b/4$  λαμβάνοντας το άθροισμα των ροπών ως προς το σημείο αυτό έχουμε :

$$P \cdot b/4 - A \cdot \xi + W \cdot b/2 = 0$$



όπου  $\xi$  η απόσταση του σημείου εφαρμογής της άνωσης  $A$  από την ακμή και δίνεται από την σχέση :

$$\xi = b/3 \cdot (h+2a)/(h+a)$$

Η απαλοιφή του  $\xi$  και του  $a$  οδηγούν στον υπολογισμό του μέγιστου φορτίου  $P$  :

$$P = b/2,5 \cdot h^2 \cdot (\gamma - \gamma_\sigma)$$

### 3.3 Στατική επάρκεια

Ο πιο κρίσιμος έλεγχος του πλωτού κυματοθραύστη ως προς τη στατική επάρκειά του σε φορτία περιβάλλοντος αφορά τη φόρτιση από κυματισμούς που προελαύνουν κατά μήκος του άξονά του. Λόγω της ομοιόμορφης δομής κατά μήκος του πλωτού μέσου ο τελευταίος δεν αναλαμβάνει φορτία λόγω ιδίου βάρους εφόσον ηρεμεί. Εάν θεωρήσουμε κατ'αρχήν το μήκος του  $L_s$  ίσο με το μήκος κύματος  $L$  των επερχόμενων κυματισμών, τότε μια δυσμενής φόρτιση εμφανίζεται όταν η κορυφή του κύματος διέρχεται από το μέσον του μήκους του κυματοθραύστη (Σχ.3.4).

Η τέμνουσα δύναμη  $V_x$  σε κάθε θέση  $x$  του κυματοθραύστη οφείλεται στη διαφορά μεταξύ άνωσης και βάρους κατασκευής που αναπτύσσεται λόγω της διέλευσης του κυματισμού και της συνεπαγόμενης μεταβολής της ελεύθερης επιφάνειας του νερού, δηλαδή με το συμβολισμό του σχήματος 3.4 έχουμε,

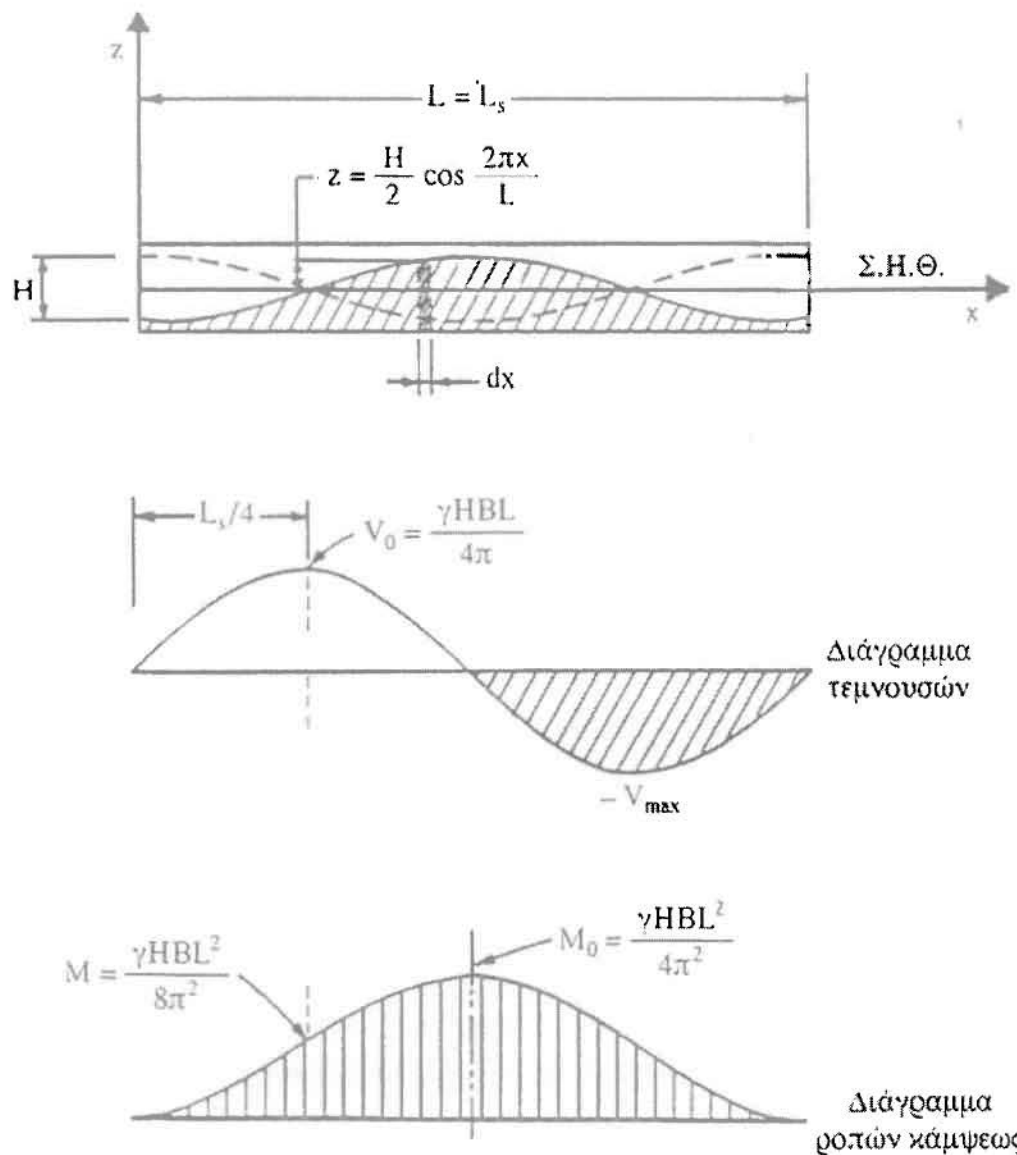
$$V_x = \int_0^x (b_x - w) dx \quad (3.1)$$

όπου  $b_x$  η άνωση στη θέση  $x$

$w$  το βάρος ανά μονάδα μήκους της ομογενούς κατασκευής

Αντίστοιχα η ροπή κάμψεως θα δίδεται από τη σχέση

$$M_x = \int_0^x V_x dx \quad (3.2)$$



**Σχήμα 3.4** Φορτίσεις πλωτού κυματοθραύστη μήκους  $L_s$  από απλό κυματισμό μήκους κύματος  $L=L_s$

Θεωρούμε απλό αρμονικό κυματισμό που προκαλεί υπερύψωση της επιφάνειας της θάλασσας

$$z = \frac{H}{2} \cos \frac{2\pi x}{L} \quad (3.3)$$

Λόγω της (3.3) η (3.1) γίνεται

$$V_x = \gamma B \frac{HL}{4\pi} \sin \frac{2\pi x}{L}$$

με μέγιστη τιμή στα τέταρτα του μήκους  $L_s$

$$V_0 = \gamma BHL / 4\pi$$



Αντίστοιχα η ροπή κάμψεως βρίσκεται από την (3.2)

$$M_x = \frac{V_0 L}{2\pi} \left( 1 - \cos \frac{2\pi x}{L} \right)$$

με μέγιστη τιμή στο μέσον του μήκους  $L_s$

$$M_0 = \gamma H B L^2 / 4\pi^2$$

Επανάληψη της παραπάνω διαδικασίας για  $L \neq L_s$  δείχνει πως η πιο κρίσιμη κατάσταση συμβαίνει για  $L_s = 1.12L$  οπότε οι μέγιστες τιμές τέμνουσας και ροπής κάμψεως είναι αντίστοιχα

$$V_{\max} = 0.082 \gamma H B L_s$$

$$M_{\max} = 0.026 \gamma H B L_s^2$$

Κατά τη λοξή πρόσπτωση κυματισμών αναπτύσσονται επιπρόσθετα και ροπές στρέψεως που δίδουν διατμητικές τάσεις στην κατασκευή. Οι τελευταίες θα πρέπει να προστεθούν στις διατμητικές τάσεις από κάμψη για τον έλεγχο της στατικής επάρκειας. Συνήθως, τέτοιος έλεγχος μόνο σε κατασκευές από σκυρόδεμα. Η μέγιστη ροπή στρέψεως σε μια συνηθισμένη πλωτή κατασκευή κυμαίνεται γύρω στο 20% της αντίστοιχης ροπής κάμψεως.

Το βέλος κάμψεως του πλωτού κυματοθραύστη μπορεί να εκφρασθεί από την ημιεμπειρική σχέση

$$\delta_x = C_\delta \frac{M_x L_s^2}{EI}$$

όπου  $E$  το μέτρο ελαστικότητας του υλικού της κατασκευής

$I$  η ροπή αδρανείας της διατομής

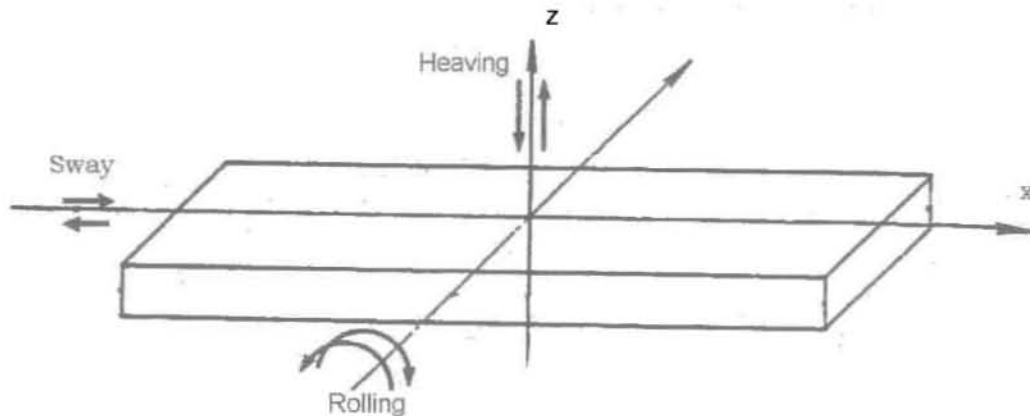
$C_\delta$  συντελεστής με τιμή περί το 0.1

### 3.4 Υδροδυναμική συμπεριφορά

Η αποτελεσματικότητα των πλωτών κυματοθραυστών στην απορρόφηση της κυματικής ενέργειας εξαρτάται από την υδροδυναμική συμπεριφορά τους έναντι των

προωθούμενων κυματισμών. Η εξέταση επομένως της συγκεκριμένης παραμέτρου αποτελεί πρωτεύων μέλημα του μελετητή μηχανικού και τα συμπεράσματα που θα εξαχθούν θεωρούνται απαραίτητα για την συνολική κατανόηση της λειτουργίας του τεχνικού έργου.

Ένας αγκυρωμένος πλωτός κυματοθραύστης όσο καλά προσδεμένος και αν είναι, έχει κάποια δυνατότητα κίνησης λόγω της ελαστικής αγκύρωσής του, που μπορεί σε ένα πεδίο δύο διαστάσεων (x,z) να αναλυθεί σε τρεις βαθμούς ελευθερίας. Την κατακόρυφη κίνηση (heave), τη στροφή γύρω απ'τον εγκάρσιο άξονα (roll) και την οριζόντια κίνηση (sway).



Σχήμα 3.5

Στην περίπτωση της κατακόρυφης κίνησης, ο εισερχόμενος κυματισμός την τροφοδοτεί και κατ'επέκταση η κατακόρυφη κίνηση του σώματος δημιουργεί κυματισμό ο οποίος ονομάζεται ακτινοβολούμενος (radiated wave). Οι υπόλοιπες δυνατές κινήσεις (στροφή και οριζόντια) απαγορεύονται σε πολύ μεγάλο βαθμό απ' τις εσωτερικές συνδέσεις των πλωτών στοιχείων και επομένως γίνεται η θεώρηση ότι δε συμβάλλουν σημαντικά στην συμπεριφορά του πλωτήρα. Η κατακόρυφη λοιπόν ταλάντωση χαρακτηρίζεται από την ιδιοσυχνότητα ταλάντωσης της οποίας η ιδιοπερίοδος  $T$ , που διέπει τον κυματοθραύστη, υπολογίζεται απ' την σχέση :

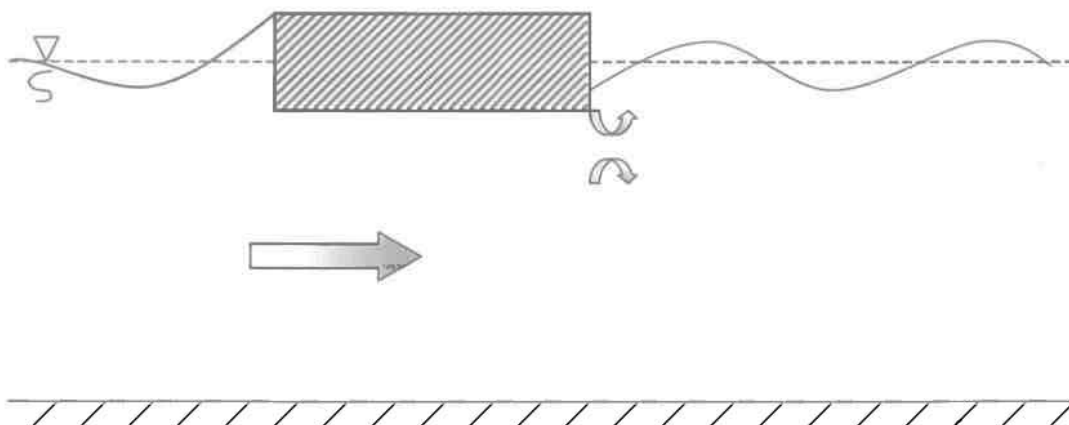
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{A\rho g}}$$

όπου  $m$ , η μάζα του

$A$ , η βρεχόμενη (ίσαλη) διατομή του και  
 $\rho$ , η πυκνότητα του νερού

Στην περίπτωση συντονισμού, όταν δηλαδή η ιδιοπερίοδος του κυματοθραύστη ταυτιστεί με την περίοδο του κύματος που προσκρούει σ' αυτόν, η ταλάντωση που εκτελεί αποκτά μέγιστο πλάτος, ο πλωτήρας λειτουργεί σαν συντονιστής (resonator) απορροφώντας μεγάλο μέρος της μηχανικής ενέργειας του κύματος και κατά συνέπεια επιτρέποντας μόνο μικρό ποσοστό της να διαδοθεί κατάντι του υπό μορφή διαδιδόμενου κύματος  $H_T$  και επομένως ο συντελεστής διάδοσης  $C_t$  (transmission coefficient) ελαχιστοποιείται, κάτι που είναι επιθυμητό. Στο σημείο αυτό πρέπει όμως να τονιστεί ότι η προαναφερθείσα κατάσταση δεν επιδιώκεται παρά τα ευεργετικά της αποτελέσματα, γιατί βάζει όλο το σύστημα των πλωτήρων και των συνδέσεων στις μέγιστες δυνατές καταπονήσεις. Αντιθέτως, ο οριακός έλεγχος της αντοχής του συστήματος επιτελείται κάτω από την δράση κυματισμών ίσης περιόδου με την ιδιοπερίοδο.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό της υδροδυναμικής συμπεριφοράς του πλωτού κυματοθραύστη είναι η παρεμπόδιση της μεταφοράς μαζών από τους κυματισμούς κάτω απ' τον κυματοθραύστη. Είναι γεγονός ότι ένα μεγάλο εύρος της κυματικής ενέργειας των κυματισμών μικρής περιόδου (2-4 sec) είναι συγκεντρωμένο κοντά στην επιφάνεια. Η ροή μαζών κάτω από τον κυματοθραύστη ως ισχυρά επιταχυνόμενη ροή συνεπάγεται αδρανειακές αντιδράσεις που μορφοποιούνται με ισχυρούς εναλλάξ στροβίλους αποκόλλησης και ανάστροφής της ροής στο χώρο κάτω από τον κυματοθραύστη.



Σχήμα 3.6

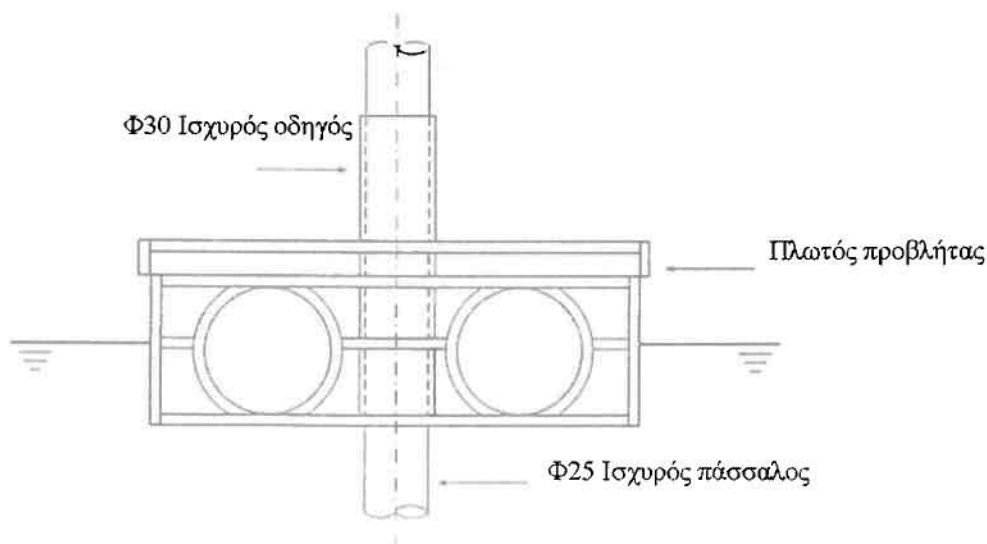
Η παρεμποδιζόμενη αυτή ροή συνεπάγεται και τη κατάντι μείωση της δυνατότητας του κύματος να αναδιαμορφωθεί άρα και τη μείωση του διαδιδόμενου κύματος σε σχέση με το προσπίπτον. Ο συνδυασμός της παρεμπόδισης της ροής κάτω απ' τον κυματοθραύστη και ο κατακόρυφος συντονισμός οδηγούν στην εκτίμηση της συνολικής αποτελεσματικότητας του κυματοθραύστη.

### 3.5 Σχεδιασμός Αγκυρώσεων

Το πιο σημαντικό επιχειρησιακό ζητούμενο στη μελέτη ενός πλωτού κυματοθραύστη που υπάγεται στο γνωστικό αντικείμενο της υδροδυναμικής είναι η εκτίμηση της φόρτισης του κυματοθραύστη και των αλυσίδων αγκύρωσής του κάτω από τη δράση ακραίων υψών κύματος. Σκοπός της πρόσδεσης είναι να περιορίσει σε ανεκτά όρια τη μετακίνηση του εν λόγω έργου, όταν σ' αυτό ενεργούν οι διάφορες εξωτερικές φορτίσεις που τείνουν να το μετατοπίσουν. Τα συστήματα πρόσδεσης με τη μεγαλύτερη εφαρμογή εμπίπτουν στις εξής δύο κατηγορίες :

- με άγκυρες
- με πασσάλους

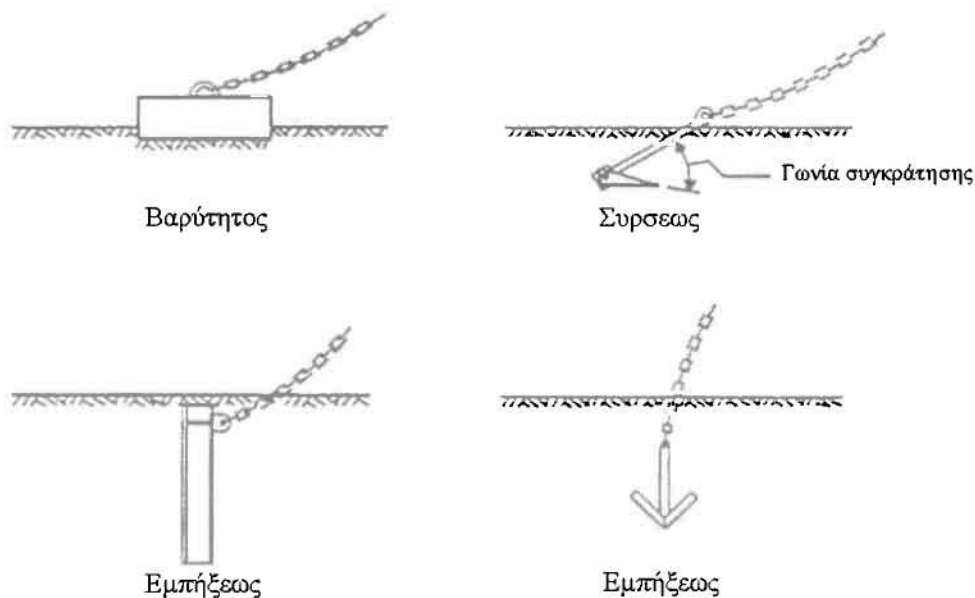
Στη μέθοδο με πασσάλους η πρόσδεση γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτρέπεται η κατακόρυφη κίνηση του πλωτού κυματοθραύστη (Σχ. 3.7). Οι πάσσαλοι εμπήγνουν στο πυθμένα και διατάσσονται είτε κατά τον άξονα είτε στην περίμετρο του ορθογωνικού τεχνικού έργου.



Σχήμα 3.7

Η πρόσδεση με άγκυρες που συγκρατούν το πλωτό μέσω σχοινιών ή αλυσίδων αφήνει κάποια μικρά περιθώρια οριζόντιας μετακίνησης των κυματοθραυστών. Η διάταξη του όλου συστήματος πρόσδεσης γίνεται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να μην εμποδίζεται η ναυσιπλοΐα και να μη μειώνεται το ωφέλιμο βάθος των θέσεων ελλιμενισμού των σκαφών. Υπάρχουν πολλών ειδών άγκυρες, που εντάσσονται σε τρεις βασικές κατηγορίες (Σχ. 3.8)

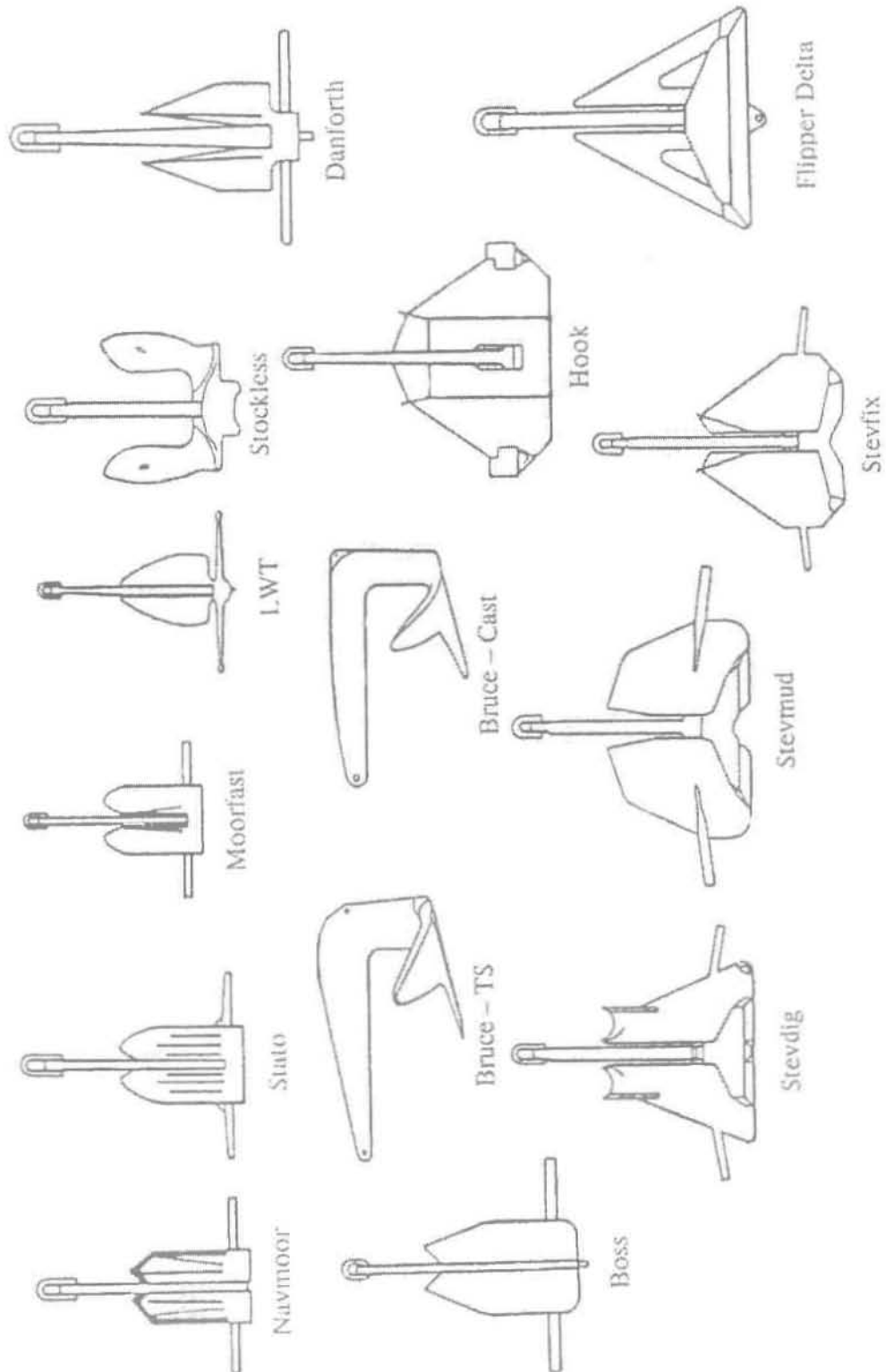
- (α) άγκυρες σύρσεως
- (β) άγκυρες βαρύτητας
- (γ) άγκυρες εμπήξεως



**Σχήμα 3.8**

Οι άγκυρες σύρσεως προβάλλουν την πλήρη τους αντίσταση αφού συρθούν επί του πυθμένα και εισχωρήσουν στο εδαφικό υλικό του ενώ ο μήκος σύρσεως εξαρτάται από τις τοπικές συνθήκες του πυθμένα. Κάποιοι συνήθεις και αντιπροσωπευτικοί τύποι του συγκεκριμένου είδους φαίνονται στο σχήμα (3.9). Επειδή το μήκος που απαιτείται για να προσφέρουν ικανοποιητική συγκράτηση οι άγκυρες αυτές είναι πολλές φορές ακαθόριστο από πριν, θεωρείται δύσκολη η επακριβής πρόβλεψη των θέσεων πόντισής τους, ώστε να προσδέσουν πλωτούς κυματοθραύστες σε συγκεκριμένη διάταξη και γι' αυτό το λόγο έχουν βρει μικρή εφαρμογή σε αυτή τη χρήση.

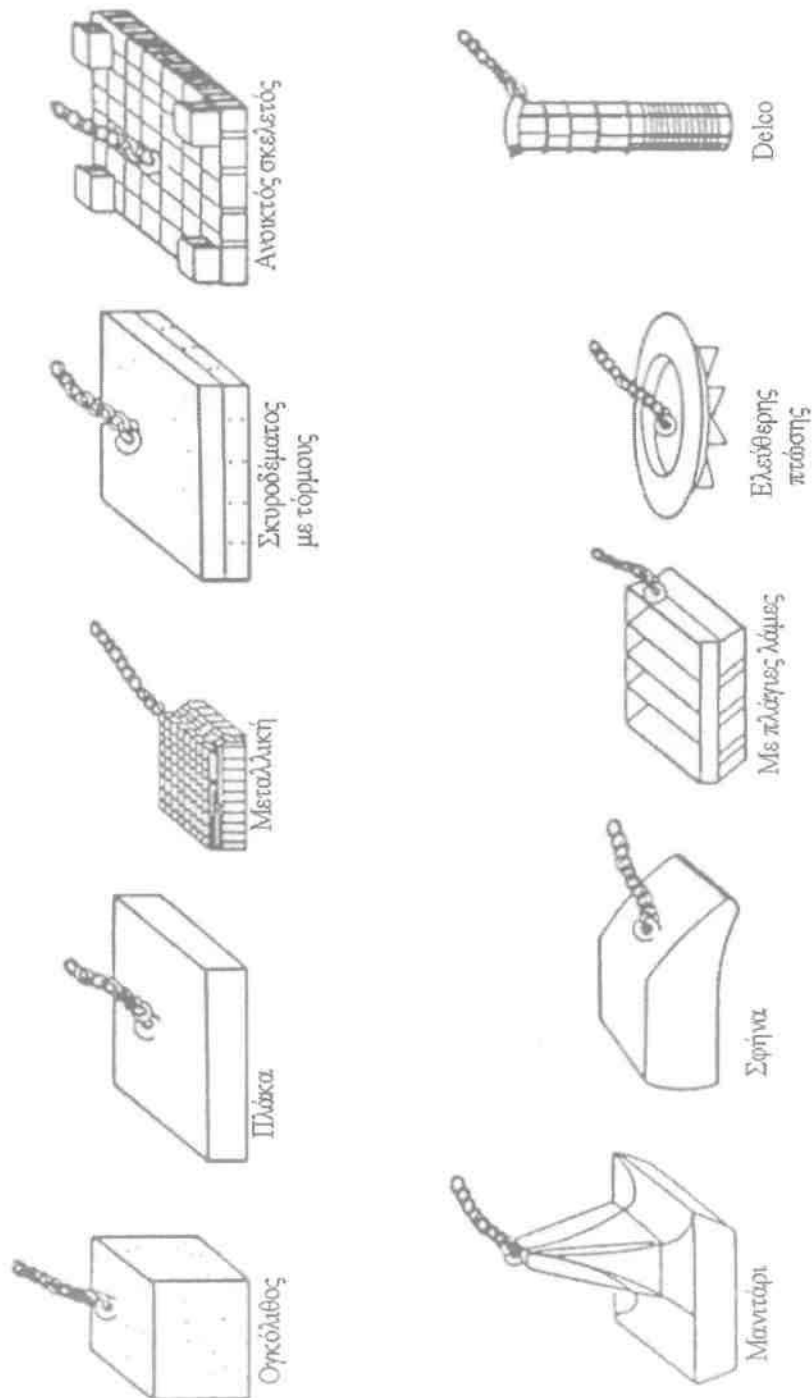




Σχήμα 3.9 Τύποι αγκύρων σύρσεως

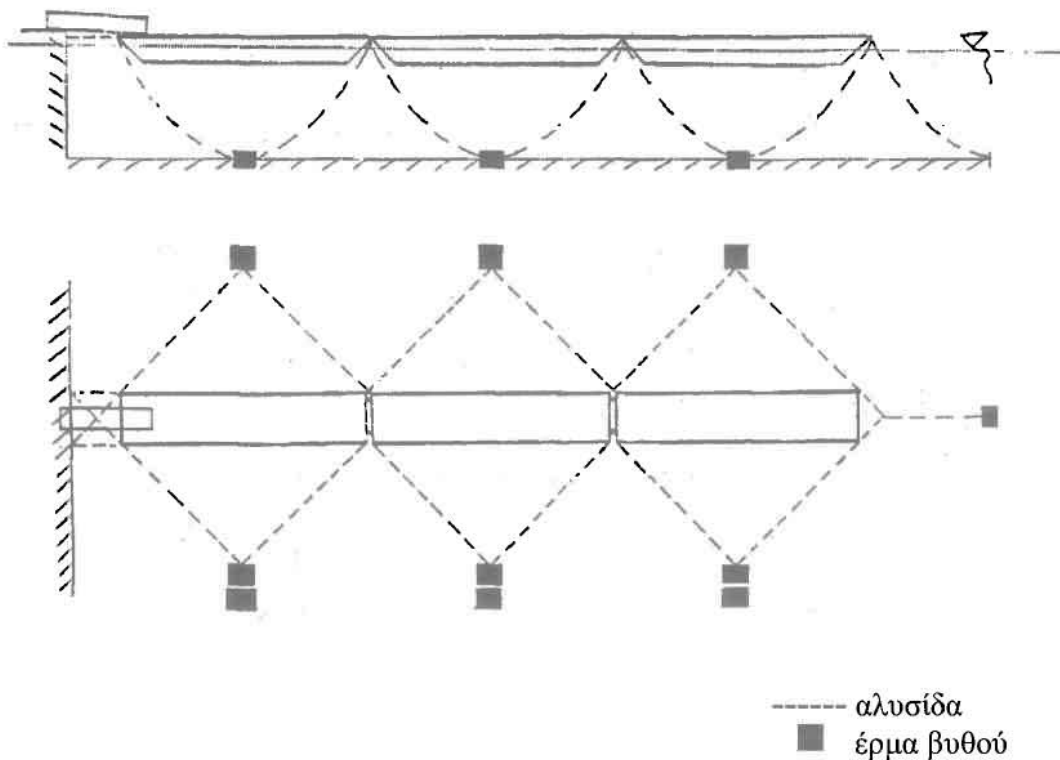


Αντίθετα οι άλλοι δύο τύποι αγκυρών που αναφέρθηκαν πιο πάνω μπορούν να τοποθετηθούν σε προκαθορισμένες θέσεις. Συνηθέστερη δε, είναι η χρήση αγκυρών βαρύτητας όπου εξετάζονται και αναλυτικότερα. Στο σχήμα (3.10) δίδονται μερικοί τύποι αγκυρών βαρύτητας εκ των οποίων οι δύο πρώτοι, που αποτελούνται από συμπαγείς ογκόλιθους σκυροδέματος, είναι απλοί και έχουν ευρεία εφαρμογή.



