



# **ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ – ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ  
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ  
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»**

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΝΤΑΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ  
ΚΥΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ ΚΑΤΑΝΤΗ  
ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΗ ΚΑΙ ΕΚΤΟΣ ΤΗΣ ΣΚΙΑΣ ΤΟΥ**

**ΕΠΑΜΕΙΝΩΝΔΑΣ Α. ΑΡΓΥΡΟΠΟΥΛΟΣ**

**«ΕΠΙΣΤΗΜΗ &  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ  
ΥΔΑΤΙΚΩΝ  
ΠΟΡΩΝ»**

Επιβλέπουσα: Βασιλική Τσουκαλά  
Επίκουρος Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2012

# **ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**



**ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ – ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ  
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»**

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΝΤΑΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΚΥΜΑΤΙΚΩΝ  
ΜΕΓΕΘΩΝ ΚΑΤΑΝΤΗ ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΗ ΚΑΙ ΕΚΤΟΣ ΤΗΣ  
ΣΚΙΑΣ ΤΟΥ**

**Επαμεινώνδας Α. Αργυρόπουλος**

**Αθήνα, Ιούλιος 2012**

**Επιβλέπουσα: Επίκουρος Καθηγήτρια Βασιλική Τσουκαλά**



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την κα. Βασιλική Τσουκαλά, Επίκουρο Καθηγήτρια Ε.Μ.Π. για την επίβλεψη κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας με τίτλο «Μελέτη της εντατικοποίησης των κυματικών μεγεθών κατάντη κυματοθραύστη και εκτός της σκιάς του», για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και για την άψογη συνεργασία μας.

Ξεχωριστές ευχαριστίες στον Υποψήφιο Διδάκτορα και φίλο Μιχάλη Χονδρό για τις πολύτιμες υποδείξεις, την καθοδήγηση και τη βοήθειά του.

Τέλος, ευχαριστώ τους φίλους μου και την οικογένειά μου που με υποστήριξαν με κάθε τρόπο μέχρι και την ημέρα της παρουσίασης της εργασίας μου.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....</b>	<b>xi</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>xiii</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</b>	
<b><i>ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</i></b>	<b>1</b>
1.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	2
1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	3
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</b>	
<b><i>ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....</i></b>	<b>5</b>
2.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	6
2.2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ.....	11
2.2.1 Γενικά.....	11
2.2.2 Περίθλαση.....	13
2.2.3 Διάθλαση.....	17
2.3 ΘΕΩΡΙΕΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΥΧΑΙΩΝ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ.....	27
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3</b>	
<b><i>ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ MIKE 21 BW.....</i></b>	<b>43</b>
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	44
3.2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	46
3.3 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ MIKE 21 BW.....	51
3.3.1 Η βαθυμετρία.....	51
3.3.2 Η περίοδος προσομοίωσης.....	51
3.3.3 Οριακές συνθήκες.....	52
3.3.4 Ανάκλαση – απορρόφηση.....	52

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

<b>ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ MIKE 21 BW.....</b>	<b>53</b>
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	54
4.2 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΒΑΣΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ.....	55
4.3 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	67
4.4 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΕΞΑΓΟΜΕΝΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ.....	81

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

<b>ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ.....</b>	<b>89</b>
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	90
5.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΧΩΡΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΤΟΥ ΥΨΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΗ.....	92
5.3 ΕΠΙΡΡΟΗ ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΗ ΣΤΑ ΚΥΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΓΙΑ ΚΑΝΟΝΙΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ.....	96
5.3.1 Μεταβολή της χωρικής κατανομής του λόγου $H_{bw}/H$ συναρτήσει των κυματικών χαρακτηριστικών της γωνίας πρόσπτωσης των κυμάτων.....	96
5.3.2 Μεταβολή της χωρικής κατανομής του λόγου $H_{bw}/H$ συναρτήσει του ύψους κύματος.....	100
5.4 ΕΠΙΡΡΟΗ ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΗ ΣΤΑ ΚΥΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΓΙΑ ΜΗ ΚΑΝΟΝΙΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ.....	102
5.4.1 Μεταβολή της χωρικής κατανομής του λόγου $H_{bw}/H$ συναρτήσει των κυματικών χαρακτηριστικών της γωνίας πρόσπτωσης και της κατευθυντικότητας των κυμάτων .....	102
5.4.2 Μεταβολή της χωρικής κατανομής του λόγου $H_{bw}/H$ συναρτήσει του ύψους κύματος και της κατευθυντικότητας των κυμάτων.....	111
5.5 ΜΕΓΕΘΗ ΤΟΥ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΠΡΟΣΠΗΤΩΝΤΟΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ.....	117