Σχήμα 3.10 Τύποι αγκυρών βαρύτητας

Οι αλυσίδες πρέπει να έχουν το κατάλληλο βάρος ανά τρέχον μέτρο ώστε και την ανάληψη των υδροδυναμικών φορτίων να επιτελούν με ασφάλεια, αλλά να προσφέρουν επίσης και τη λειτουργία του <<ελατηρίου>> στις οριζόντιες παλμικές φορτίσεις του πλωτήρα από τους κυματισμούς με τον βέλτιστο τρόπο. Τα έρματα ανάλογα με την έκθεση στις κυματικές συνθήκες και την ποιότητα του βυθού προκατασκευάζονται και ποντίζονται στις προϋπολογισμένες θέσεις. Πρέπει να έχουν σχήμα τέτοιο ώστε να εξασφαλίζεται η ευστάθεια της έδρασής τους και η πρόσφυση στο βυθό καθώς και η οριζόντια μετακίνησή τους να είναι αδύνατη ακόμη και για ακραίες κυματικές συνθήκες. Συνήθως απαιτούνται διπλά έρματα σε κάθε αλυσίδα στην προσήνεμη πλευρά του κάθε πλωτήρα και μονό έρμα στην υπήνεμη πλευρά του. Συνίσταται η διαμόρφωση της κινηματικής ανεξαρτησίας του κάθε πλωτήρα μέσω ξεχωριστών ερμάτων. Τυπική διάταξη των γραμμών αγκυρώσεων δίνεται στο παρακάτω σχήμα.

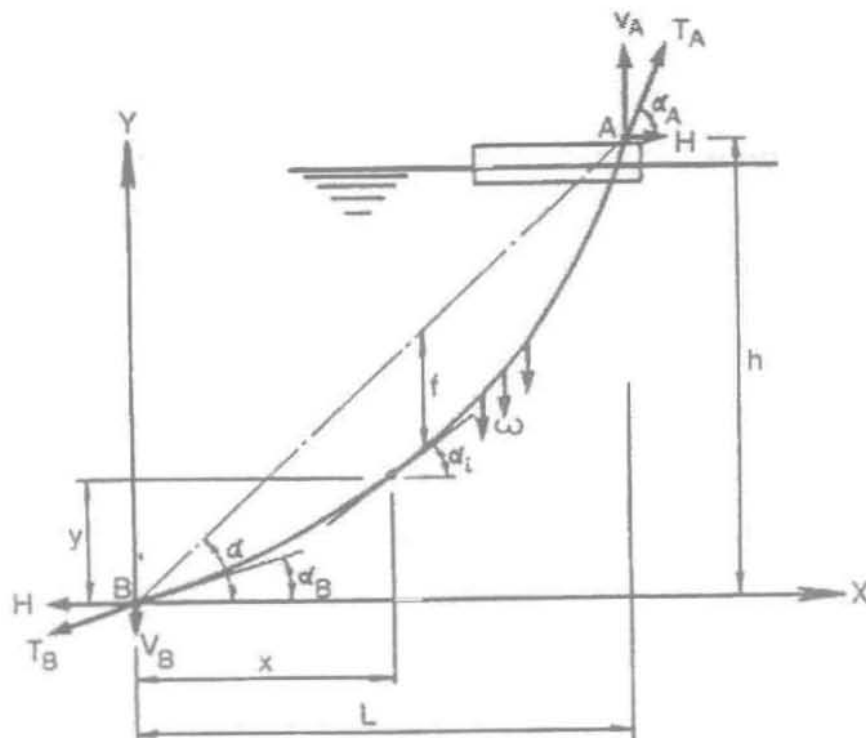


Σχήμα 3.6

### 3.5.1 Υπολογισμός Αγκυρώσεων

Ας θεωρήσουμε ως σύστημα πρόσδεσης μια αλυσίδα ελεύθερα αναρτημένη (δημιουργία αλυσοειδούς καμπύλης) μεταξύ των αγκυρωμένων σημείων A και B, όπου A το άκρο του κυματοθραύστη και B ένα σταθερό σημείο στον πυθμένα (συνήθως βυθισμένο έρμα από σπλισμένο σκυρόδεμα). Η οριζόντια δύναμη H που ασκείται στον πλωτήρα ανθίσταται από το βάρος της αλυσίδας. Το σύνθηδες πρόβλημα του μελετητή είναι η εύρεση του κατάλληλου μήκους και βάρους της αναρτημένης αλυσίδας καθώς και η αξιόπιστη αγκύρωσή της.

Προσεγγιστικά, μπορεί να θεωρηθεί ως  $\omega$  το στοιχειώδες ανά μέτρο βάρος της αλυσίδας, σύμφωνα με το σχέδιο 3.7.



Σχήμα 3.7

Όπως προαναφέρθηκε, η αναρτημένη αλυσίδα παίρνει τη μορφή αλυσοειδούς καμπύλης που δύναται να εκφρασθεί απ' την εξίσωση :



$$Hy - V_Bx - \omega x^2/2 = 0 \quad \text{και άρα}$$
$$y = V_Bx/H + \omega x^2/2H \quad (3.4.1)$$

Από τις συνθήκες ισορροπίας έχουμε:

$$V_A = V_B + \omega L \quad \text{και}$$
$$V_AL = Hh + \omega L^2/2$$

Από τις παραπάνω καταλήγουμε στις σχέσεις:

$$V_A = Hh/L + \omega L/2$$
$$V_B = Hh/L - \omega L/2$$

Αντικαθιστώντας τις παραπάνω τιμές στη σχέση 3.4.1 το  $y$  γίνεται :

$$y = (h/L - \omega L/2H)x + \omega x^2/2H$$

Η μέγιστη δύναμη που ασκείται στο σημείο A ισούται με:

$$T_A = (H^2 + V_A^2)^{0.5}$$

Απ'τις παραπάνω εξισώσεις είναι δυνατόν να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι οποιαδήποτε αύξηση του μήκους  $L$  οδηγεί σε μια μείωση της κατακόρυφης αντίδρασης  $V_B$ . Συνεπώς, θέτοντας τη  $V_B$  μηδενική (και θεωρώντας τη γωνία  $\alpha_B$  αμελητέα) μπορεί να υπολογιστεί το μέγιστο μήκος  $L_{\max}$  :

$$L_{\max} = (2Hh/\omega)^{0.5}$$

Ακόμα από την εξίσωση της αλυσοειδούς καμπύλης δύναται να υπολογιστεί το βέλος  $f$  :

$$f = \omega L^2/8H \quad \text{και άρα}$$
$$H = \omega L^2/8f$$



Η εξίσωση 3.4.1 μπορεί να γραφτεί ως εξής :

$$y = x \operatorname{tga} - 4f/L^2 x(L-x)$$

όπου

$$dy/dx = \operatorname{tga}_i = \operatorname{tga} - 4f/L^2 (L-2x)$$

ή αλλιώς

$$\operatorname{tga}_i = h/L + \omega/2H(L-2x)$$

Άρα έχουμε :

$$\operatorname{tga}_A = h/L + \omega L/2H \quad \text{και}$$

$$\operatorname{tga}_B = h/L - \omega L/2H$$

Επομένως το ελάχιστο οριζόντιο προβαλλόμενο μήκος  $L_{\min}$  καθορίζεται απ'τη σχέση :

$$L_{\min} = -H \operatorname{tga}_B / \omega + (H^2 \operatorname{tg}^2 a_B / \omega^2 + 2Hh/\omega)^{0.5}$$

Τέλος, οι σχέσεις των κατακόρυφων αντιδράσεων στα σημεία A και B γίνονται :

$$V_A = H \operatorname{tga}_A$$

$$V_B = H \operatorname{tga}_B$$

Παρατηρούμε ότι η  $V_A$  ασκείται προς τα κάτω ενώ αντίθετα η  $V_B$  προς τα πάνω.

## *ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4*

**Προσομοίωση της επίδρασης των  
πλωτών κυματοθραυστών σε  
δισδιάστατα κυματικά μοντέλα**



## Κεφάλαιο 4 – Προσομοίωση της επίδρασης των πλωτών κυματοθραυστών σε δισδιάστατα κυματικά μοντέλα

### 4.1 Εισαγωγή

Η εκτίμηση των κυματικών συνθηκών στο εσωτερικό των λιμένων, γίνεται σήμερα με την εφαρμογή μαθηματικών μοντέλων διάδοσης κυματισμών που περιγράφουν τις διεργασίες της ανάκλασης, διάθλασης, περίθλασης, και θραύσης σε πραγματική βυθομετρία. Τα μαθηματικά μοντέλα που εφαρμόζονται αντιμετωπίζουν τα συμβατικά έργα προστασίας ως τοπικές οριακές συνθήκες μερικής ανάκλασης-απορρόφησης.

Η παρουσία πλωτών κυματοθραυστών στο δυσδιάστατο πεδίο διάδοσης κυματισμών δημιουργεί ένα πρόβλημα μαθηματικής προσομοίωσης που επιχειρησιακά πρέπει να επιλυθεί με την μικρότερη δυνατή αναρρύθμιση των χρησιμοποιούμενων κωδίκων. Στόχος στο συγκεκριμένο κεφάλαιο είναι η παρουσίαση μίας τεχνικής εισαγωγής των πλωτών κυματοθραυστών στα κυματικά μοντέλα.

### 4.2 Φυσική και μαθηματική ανάλυση

Οι πλωτοί κυματοθραύστες χωρίζονται ως προς την λειτουργία τους σε δύο κατηγορίες, τους απορροφητικούς και τους ανακλαστικούς. Σύμφωνα με τα προτεινόμενα, η παρουσία και των δύο τύπων, προσομοιώνεται επιτυχώς με αυξημένη τοπική απώλεια ενέργειας. Αποκαθίσταται μία μονοσήμαντη αντιστοίχιση του ισοδύναμου τοπικού συντελεστή απωλειών ενέργειας σε «τριβές πυθμένα» με τον συντελεστή διάδοσης  $C_t$  που αντιστοιχεί στα στοιχεία του έργου (λόγος πλάτους κυματοθραύστη προς μήκος κύματος).

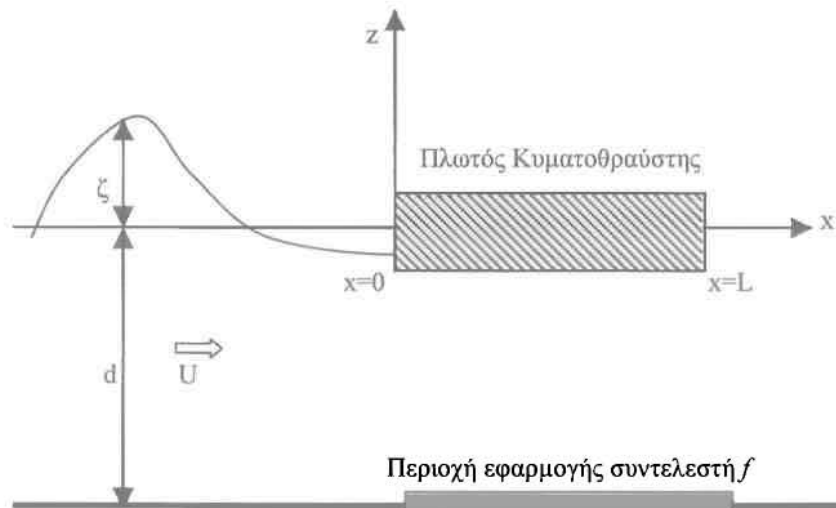
Η προσομοίωση αυτή περιγράφει επιτυχώς την ζητούμενη τρισδιάστατη διάδοση κυματισμών κάτω από τον κυματοθραύστη και τη συμβολή των από περίθλαση κυματισμών στο σύνθετο κυματικό πεδίο που δημιουργείται κατόπιν, εισάγοντας κατάλληλο συντελεστή τριβής και μήκος εφαρμογής  $L$ , μέσω των οποίων εξασφαλίζουμε τους επιθυμητούς συντελεστές ανάκλασης και διάδοσης.



Το μαθηματικό μοντέλο γραμμικών διασπειρόμενων κυματισμών που δοκιμάζεται συντίθεται από τις εξής εξισώσεις (Copeland, 1985, Karambas, 1999):

$$\begin{aligned} \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{n} \frac{\partial (nUd)}{\partial x} + \frac{1}{n} \frac{\partial (nVd)}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{c^2}{d} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{2} \frac{f_w}{d} U \sqrt{U^2 + V^2} &= 0 \\ \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{c^2}{d} \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{1}{2} \frac{f_w}{d} V \sqrt{U^2 + V^2} &= 0 \end{aligned} \quad (4.1)$$

όπου  $c$  η ταχύτητα διάδοσης,  $n$  ο συντελεστής βάθους,  $d$  το βάθος του νερού,  $U$ ,  $V$  οι μέσες οριζόντιες ταχύτητες,  $\eta$  η στάθμη της επιφάνειας από την στάθμη ηρεμίας και  $f_w$  ο συντελεστής “απωλειών” στη θέση του κυματοθραύστη.



**Σχήμα 4.1** Σχηματική αναπαράσταση και συμβολισμοί.

Στο παραπάνω μαθηματικό μοντέλο διάδοσης γραμμικών διασπειρομένων κυματισμών, έχουν συμπληρωθεί οι εξισώσεις ισορροπίας με τετραγωνικούς όρους τριβών. Το αριθμητικό σχήμα επίλυσης είναι αυτό του μοντέλου μακρών κυματισμών (Koutitas, 1988). Στο επόμενο κεφάλαιο εξάγονται νέες εξισώσεις, οι οποίες όμως ταυτίζονται με τις εξισώσεις (4.1) για σταθερό βάθος πυθμένα.



Για την αναλυτική επίλυση του προβλήματος γραμμικοποιούνται οι όροι τριβής:

$$\frac{1}{2} \frac{f_w}{d} U \sqrt{U^2 + V^2} = f \omega U$$

$$\frac{1}{2} \frac{f_w}{d} V \sqrt{U^2 + V^2} = f \omega V$$

όπου  $f$  ένας νέος συντελεστής τριβής και  $\omega = 2\pi/T$  ( $T$ =περίοδος κύματος).

Ο συντελεστής αυτός εφαρμόζεται αντί του πλωτού κυματοθραύστη σε ένα μήκος  $L$  το οποίο δεν είναι απαραίτητα ίσο με το πλάτος του κυματοθραύστη. Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται μία σχηματική αναπαράσταση του προβλήματος.

Η τιμή του  $f$  σε συνδυασμό με το μήκος εφαρμογής  $L$  καθορίζουν και την τιμή του συντελεστή διάδοσης  $C_t$ .

Η αναλυτική λύση βασίζεται στο μονοδιάστατο πρόβλημα. Οι εξισώσεις (4.1) σε μονοδιάστατη μορφή για σταθερό βάθος γράφονται:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(Ud)}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{c^2}{d} \frac{\partial \eta}{\partial x} + f \omega U = 0$$
(4.2)

Ας υποθέσουμε περιοδική λύσης της μορφής :

$$\eta = \text{Real}(\zeta(x) e^{i\omega t})$$

$$U = \text{Real}(u(x) e^{i\omega t})$$
(4.3)

όπου  $\zeta$ ,  $U$  (μιγαδικές) συναρτήσεις του  $x$  και  $i = \sqrt{-1}$

Η αντικατάσταση των εξ. (4.3) στην (4.2) οδηγεί στις:

$$i\omega \zeta + d \frac{\partial u}{\partial x} = 0$$

$$i\omega(1 - if)u + \frac{c^2}{d} \frac{\partial \zeta}{\partial x} = 0$$
(4.4)

ή, μετά την απαλοιφή του  $u$ , έχουμε:

$$\frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} + \frac{\omega^2}{c^2} (1 - if) \zeta = 0$$
(4.5)

η παραπάνω έχει τη γενική λύση:

$$\zeta = a_i e^{ikx} + a_r e^{-ikx} \quad u = \frac{c}{d} (a_i e^{ikx} + a_r e^{-ikx}) \quad x < 0 \quad (4.6)$$

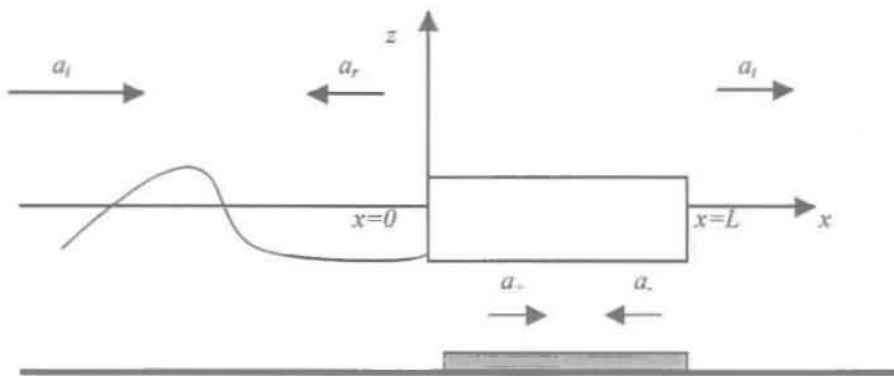
$$\zeta = a_t e^{ik(x-L)} \quad u = \frac{c}{d} a_t e^{ik(x-L)} \quad x > L \quad (4.7)$$

όπου:  $a_i$ : πλάτος προσπίπτοντος κυματισμού (πραγματικός αριθμός)

$a_r$ : πλάτος διαδιδόμενου κυματισμού (μιγαδικός αριθμός)

$a_t$ : πλάτος ανακλώμενου κυματισμού (μιγαδικός αριθμός)

$k$ : μήκος κύματος



**Σχήμα 4.2** Ανακλώμενοι και διαδιδόμενοι κυματισμοί.

Στο διάστημα εφαρμογής του συντελεστή  $f$ :

Για  $0 < x < L$

$$\zeta = a_+ e^{iKx} + a_- e^{iK(x-L)} \quad u = \frac{c}{d} \frac{1}{\sqrt{1-if}} (a_+ e^{iKx} + a_- e^{iK(x-L)}) \quad (4.8)$$

όπου:  $a_+$ : πλάτος κυματισμού που μεταδίδεται προς τα θετικά

$a_-$ : πλάτος κυματισμού που μεταδίδεται προς τα αρνητικά

$K$ : ένα 'μήκος κύματος' που ορίζεται:

$$K = k \sqrt{1-if} \quad (4.9)$$

Ορίζοντας έναν συντελεστή  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{1-if}} \quad (4.10)$$



Θεωρώντας ότι οι συναρτήσεις  $\zeta$  και  $u$  είναι συνεχείς στα σημεία  $x=0$  και  $x=L$  καταλήγουμε στην αναλυτική λύση:

$$\begin{aligned}
 a_{-} &= \frac{1+\varepsilon}{2\varepsilon} e^{ikL} a_{+} \\
 a_{-} &= \frac{1-\varepsilon}{2\varepsilon} a_{+} \\
 \frac{a_{+}}{a_{-}} &= \frac{4\varepsilon}{(1+\varepsilon)^2 e^{ikL} - (1-\varepsilon)^2 e^{-ikL}} \\
 \frac{a_{r}}{a_{i}} &= \frac{(1-\varepsilon)^2 (e^{ikL} - e^{-ikL})}{(1+\varepsilon)^2 e^{ikL} - (1-\varepsilon)^2 e^{-ikL}} \tag{4.11}
 \end{aligned}$$

Οι συντελεστές διάδοσης  $C_t$  και ανάκλασης  $C_r$  είναι το μέτρο των μιγαδικών  $a_t$ ,  $a_r$ :

$$\begin{aligned}
 C_t &= \left| \frac{a_{+}}{a_{-}} \right| = \left| \frac{4\varepsilon}{(1+\varepsilon)^2 e^{ikL} - (1-\varepsilon)^2 e^{-ikL}} \right| \\
 C_r &= \left| \frac{a_{r}}{a_{i}} \right| = \left| \frac{(1-\varepsilon)^2 (e^{ikL} - e^{-ikL})}{(1+\varepsilon)^2 e^{ikL} - (1-\varepsilon)^2 e^{-ikL}} \right| \tag{4.12}
 \end{aligned}$$

Αν είναι γνωστός ο συντελεστής διάδοσης  $C_t$  (ο οποίος υπολογίζεται μέσω των αναλυτικών λύσεων που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο) η παραπάνω εξίσωση επιλύεται με τη μέθοδο των προσεγγίσεων για τον υπολογισμό του συντελεστή  $\varepsilon$ .

# *ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5*

**Εφαρμογή μοντέλων γραμμικών  
κυματισμών για τον υπολογισμό  
κυματισμών στο λιμένα του  
Νέου Μαρμαρά**



## Κεφάλαιο 5 – Εφαρμογή μοντέλων γραμμικών κυματισμών για τον υπολογισμό κυματισμών στο λιμένα του Νέου Μαρμαρά

### 5.1 Εισαγωγή

Ο όρμος του Μαρμαρά είναι μια φυσικά ημιπροστατευόμενη θαλάσσια λεκάνη στην ανατολική πλευρά της χερσονήσου Σιθωνίας του νομού Χαλκιδικής, δεχόμενη την επίδραση μόνο των νότιων και νοτιοδυτικών ανέμων. Οι υπάρχουσες λιμενικές εγκαταστάσεις εξυπηρετούν μερικώς τα αλιευτικά σκάφη της Κοινότητας, καθώς τα υπάρχοντα κρηπιδώματα δεν προστατεύονται από τη δράση των κυματισμών με τον υφιστάμενο λιμενοβραχίονα μήκους 60 m περίπου.

Η διερευνηθείσα παλαιότερα τεχνική λύση μόνιμου κυματοθραύστη σε επέκταση του υφισταμένου, με μικτή καθ' ύψος διατομή αποτελούμενη από βάση λιθορριπής μέχρι τη στάθμη των 4 m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, αντιμετώπιζε μεν το πρόβλημα της προστασίας των λιμενικών εγκαταστάσεων Νέου Μαρμαρά, αλλά ήταν δαπανηρή λόγω των μεγάλων βαθών του όρμου που σε ορισμένα σημεία φτάνει μέχρι και τα 25μ.

Η οικονομική αδυναμία της Κοινότητας να υλοποιήσει το έργο, παράλληλα με την ανάγκη ταχύτατης υλοποίησης του με μηδενικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, οδήγησε στην ανάγκη διερεύνησης εναλλακτικών λύσεων από πλωτές προκατασκευασμένες κατασκευές.

### 5.2 Περιγραφή υφιστάμενης κατάστασης

Η περιοχή του έργου είναι στη θέση των υφιστάμενων λιμενικών εγκαταστάσεων και πιο συγκεκριμένα στη θέση του υπάρχοντος μικρού λιμενοβραχίονα. Τα υφιστάμενα κρηπιδώματα ευρίσκονται στη δυτική πλευρά του όρμου και εξυπηρετούν εκτός από τα αλιευτικά σκάφη της Κοινότητας και αρκετά



τουριστικά σκάφη που δεν εξυπηρετούνται από την υπερπλήρωση του γειτονικού τουριστικού λιμένα του Πόρτο-Καράς.

Ο υφιστάμενος λιμενοβραχίονας μήκους 50 m περίπου έχει κατασκευαστεί από φυσικούς ογκολίθους και έχει διεύθυνση κατά τον άξονα Δ-Α, προσφέροντας έτσι λόγω του μικρού μήκους του ελάχιστη προστασία στα παρακείμενα κρηπιδώματα. Στο μέσο της ακτής υπάρχει επίσης προβλήτας διαστάσεων 80×30 m, ο οποίος εξυπηρετεί μικρά τουριστικά κρουαζιερόπλοια και αποτελεί χώρο πολιτιστικών εκδηλώσεων.

### 5.3 Κυματικό κλίμα

Η εκτίμηση του κυματικού κλίματος στην περιοχή του έργου αλλά και στο εσωτερικό του είναι απαραίτητο στοιχείο για τον ορθό σχεδιασμό ενός λιμενικού έργου. Επομένως, δόκιμο είναι η εκτίμηση αυτή να μη γίνει με οποιαδήποτε προχειρότητα, αλλά να είναι εμπειριστατωμένη με κάθε δυνατό τρόπο εφόσον τα στοιχεία τα οποία θα συλλέξουμε και θα επεξεργαστούμε θα αποτελέσουν τη κατευθυντήρια γραμμή των ενεργειών μας και της μελέτης μας.

Αρχικά γίνεται η συλλογή όσο πιο έγκυρων μετεωρολογικών δεδομένων της περιοχής μέσω των οποίων είναι δυνατόν να προβλεφθούν οι συνθήκες κατά τις οποίες θα λειτουργήσει το λιμάνι μας. Τα ανεμολογικά στοιχεία κυρίως, είναι απαραίτητα για την πρόβλεψη της κατευθύνσεως αλλά και του ύψους των κυματισμών που θα αναπτυχθούν στην περιοχή μας.

Για το λιμάνι του Νέου Μαρμαρά τα δεδομένα συλλέχθηκαν απ' το σταθμό της Ψαθούρας και μας οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι οι δύο επικρατούντες κυματογενείς άνεμοι είναι ο Νότιος ορμητικός, με ταχύτητα 24 m/s και απόσταση απ' την απέναντι ακτή 22 km, και ο Νοτιοδυτικός ορμητικός, ταχύτητας 24 m/s και απόστασης απ' την απέναντι ακτή 20 km.

Όπως είναι κατανοητό λόγω γεωγραφικής θέσης, το λιμάνι είναι ημιπροστατευόμενο, κάτι που δεν ευνοεί τη δημιουργία μεγάλων κυματισμών και επομένως η χρήση των πλωτών κυματοθραυστών θεωρείται δόκιμη, σε συνάρτηση με τα μεγάλα βάθη που συναντάμε στο εσωτερικό του λιμένα.



## 5.4 Μοντέλα υπολογισμού

Για την επεξεργασία και αξιοποίηση των δεδομένων που συλλέχθηκαν, αναπτύχθηκαν υπολογιστικά προγράμματα που βασίζονται στην αριθμητική επίλυση διαφορικών εξισώσεων της θεωρίας των κυματισμών. Η επιλογή των μοντέλων που χρησιμοποιούνται για τον ορθό και βέλτιστο σχεδιασμό γίνεται με γνώμονα την δυνατότητα περιγραφής του συνόλου των σημαντικών κυματικών φαινομένων του παράκτιου χώρου. Επομένως τα μοντέλα που θα επιλεγούν πρέπει να μπορούν να περιγράψουν τα φαινόμενα γένεσης των κυματισμών, της μετάδοσης σε βαθιά και ρηχά νερά, της μερικής και ολικής ανάκλασης από τις κατασκευές και την ακτή, της περίθλασης, της επίδρασης της ρηχότητας και της απώλειας της ενέργειας λόγω θραύσης και τριβής πυθμένα.

Στην παρούσα εργασία για την προσομοίωση των παραπάνω φαινομένων χρησιμοποιήθηκαν μοντέλα που βασίζονται σε εξισώσεις ενέργειας, ορμής και συνέχειας με βάση την γραμμική θεωρία των κυματισμών.

Οι προβλεπόμενες διαδικασίες επίλυσης απαιτούν την ανάλυση του πεδίου εφαρμογής με κάνναβο ορθογωνικού βήματος  $\Delta x = \Delta y$  και την εισαγωγή δεδομένων βυθομετρίας, γεωμετρίας τεχνικών έργων και ακτογραμμής. Στα προβλεπόμενα δεδομένα εισαγωγής συμπεριλαμβάνονται και οι κυματικές συνθήκες σχεδιασμού στα ανοικτά και την ευρύτερη περιοχή του λιμένα του Νέου Μαρμαρά.

Η εισαγωγή των δεδομένων βυθομετρίας, γεωμετρίας τεχνικών έργων και ακτογραμμής γίνεται με τον ορισμό του πεδίου εφαρμογής και του καννάβου και εντάσσονται στα μοντέλα με την βοήθεια αρχείων και προγραμμάτων σε γλώσσα Fortran.

### 5.4.1 Πρόγραμμα πρόγνωσης κυματισμών *JONSWAP.FOR*

Το πρόγραμμα JONSWAP.FOR βασίζεται στην πρόγνωση κυματισμών με τη μέθοδο Jonswarp. Με δεδομένα το γραμμικό μήκος αναπτύγματος  $F$ , τη ρυθμισμένη ταχύτητα ανέμου  $U_A$ , τη διάρκεια πνοής του ανέμου  $t_D$  και την εφαρμογή της





μεθόδου Jonswar, υπολογίζεται το ύψος σημαντικού κύματος  $H_s$  και η περίοδος  
μεγίστης ενεργειακής πυκνότητας  $T_p$ . Σύμφωνα με τη μέθοδο Jonswar έχουμε :

Ελέγχεται εάν ισχύει η ανισότητα:  $\frac{gF}{U_A^2} > 22.810^3$

α) Εάν ισχύει τότε οι κυματισμοί έχουν πλήρη ανάπτυξη και εφαρμόζονται οι  
σχέσεις:

•  $g \frac{H_s}{U_A^2} = 0.243$  και

•  $g \frac{T_p}{U_A} = 8.13$

Στην περίπτωση αυτή υπάρχει περιορισμός του μήκους κύματος οπότε επιλύονται οι  
εξισώσεις:

•  $g \frac{H_s}{U_A^2} = 0.0016 \left( \frac{gx}{U_A^2} \right)^{0.5}$  και

•  $g \frac{T_p}{U_A} = 0.286 \left( \frac{gx}{U_A^2} \right)^{0.33}$

β) Εάν δεν ισχύει η ανισότητα :  $\frac{gF}{U_A^2} > 22.810^3$

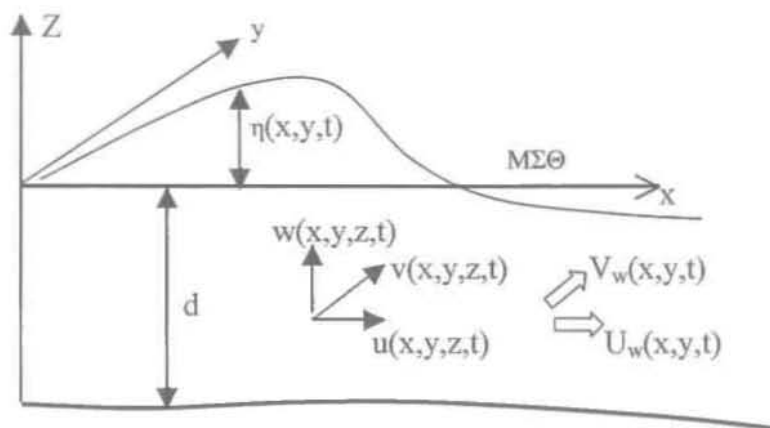
Τότε ελέγχεται εάν:  $\frac{gt_D}{U_A} > 68.8 \left( \frac{gF}{U_A^2} \right)^{0.66}$

Σε αυτή την περίπτωση σημειώνεται περιορισμός διάρκειας και επιλύεται η  
παραπάνω σχέση σαν ισότητα για τον υπολογισμό του F:

$$F = \frac{U_A^2}{g} \left( \frac{gt_D}{68.8U_A} \right)^{1.5}$$

### 5.4.2 Πρόγραμμα Προσομοίωσης *HARBOR.FOR*

Το πρόγραμμα *HARBOR.FOR* βασίζεται στην αριθμητική επίλυση των εξισώσεων ήπιας κλίσης (mild slope equations) υπερβολικής μορφής (CorpeLand, 1985α, Watanabe & Maruyama, 1986, Karambas, 1999) και μπορεί να περιγράψει τα φαινόμενα της διάθλασης, περίθλασης, επίδρασης της ρηχότητας και της ανάκλασης από τα κατακόρυφα μέτωπα και τους κυματοθραύστες με πρηνή (ολική και μερική ανάκλαση).



**Σχήμα 3.1.** Σύστημα συντεταγμένων και μεταβλητές.

Οι εξισώσεις που διέπουν την κίνηση στο νερό (που θεωρείται ασυμπίεστο ρευστό) είναι η εξίσωση συνέχειας και οι εξισώσεις ορμής (Euler). Οι γραμμικοποιημένες μορφές των εξισώσεων (δηλ. χωρίς τους μη γραμμικούς όρους) γράφονται:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5.1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (5.2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (5.3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g \quad (5.4)$$



όπου  $u$ ,  $v$  και  $w$  είναι οι ταχύτητες του ρευστού κατά  $x$ ,  $y$  και  $z$  αντίστοιχα (Σχήμα 5.1),  $\rho$  η πυκνότητα του νερού και  $p$  η πίεση.

Οι (γραμμικοποιημένες) οριακές συνθήκες στην ελεύθερη επιφάνεια και στον πυθμένα γράφονται:

$$w = \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad (z = \eta \text{ ή } z = 0) \quad (5.5)$$

$$w = -u \frac{\partial d}{\partial x} - v \frac{\partial d}{\partial y} \quad (z = -d) \quad (5.6)$$

όπου  $\eta$  είναι η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας της θάλασσας λόγω του κυματισμού.

Η ολοκλήρωση της (5.1) ως προς  $z$  από τον πυθμένα ( $z = -d$ ) έως την επιφάνεια ( $z = \eta$  ή  $z = 0$ ), σε συνδυασμό με τις (5.5) και (5.6), δίνει την ολοκληρωμένη ως προς το βάθος εξίσωση της συνέχειας<sup>1</sup>:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial (U_w d)}{\partial x} + \frac{\partial (V_w d)}{\partial y} = 0 \quad (5.7)$$

όπου  $U_w$  και  $V_w$  είναι οι μέσες ως προς το βάθος οριζόντιες ταχύτητες κατά  $x$  και  $y$  που ορίζονται από τις σχέσεις:  $U_w = \frac{1}{d} \int_{-d}^0 u dz$  και  $V_w = \frac{1}{d} \int_{-d}^0 v dz$ .

Η σχέση (5.4) γράφεται:

$$p(z) = -\rho g z + \rho \frac{\partial}{\partial t} \int_z^0 w dz \quad (5.8)$$

Υιοθετώντας την κατανομή της γραμμικής θεωρίας κυματισμών (Κουτίτας, 1994, σχέση 1.10) για την πίεση  $p$ , έχουμε:

$$p(z) = -\rho g z + p_d \quad (5.9)$$

όπου  $p_d$  η δυναμική πίεση:

$$p_d(z) = \rho g \eta \frac{\cosh(k(d+z))}{\cosh(kd)} \quad (5.10)$$

<sup>1</sup> Σημειώνεται στο σημείο αυτό ότι η πλήρης μη γραμμική εξίσωση της συνέχειας γράφεται  $\partial \eta / \partial t + \partial (U_w(d+\eta)) / \partial x + \partial (V_w(d+\eta)) / \partial y = 0$ , η οποία προκύπτει από την ολοκλήρωση της (3.1) χρησιμοποιώντας την μη γραμμική κινηματική οριακή συνθήκη  $w = \partial \eta / \partial t + u \partial \eta / \partial x + v \partial \eta / \partial y$ , στη ελεύθερη επιφάνεια ( $z = \eta$ ), και τον κανόνα του Leibnitz.



Η ολοκλήρωση ως προς το βάθος των εξισώσεων της ορμής (5.2) και (5.3) δίνει:

$$d \frac{\partial U_w}{\partial t} = p|_{z=d} \dot{d}_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \int_{-d}^0 p \, dz \quad (5.11)$$

$$d \frac{\partial V_w}{\partial t} = p|_{z=d} \dot{d}_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} \int_{-d}^0 p \, dz \quad (5.12)$$

Αντικαθιστώντας την (5.9) στις (5.11) και (5.12) καταλήγουμε στις παρακάτω, ολοκληρωμένες ως προς το βάθος, εξισώσεις ορμής:

$$\frac{\partial U_w}{\partial t} + \frac{1}{d} \frac{\partial(c^2 \eta)}{\partial x} - \frac{1}{d} \frac{g \eta}{\cosh(kd)} \frac{\partial d}{\partial x} = 0 \quad (5.12)$$

$$\frac{\partial V_w}{\partial t} + \frac{1}{d} \frac{\partial(c^2 \eta)}{\partial y} - \frac{1}{d} \frac{g \eta}{\cosh(kd)} \frac{\partial d}{\partial y} = 0 \quad (3.13)$$

όπου  $k$  ο αριθμός κύματος και  $c$  η ταχύτητα διάδοσης του κυματισμού,  $c=L/T$ .

Η απώλεια της ενέργειας λόγω θραύσης των κυματισμών στην ακτή ή πάνω στους κυματοθραύστες εισάγεται στο μοντέλο μέσω της προσομοίωσης των τάσεων Reynolds με τη θεώρηση τυρβώδη συντελεστή ιξώδους. Στο β μέρος των εξισώσεων της ορμής προστίθενται οι όροι:

$$\begin{aligned} \dots &= \nu_h \frac{\partial U_w^2}{\partial x^2} + \nu_h \frac{\partial U_w^2}{\partial y^2} \\ \dots &= \nu_h \frac{\partial V_w^2}{\partial x^2} + \nu_h \frac{\partial V_w^2}{\partial y^2} \end{aligned} \quad (5.14)$$

όπου  $\nu_h$  ένας τεχνητός τυρβώδης συντελεστής ιξώδους.

Η απώλεια της ενέργειας λόγω τριβής πυθμένα προσομοιώνεται με τους γραμμικοποιημένους όρους στο β μέρος των εξισώσεων της ορμής:

$$\begin{aligned} \dots &= -f_b \sigma U_w \\ \dots &= -f_b \sigma V_w \end{aligned} \quad (5.15)$$

όπου  $\sigma$  η γωνιακή συχνότητα,  $f_b$  είναι ο γραμμικοποιημένος συντελεστής τριβής που συνδέεται με τον συντελεστή τριβής (κύματος)  $f_w$  με τη σχέση:

$$f_b \sigma = \frac{1}{2} f_w \sqrt{U_w^2 + V_w^2} \quad (5.16)$$

Ανακεφαλαιώνοντας, οι τελικές εξισώσεις του μοντέλου κυματισμών είναι οι εξής:



$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(U_w d)}{\partial x} + \frac{\partial(V_w d)}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial U_w}{\partial t} + \frac{1}{d} \frac{\partial(c^2 \eta)}{\partial x} - \frac{1}{d} \frac{g \eta}{\cosh(kd)} \frac{\partial d}{\partial x} = v_n \frac{\partial^2 U_w}{\partial x^2} + v_h \frac{\partial^2 U_w}{\partial y^2} - f_b \sigma U_w$$

$$\frac{\partial V_w}{\partial t} + \frac{1}{d} \frac{\partial(c^2 \eta)}{\partial y} - \frac{1}{d} \frac{g \eta}{\cosh(kd)} \frac{\partial d}{\partial y} = \frac{\partial \left( v_n \frac{\partial V_w}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left( v_h \frac{\partial V_w}{\partial y} \right)}{\partial y} - f_b \sigma V_w$$

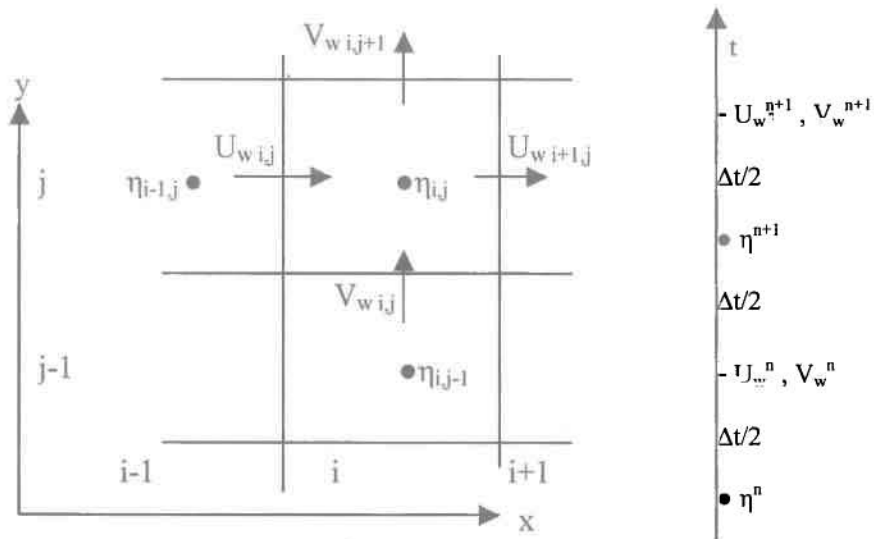
(5.17)

Οι παραπάνω εξισώσεις διαφέρουν από τις (4.1). Σε σταθερού βάθους νερά όμως οι εξισώσεις ταυτίζονται. Άρα η θεωρητική προσέγγιση του υπολογισμού του συντελεστή  $f$  του προηγούμενου κεφαλαίου για την προσομοίωση της επίδρασης του πλωτού κυματοθραύστη, παραμένει η ίδια.

#### 5.4.2.1 Αριθμητικό σχήμα επίλυσης

Στο σημείο  $i \Delta x$  και στο χρόνο  $n \Delta t$  (όπου  $\Delta x$  και  $\Delta t$  το χρονικό και χωρικό βήμα διακριτοποίησης) οι μερικές παράγωγοι των εξισώσεων (5.17) προσεγγίζονται, σε έναν έκκεντρο κάρναβο όπου στο κέντρο του καννάβου υπολογίζεται η ανύψωση  $\eta$  ενώ οι ταχύτητες  $U_w$  και  $V_w$  στην άκρη (Σχήμα 5.2), ως εξής:

$$\begin{aligned} & \frac{\eta_i^{n+1} - \eta_i^n}{\Delta t} + \frac{(U_w d)_{i+1,j}^n - (U_w d)_{i,j}^n}{\Delta x} + \frac{(V_w d)_{i,j+1}^n - (V_w d)_{i,j}^n}{\Delta y} = 0 \\ & \frac{U_w_{i,j}^{n+1} - U_w_{i,j}^n}{\Delta t} + \left( \frac{1}{d} \right)_i \frac{(c^2 \eta)_{i,j}^{n+1} - (c^2 \eta)_{i,j}^n}{\Delta x} - \frac{1}{d_{i,j}} \frac{g \eta_{i,j}^n}{\cosh(k_{i,j} d_{i,j})} \frac{d_{i,j} - d_{i,j-1}}{\Delta x} = \\ & v_h \frac{U_w_{i+1,j}^n - 2U_w_{i,j}^n + U_w_{i-1,j}^n}{\Delta x^2} + v_h \frac{U_w_{i,j+1}^n - 2U_w_{i,j}^n + U_w_{i,j-1}^n}{\Delta x^2} - f_b \sigma U_w_{i,j}^n \\ & \frac{V_w_{i,j}^{n+1} - V_w_{i,j}^n}{\Delta t} + \left( \frac{1}{d} \right)_i \frac{(c^2 \eta)_{i,j}^{n+1} - (c^2 \eta)_{i,j}^n}{\Delta x} - \frac{1}{d_{i,j}} \frac{g \eta_{i,j}^n}{\cosh(k_{i,j} d_{i,j})} \frac{d_{i,j} - d_{i,j-1}}{\Delta x} = \\ & v_n \frac{V_w_{i+1,j}^n - 2V_w_{i,j}^n + V_w_{i-1,j}^n}{\Delta x^2} + v_n \frac{V_w_{i,j+1}^n - 2V_w_{i,j}^n + V_w_{i,j-1}^n}{\Delta x^2} - f_b \sigma V_w_{i,j}^n \end{aligned} \quad (5.18)$$



Σχήμα 5.2. Διακριτοποίηση των μεταβλητών.

Οι οριακές συνθήκες που εφαρμόστηκαν πλευρικά ήταν συνθήκες σπογγώδους ζώνης (τεχνική απορρόφησης των κυματισμών -sponge layer- των Larsen and Dancy, 1983). Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται σε ένα διάστημα μήκους  $x_s$  από το όριο και προς τα έξω (Σχήμα 5.3). Στο εσωτερικό του διαστήματος αυτού οι μεταβλητές  $\eta$ ,  $U_w$  και  $V_w$  διαιρούνται, σε κάθε χρονικό βήμα, με έναν συντελεστή  $\mu(x)$  που ορίζεται:

$$\mu(x) = \exp \left[ \left( 2^{-x/\Delta x} - 2^{x_s/\Delta x} \right) \ln \beta \right] \quad (5.19)$$

όπου  $\beta$  είναι μία σταθερά η οποία εξαρτάται από τον αριθμό των σημείων του διαστήματος  $x_s$  δηλαδή το  $x_s/\Delta x$ . Ο αριθμός αυτός μπορεί να καθορίσει και τον συντελεστή της (μερικής) ανάκλασης.

Το σύστημα διεγείρεται από μία χρονοσειρά  $\zeta_i(t)$  ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας που εφαρμόζεται σε μία γραμμή του εσωτερικού της λιμενολεκάνης παράλληλα σε ένα όριο (Σχήμα 5.3) και σε απόσταση  $20\Delta x$  από αυτό (Larsen and Dancy, 1983, Lee and Suh, 1998).

Η χρονοσειρά διέγερσης είναι ημιτονοειδής:

$$\eta_i^* = 2 \frac{H}{2} \sin(\sigma(t-t_r)) \cos \phi \ c \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (5.20)$$

με



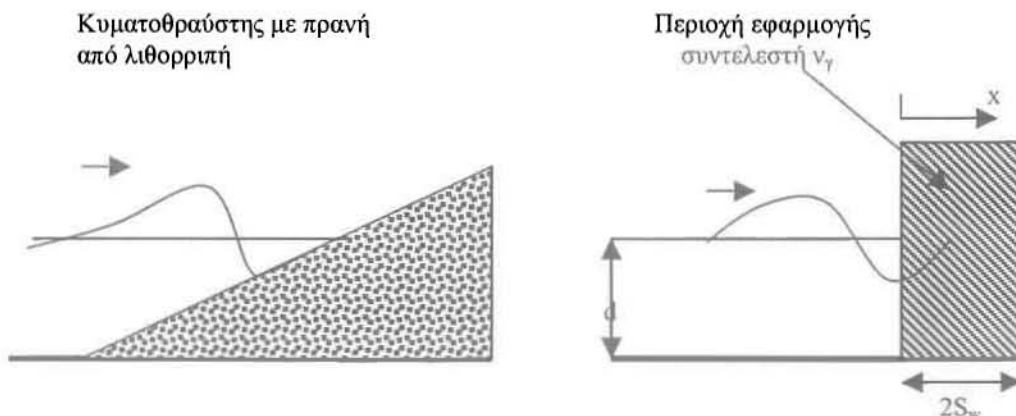


### 5.4.2.2 Τυρβώδης συντελεστής ιξώδους για την προσομοίωση της μερικής ανάκλασης από κυματοθραύστες με πρανή

Όταν ο κυματισμός προσπίπτει σε έναν κυματοθραύστη με πρανή από λιθορριπή ή σε βραχώδη ακτή δεν ανακλάται αλλά και ούτε απορροφάται πλήρως. Ένα μέρος της ενέργειας καταναλώνεται πάνω στον κυματοθραύστη ή τη βραχώδη ακτή ενώ το υπόλοιπο ανακλάται προς την ανοικτή θάλασσα δημιουργώντας στάσιμο κυματισμό που επηρεάζει το κυματικό πεδίο στον λιμένα. Ιδιαίτερη σημασία έχει η ανάκλαση κοντά στην είσοδο του έργου που επηρεάζει την προσέγγιση των πλοίων. Η περιγραφή του φαινομένου αυτού γίνεται με την εισαγωγή ενός τεχνητού τυρβώδους συντελεστή ιξώδους  $\gamma$  (Σχήμα 5.4). Οι εξισώσεις (5.17) στη μονοδιάστατή τους μορφή, γράφονται:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial (U_w d)}{\partial x} = 0$$
$$\frac{\partial U_w}{\partial t} + \frac{c^2}{d} \frac{\partial \eta}{\partial x} - \nu \gamma \frac{\partial^2 U_w}{\partial x^2} = 0$$

(5.20)



**Σχήμα 5.4** Κυματοθραύστης με πρανή και ενεργειακά ισοδύναμη προσομοίωση

Ας υποθέσουμε ότι για ένα μήκος  $2S_w$  το βάθος του νερού μπροστά από τον κυματοθραύστη είναι σταθερό. Η περιοχή εφαρμογής του συντελεστή  $\gamma$  βρίσκεται ανάμεσα  $0 < x < 2S_w$  με πλήρη ανάκλαση στο σημείο  $x=2S_w$ . Για προσπίπτοντα





κυματισμό εύρους  $a_i$  και ανακλώμενο εύρους  $a_r$ , έξω από την περιοχή εφαρμογής του συντελεστή  $\gamma$  ( $\gamma=0$ ) ισχύει η αναλυτική έκφραση:

$$\eta = a_i e^{i(\sigma t - kx)} + a_r e^{i(\sigma t + kx)} \quad (5.21)$$

με  $\sigma^2 = gk \tanh kd$  και  $k = 2\pi/L$ .

Μέσα στην περιοχή εφαρμογής του συντελεστή  $\gamma$  έχουμε:

$$\eta = a_1 e^{i(\sigma t - Kx)} + a_2 e^{i(\sigma t + Kx)} \quad (5.22)$$

όπου  $K$  είναι τώρα μιγαδικός και ικανοποιεί τη σχέση:

$$\sigma^2 - v_\gamma i \sigma K^2 = c^2 K^2 \quad (5.23)$$

Εκφράζοντας για την  $U_w$  παρόμοιες με τις (5.21) και (5.22) σχέσεις και χρησιμοποιώντας τις οριακές συνθήκες (συνέχεια στις συναρτήσεις  $\eta$  και  $U_w$  για  $x=0$  και  $U_w=0$  για  $x=2S_w$ ) μετά από αντικατάσταση στις 5.20 έχουμε την αναλυτική λύση για τον συντελεστή ανάκλασης  $R_s = |a_i/a_r|$ :

$$R_s = \left| \frac{\frac{K}{k} (1 + e^{4iKS_w}) - (1 - e^{4iKS_w})}{\frac{K}{k} (1 + e^{4iKS_w}) + (1 - e^{4iKS_w})} \right| \quad (5.24)$$

Όταν ο συντελεστής ανάκλασης  $R_s$  είναι γνωστός, το παραπάνω σύστημα των εξισώσεων (5.23) και (5.24) λύνεται εύκολα με τη μέθοδο των προσεγγίσεων και έτσι υπολογίζεται ο συντελεστής  $v_\gamma$ .

Ο συντελεστής  $R_s$  για τους κυματοθραύστες με πρηνή από λιθορριπή μπορεί να εκτιμηθεί από εμπειρικές σχέσεις όπως αυτή που προτείνεται από τον Bruun:

$$R_s = A (1 - e^{B I_r}) \quad (5.25)$$

όπου  $A=1.3508$ ,  $B=-0.710$ ,  $I_r = (g/2\pi)^{1/2} \tan \alpha T/H^{1/2}$

Η το ύψος του προσπίπτοντος κύματος και  $\tan \alpha$  την κλίση του πρηνούς.



Η εισαγωγή της μερικής ανάκλασης από τους κυματοθραύστες σε μοντέλα κυματισμών παρουσιάζεται αναλυτικότερα στην εργασία Karambas and Bowers (1996).

### 5.4.2.3 Τυρβώδης συντελεστής ιξώδους για την προσομοίωση της θραύσης τυχαίων κυματισμών

Όταν οι κυματισμοί πλησιάζουν την ακτή, λόγω της επίδρασης της ρηχότητας και τη μείωση του μήκους τους, αυξάνεται το ύψος και η ταχύτητά τους ώστε να διατηρηθεί η ενέργειά τους. Η ροή όμως τότε φτάνει σε οριακή κατάσταση με το ύψος  $H$  να πλησιάζει το βάθος  $d$  και την οριζόντια ταχύτητα στην επιφάνεια  $u$  να πλησιάζει την ταχύτητα μετάδοσης  $c$ . Ο κυματισμός τότε θραύεται και μεταδίδεται θραυόμενος μέχρι την αναρρίχσή του στην ακτή (Σχήμα 5.4).

Το φαινόμενο αυτό περιγράφεται με την εισαγωγή ενός συντελεστή τυρβώδους ιξώδους  $\nu_h$  στη ζώνη θραύσης (Karambas and Koutitas, 1992). Ο συντελεστής τυρβώδους ιξώδους υπολογίζεται από (Battjes, 1975):

$$\nu_h = 2h \left( \frac{D}{\rho} \right)^{1/3} \quad (5.26)$$

όπου  $D$  η απώλεια της ενέργειας λόγω της θραύσης τυχαίων κυματισμών:

$$D = \frac{1}{4} Q_b f \rho g H_m^2 \quad (5.27)$$

με  $f=1/T_p$  ( $T_p$  η περίοδος κορυφής του φάσματος),  $H_m$  το μέγιστο δυνατό ύψος κύματος ( $\gamma_r h$ , με  $\gamma_r$  μία σταθερά,  $\gamma_r \approx 0.6$ ) και  $Q_b$  είναι το ποσοστό των θραυόμενων κυματισμών σε ένα συγκεκριμένο σημείο.

Μετά την παραδοχή κατανομής Rayleigh, ο συντελεστής  $Q_b$  δίνεται από τη λύση της εξίσωσης (5.40).

Η παραπάνω εξίσωση της απώλειας (5.27) μπορεί να περιγράψει την απώλεια τυχαίων κυματισμών σε πολύπλοκη βυθομετρία.

Λόγω της πεπλεγμένης μορφής της εξίσωσης (5.40) μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την παρακάτω ρητή έκφραση:



$$D = \left[ 1 - \exp \left[ - \left( \frac{\bar{E}}{\gamma_r^2 \bar{E}_{ref}} \right)^{10} \right] \right] 2f \bar{E} \quad (5.28)$$

όπου  $\bar{E}$  είναι η πυκνότητα της ενέργειας (σχέση 5.12) και  $\bar{E}_{ref}$  είναι η μέγιστη δυνατή κυματική ενέργεια σε ένα συγκεκριμένο βάθος:

$$\bar{E}_{ref} = \rho g \frac{d^2}{8} \quad (5.29)$$

Στην παραπάνω σχέση (5.29) η ποσότητα μέσα στην καμπύλη εκφράζει την πιθανότητα να είναι ένας κυματισμός θραυόμενος.

#### 5.4.2.4 Λογισμικό

Η παραπάνω θεωρητική ανάλυση εφαρμόζεται στο μοντέλο WAVE-L και HARBOR. Το πρόγραμμα HARBOR.FOR δέχεται δεδομένα το ύψος κύματος  $H_0$  την περίοδο  $T$  (per), το χρονικό βήμα  $\Delta t (=dt)$ , το χωρικό  $\Delta x (=dx)$ , τη γωνία πρόσπτωσης  $\beta_{in}$  και το συνολικό χρόνο εφαρμογής του μοντέλου  $t_{end}$ . Το πεδίο διακριτοποιείται σε  $(im \times jm)$  σημεία (με μέγιστη τιμή των  $x$  και  $y$ ,  $x_{max} = im \times dx$ ,  $y_{max} = jm \times dx$ ). Ο άξονας  $x$  αντιστοιχεί στα σημεία  $i$  ενώ ο  $y$  στα σημεία  $j$ . Πριν από τη διακριτοποίηση βέβαια έχει καθοριστεί το χωρικό βήμα  $dx$  της τάξεως του:

$$dx: L/10 \quad (L \text{ το μήκος κύματος})$$

και το χρονικό  $dt$  μικρότερο από:

$$dt < 0.5 dx/c \quad (c \text{ η ταχύτητα μετάδοσης})$$

Η διακριτοποίηση του πεδίου γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε η είσοδος του λιμενικού έργου να βρίσκεται στη 'Νότια' πλευρά του καννάβου όπου βρίσκεται και η γραμμή (κατά  $x$ ) εισόδου του κύματος (input). Στα 20 πρώτα σημεία εφαρμόζεται η οριακή συνθήκη απορρόφησης. Για το λόγο αυτό το λιμενικό έργο περιγράφεται στα σημεία  $(i, j > 20)$ .



Για τη δημιουργία του αρχείου δεδομένων DEPTH.DAT λειτουργούμε ως εξής. Αρχικά γράφουμε στην πρώτη σειρά τις μέγιστες τιμές  $im$  και  $jm$ . Για κάθε μία τιμή του  $j$  (αρχίζοντας από  $j=1$ ) γράφουμε για όλα τα  $i$  τα βάθη. Στην θέση των κατασκευών (ολική ανάκλαση από κυματοθραύστες με κατακόρυφα μέτωπα) γράφουμε την τιμή του βάθους  $-1$ . Το πρόγραμμα αυτόματα θα μηδενίσει τις μεταβλητές στα σημεία αυτά και θα ικανοποιήσει οι οριακές συνθήκες ανάκλασης. Πριν από κάθε ομάδα  $im$  σημείων αρχή γράφεται και η τιμή του  $j$  που αντιστοιχεί σε αυτά.

Το αρχείο EDDY.DAT έχει την ίδια μορφή με το αρχείο DEPTH.DAT. Τα αποτελέσματα του μοντέλου (ύψος κύματος  $H$  σε όλα τα σημεία του πεδίου) γράφονται στο παρακάτω αρχείο:

height.dat

με FORMAT:

$x, y, H(x,y)$

Με παρόμοιο τρόπο γράφονται και τα υπόλοιπα αποτελέσματα, όπως π.χ. οι μέγιστες οριζόντιες ταχύτητες  $U_w\text{-max}(x,y)$ ,  $V_w\text{-max}(x,y)$ , η ανύψωση  $\eta$ , οι τάσεις ακτινοβολίας  $S_{ij}$

Η εισαγωγή της πολύπλοκης βυθομετρίας επιτυγχάνεται με τη βοήθεια του προγράμματος MakeGrid.for. Το πρόγραμμα MakeGrid χρησιμοποιείται για την δημιουργία του αρχείου βαθών συμπεριλαμβανομένης και της περιγραφής στερεών όγκων που περιέχονται σε μία θαλάσσια έκταση (π.χ. νησιά, κυματοθραύστες). Η λειτουργία του βασίζεται στη παρακάτω διαδικασία:

1. Με τη χρήση digitizer εισάγεται η περιγραφή των βυθομετρικών δεδομένων της παράκτιας περιοχής που προσομοιώνεται.
2. Στη συνέχεια με τη βοήθεια του προγράμματος surfer το αρχείο μετατρέπεται σε ένα μητρώο βαθών  $im \times jm$  με βάση τον κάρναβο που επιλέχθηκε.



3. Κατόπιν περιγράφουμε τις στερεές κατασκευές (τεχνητά έργα ή ακτές) δίνοντας τις συντεταγμένες των κορυφών. Κάθε στερεός όγκος θεωρείται ως ένα κλειστό πολύγωνο και έτσι γίνεται εύκολα η αναγνώριση των εσωτερικών σημείων των πολυγώνων. Σε αυτά τα σημεία δίδεται τιμή αρνητικού βάθους ώστε να αναγνωριστεί από την αριθμητική επίλυση.

Το μέγεθος του αρχείου βαθών που μπορεί να δημιουργηθεί είναι της τάξεως εκατομμυρίων σημείων (!), που θα ήταν αδύνατο να εισαχθούν χωρίς τη βοήθεια παρόμοιων προγραμμάτων. Η ίδια διαδικασία χρησιμοποιείται και για να δημιουργηθούν άλλα αρχεία που θα δώσουν τις τιμές των συντελεστών τριβής  $f_b$  και του συντελεστή τυρβώδους ιξώδους  $\nu_\gamma$ .

## 5.5 Εφαρμογή στο λιμένα Νέου Μαρμαρά

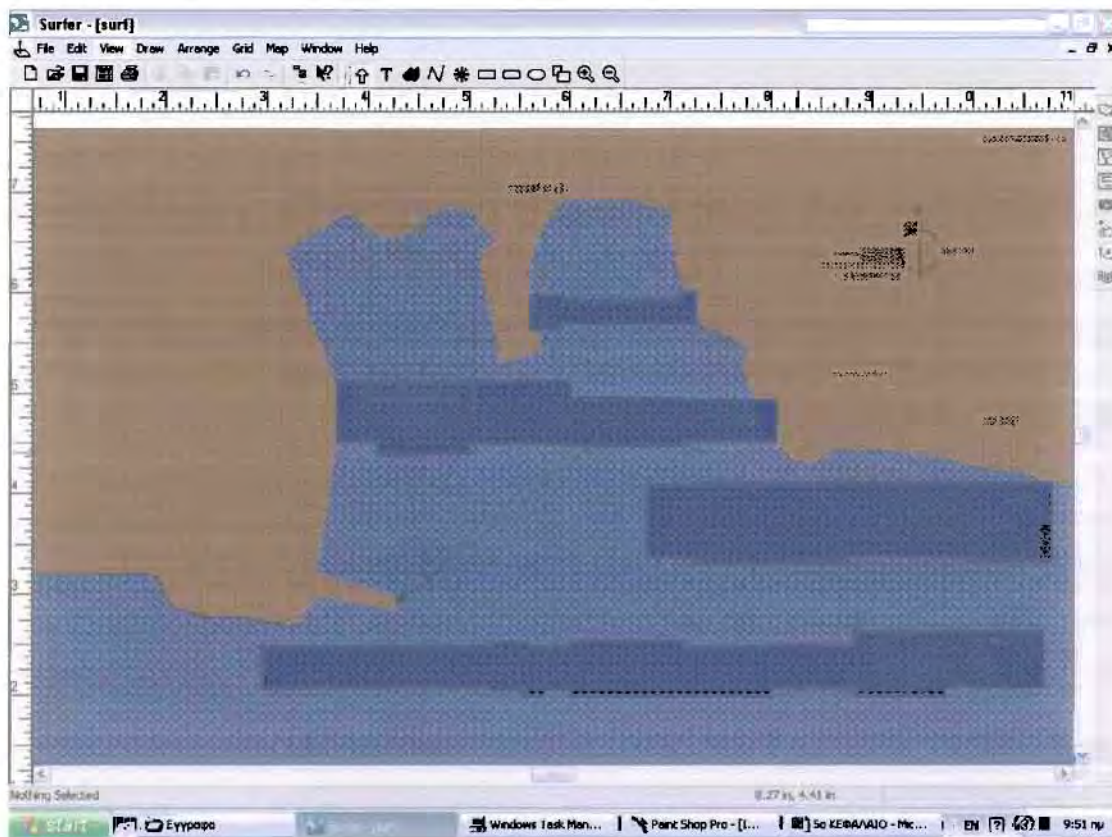
Στην παρούσα εργασία σκοπός μας είναι να εξετάσουμε μέσω μαθηματικού μοντέλου τις κυματικές συνθήκες που θα επικρατήσουν στο λιμένα του Νέου Μαρμαρά μετά την προσθήκη των πλωτών κυματοθραυστών και να τις συγκρίνουμε με αυτές που θα επικρατούσαν αν είχαμε την κλασική λύση του σταθερού κυματοθραύστη, αλλά και σε σχέση με την απουσία οποιουδήποτε τεχνικού έργου. Από τα αποτελέσματα που θα συγκεντρώσουμε απ'το μαθηματικό μας μοντέλο για κάθε μια απ'τις παραπάνω περιπτώσεις θα μπορέσουμε να εξάγουμε ασφαλή και αξιόπιστα συμπεράσματα για τη χρησιμότητα των πλωτών κυματοθραυστών. Μια πιο ολοκληρωμένη εργασία θα περιλάμβανε τη σύγκριση όλων των παραπάνω με πειραματικές μετρήσεις, αλλά κάτι τέτοιο ξεφεύγει απ'τους σκοπούς και τους χρονικούς περιορισμούς της παρούσας διπλωματικής.

Για την καλύτερη κατανόηση της πορείας της εργασίας, τη χωρίζουμε στα παρακάτω στάδια .



### 5.5.1 Συγκέντρωση αρχικών στοιχείων

Το πρώτο απαραίτητο στοιχείο για την κατάστρωση του μαθηματικού μας μοντέλου ήταν η οριζοντιογραφία της περιοχής του λιμένα του Νέου Μαρμαρά. Η οριζοντιογραφία αυτή σαρώθηκε (scanning) και αποθηκεύτηκε σε ψηφιακή μορφή (με επεκτάσεις .jpg και .bmp) και μεταφέρθηκε στο σχεδιαστικό πρόγραμμα AutoCAD. Στη συνέχεια, εισαγάγαμε το παραπάνω σχέδιο στο πρόγραμμα Surfer όπου έγινε διακριτοποίηση της ακτής, των λιμενικών κατασκευών και της βυθομετρίας του εσωτερικού του λιμένα. Κατ'αυτόν τον τρόπο δημιουργήθηκαν τρία ξεχωριστά αρχεία που θα χρησιμοποιήσουμε αργότερα στο μαθηματικό μας μοντέλο.



Ένα άλλο απαραίτητο στοιχείο είναι η καταγραφή του κυματικού κλίματος που επικρατεί στο εσωτερικό του λιμένα. Τα ανεμολογικά στοιχεία βρέθηκαν απ'την οριστική μελέτη του λιμενοβραχίονα του Νέου Μαρμαρά, συνταχθείσα από τον Δρ. Πολιτικό Μηχανικό Σ. Χριστόπουλο ενώ τα επιπρόσθετα δεδομένα (όπως το γραμμικό μήκος αναπτύγματος  $F$  και η διάρκεια πνοής του ανέμου  $t_D$ ) υπολογίσθηκαν

από χάρτη της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού. Πιο συγκεκριμένα, η προσομοίωση έγινε για τους δύο επικρατούντες κυματογενείς ανέμους οι οποίοι είναι ο Νότιος ορμητικός, με ταχύτητα 24 m/s και απόσταση απ' την απέναντι ακτή 22 km, και ο Νοτιοδυτικός ορμητικός, ταχύτητας 24 m/s και απόστασης απ' την απέναντι ακτή 20 km. Επιπλέον έγιναν υπολογισμοί και για πιο μετριοπαθείς καταστάσεις, δηλαδή για μέτριους ανέμους προκειμένου να αξιολογηθεί η προστασία που δύναται να προσφέρουν οι πλωτοί κυματοθραύστες σε κάθε περίπτωση.

### 5.5.2 Επεξεργασία δεδομένων μέσω προγραμμάτων Fortran

Χρησιμοποιώντας τα παραπάνω δεδομένα ( το γραμμικό μήκος αναπτύγματος  $F$ , τη ρυθμισμένη ταχύτητα ανέμου  $U_A$ , τη διάρκεια πνοής του ανέμου  $t_D$  ) στο πρόγραμμα της Fortran *Jonswap.FOR* που βασίζεται στην πρόγνωση κυματισμών με τη μέθοδο Jonswap όπως έχει ήδη αναφερθεί, υπολογίζεται το ύψος σημαντικού κύματος  $H_s$  και η περίοδος μέγιστης ενεργειακής πυκνότητας  $T_p$ . Συγκεντρωτικά, τα αποτελέσματα του προγράμματος φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Άνεμος	Ταχύτητα (m/sec)	Διάρκεια (sec)	Fetch (m)	$T_p$ (sec)	$H_s$ (m)
N	24	21600	22000	5,04	1,82
ΝΔ	24	21600	22000	4,88	1,73
N	15	21600	20000	4,00	0,91
ΝΔ	15	21600	20000	3,97	0,88

Πίνακας 5.1

Για τις υπολογισμένες περιόδους απ' το πρόγραμμα *RandT.for* το οποίο βασίζεται στις εξισώσεις που αναφέρθηκαν στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο καταφέρνουμε να προσδιορίσουμε προσεγγιστικά τον συντελεστή διάδοσης  $C_t$  (transmission coefficient) και τον συντελεστή ανάκλασης  $C_r$  (reflection coefficient). Ο πρώτος ορίζεται ως ο λόγος του ύψους του διαδιδόμενου κύματος στα κατάντη προς το



προσπίπτων, ενώ ο δεύτερος κατά αντιστοιχία είναι ο λόγος του ύψους του ανακλώμενου κύματος στα ανάντη προς το ύψος του προσπίπτοντος κύματος. Επιπλέον, στο πρόγραμμα είναι απαραίτητο να δώσουμε το μήκος του πλωτού κυματοθραύστη, το βύθισμά του και το βάθος πάνω απ' το οποίο βρίσκεται. Στη δική μας περίπτωση θεωρούμε μήκος  $L=20\text{m}$ , βύθισμα  $h=1\text{m}$  και βάθος  $H=20\text{m}$ . Τα αποτελέσματα του προγράμματος συγκεντρώνονται στον παρακάτω πίνακα:

Άνεμος	$T_s$ (sec)	Μήκος (m)	Βύθισμα (m)	Βάθος (m)	$C_t$
N (ορμητικός)	5,04	20	1	20	0,202
NΔ (ορμητικός)	4,88	20	1	20	0,172
N (μέτριος)	4,00	20	1	20	0,060
NΔ (μέτριος)	3,97	20	1	20	0,057

**Πίνακας 5.2**

Τέλος, με την εισαγωγή των υπολογιζόμενων συντελεστών διάθλασης, του μήκους του κυματοθραύστη, του βάθους στο οποίο βρίσκεται και των περιόδων του κύματος στο πρόγραμμα *Fscale.for*, υπολογίζουμε το συντελεστή “απωλειών”  $f$ , στη θέση του κυματοθραύστη.

Άνεμος	$T_s$ (sec)	Μήκος (m)	Βάθος (m)	$C_t$	$f$
N (ορμητικός)	5,04	20	20	0,202	1,03
NΔ (ορμητικός)	4,88	20	20	0,172	1,05
N (μέτριος)	4,00	20	20	0,060	1,16
NΔ (μέτριος)	3,97	20	20	0,057	1,17

**Πίνακας 5.3**





Ο συντελεστής “απωλειών”  $f$  είναι απαραίτητος στο μαθηματικό μοντέλο που έχουμε καταστρώσει αφού αυτός εφαρμόζεται αντί του πλωτού κυματοθραύστη.

### 5.5.3 Διαδικασία Προσομοίωσης

Έχοντας πλέον συλλέξει και υπολογίσει όλα τα απαραίτητα στοιχεία για την κατάστρωση του μοντέλου υπολογισμού *harbor.for*, ξεκινάμε τη διαδικασία επεξεργασίας των δεδομένων στο εν λόγω μαθηματικό ομοίωμα. Όπως αναφέρθηκε το πρόγραμμα δέχεται δεδομένα το ύψος κύματος  $H_0$  την περίοδο  $T$ , το χρονικό βήμα  $dt$ , το χωρικό  $dx$ , τη γωνία πρόσπτωσης  $\varphi_{in}$  και το συνολικό χρόνο εφαρμογής του μοντέλου  $t_{end}$ .

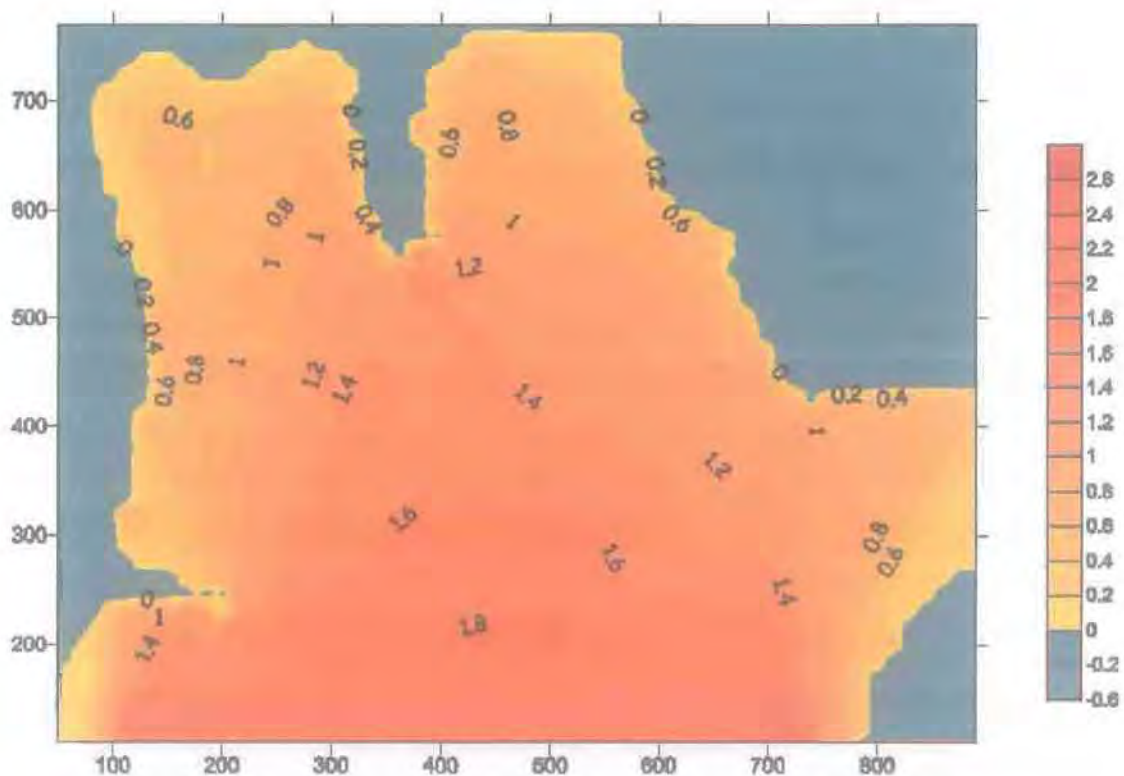
Στην περίπτωση του λιμένα του Νέου Μαρμαρά διατηρούμε σταθερά σε κάθε διαδικασία επεξεργασίας το χρονικό βήμα  $dt=0,05\text{sec}$  το χωρικό  $dx=5\text{m}$  και το συνολικό χρόνο εφαρμογής του μοντέλου  $t_{end}=300\text{ sec}$ , ενώ αλλάζουμε για κάθε περίπτωση το ύψος κύματος  $H_0$  και την περίοδο  $T$  σύμφωνα με τον πίνακα 5.1. Την δε γωνία πρόσπτωσης  $\varphi_{in}$  την θέτουμε  $\varphi_{in}=0$  για τους Νότιους ανέμους και  $\varphi_{in}=-0,5$  για τους Νοτιοδυτικούς. Επιπλέον, αλλάζουμε ανάλογα με την θεώρηση σταθερού ή πλωτού κυματοθραύστη το αρχείο δεδομένων *eddy.dat* στο οποίο επιτυγχάνεται ουσιαστικά η προσομοίωση (μέσω του συντελεστή “απωλειών”  $f$ ) του τεχνικού μας έργου.

Για την καλύτερη κατανόηση όλων όσων αναφέρθηκαν παραπάνω αλλά και για τη δυνατότητα σύγκρισης των επιλογών μας, παρουσιάζεται αναλυτικά η επεξεργασία και τα αποτελέσματα του μαθηματικού μοντέλου για την περίπτωση όπου έχουμε Νότιο ορμητικό άνεμο και θεώρηση :

- 1) Απουσία οποιουδήποτε τεχνικού έργου.
- 2) Σταθερού κυματοθραύστη.
- 3) Πλωτού κυματοθραύστη.

### 5.5.3.1 Απουσία οποιουδήποτε τεχνικού έργου

Η πρώτη περίπτωση που εξετάζουμε είναι ουσιαστικά η υφιστάμενη κατάσταση των συνθηκών που επικρατούν στο εσωτερικό του λιμένα του Νέου Μαρμαρά, πριν την κατασκευή οποιουδήποτε τεχνικού έργου. Τα δεδομένα που εισάγουμε για τη συγκεκριμένη κατάσταση είναι  $H_0=1.82$ ,  $T=5.04$ ,  $\text{fin}=0$ ,  $dx=5$ ,  $dt=0.05$ ,  $t_{\text{end}}=300$  sec. Από τα αποτελέσματα της κατάστασης αυτής θα μπορούσαμε να κατανοήσουμε την αναγκαιότητα ή μη, δημιουργίας ενός κυματοθραύστη και θα υπάρξει ένα κοινό μέτρο σύγκρισης όσον αφορά την αποτελεσματικότητα των δύο επιλογών μας (σταθερού και πλωτού κυματοθραύστη). Η απεικόνιση της κατανομής των κυμάτων παρουσιάζεται στο παρακάτω σχέδιο.

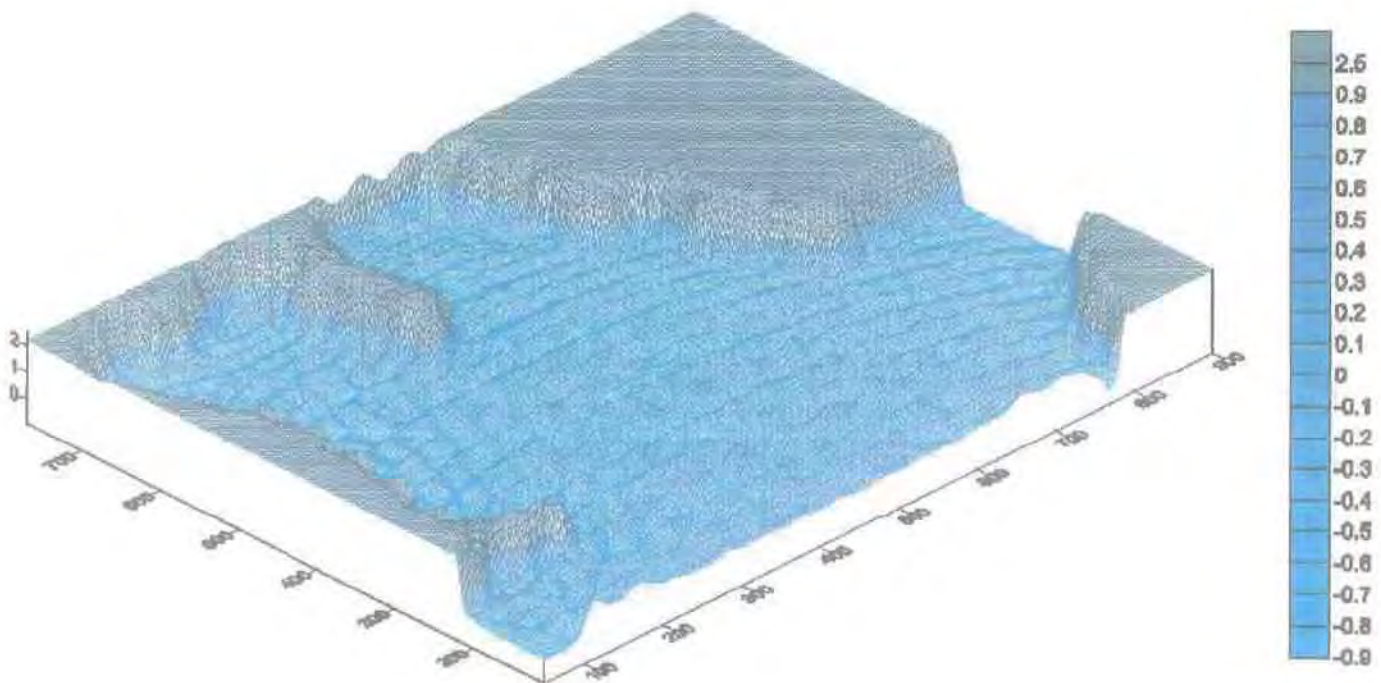


Σχέδιο 5.1

Παρατηρούμε επομένως ότι παρά τη φυσική προστασία που παρέχει στο λιμένα μας η γεωγραφική του θέση, τα ύψη κύματος παραμένουν σχετικά υψηλά,

κάτι που οφείλεται κυρίως στις διάφορες ανακλάσεις, δυσχεραίνοντας έτσι την αρμονική λειτουργία του λιμανιού και καθιστώντας απαραίτητη την κατασκευή ενός τεχνικού έργου που θα αποκαταστήσει την ήρεμη κυματική κατάσταση που επιζητούμε. Πιο συγκεκριμένα, απ' το παραπάνω σχήμα γίνεται σαφές ότι τα ύψη κύματος που επικρατούν στο περιοχή που εξετάζουμε είναι της τάξης του ενός μέτρου (1m) και μόνο πολύ κοντά στην ακτή, λόγω θραύσης, κυμαίνονται σε αποδεκτές για την ευχερή λειτουργία του λιμανιού τιμές (0.4m-0.2m).

Όλα όσα αναφέρθηκαν είναι δυνατόν να απεικονιστούν και σε τρισδιάστατη μορφή, γεγονός που μας δίνει ένα πιο απτό οπτικό αποτέλεσμα και μια καλύτερη αντίληψη των επικρατούντων συνθηκών.



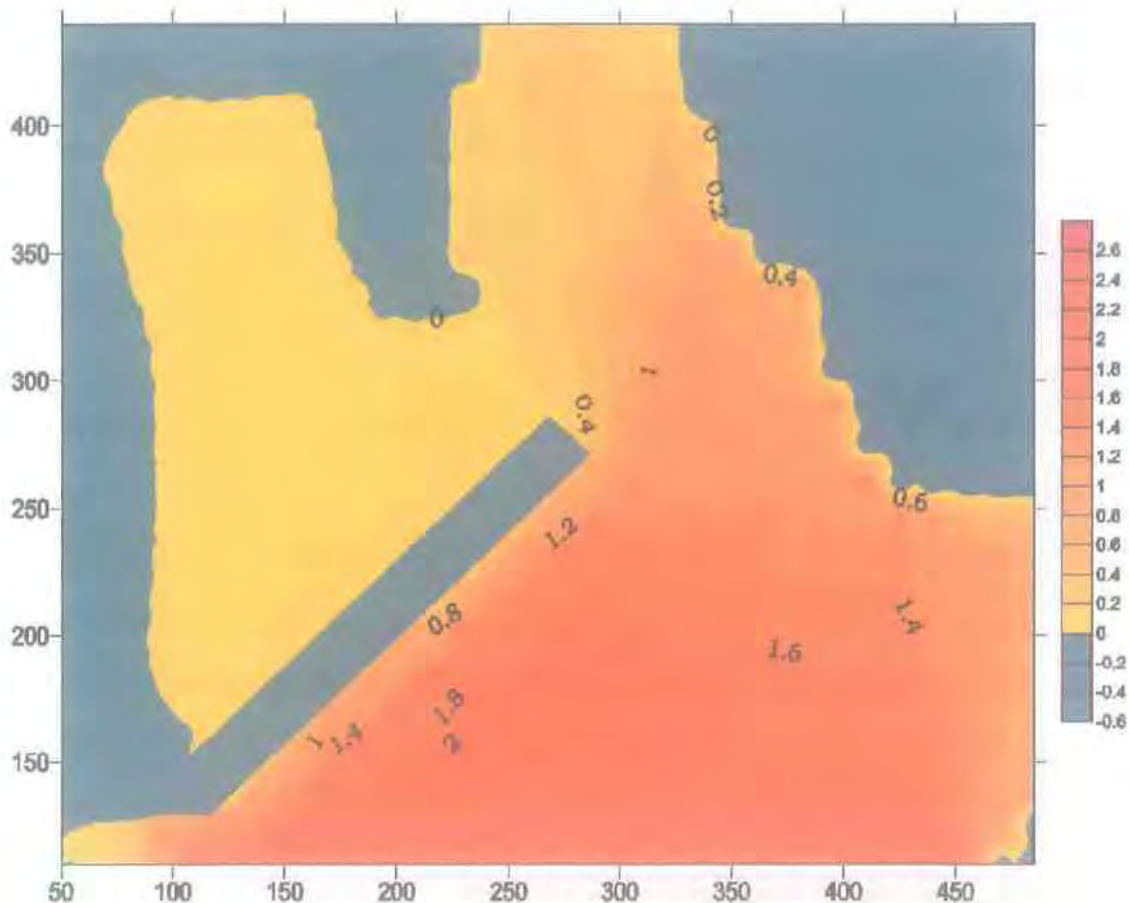
Σχέδιο 5.2

### 5.5.3.2 Σταθερός κυματοθραύστης

Η περίπτωση του σταθερού κυματοθραύστη αναμένουμε να παρουσιάζει την ευμενέστερη κατάσταση από άποψη κυματικού κλίματος στο εσωτερικό του λιμένα.



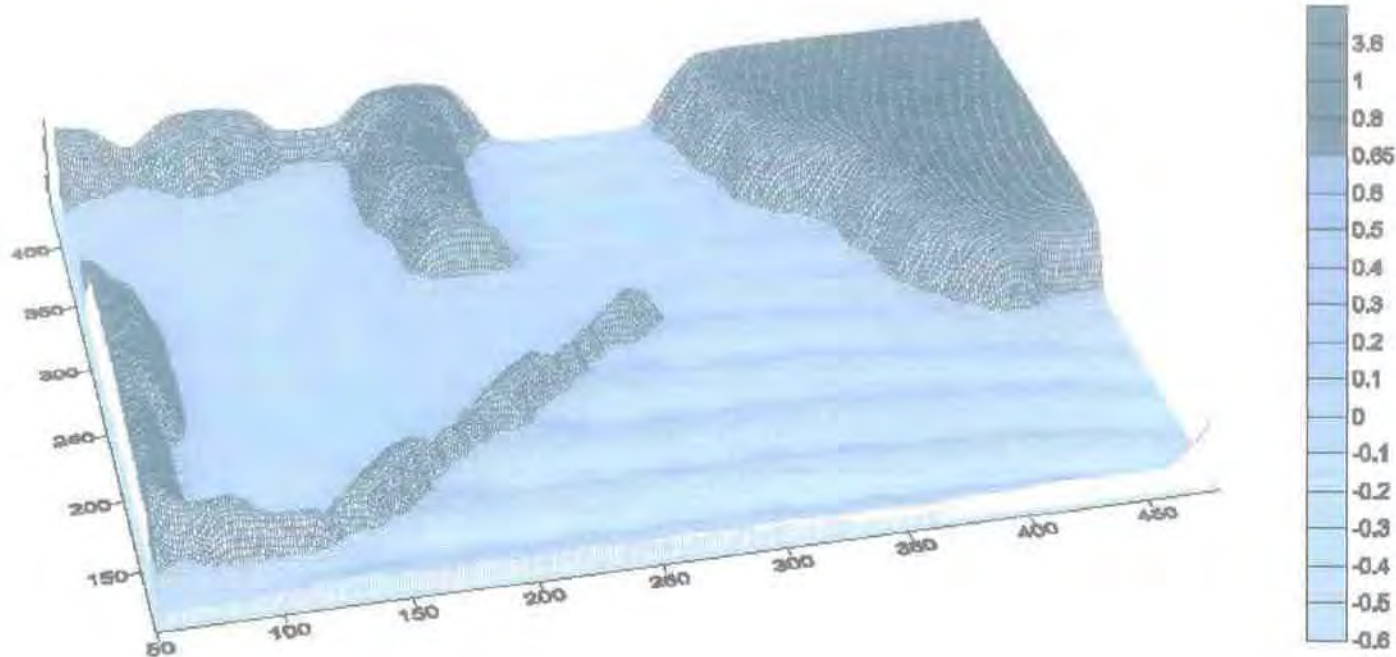
Το πρόγραμμα ξεκινάει την επεξεργασία των στοιχείων και μετά το πέρας της διαδικασίας προσομοίωσης μας δίνει σε γραφική απεικόνιση την παρακάτω διαμόρφωση των κυματικών συνθηκών.



**Σχέδιο 5.3**

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε η κατασκευή ενός σταθερού κυματοθραύστη δημιουργεί ιδανικές κυματικές συνθήκες στο εσωτερικό του λιμένα. Πιο συγκεκριμένα διαπιστώνεται ότι ενώ το ύψος κύματος στην είσοδο του λιμένα είναι  $H_0=1.8\text{m}$ , στην προστατευμένη απ'τον κυματοθραύστη περιοχή το κύμα μειώνεται σε  $0.2\text{m}$ . Η αποτελεσματικότητα επομένως του εν λόγω τεχνικού έργου είναι πλήρης και η προστασία που παρέχει στο λιμάνι μας απόλυτη. Όλα αυτά βεβαίως θα πρέπει συνυπολογιστούν με οικονομικά αλλά και περιβαλλοντικά μεγέθη προκειμένου να καταλήξουμε σε ένα ασφαλές συμπέρασμα που θα εξετάζει μέσα από ένα πιο γενικό και ολοκληρωμένο πρίσμα το πρόβλημα που μας τίθεται.

Έχουμε επιπλέον τη δυνατότητα μέσω του προγράμματος Surfer να αναπαραστήσουμε τις παραπάνω κυματικές ισοϋψείς σε τρισδιάστατη γραφική απεικόνιση.

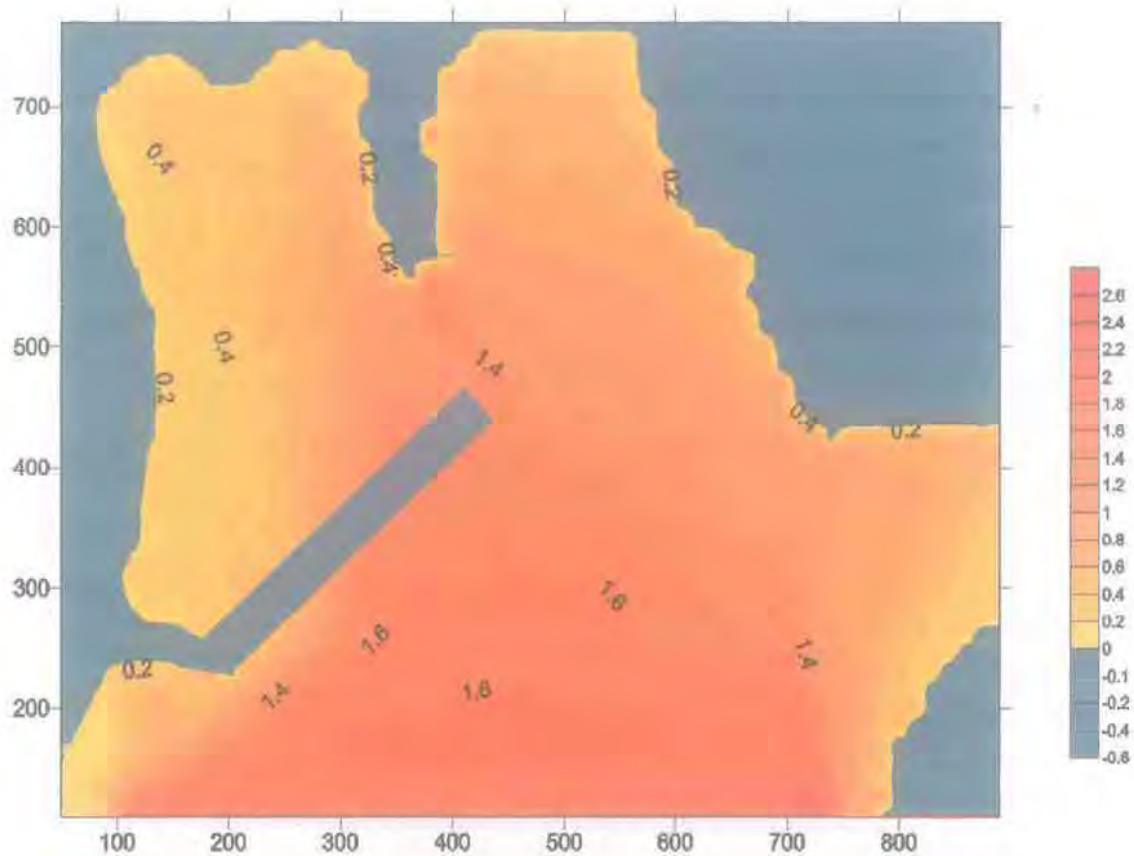


Σχέδιο 5.4

### 5.5.3.3 Πλωτός κυματοθραύστης

Στην τελευταία θεώρηση έχουμε την εισαγωγή του πλωτού κυματοθραύστη που αποτελεί και το κύριο αντικείμενο διερεύνησης της παρούσας εργασίας. Από τα στοιχεία που θα εξάγει το μαθηματικό μοντέλο δυνάμεθα να διατυπώσουμε μια προκαταρκτική άποψη και να αποκτήσουμε μια σαφή αντίληψη της αποτελεσματικότητας του συγκεκριμένου τεχνικού έργου. Επιπρόσθετα, γίνεται πλέον δυνατή η σύγκριση -μέσω των αποτελεσμάτων τους- των διάφορων επιλογών μας σε ένα πρωταρχικό τουλάχιστον επίπεδο. Οι κυματικές ισοϋψείς που θα επικρατήσουν στο λιμένα απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα.

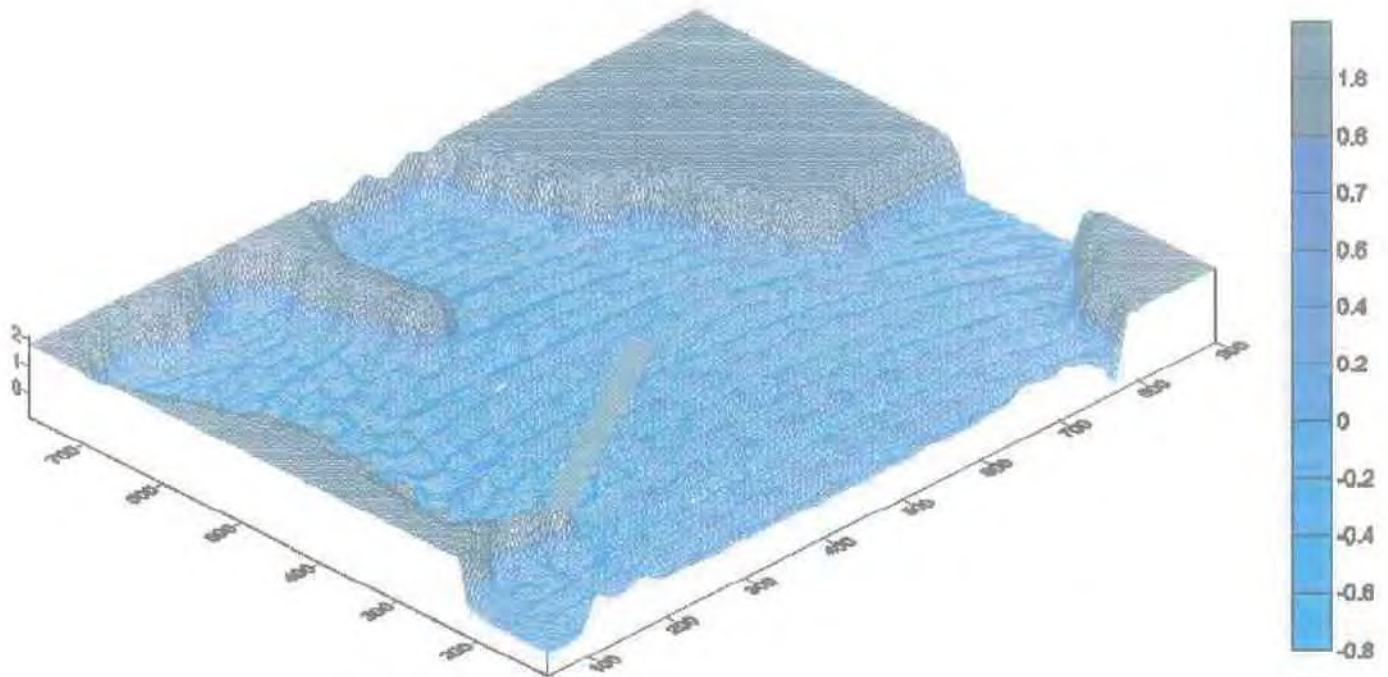




**Σχέδιο 5.5**

Παρατηρώντας την παραπάνω απεικόνιση συμπεραίνουμε ότι η κατασκευή ενός πλωτού κυματοθραύστη οδηγεί στη σταδιακή μείωση του αρχικού ύψους κύματος στην είσοδο του λιμένα από  $H_0=1.8\text{m}$  σε  $0.6\text{m}$  και  $0.4\text{m}$  στην περιοχή που μας ενδιαφέρει να επικρατούν ήπιες κυματικές συνθήκες. Οι τιμές αυτές του ύψους κύματος αν και συγκρινόμενες με αυτές που θα είχαμε στην περίπτωση του σταθερού κυματοθραύστη είναι αρκετά υψηλότερες (ήταν σχεδόν μηδενικού ύψους το κύμα που πέρναγε), κυμαίνονται σε ανεκτά για τη λειτουργία του λιμανιού επίπεδα και η αποτελεσματικότητα της πλωτής μας κατασκευής σε σχέση με την ανυπαρξία οποιουδήποτε τεχνικού έργου, είναι αδιαμφισβήτητη.

Προκειμένου να αποκτήσουμε μια τρισδιάστατη γραφική θεώρηση των κυματικών συνθηκών στο εσωτερικό του λιμένα του Νέου Μαρμαρά σε περίπτωση κατασκευής πλωτού κυματοθραύστη ακολουθεί το παρακάτω σχήμα.



**Σχέδιο 5.6**

Έχοντας την παραπάνω ολοκληρωμένη επεξεργασία και ανάλυση της δυσμενέστερης κατάστασης για το υπό εξέταση λιμάνι -που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι η επικράτηση Νότιων ορμητικών ανέμων- μπορούμε να αποκτήσουμε μια γενική αντίληψη της κατάστασης που θα επικρατήσει σε κάθε περίπτωση για τη δυσμενή κυματικά περίοδο. Ο σχεδιασμός μας όμως δεν αρκείται αποκλειστικά στην διερεύνηση της δυσμενέστερης επικρατούσας κατάστασης, αλλά ενδιαφέρον παρουσιάζει και η εξέταση της αποτελεσματικότητας και χρησιμότητας των τεχνικών μας έργων σε πιο ήπιες κυματικά συνθήκες.

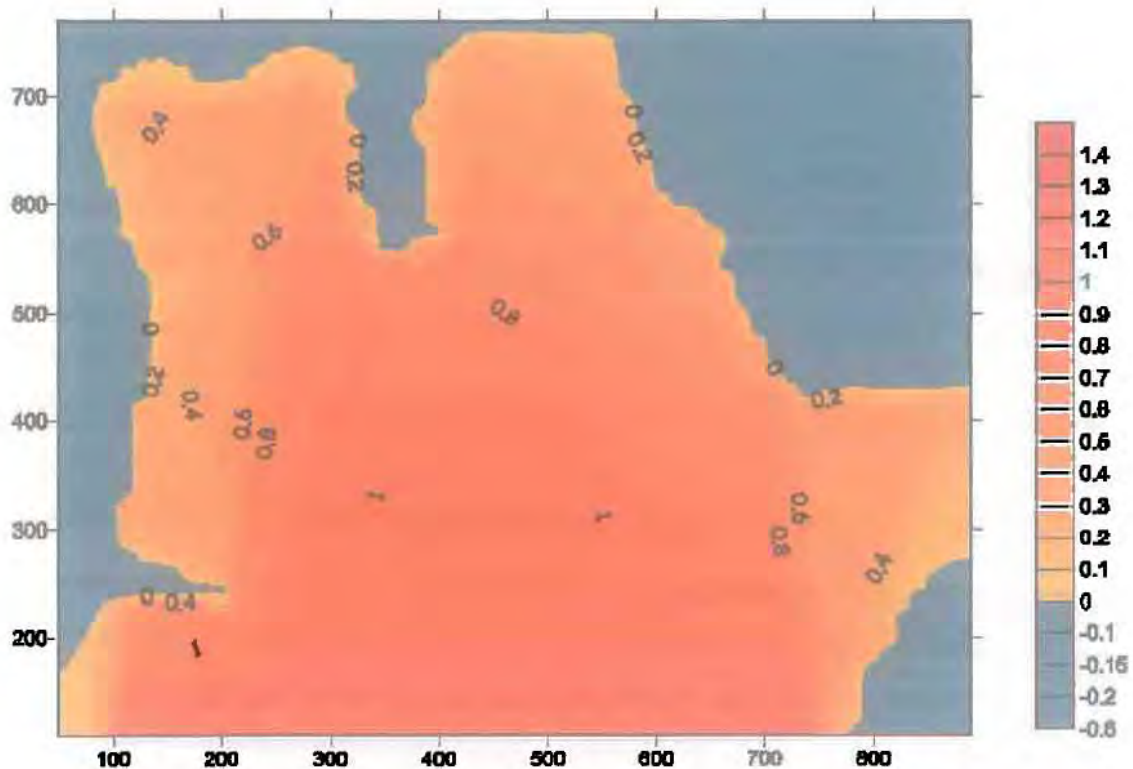


### 5.5.3.4 Διερεύνηση σε ήπιες συνθήκες

Όμοια λοιπόν με προηγουμένως εξετάζουμε την περίπτωση Νότιου μέτριου ανέμου θεωρώντας αρχικά ότι δεν παρεμβάλλεται κανένα τεχνικό έργο και εν συνεχεία την κατασκευή πλωτού κυματοθραύστη. Η θεώρηση σταθερού κυματοθραύστη θεωρείται περιττή αφού εκ των προτέρων γνωρίζουμε ότι εφόσον στις δυσμενέστερες κυματικές συνθήκες η προστασία που προσέφερε στο λιμένα μας ήταν απόλυτη, άρα και σε πιο ήπιες καταστάσεις θα είναι εξίσου ικανοποιητική.

Εξετάζοντας την περίπτωση της μη ύπαρξης κανενός τεχνικού έργου σε ήπιες συνθήκες εισάγουμε ως δεδομένα το αρχικό ύψος κύματος  $H_0=0.91\text{m}$ , την περίοδο  $T=4\text{sec}$ , τη γωνία πρόσπτωσης για Νότιο άνεμο  $\text{fin}=0$ , το χωρικό και χρονικό βήμα  $dx=5, dt=0.05$  και το συνολικό χρόνο εφαρμογής του μοντέλου  $t_{end}=300\text{ sec}$ .

Η απεικόνιση της κατανομής των κυμάτων παρουσιάζεται στο παρακάτω σχέδιο.

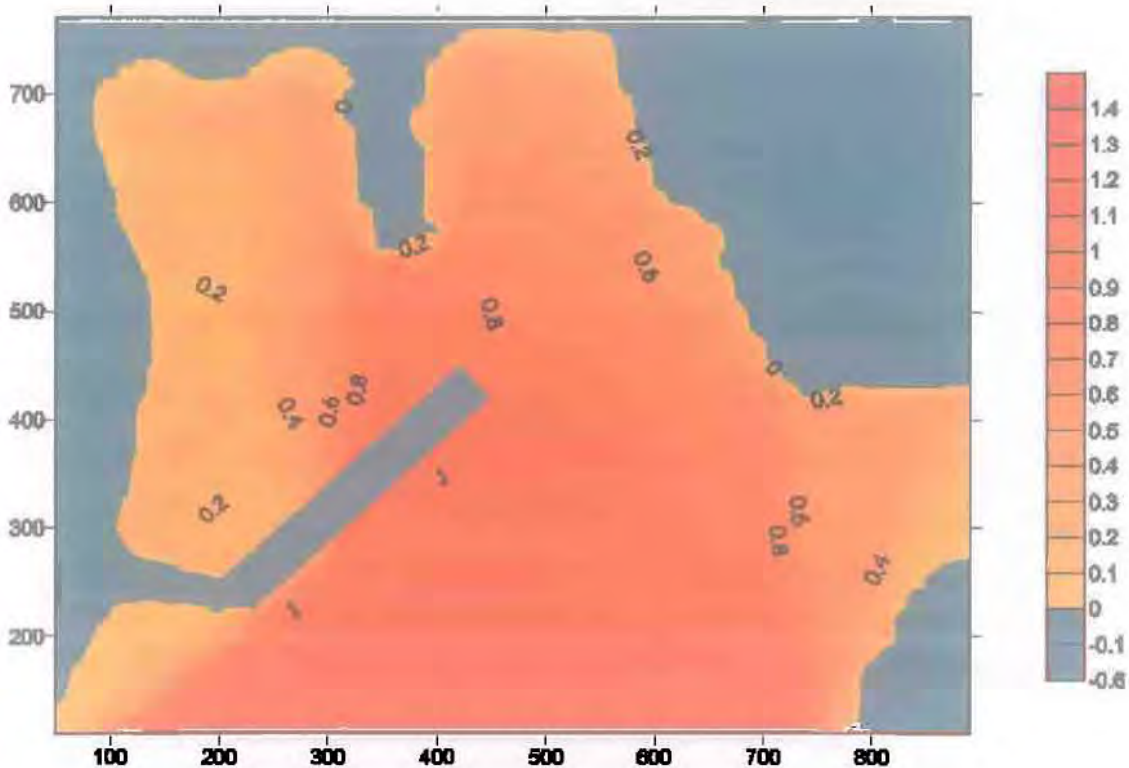


Σχέδιο 5.7



Παρατηρούμε ότι ακόμα και σε ήπιες συνθήκες το ύψος κύματος -αν και δεν είναι απαγορευτικό για τη λειτουργία του λιμένα-εν τούτοις είναι της τάξεως των 0.60m, γεγονός που δυσχεραίνει κάποιες δραστηριότητες.

Εν συνεχεία εξετάζουμε την παρεμβολή του πλωτού κυματοθραύστη, προκειμένου να αξιολογήσουμε την αποτελεσματικότητά του σε μικρότερα ύψη κύματος. Μετά την επεξεργασία του μαθηματικού μοντέλου καταλήγουμε στο παρακάτω σχήμα.



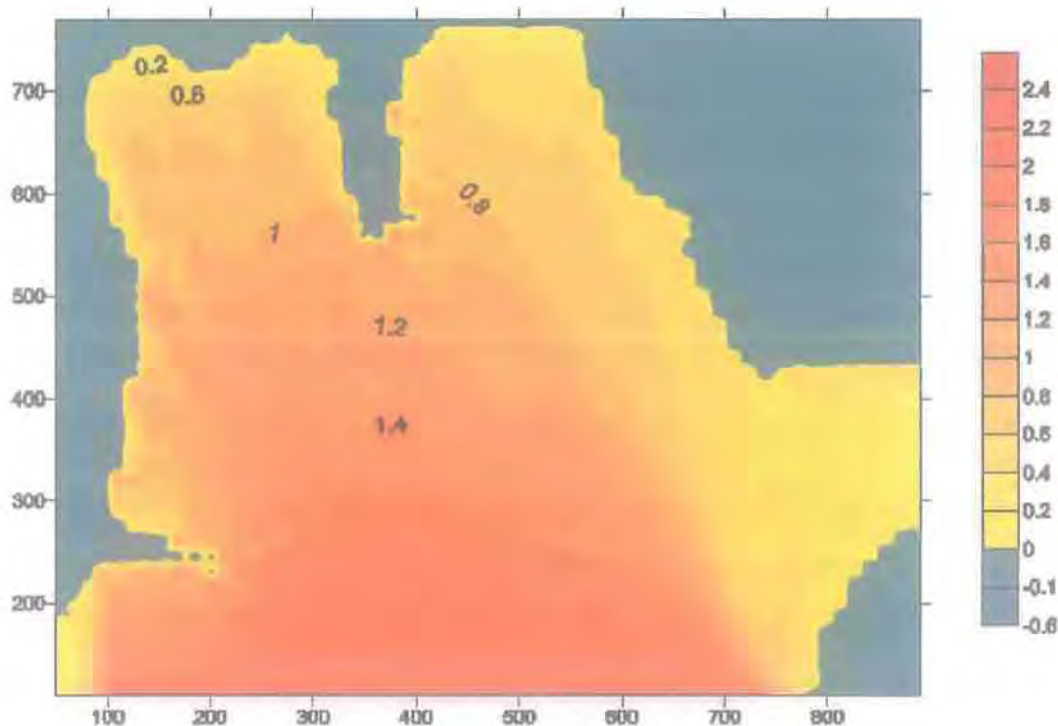
Σχέδιο 5.8

Είναι εύκολα αντιληπτό ότι ο πλωτός κυματοθραύστης αποσβένει σχεδόν ολοκληρωτικά την ενέργεια των κυματισμών στο εσωτερικό του λιμένα, καθιστώντας αυτή τη λύση ιδανική.

### 5.5.3.5 Θεώρηση Νοτιοδυτικών ανέμων

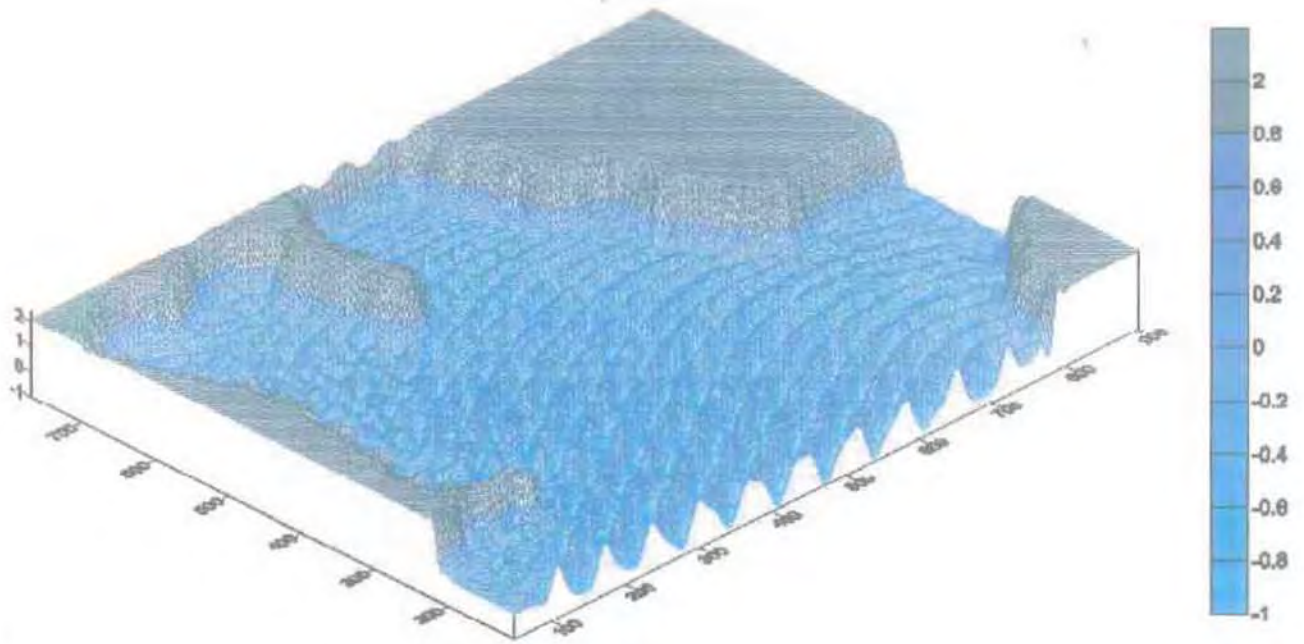
Με την επεξεργασία των προηγούμενων θεωρήσεων, ουσιαστικά έχουμε καλύψει το κομμάτι του σχεδιασμού του τεχνικού έργου που γίνεται για τις πιο δυσμενείς κυματικές συνθήκες καθώς και το ακαδημαϊκό μας ενδιαφέρον όσον αφορά τη διερεύνηση της λειτουργίας του πλωτού κυματοθραύστη σε πιο ήπιο κυματικό κλίμα. Για την ολότητα της παρούσας εργασίας, το μοντέλο προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε και για Νοτιοδυτικούς ορμητικούς ανέμους, δίνοντας αποτελέσματα που διαφέρουν ελάχιστα απ'τα προηγούμενα και γι'αυτό το λόγο παρουσιάζονται παρακάτω συνοπτικά.

- *Απουσία τεχνικού έργου*



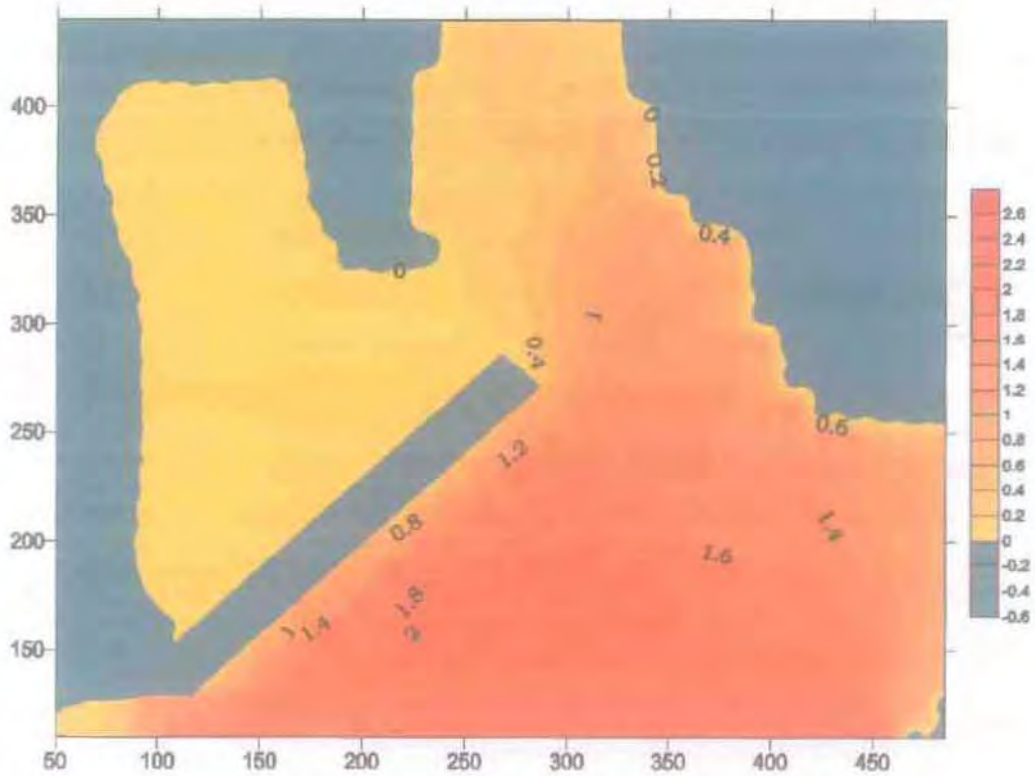
Σχέδιο 5.9

Όπως και στους Νότιους ορμητικούς ανέμους, τα ύψη κύματος εντός του λιμένα κυμαίνεται μεταξύ 1.4m και 0.8m. Η τρισδιάστατη απεικόνιση των κυματικών συνθηκών παρατίθεται παρακάτω.



Σχέδιο 5.10

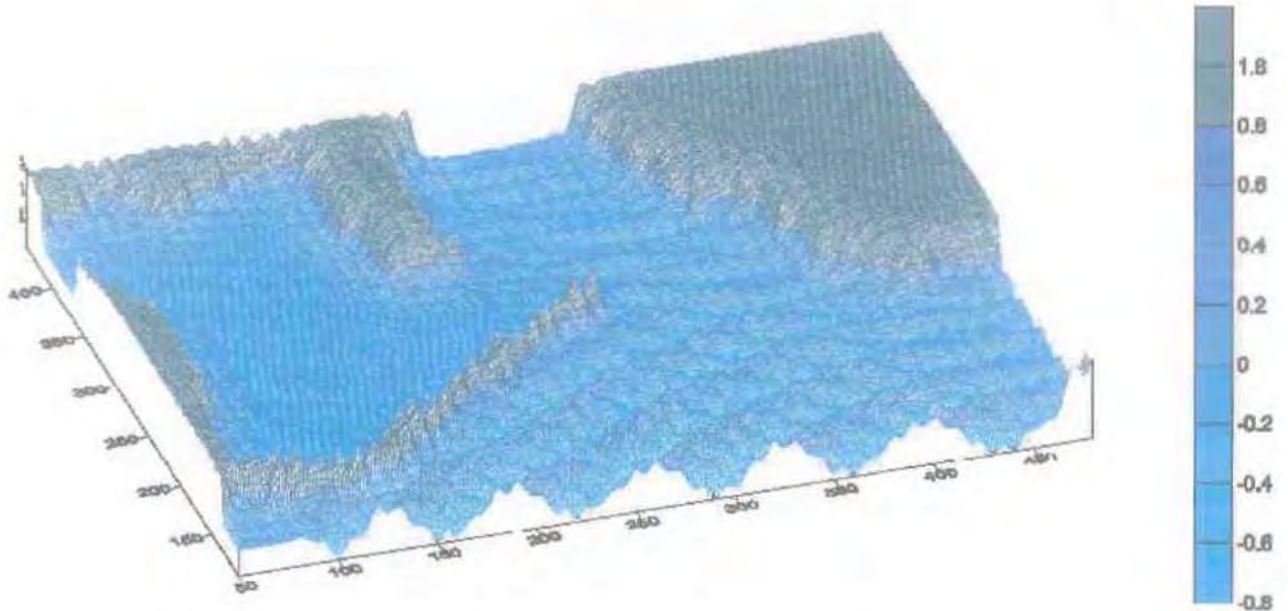
• Σταθερός κυματοθραύστης



Σχέδιο 5.1

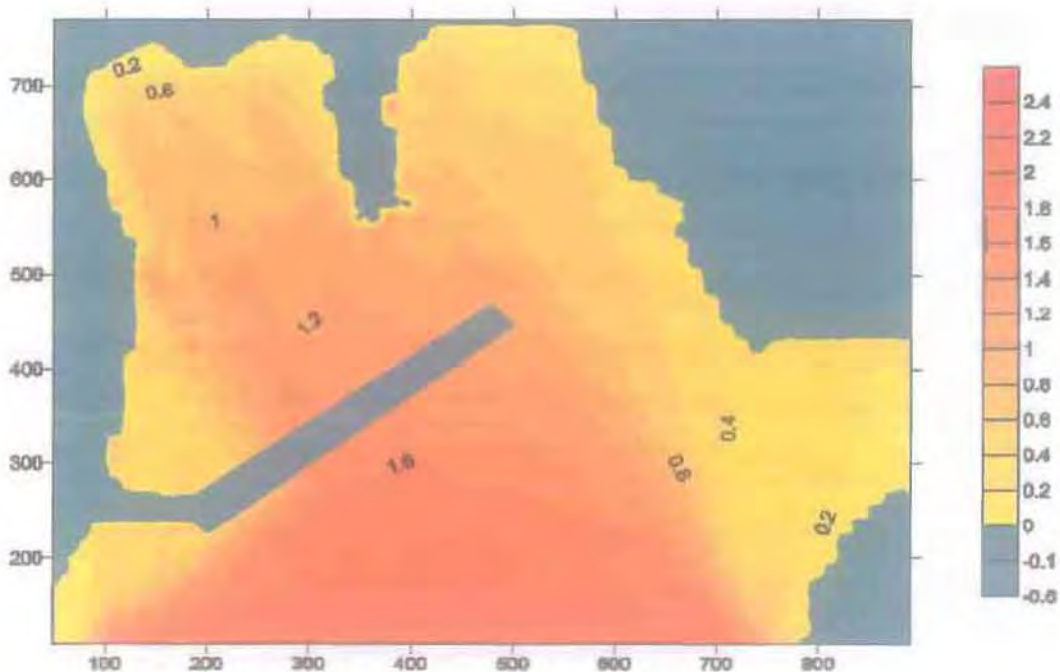


Όπως ήταν αναμενόμενο η απόσβεση του κύματος που επιτυγχάνεται από το σταθερό κυματοθραύστη είναι καθολική και άρα χωρίς περαιτέρω σχόλια παρουσιάζεται η τρισδιάστατη γραφική απεικόνιση.



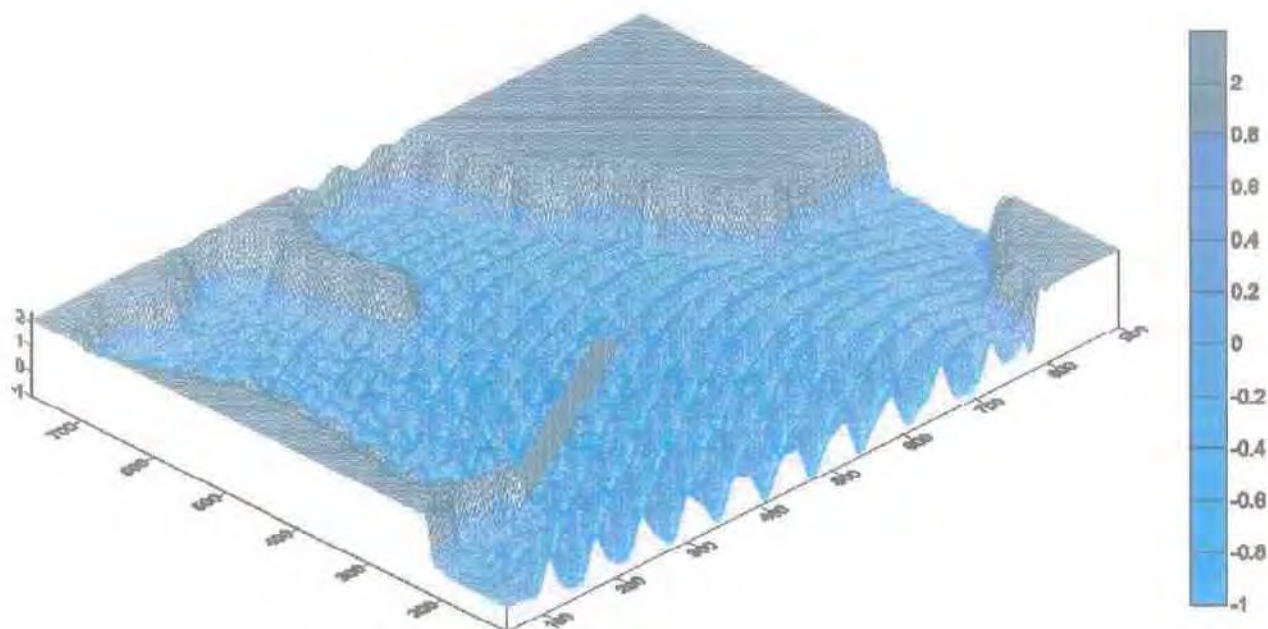
Σχέδιο 5.12

- Πλωτός κυματοθραύστης



Σχέδιο 5.13

Είναι εύκολα αντιληπτό πως και σε αυτή την περίπτωση δεν υπάρχει κάτι άξιο σχολιασμού σε σχέση με την επεξεργασία που έχει συντελεστεί προηγουμένως και άρα το μόνο που απέμεινε είναι μια τρισδιάστατη γραφική θεώρηση των κυματικών συνθηκών στο εσωτερικό του λιμένα του Νέου Μαρμαρά.



Σχέδιο 5.14

### 5.5.4 Υπολογισμός Αγκύρωσης Πλωτού Κυματοθραύστη

Αρχικά, υπολογίζεται η οριζόντια δύναμη  $H$  απ' τον τύπο :

$$H = \frac{c_D}{2} \rho A U^2$$

όπου  $U$  η μέγιστη οριζόντια ταχύτητα του κύματος στην επιφάνεια για  $z=0$  και

$$\cos(kx - \sigma t) = 1,$$

$A$  η μετωπική επιφάνεια και

$$c_D = 2.$$



Επιπλέον, από το 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο έχουμε:

$$L_{\max} = (2Hh/\omega)^{0.5}$$

$$V_A = V_B + \omega L$$

$$L_{\min} = -Htga_B/\omega + (H^2tg^2a_B/\omega^2 + 2Hh/\omega)^{0.5}$$

$$tga_A = h/L + \omega L/2H$$

$$V_A = H tga_A$$

$$V_B = H tga_B$$

Έχοντας υπόψη τα παραπάνω και θεωρώντας:

ταχύτητα κύματος	$U=24$ m/sec
συντελεστής σύρσεως	$c_D=2$
μετωπική επιφάνεια	$A=1,4$ m <sup>2</sup> /m
βάθος πυθμένα	$h=20$ m
βάρος αλυσίδας	$\omega=35$ Kp/m

Τελικά υπολογίζουμε:

$$H = \frac{2}{2} * 1.4 * 24^2 = 806.4 \text{ kN}$$

Ενώ το μέγιστο προβαλλόμενο μήκος (θεωρώντας  $\alpha_B=0, V_B=0$ ) και οι αντιδράσεις  $V_A$  και  $V_B$ .

$$L_{\max} = (2*806.4*20/35)^{0.5}=30.36 \text{ m}$$

και εφόσον  $V_B=0$ ,

$$V_A = 35*30.36=1032.6 \text{ kN}$$

Ενώ για το ελάχιστο προβαλλόμενο μήκος (θεωρώντας  $\alpha_B=6^\circ$  και άρα  $tga_B=0.105$ )

και τις αντίστοιχες αντιδράσεις  $V_A$  και  $V_B$  έχουμε:

$$L_{\min} = -806.4*0.105/35 + (806.4^2*0.105^2/35^2 + 2*806.4*20/35)^{0.5} = \\ =28.03 \text{ m} < L_{\max} = 30.36 \text{ m}$$

$$tga_A = 20/28.03 + 35*28.03/2*806.4=1.322$$

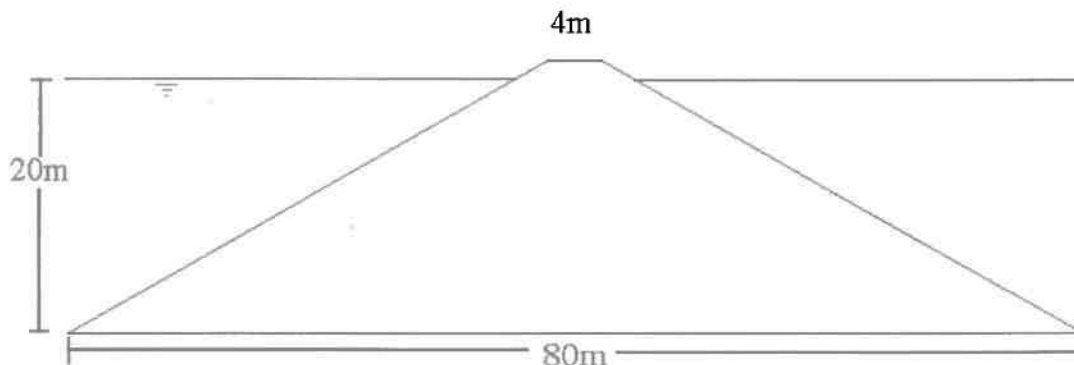
$$V_A = H tga_A=806.4*1.322=1066.06 \text{ kN}$$

$$V_B = H tga_B=806.4*0.105= 84.67 \text{ kN}$$

### 5.5.5 Προϋπολογισμοί συμβατικού και πλωτού κυματοθραύστη

Ένα απ'τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του πλωτού κυματοθραύστη έναντι των συμβατικών λύσεων είναι η σημαντική μείωση του συνολικού κόστους του έργου η οποία γίνεται τόσο σημαντικότερη όσο αυξάνεται το βάθος του πυθμένα. Για να γίνει πιο αντιληπτή η τελευταία παρατήρηση, ακολουθεί η αντιπαράθεση του οικονομικού προϋπολογισμού ενός πλωτού κυματοθραύστη και ενός σταθερού στην περίπτωση του λιμένα του Νέου Μαρμαρά.

Αρχικά, πρέπει να σημειωθεί ότι η πλέον συνήθης μέθοδος κατασκευής-οι λιθορριπές που διατάσσονται σε τραπεζοειδή πρισματική μορφή με πρηνή-απορρίπτεται εκ των προτέρων λόγω του υπερβολικού βάθους των 20 μέτρων του πυθμένα και του απαραίτητου μεγάλου μήκους των 200 μέτρων που απαιτείται για την ικανοποίηση των αναγκών του λιμένα. Όπως κατανοούμε, τα προαναφερθέντα μεγέθη συνιστούν τη δημιουργία μιας κατασκευής μη αποδεκτής τεχνικοοικονομικά, αισθητικά αλλά και περιβαλλοντικά (Σχήμα 6.1).

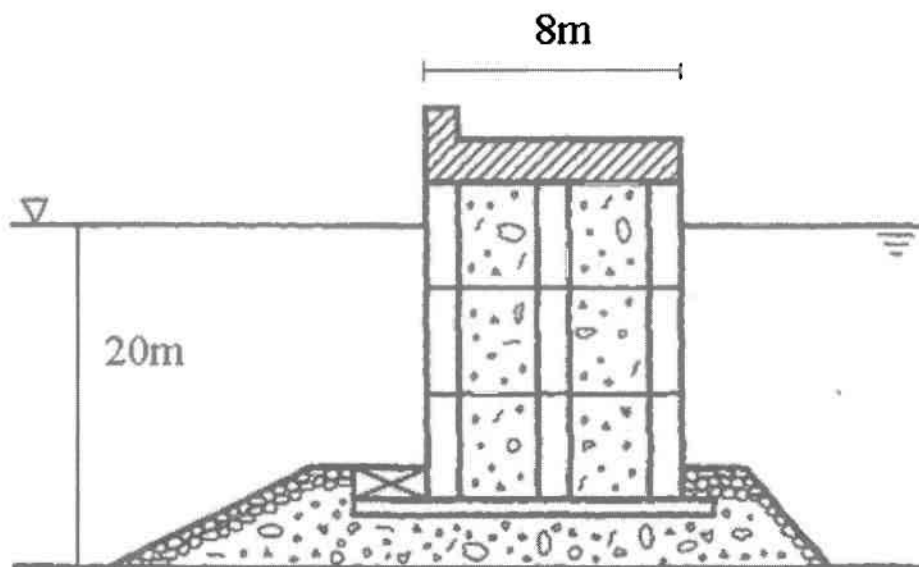


Σχήμα 6.1

Απ'τα παραπάνω, εύκολα συμπεραίνουμε ότι μοναδική ενδεδειγμένη εναλλακτική λύση αποτελεί η κατασκευή ενός κατακόρυφου μετώπου, εφόσον θεωρηθεί ότι είναι δυνατή η θεμελίωσή του. Επιπλέον, απαραίτητο θεωρείται ένα μεγάλο σχετικά πλάτος  $b$ , της τάξεως των 8 μέτρων, προκειμένου να εξασφαλισθεί η



ευστάθεια του τεχνικού έργου έναντι του μεγάλου βάθους στο οποίο θεμελιώνεται (Σχήμα 6.2).



Σχήμα 6.2

Με γνώμονα τα προηγούμενα, ένας πρόχειρος προϋπολογισμός έχει ως εξής.

Περιγραφή	Ποσότητα	Μονάδα	Τιμή Μονάδας (Ευρώ)	Δαπάνη (Ευρώ)
Τεχνητοί Ογκόλιθοι	25.000	m <sup>3</sup>	170	4.250.000
Αμμογάλικο	4000	m <sup>3</sup>	40	160.000

Σύνολο = 4.410.000 ευρώ

Επιπλέον, πρέπει να συνυπολογιστεί η μεγάλη δυσκολία της κατασκευής, κυρίως λόγω της θεμελίωσης που πρέπει να συντελεστεί σε μεγάλα βάθη και επομένως οι κακοτεχνίες θεωρούνται αναπόφευκτες.

Αντίστοιχα ο πλωτός κυματοθραύστης αποτελείται από 10 στοιχεία συνδεδεμένα μεταξύ τους, μήκους 20 m και πλάτους 4 m το κάθε ένα. Οι διαστάσεις πλάτους και μήκους αποτελούν βέλτιστη επιλογή για τις λειτουργικές ανάγκες του κυματοθραύστη και την επίτευξη του στόχου του, που είναι η μείωση της κυματικής ενέργειας στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης. Το έξαλο ύψος είναι 0,5 m, ενώ το ύψος





τους κυμαίνεται από 1,4-1,8 m. Το βάρος κάθε στοιχείου είναι 55 t. Τα στοιχεία είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους, επιτρέποντας σχετικά μικρές κινήσεις, με ελαστικούς συνδέσμους 6 σημείων ολικής αντοχής περίπου 300 t. Τα στοιχεία αγκυρώνονται με αλυσίδα κρίκου 40mm στον πυθμένα σε έρματα αγκύρωσης 10t από σκυρόδεμα . Θα υπάρχουν από δύο έρματα αγκύρωσης στις δύο εξωτερικές γραμμές αγκυρώσεως και από ένα έρμα αγκύρωσης στις δύο εσωτερικές γραμμές αγκυρώσεως. Το ακραίο στοιχείο θα έχει μία ακόμα γραμμή αγκύρωσης κατά την κατεύθυνση του μήκους του. Έτσι, κάνοντας έναν προϋπολογισμό έχουμε:

Περιγραφή	Ποσότητα	Μονάδα	Τιμή Μονάδας (Ευρώ)	Δαπάνη (Ευρώ)
Πλωτός κυματοθραύστης	10	Τεμ	65.000	650.000
Συνδέσεις αντοχής 300 t	18	Τεμ	1800	32.400
Μεταχειρισμένη αλυσίδα αγκύρωσης(40mm)	1600	m	40	64.000
Ελατήρια 5 t	2	Τεμ	750	1.500
<i>Εργασίες με ανάλυση τιμών</i>				
Σκυρόδεμα (Τεχνικοί ογκόλιθοι αγκύρωσης)	318	m <sup>3</sup>	102.5	
Σκυρόδεμα (διαμόρφωση στέψης υπάρχοντος κυματοθραύστη)	108.4	m <sup>3</sup>	100	43.400
Μεταφορά από Ιρλανδία				158.280

Σύνολο = 949.680 ευρώ

Είναι εύκολα αντιληπτό ότι το κόστος του σταθερού κυματοθραύστη καθιστά την κατασκευή του απαγορευτική και αναδεικνύει ένα απ'τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της εναλλακτικής λύσης των πλωτών μειωτήρων κυματισμών, τη μείωση του συνολικού κόστους σε μεγάλα βάθη πυθμένα.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

**Συμπεράσματα και  
Μελλοντική έρευνα**



## Κεφάλαιο 6 – Συμπεράσματα και Μελλοντική έρευνα

### 6.1 Συμπεράσματα

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτέλεσε η διερεύνηση της συμπεριφοράς των πλωτών κυματοθραυστών ως έργα προστασίας των λιμενολεκανών από τη δράση έντονων κυματισμών, μέσα από τον υπολογισμό των συντελεστών διάδοσης και ανάκλασης. Επιπλέον, μελετήθηκαν τα στατικά και υδροδυναμικά χαρακτηριστικά των εν λόγω κατασκευών και αναπτύχθηκε μία απλή τεχνική εισαγωγής της επίδρασης των πλωτών κυματοθραυστών σε δισδιάστατα μοντέλα μετάδοσης κυματισμών. Επιστέγασμα όλων των προηγούμενων αποτέλεσε η εφαρμογή στο λιμένα του Νέου Μαρμαρά, μέσω της οποίας τα συμπεράσματα είναι αμεσότερα και πιο αξιόπιστα.

Πιο συγκεκριμένα, από την εκπόνηση της συγκεκριμένης μελέτης είναι εύκολα αντιληπτό ότι η χρήση των πλωτών κυματοθραυστών έχει ως άμεση συνέπεια την αποκόμιση μιας σειράς σημαντικότερων προτερημάτων, έναντι των συμβατικών λύσεων, σε τέτοιο βαθμό μάλιστα για ορισμένες περιπτώσεις, που αποτελεί μονόδρομο για την ορθή λειτουργία του έργου.

Ένα απ'τα σημαντικότερα και αδιαμφισβήτητα πλεονεκτήματα των μη συμβατικών αυτών μειωτήρων κυματισμών, αποτελεί η σημαντική μείωση του συνολικού κόστους του έργου, ειδικότερα δε στην περίπτωση μεγάλων βαθών ή ιδιαίτερα δύσκολων γεωλογικών συνθηκών του πυθμένα. Επιπλέον, σε τεχνικοοικονομικό επίπεδο προστίθεται και η ελαχιστοποίηση του χρόνου κατασκευής στο χώρο εφαρμογής, αφού η τοποθέτηση των πλωτών κυματοθραυστών επιτυγχάνεται εντός λίγων ημερών, αλλά και η αποφυγή της παρακώλυσης των καθημερινών δραστηριοτήτων της περιοχής από τις εργοταξιακές διαταράξεις που θα λάμβαναν χώρο εάν επιλέγονταν μόνιμες κατασκευές. Τέλος, όσον αφορά το κόστος, σημαντική μείωση επιτυγχάνεται και με τη φτηνή σχετικά δυνατότητα αποκατάστασης των όποιων ζημιών εμφανισθούν.

Ένα επιπρόσθετο όφελος των πλωτών κυματοθραυστών αποτελεί η οικολογική συμπεριφορά τους, που ελαχιστοποιεί το χρόνο ανανέωσης των υδάτων



εντός του λιμένα και διατηρεί ανέπαφο το θαλάσσιο οικοσύστημα, καθιστώντας την εν λόγω κατασκευή περιβαλλοντικά αόρατη.

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί η δυνατότητα μετακίνησης, επέκτασης και αναδιάταξης της κατασκευής ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη προστασία της λιμενολεκάνης αλλά και η εποχιακή χρησιμοποίησή της ανάλογα με τις κυματικές συνθήκες που επικρατούν.

Παρόλα τα προτερήματα που αναφέρθηκαν και προέκυψαν από το σύνολο της εργασίας, η χρήση των πλωτών κυματοθραυστών δεν αποτελεί πανάκεια. Αυτό που πρέπει να τονιστεί είναι ότι αποτελούν μια ειδική κατηγορία λιμενικών έργων και για αυτό πρέπει να προτείνονται και να χρησιμοποιούνται σε ειδικές περιπτώσεις, γεγονός που έγκειται στην ελλιπή προστασία που δύνανται να προσφέρουν όταν επικρατούν μεγάλα ύψη κύματος. Πιο συγκεκριμένα, όπως προέκυψε απ'την προσομοίωση της κατασκευής, ο πλωτός κυματοθραύστης είναι ικανός να μειώσει την ενέργεια του κύματος από 10% έως 50% ανάλογα με τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά και τις κυματολογικές συνθήκες.

Επομένως, η εφαρμογή των πλωτών κυματοθραυστών είναι επιθυμητή και ωφέλιμη μόνο σε περιοχές ήπιου κυματικού κλίματος, όπως είναι οι γεωγραφικά ημιπροστατευμένοι όρμοι αλλά και οι ήδη προστατευμένες λιμενολεκάνες από κλασικούς κυματοθραύστες με αυξημένες απαιτήσεις ελέγχου των κυματικών συνθηκών. Το επιθυμητό κυματικό κλίμα συνίσταται στην επικράτηση υψών κύματος της τάξης του 1 με 1,5 μέτρων, με ακραίους κυματισμούς έως 2-3 μέτρων.

Οι χαρακτηριστικές γεωμετρικές παράμετροι που επηρεάζουν την υδροδυναμική συμπεριφορά του κύματος είναι το βύθισμα και το πλάτος του κυματοθραύστη που χαρακτηρίζονται από τις αδιάστατες παραμέτρους  $d/h$  και  $B/L$  αντίστοιχα. Η αύξηση τους, αυξάνει και την αποτελεσματικότητα του πλωτού κυματοθραύστη μέχρι όμως κάποιας συγκεκριμένης τιμής όπου η περαιτέρω αύξηση δε μεταβάλλει το συντελεστή διάδοσης.

Από άποψη κυματικών και γεωμορφολογικών συνθηκών της υπό εξέταση λιμενολεκάνης σημαντικές παραμέτρους αποτελούν το βάθος της και η περίοδος των επικρατούντων κυματισμών. Από τη μελέτη των προαναφερθέντων μεγεθών, προέκυψε το συμπέρασμα ότι ο πλωτός κυματοθραύστης λειτουργεί αποτελεσματικότερα όταν εφαρμόζεται σε βαθιά νερά.



Τέλος, σημαντική προσφορά της παρούσας εργασίας ήταν οι προσομοιώση του πλωτού κυματοθραύστη σε ένα ήδη υπάρχον κυματικό μοντέλο μετάδοσης κυματισμών στο εσωτερικό ενός λιμένα, με κάποιες απλές τροποποιήσεις.

## 6.2 Μελλοντική έρευνα

Μελλοντική έρευνα στο θέμα του πλωτού κυματοθραύστη μπορεί να αποτελέσει η εύρεση πιο αποτελεσματικών κατασκευών και διατάξεων όπως είναι :

- Η χρήση διπλών κυματοθραυστών σε παράλληλη διάταξη
- Η κατασκευή πετασμάτων κάτω από τον πλωτό για τη δημιουργία επιπλέον στροβίλων με την επικείμενη αύξηση της απώλειας της ενέργειας του κύματος.
- Η εναλλακτική χρήση των πλωτών κυματοθραυστών για την προστασία των ακτών από διάβρωση.

Γενικά, μελλοντική έρευνα αποτελεί και η σύνθεση ενός πιο ολοκληρωμένου ομοιώματος που θα περιγράφει τη παράκτια κυκλοφορία και τα φαινόμενα που δύναται να αναπτυχθούν εξαιτίας της ύπαρξης πλωτού κυματοθραύστη. Τέλος, απαραίτητη θεωρείται η υποστήριξη και ο έλεγχος της ορθότητας των μαθηματικών προσομοιωμάτων και των αναλυτικών λύσεων που αναπτύχθηκαν, μέσα από πειραματικές μετρήσεις.



ΤΕΛΟΣ

---

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

- Πρόγραμμα Προσομοίωσης  
HARBOR.FOR
- Πρόγραμμα Υπολογισμού του  
συντελεστή διάδοσης RandT. FOR
- Πρόγραμμα Υπολογισμού του  
συντελεστή τριβών Fscale.FOR



## HARBOR.FOR

c Th. V. Karambas and C. Koutitas'  
c Hyperbolic type 'mild slope' equations  
c based on Yu-Isobe-Watanabe paper (CEJ, 1992)  
c refraction-diffraction-reflection inside harbours

c implicit real\*8 (a-h,o-z)

parameter (ijm=1200,iim=700)

c u and v are the velocities  
c z is the elevation  
c d is the depth  
c c is the linear theory celerity

dimension u(ijm,iim),v(ijm,iim),vn(ijm,iim)  
dimension dnmax(ijm,iim), H(ijm,iim)  
dimension z(ijm,iim),c(ijm,iim),un(ijm,iim)  
dimension d(ijm,iim),r(ijm),da(ijm,iim)  
dimension ed(ijm,iim),edr(ijm,iim)  
dimension umax(ijm,iim),vmax(ijm,iim)  
dimension dl(ijm,iim),edrl(ijm,iim),fr(ijm,iim)

c Ho: wave height  
c dt, dx: time and space step  
c per: the period  
c d water depth  
c im, jm: max number of grids (x and y)  
c tend: time in which the programme stops

c c is the celerity  
c dnmax the max elevation  
c at each point

```
write (*,*)' ~~~~~~  
write (*,*)' ~ Th. V. Karambas and C. Koutitas ~'  
write (*,*)' ~ Hyperbolic type "mild slope" equations ~'  
write (*,*)' ~ Refraction-diffraction-reflection ~'  
write (*,*)' ~ of linear monochromatic waves inside ~'  
write (*,*)' ~ port and harbours ~'  
write (*,*)' ~ ~'  
write (*,*)' ~ Ho: wave height ~'  
write (*,*)' ~ dt, dx: time and space step ~'  
write (*,*)' ~ T: the period ~'  
write (*,*)' ~ im, jm: max number of grids (x and y) ~'  
write (*,*)' ~ tend: time in which the programme stops ~'
```





```
write (*,*)' ~ angle: the incident wave angle (in rad) ~'  
write (*,*)' ~  
write (*,*)' ~ Input file:  
write (*,*)' ~ "depth.dat" (depth and boundary file) ~'  
write (*,*)' ~  
write (*,*)' ~ Output files:  
write (*,*)' ~ "height.dat" (wave height) ~'  
write (*,*)' ~ "section.dat" (wave height in sections ~'  
write (*,*)' ~ x=im/4, x=im/2 and x=3im/4) ~'  
write (*,*)' ~ "elev.dat" (surface elevation) ~'  
write (*,*)' ~~~~~~
```

```
data Ho,per,dt,dx,fin,tend/1.,6.,.05,5.,-.5,200/
```

```
pi=3.141593
```

```
omega=2.*pi/per
```

c read the depth

```
open (unit=20,file='depth.dat')  
open (unit=19,file='eddy.dat')
```

```
write (*,*) 'reading depth.dat file'
```

```
read(19,*) im,jm  
do j=1,jm  
read (19,*) jaa  
write (*,*) jaa  
read (19,*) (edrl(i,j),i=1,im)  
end do
```

```
read (20,*) im,jm  
do j=1,jm  
read (20,*) ja  
write (*,*) ja  
read (20,*) (dl(i,j),i=1,im)  
end do
```

```
do j=1,jm  
do i=1,im  
d(i,j)=dl(i,j)  
edr(i,j)=0.0  
fr(i,j)=edrl(i,j)  
end do  
end do
```



```
do j=1,jm
do i=1,20
edr(i,j)=0.
end do
do i=im-20,im
edr(i,j)=0.
end do
end do

c   open(unit=18,file='see.dat')
c   do i=1,im,3
c   do j=1,jm,3
c   write (18,6)i*dx,j*dx,d(i,j)
c   end do
c   end do
c   close (18)
c   stop

do i=1,im
do j=1,jm
if (d(i,j).lt.0.5.and.d(i,j).gt.-.5) then
d(i,j)=0.5
c   edr(i,j)=1.
else
end if
end do
end do

c   do j=1,jm
c   write (*,*) d(im/2,j)
c   end do

write (*,*)
write (*,*)
write (*,*)'~~~~~'
write (*,*)'~ the program is now running !!! ~'
write (*,*)'~'
write (*,*)'~~~~~'
write (*,*)'~~~~~'

write (*,*)' Time in secs'

do 30 i=1,im
do 30 j=1,jm
```



```
u(i,j)=0.0
v(i,j)=0.0
z(i,j)=0.0
un(i,j)=0.0
vn(i,j)=0.0
umax(i,j)=0.
vmax(i,j)=0.
dnmax(i,j)=0.0
da(i,j)=d(i,j)
30  continue

c  lo=aleno
   aleno=9.81*(per**2)/2.0/3.14

c  solving the linear dispersion relation
c  to estimate celerity c

   do 876 j=1,jm
   do 876 i=1,im

   if (d(i,j).lt.0.01) goto 876

   alen=aleno
39  alenp=alen
   akapa=2*3.14/alenp
   akd=akapa*d(i,j)
   alen = aleno *tanh(akd)
   dlen = abs(alen - alenp)
   if (dlen.gt.0.001) goto 39

   c(i,j)=9.81*per/(2*3.14)*tanh(akd)

876  continue

c  jst=30
c  jfin=2*jst
c  delta=.3
c  aln=c(im/2,jst)*per
c  wa=delta*aln/2.
c  bta=80./((delta*aln)**2)

   do j=1,jm-1
   do i=1,im-1

   if (d(i,j+1).lt.0.01) then
c(i,j+1)=c(i,j)
da(i,j+1)=d(i,j)
```



```
else
end if

if (d(i+1,j).lt.0.01) then
c(i+1,j)=c(i,j)
da(i+1,j)=d(i,j)
else
end if

end do
end do

t=0.0
n=0
40 t=t+dt
c n=n+1

c
c continuity equation
c
do 100 j=1,jm-1
c write (*,*)j
do 100 i=1,im-1

if (d(i,j).lt.0.01) then
z(i,j)=0.0
goto 100
else
end if

al=c(i,j)*per
akd=2*d(i,j)*pi/al
an=0.5*(1+2*akd/sinh(2*akd))
al=c(i+1,j)*per
akd=2*da(i+1,j)*pi/al
if (da(i+1,j).lt..01) akd=2*d(i,j)*pi/al
ani1=0.5*(1+2*akd/sinh(2*akd))
al=c(i,j+1)*per
akd=2*da(i,j)*pi/al
if (da(i,j+1).lt..01) akd=2*d(i,j)*pi/al

anj1=0.5*(1+2*akd/sinh(2*akd))

q1=ani1*da(i+1,j)*u(i+1,j)
q2=an*d(i,j)*u(i,j)
ux=(q1-q2)/dx
```



```
p1=anj1*da(i,j+1)*v(i,j+1)
p2=an*da(i,j)*v(i,j)
vy=(p1-p2)/dx
```

```
z(i,j)=z(i,j)-dt*(ux+vy)/an
```

```
100 continue
```

```
c
```

```
c momentum equations (x and y)
```

```
c
```

```
do 120 j=2,jm
do 120 i=2,im
```

```
if (d(i,j).lt.0.01.or.d(i-1,j).lt.0.01) then
un(i,j)=0.0
goto 120
else
end if
```

```
al=c(i,j)*per
akd=2*d(i,j)*pi/al
an=0.5*(1+2*akd/sinh(2*akd))
```

```
al=c(i-1,j)*per
akd=2*d(i-1,j)*pi/al
anil=0.5*(1+2*akd/sinh(2*akd))
```

```
zx=(an*z(i,j)-anil*z(i-1,j))/dx
```

```
uxx=(u(i+1,j)-2*u(i,j)+u(i-1,j))/dx**2
uyy=(u(i,j+1)-2*u(i,j)+u(i,j-1))/dx**2
un(i,j)=u(i,j)-dt*((c(i,j)**2)/d(i,j))*zx/an+
! ed(i,j)*dt*uxx+ed(i,j)*dt*uyy-dt*fr(i,j)*omega*u(i,j)
```

```
120 continue
```

```
do 121 j=2,jm
do 121 i=2,im
```

```
if (d(i,j).lt.0.01.or.d(i,j-1).lt.0.01) then
vn(i,j)=0.0
goto 121
else
```



end if

```
al=c(i,j)*per  
akd=2*d(i,j)*pi/al  
an=0.5*(1+2*akd/sinh(2*akd))
```

```
al=c(i,j-1)*per  
akd=2*d(i,j-1)*pi/al  
anj1=0.5*(1+2*akd/sinh(2*akd))
```

```
zy=(an*z(i,j)-anj1*z(i,j-1))/dx
```

```
vxx=(v(i+1,j)-2*v(i,j)+v(i-1,j))/dx**2  
vyy=(v(i,j+1)-2*v(i,j)+v(i,j-1))/dx**2
```

```
vn(i,j)=v(i,j)-dt*((c(i,j)**2)/d(i,j))*zy/an+  
! ed(i,j)*dt*(vxx+vyy)-dt*fr(i,j)*omega*v(i,j)
```

121 continue

```
c do i=1,im  
c do j=1,jm  
c if (d(i,j).gt..01) then  
c uv=(umax(i,j)**2+vmax(i,j)**2)  
c uv1=(.7*c(i,j))**2  
c uv=H(i,j)  
c uv1=d(i,j)  
c Qb=1.-exp(-(uv/uv1)**10)  
c if (Qb.gt.1) Qb=1.  
c dis=Qb*2.*(9.81*(H(i,j)**2)/8.)/per  
c ed(i,j)=edr(i,j)+7.*d(i,j)*dis**.333333  
c ed(i,j)=7.*d(i,j)*dis**.333333  
c else  
c end if  
c end do  
c end do
```

c input of the wave surface elevation

```
c jv1=20  
c jv2=21  
c do j=2,jfin  
c do i=20,im-20  
c cel=c(i,jst)
```



```
c   tf=tan(fin)*i*dx/cel
c   chi=j*dx
c   chis=jst*dx
c   fsource=exp(-bta*(chi-chis)**2)
c   z1=Ho/2.*sin(2*pi*(t-tf)/per)*cel*dt/dx
c   zin=z1*fsource*tanh(t/per)
c   z(i,j)=z(i,j)+zin
c   end do
c   end do

      jv1=20
      jv2=21
      do 81 i=20,150
      cel=c(im/2,jv1)
      tf=tan(fin)*i*dx/cel
      zin=Ho/2.*sin(2*pi*(t-tf)/per)*cel*dt/dx
81   z(i,jv1)=z(i,jv1)+2.*zin*tanh(t/per)*cos(fin)

c     do 82 i=20,im-20
c     cel=c(i,jv2)
c     tf=tan(fin)*i*dx/cel
c     zin=Ho/2.*sin(2*pi*(t-tf)/per)*cel*dt/dx
c 82   z(i,jv2)=z(i,jv2)+zin*tanh(t/per)*cos(fin)

      do i=1,IM
      VN(i,1)=(1.-r(i))*V(i,1)+r(i)*V(i,2)
      Z(i,1)=-d(i,1)*VN(i,1)/c(i,1)
      end do
      do i=1,IM
      UN(i,1)=UN(i,2)
      end do
      do i=1,IM
      dven=V(i,3)-V(i,2)
      if (ABS(dven).lt..0001) goto 207
      r(i)=(VN(i,2)-V(i,2))/dven
      if (r(i).gt..99) r(i)=.99
      if (r(i).lt.0.) goto 207
      goto 60
207  r(i)=0.0
60   end do

      do j=1,jm
      un(1,j)=un(2,j)
      vn(1,j)=vn(2,j)
      end do
```





```
c    boundary condition sponge layer

c    West b. c.
350  do 165 j=1,jm
      do 165 i=1,10
        ml1=i-10
        ml2=-10.0
        rm=exp((1.8**(ml1)-1.8**(ml2))*1.6)
        z(i,j)=z(i,j)/rm
        vn(i,j)=vn(i,j)/rm
165  un(i,j)=un(i,j)/rm
      ims1=im-10
      do 175 j=1,jm
        do 175 i=20,10,-1
          ml1=10-i
          ml2=-10.0
          rm=exp((1.8**(ml1)-1.8**(ml2))*1.6)
          z(i,j)=z(i,j)/rm
          vn(i,j)=vn(i,j)/rm
175  un(i,j)=un(i,j)/rm

c    South b.c.
      do 665 i=1,im
        do 665 j=1,10
          ml1=j-10
          ml2=-10.0
          rm=exp((1.8**(ml1)-1.8**(ml2))*1.6)
          z(i,j)=z(i,j)/rm
          vn(i,j)=vn(i,j)/rm
665  un(i,j)=un(i,j)/rm
        do 675 i=1,im
          do 675 j=20,10,-1
            ml1=10-j
            ml2=-10
            rm=exp((1.8**(ml1)-1.8**(ml2))*1.6)
            z(i,j)=z(i,j)/rm
            vn(i,j)=vn(i,j)/rm
675  un(i,j)=un(i,j)/rm

c    North b.c.
c    jms=jm-20
c    do 667 i=1,im
c    do 667 j=jms,jm-10
c    ml1=j-jm+10
c    ml2=-10.0
c    rm=exp((1.8**(ml1)-1.8**(ml2))*1.6)
c    z(i,j)=z(i,j)/rm
c    vn(i,j)=vn(i,j)/rm
c667 un(i,j)=un(i,j)/rm
c    jms1=jm-10
```



```
c   do 677 i=1,im
c   do 677 j=jm,jms1,-1
c   ml1=j-jm
c   ml2=-10
c   rm=exp((1.8**(ml1)-1.8**(ml2))*1.6)
c   z(i,j)=z(i,j)/rm
c   vn(i,j)=vn(i,j)/rm
c677  un(i,j)=un(i,j)/rm

c   East b.c.
ims=im-20
do 668 j=1,jm
do 668 i=ims,im-10
ml1=i-im+10
ml2=-10.0
rm=exp((1.8**(ml1)-1.8**(ml2))*1.6)
z(i,j)=z(i,j)/rm
vn(i,j)=vn(i,j)/rm
668  un(i,j)=un(i,j)/rm
ims1=im-10
do 679 j=1,jm
do 679 i=im,ims1,-1
ml1=i-im
ml2=-10
rm=exp((1.8**(ml1)-1.8**(ml2))*1.6)
z(i,j)=z(i,j)/rm
vn(i,j)=vn(i,j)/rm
679  un(i,j)=un(i,j)/rm

      write (*,*) t

      do 405 i=1,im
      do 405 j=1,jm
      u(i,j)=un(i,j)
405  v(i,j)=vn(i,j)

      do 185 j=1,jm
      do 185 i=1,im
      if (d(i,j).lt.0.01) goto 185
      if (z(i,j).gt.dnmax(i,j)) then
      dnmax(i,j) = z(i,j)
      else
      end if

      if (u(i,j).gt.umax(i,j)) then
      umax(i,j) = u(i,j)
      else
      end if
      if (v(i,j).gt.vmax(i,j)) then
```



```

    vmax(i,j) = v(i,j)
    else
    end if
185  continue

    do i=1,im
    do j=1,jm
    H(i,j)=2.*dnmax(i,j)
    end do
    end do

    do i=1,im
    do j=1,jm
    if (d(i,j).gt..01) then
    uv=(umax(i,j)**2+vmax(i,j)**2)
    uvl=(.7*c(i,j))**2
    uv=H(i,j)
    uvl=d(i,j)
    Qb=1.-exp(-(uv/uvl)**10)
    if (Qb.gt.1) Qb=1.
    dis=Qb*2.*(9.81*(d(i,j)**2)/8.)/per
    ed(i,j)=18.*d(i,j)*dis**.333333
    if (edr(i,j).gt.ed(i,j)) ed(i,j)=edr(i,j)
    else
    end if
    end do
    end do

c    nendh=int(tend/dt-2.*per/dt)

c
c    equalies the grids outside the calculated region
c    with z=2.*Ho in order to have a nice view in the
c    surfer package

c    nend=int(tend/dt)-1
    if (t.lt.tend) then
    goto 40
    else

        do 321 j=1,jm
        do 321 i=1,im
        if (d(i,j).lt.0.01) then
        z(i,j)=2.*Ho
        else
        end if
321  continue
```



```
open (unit=3,file='elev.dat')  
open (unit=2,file='sectse.dat')  
open (unit=5,file='heise.dat')
```

777 FORMAT (6F12.7)

```
do 355 j=jv2+1,jm-1,2  
do 355 i=10,im-20,2  
disx=i*dx  
disy=j*dx  
write (3,6) disx,disy,z(i,j)  
355 continue  
  
do i=10,im-30,20  
do j=jv2+1,jm-2  
disy=j*dx  
disx=i*dx  
write (2,7) disx,umax(i,j),vmax(i,j),2*dnmax(i,j),d(i,j)  
end do  
end do  
  
do j=jv2+1,jm-1,3  
do i=10,im-20,3  
disx=i*dx  
disy=j*dx  
if (d(i,j).lt.0.01) dnmax(i,j)=-.25  
write (5,6) disx,disy,2.*dnmax(i,j)  
end do  
end do  
  
stop  
endif  
6 format (3f10.3)  
7 format (5f12.4)  
  
end
```



## FCALE.FOR

```
complex Tr,ai,eps,akb,par1,par2

ai=(0.,1.)

write (*,*) 'Wave period=?'
read (*,*) per
write (*,*) 'depth=?'
read (*,*) h
write (*,*) 'Length of breakwater?'
read (*,*) BL
write (*,*) 'f=?'
read (*,*) f

pi=4.0*atan(1.0)

omega=2*PI/per

ALo=9.81*(PER**2)/(2*PI)
ALNGHP=ALo

39 AKAPA=2*PI/ALNGHP
AKD=AKAPA*h
ALNGH=ALo*TANH(AKD)
DLEN=ABS(ALNGH-ALNGHP)
IF (DLEN.GT.0.001) THEN
ALNGHP=ALNGH
GOTO 39
ELSE
END IF
aL=ALNGH
AK=2*PI/aL
cel=aL/per

eps=(sqrt(1-ai*f))
aKb=ak*sqrt(1-ai*f)

par1=4.*eps
par2=(1+eps)**2*exp(ai*akb*BL)-(1-eps)**2*exp(-ai*akb*BL)

Tr=par1/par2
Trr=abs(Tr)

eddy=f*omega/ak**2

write (*,*) 'Transmission coefficient-', Trr
write (*,*) 'Eddy viscosity-', eddy
end
```



## RandT.FOR

```
dimension akim(100000), aa(10000000)
complex Tr,ai,pari
```

```
ai=(0,1.)
```

```
write (*,*) 'Wave period=?'
read (*,*) per
write (*,*) 'depth=?'
read (*,*) h
WRITE (*,*) 'Draft=?'
READ (*,*) d
WRITE (*,*) 'Width=?'
read (*,*) b
b=b/2.
```

```
S=h-d
```

```
pi=4.0*atan(1.0)
```

```
omega=2*PI/per
```

```
ALo=9.81*(PER**2)/(2*PI)
ALNGHP=ALo
```

```
39 AKAPA=2*PI/ALNGHP
AKD=AKAPA*h
ALNGH=ALo*TANH(AKD)
DLEN=ABS(ALNGH-ALNGHP)
IF (DLEN.GT.0.001) THEN
ALNGHP=ALNGH
GOTO 39
ELSE
END IF
aL=ALNGH
AK=2*PI/AL
```

```
sig=omega**2/9.81
```

```
aki=0
j=0
im=100000
do i=1,im
aki=aki+.00001
aa(i)=sig+aki*tan(aki*h)
```





```
if (aa(i)*aa(i-1).lt.0.and.abs(aa(i)).lt..001) then
j=j+1
akim(j)=aki
else
end if

end do

aki=abs(aki)

par=sqrt(h+sinh(ak*h)**2/sig)
U0=1.41*sinh(AK*S)/par/ak

sum=0.
do ii=1,j
par=sqrt((h-sin(akim(ii)*h)**2/sig))
U1=1.41*sin(akim(ii)*S)/par/akim(ii)
sum=sum+U1**2/akim(ii)
end do

pari=s*b+ai*U0**2/ak+sum

Tr=ai*U0**2/ak/pari
Trr=abs(Tr)

write (*,*)
write (*,*)
write (*,*) 'Transmission coefficient:'
write (*,123)Trr
write (*,*)
write (*,*)

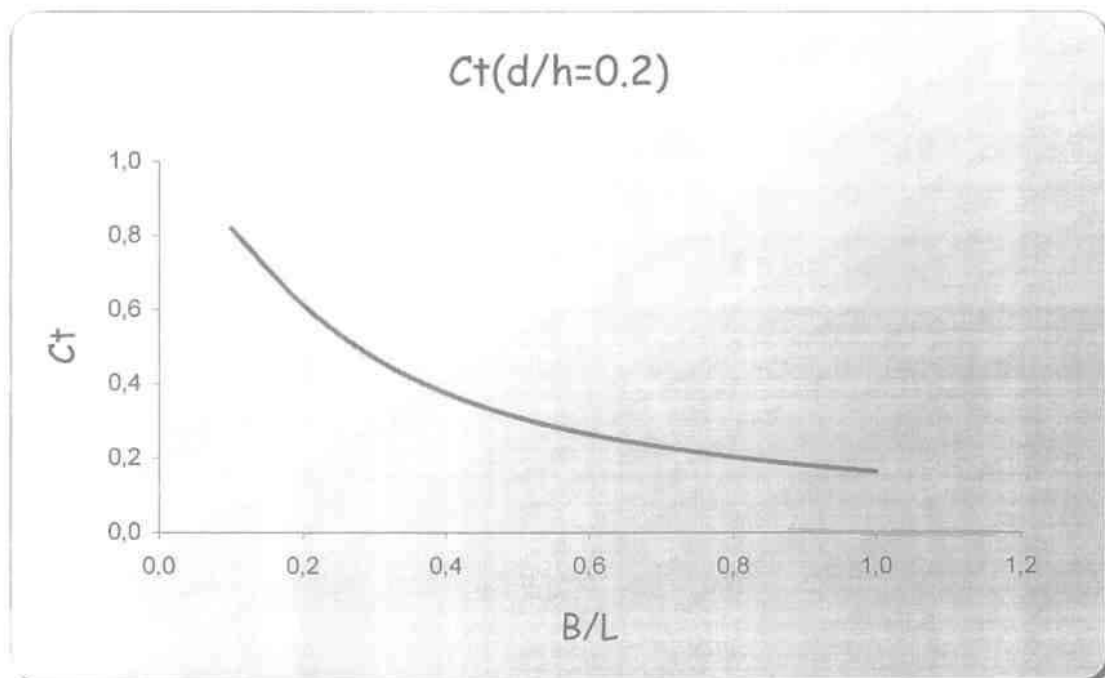
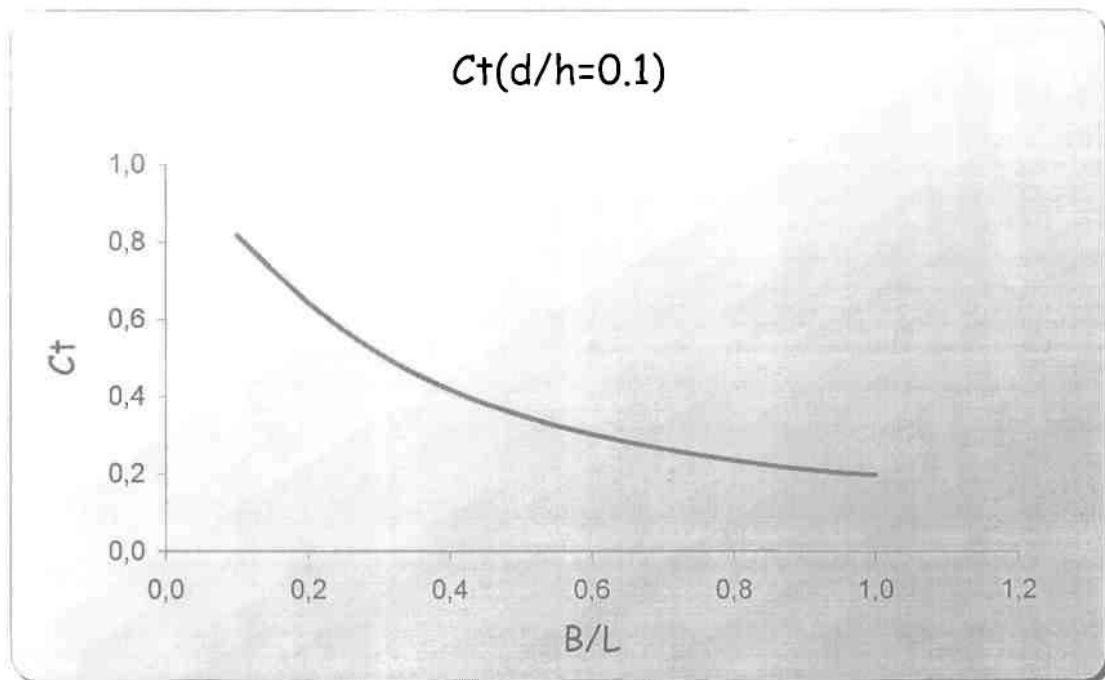
123   format (f6.3)
end
```

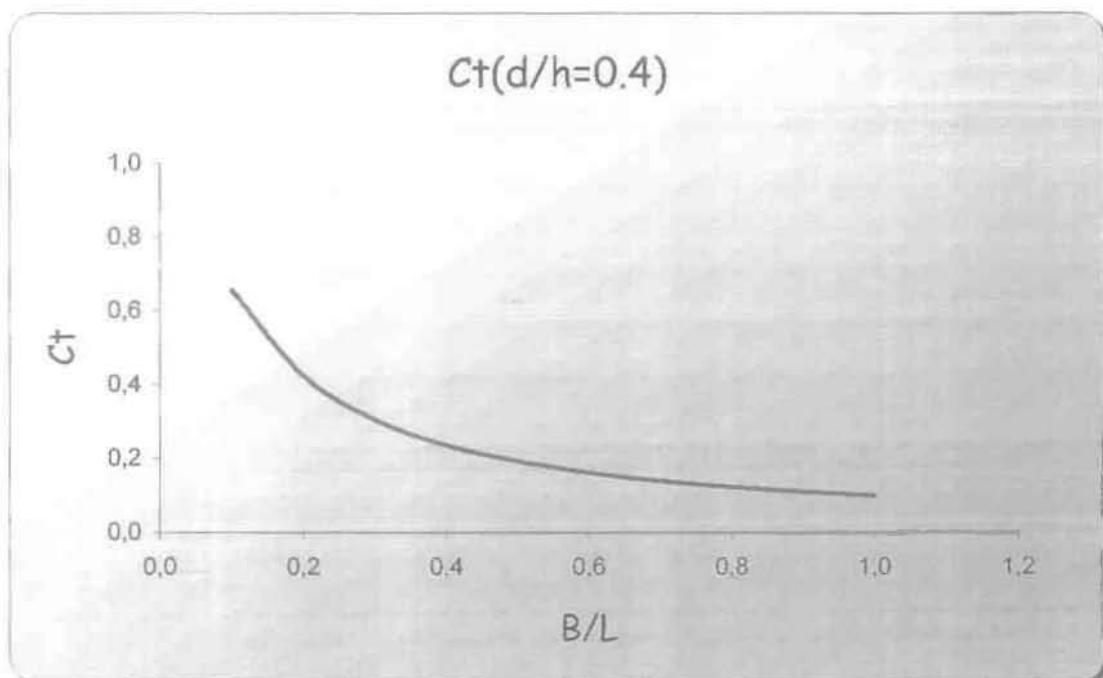
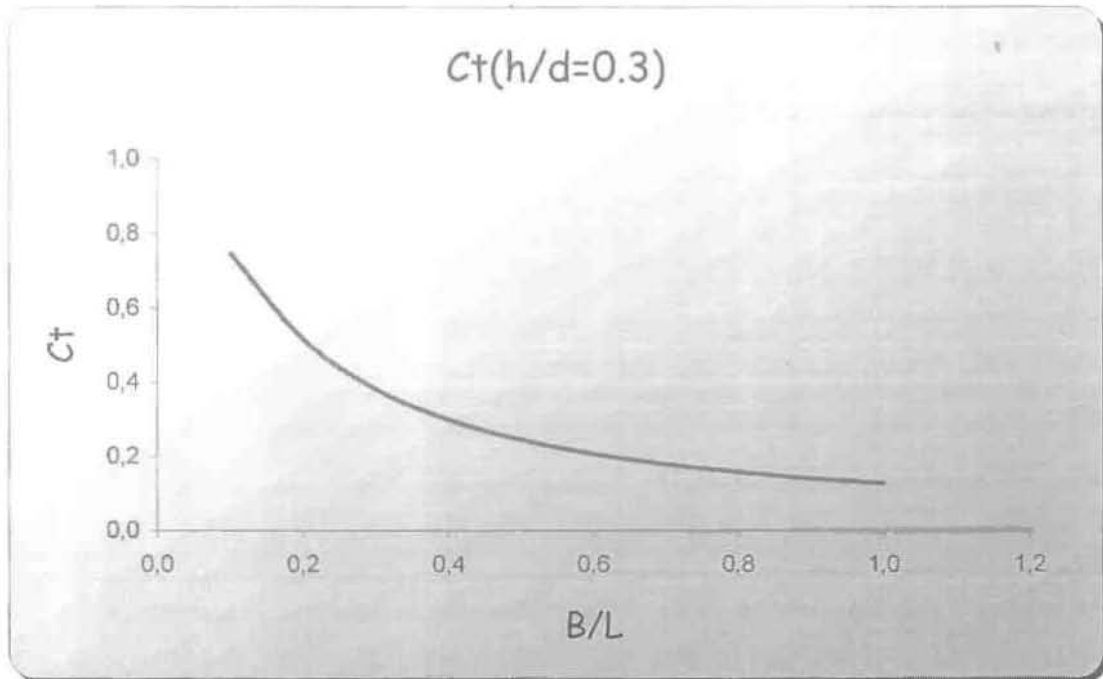
## *ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β*

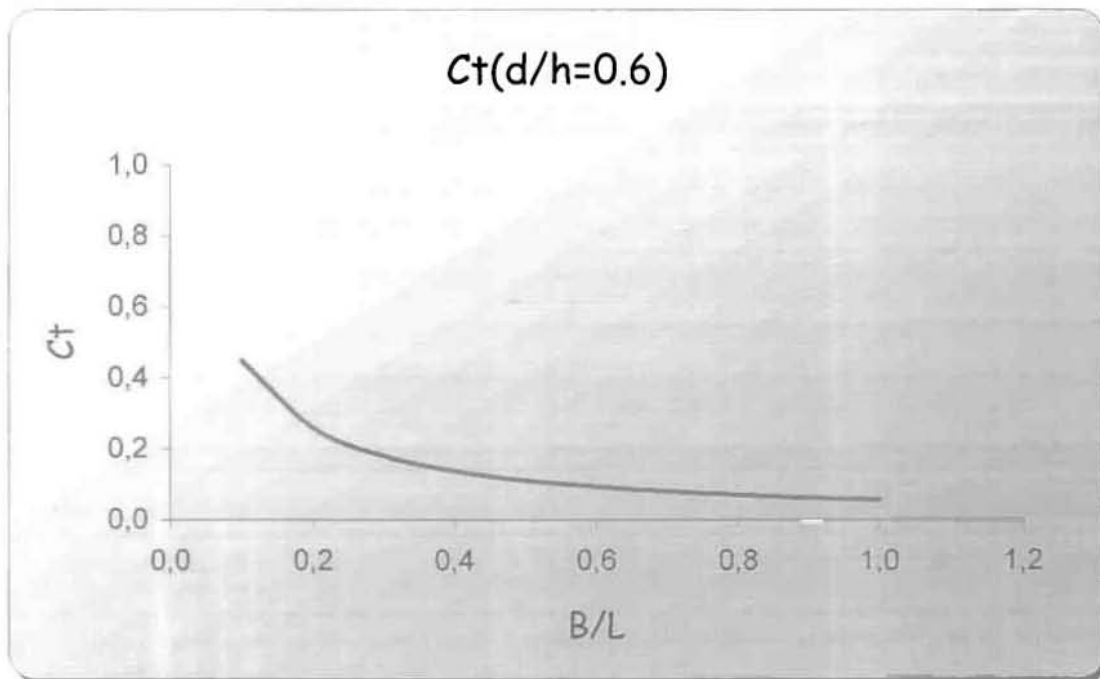
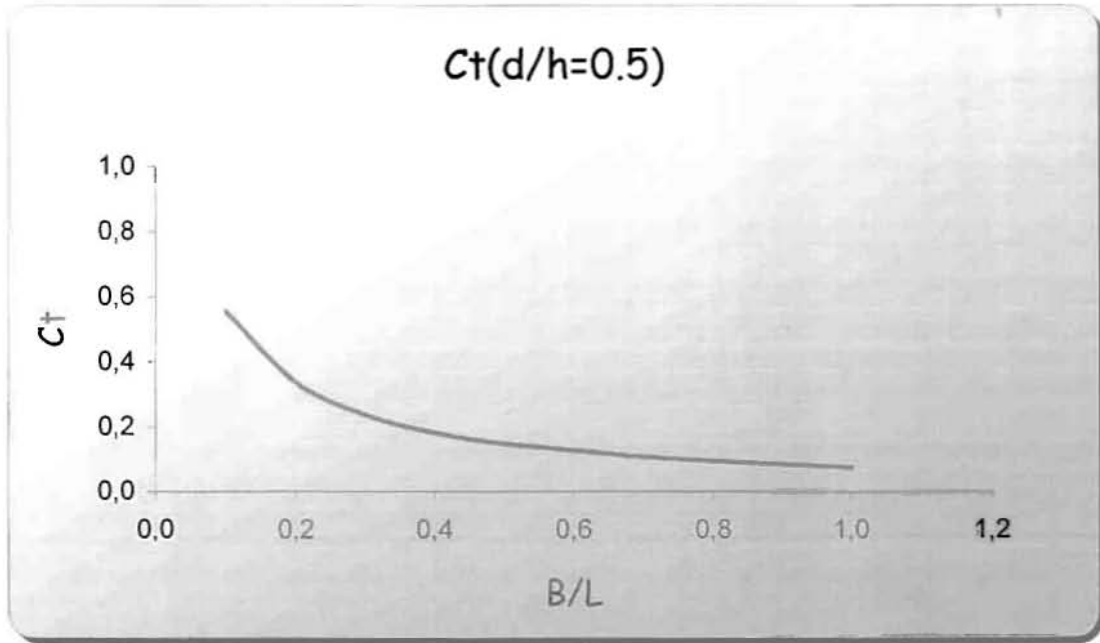
**Γραφήματα μεταβολής του συντελεστή  
διάδοσης βασισμένα στο πρόγραμμα  
RandT.FOR**

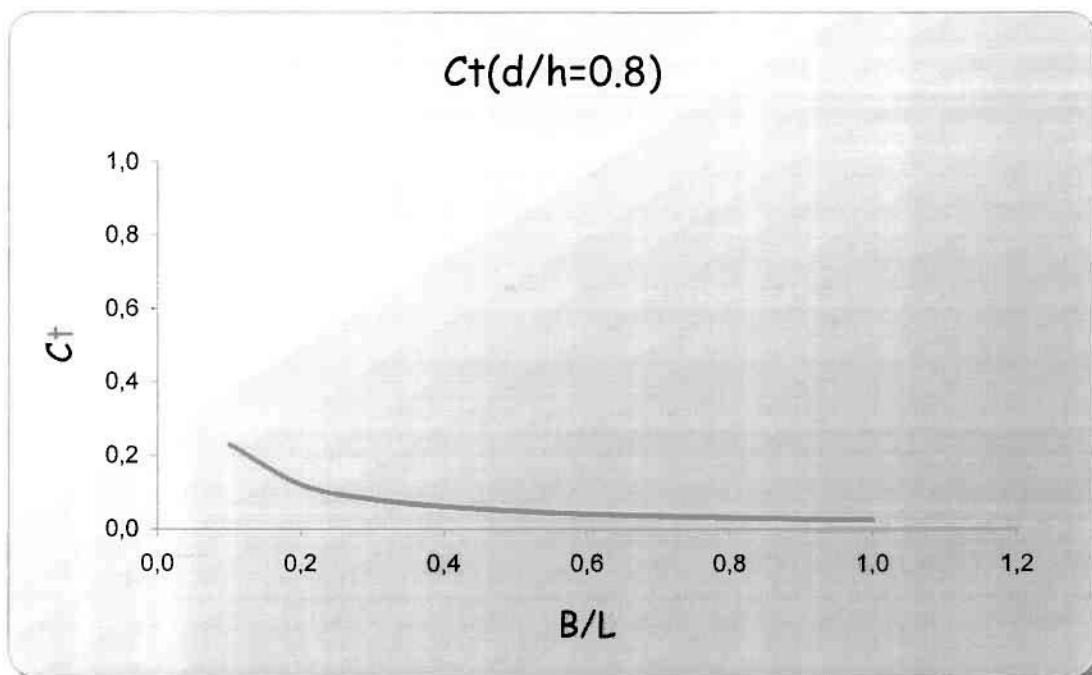
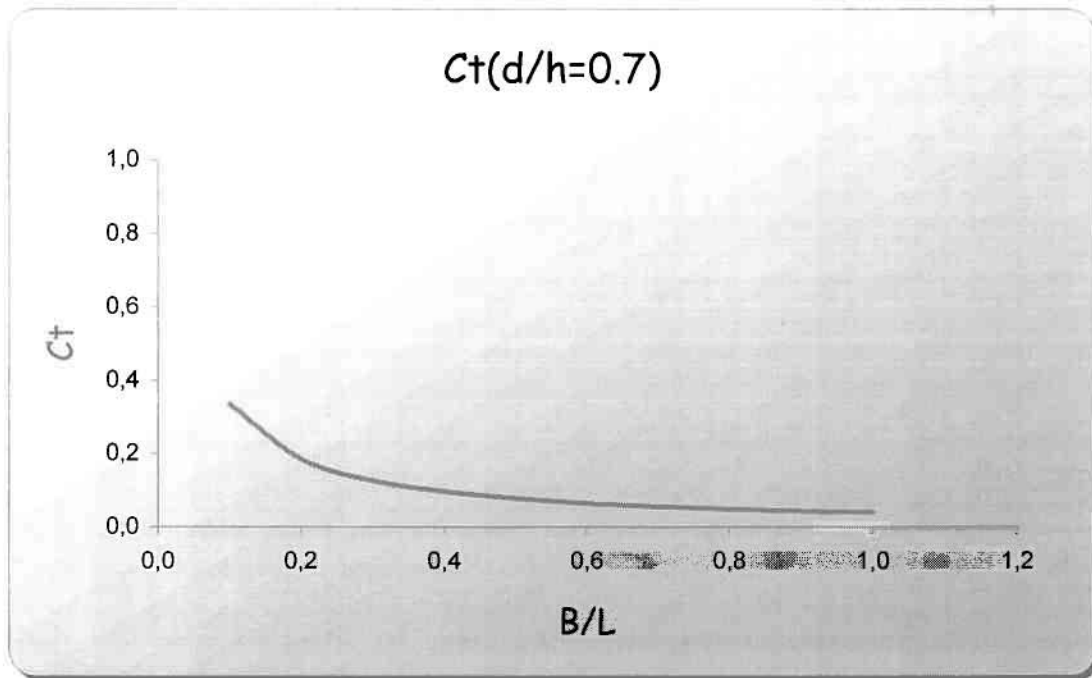
## Γραφήματα μεταβολής του συντελεστή διάδοσης βασισμένα στο πρόγραμμα RandT.FOR

- Μεταβολή του αδιαστατοποιημένου μεγέθους  $B/L$  για σταθερό  $d/h$

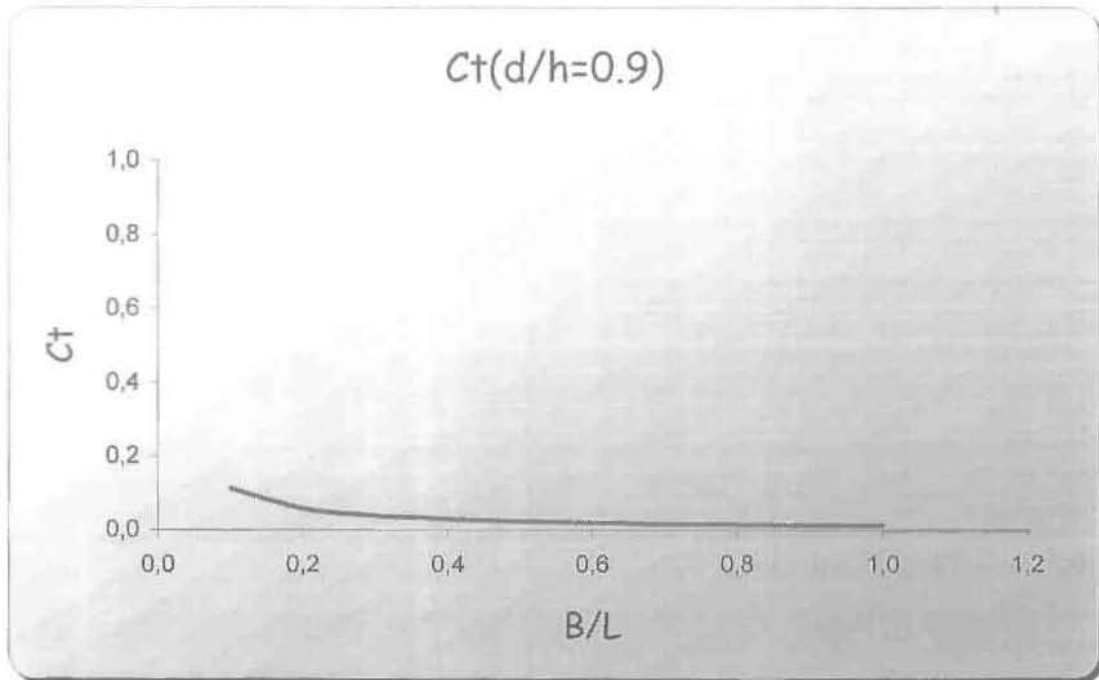




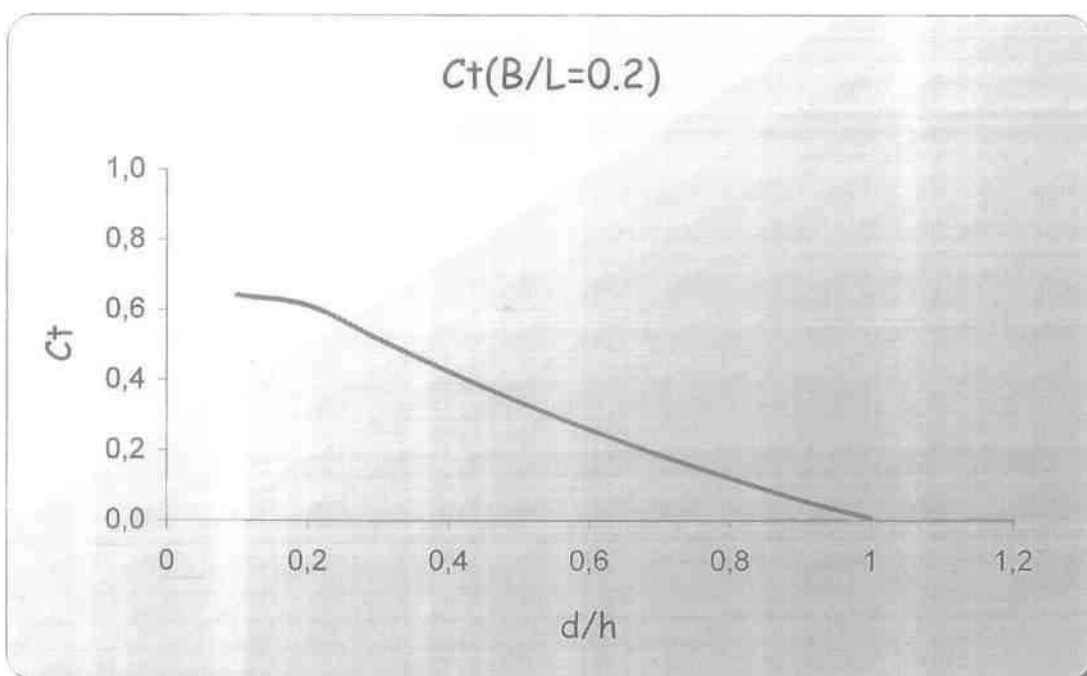
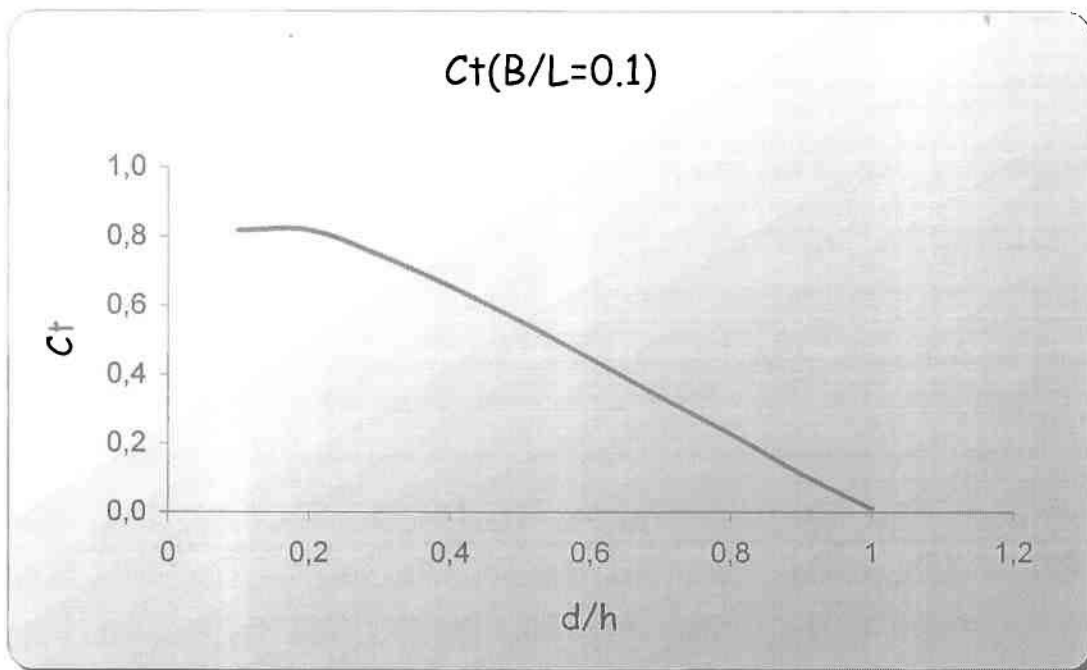


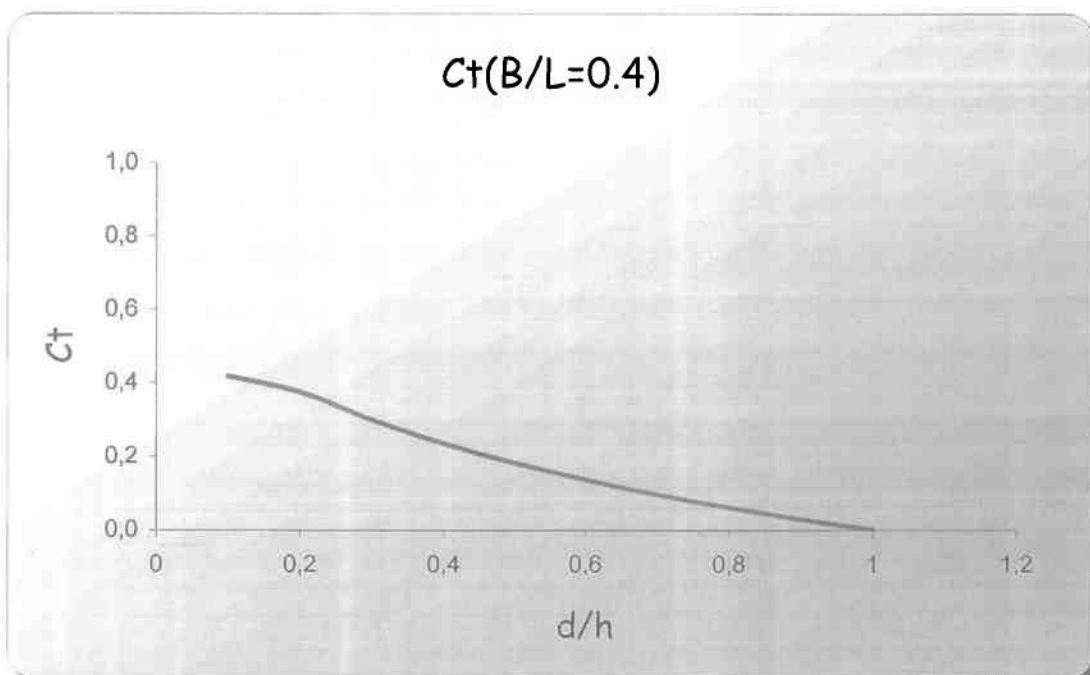
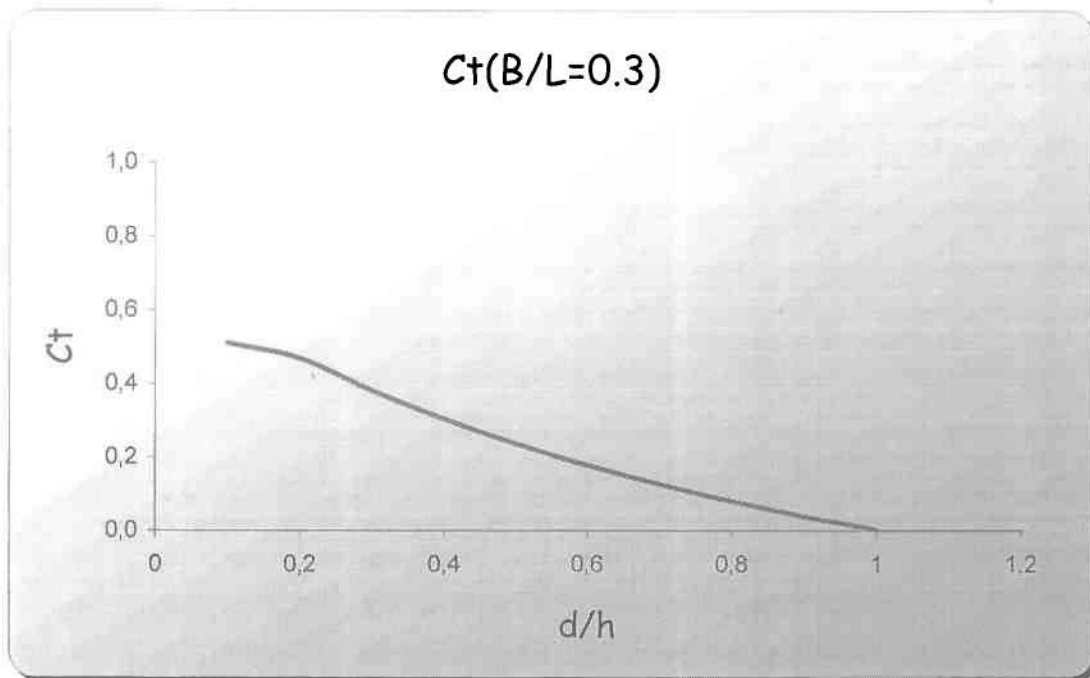


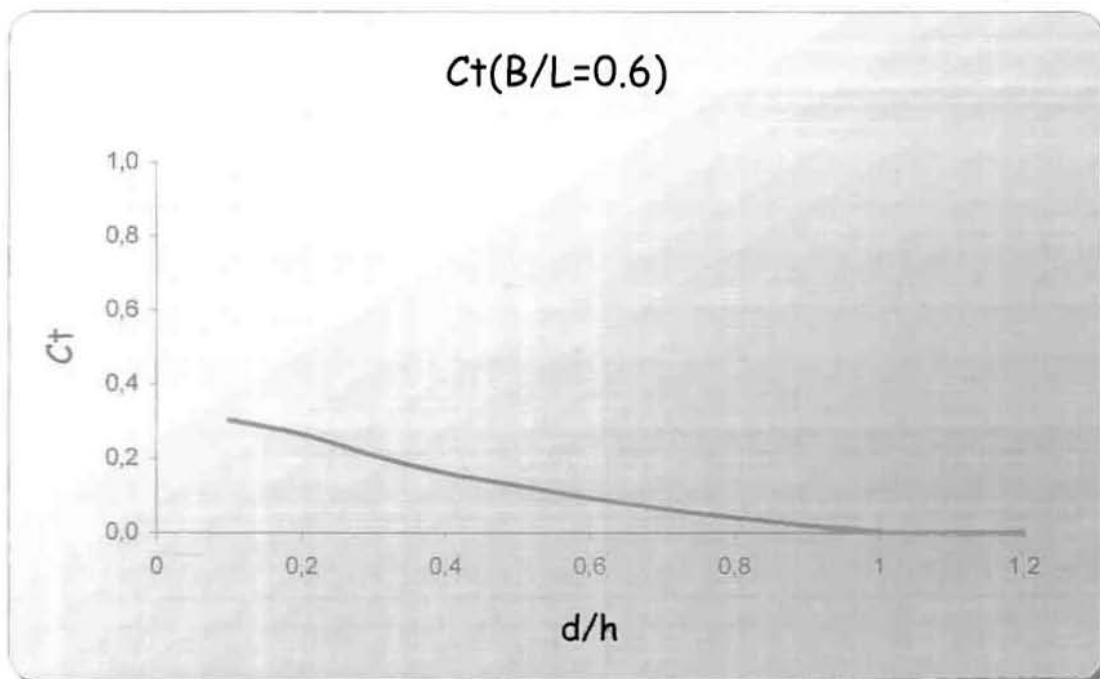
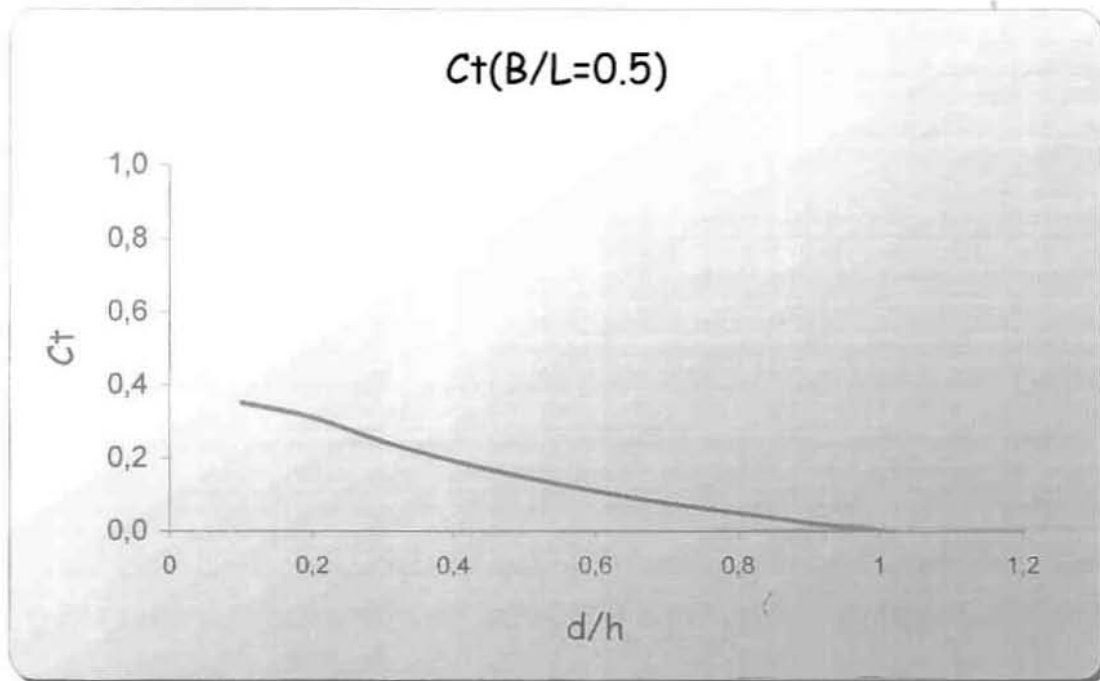


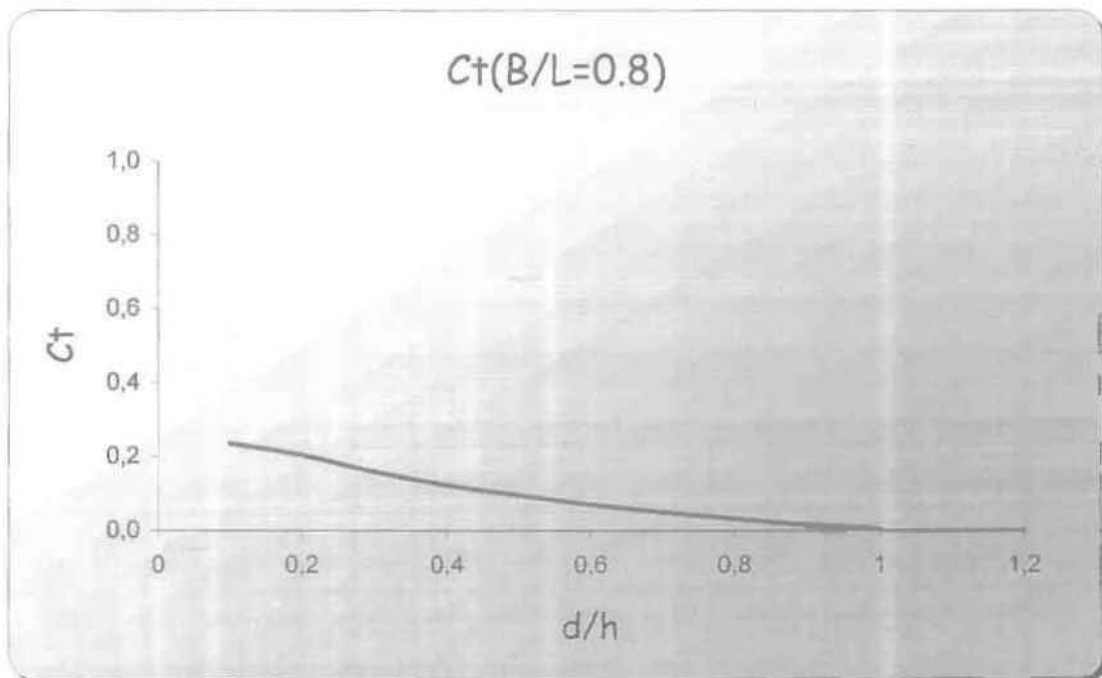
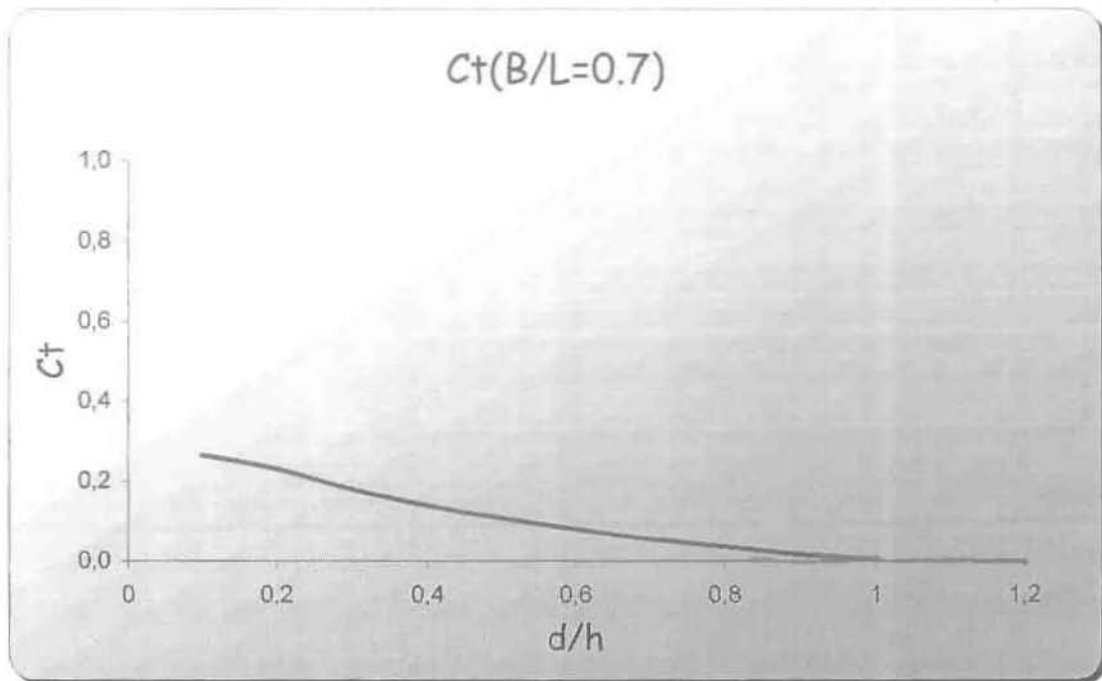


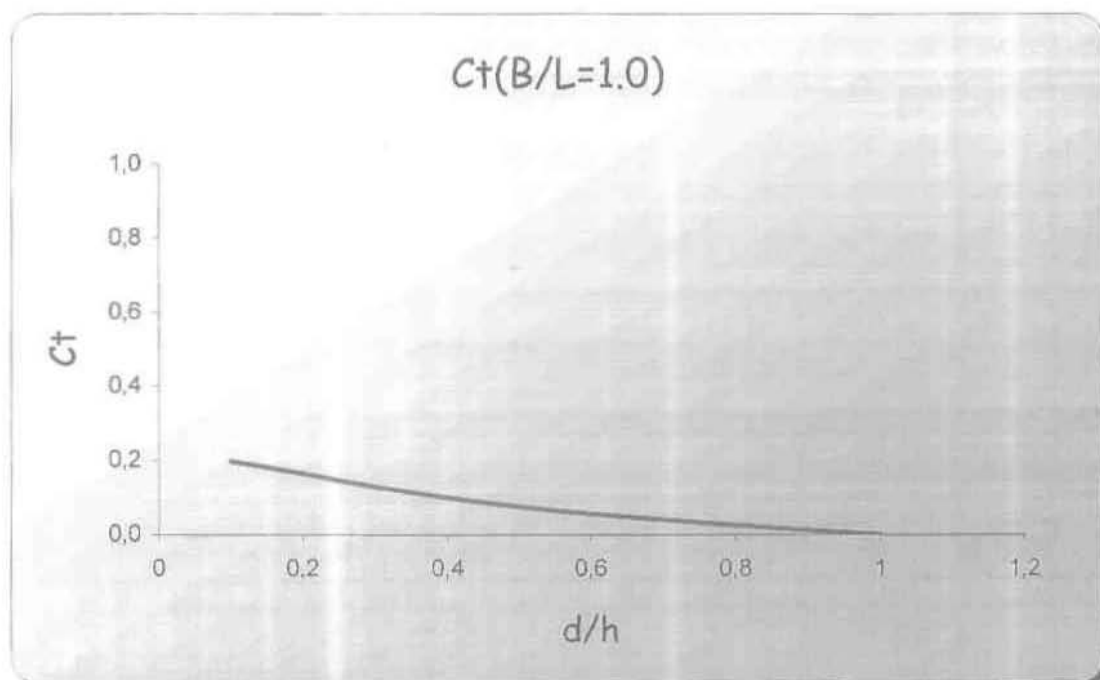
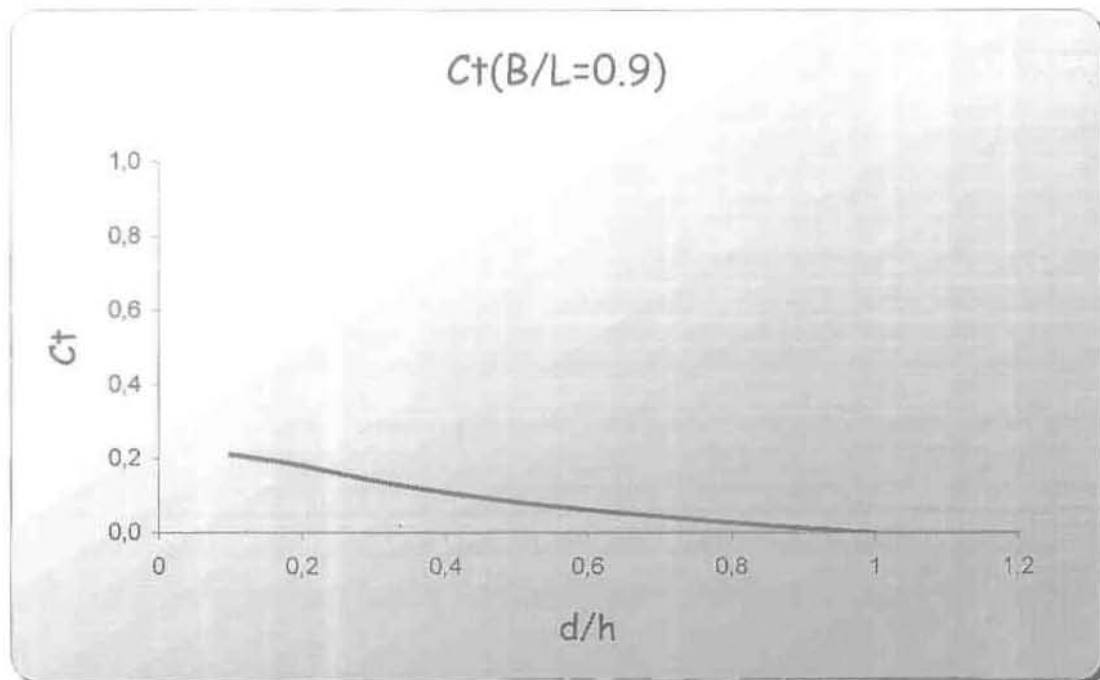
- Μεταβολή του αδιαστατοποιημένου μεγέθους  $d/h$  για σταθερό  $B/L$















## Βιβλιογραφία

- Bruun P. (1996), Port Engineering, Vol 1-2, Gulf Publishing Co.
- Drimer N., Agnon Y., Stiassie M. (1991), A simplified analytical model for a floating breakwater in water of finite depth.
- Γιάντση Θ. (1999), Πλωτοί Κυματοθραύστες, Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Καραμπάς Θ., Κουτίτας Χ. (2002), Προσομοίωση της επίδρασης των Πλωτών Κυματοθραυστών σε επιχειρησιακά κυματικά μοντέλα .
- Καραμπάς Θ. (2003), Υπολογιστική Κυματομηχανική και Ακτομηχανική, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
- Koutitas C. (1998), Mathematical Models in Coastal Engineering, Pentech Press.
- Κουτίτας Χ. (1998), Εισαγωγή στην παράκτια τεχνική και τα Λιμενικά έργα. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
- Κουτίτας Χ. (1999), Πλωτοί Κυματοθραύστες από Σκυρόδεμα., *Εισαγωγικό εγχειρίδιο*. Θεσσαλονίκη, Typooffset.
- Κουτίτας Χ. (1999), Απόκριση συστήματος πλωτών κυματοθραυστών σε κυματισμούς, ΠΣΑΠΘ.
- Κριέζη Α., Καραμπάς Θ., Κουτίτας Χ. Πρίνος Π.(1997), *Ανάκλαση & Διάδοση στους Πλωτούς Κυματοθραύστες*. 7<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο ΕΥΕ, σ.393-400
- Κριέζη Α. (1999), Διερεύνηση της επίδρασης Πλωτού-Βυθισμένου Κυματοθραύστη στη διαμόρφωση των κυματισμών σε ρηγά ύδατα, Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Losada I. (2000), *Coastal Structures '99.*, Proceedings of the International Conference in Spain, A.A.Balkema/Rotterdam/Brookfield
- Μέμος Κ. (2002), Μαθήματα Λιμενικών έργων, Αθήνα:Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Tsinker G. (1992), Floating Ports-Design and Construction practices, Gulf Publishing Company.
- Shore Protection Manual (1984), Volume 1-2, Coastal Engineering Research Center, Department of the Army.



- Veldee M.A. (1983), Floating Breakwater Wave Attenuation and Mooring Force Performance, University of Washington.
- Werner G. (1988), Experiences with Floating Breakwaters, *A Literature Review Bull*, PIANC No 63.
- Χριστόπουλος Σ. (1998), Κατασκευή –Προστασία λιμενοβραχίονα Νέου Μαρμαρά, Νομαρχιακή Διοίκηση Χαλκιδικής.