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6**

**ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ..... 125**

6.1 ΓΕΝΙΚΑ.....126

6.2 ΕΠΙΡΡΟΗ ΓΩΝΙΑΣ ΠΡΟΣΠΤΩΣΗΣ  $\alpha$ ..... 126

6.3 ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΟΥ ΥΨΟΥΣ  
ΚΥΜΑΤΟΣ..... 126

6.4 ΕΠΙΡΡΟΗ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ  $\theta$ ..... 127

6.5 ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ..... 127

6.6 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΕΤΑΙΡΩ ΕΡΕΥΝΑ..... 128

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... 131**

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ**

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

<b>Σχήμα 1.2.1</b>	Περιοχές καννάβου.....	3
<b>Σχήμα 2.1.1</b>	Port Canaveral (Florida).....	7
<b>Σχήμα 2.1.2</b>	Marina del Rey (California).....	7
<b>Σχήμα 2.1.3</b>	Gulfport (Mississippi).....	7
<b>Σχήμα 2.1.4</b>	Half Moon Bay Harbor.....	8
<b>Σχήμα 2.1.5</b>	Barcelona Harbor.....	8
<b>Σχήμα 2.1.6</b>	Crescent City.....	8
<b>Σχήμα 2.1.7</b>	Panama City Harbor.....	9
<b>Σχήμα 2.1.8</b>	Kings Bay.....	9
<b>Σχήμα 2.1.9</b>	Port of Portland.....	9
<b>Σχήμα 2.1.10</b>	New Orleans.....	9
<b>Σχήμα 2.1.11</b>	Τύποι χωροθέτησης λιμένων.....	10
<b>Σχήμα 2.2.1</b>	Διάγραμμα κυματισμών που προσεγγίζουν άμεσα έναν ημιάπειρο κυματοθραύστη.....	12
<b>Σχήμα 2.2.2</b>	Συντελεστές περίθλασης κατάντη απορροφητικού και μη απορροφητικού κυματοθραύστη σε απόσταση $y/\lambda=2$ από τον άξονά του.....	12
<b>Σχήμα 2.2.3</b>	Περίθλαση κυματισμών.....	14
<b>Σχήμα 2.2.4</b>	Περίθλαση κυματισμών – $90^\circ$ γωνία πρόσπτωσης (wiegel).....	15
<b>Σχήμα 2.2.5</b>	Περίθλαση κυματισμών.....	16
<b>Σχήμα 2.2.6</b>	Περίθλαση κυματισμών.....	16
<b>Σχήμα 2.2.7</b>	Διαγράμματα διαθλάσεως για διάφορες τοπογραφίες πυθμένα.....	18
<b>Σχήμα 2.2.8</b>	Διάθλαση κυμάτων σε γειτονικούς κόλπους.....	18
<b>Σχήμα 2.2.9</b>	Διάθλαση κυματισμών.....	18
<b>Σχήμα 2.2.10</b>	Σκίτσο ορισμών.....	19
<b>Σχήμα 2.2.11</b>	Διάγραμμα διαθλάσεως.....	22
<b>Σχήμα 2.2.12</b>	Διάταξη υπολογισμού διαγράμματος διαθλάσεως.....	26
<b>Σχήμα 2.3.1</b>	Φωτογραφικό στιγμιότυπο θαλάσσιας διαταραχής.....	27
<b>Σχήμα 2.3.2</b>	Εργαστηριακές μετρήσεις ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας με την πάροδο του χρόνου.....	27

<b>Σχήμα 2.3.3</b>	Χαρακτηριστικό σχέδιο χρονικής εξέλιξης τυχαίου κυματισμού (Ochi 1973).....	29
<b>Σχήμα 2.3.4</b>	Κανονική κατανομή (Gauss) που ακολουθεί η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας.....	31
<b>Σχήμα 2.3.5</b>	Κατανομή Rayleigh που ακολουθεί το ύψος κύματος και αθροιστική κατανομή.....	31
<b>Σχήμα 2.3.6</b>	Προσομοίωση τυχαίων κυματισμών με επαλληλία ημιτονοειδών... 33	33
<b>Σχήμα 2.3.7</b>	Καταγραφή χρονοσειράς ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας.....	33
<b>Σχήμα 2.3.8</b>	Φασματική αναπαράσταση υπερτιθέμενων κυματισμών.....	34
<b>Σχήμα 2.3.9</b>	Παράδειγμα φάσματος θαλάσσιων κυματισμών.....	34
<b>Σχήμα 2.3.10</b>	Σύγκριση φασμάτων PM και JONSWAP.....	37
<b>Σχήμα 2.3.11</b>	Σχηματική απεικόνιση δυσδιάστατου φάσματος.....	40
<b>Σχήμα 3.1.1</b>	Οπτικοποίηση μονοδιάστατου κυματισμού.....	44
<b>Σχήμα 3.1.2</b>	Οπτικοποίηση δισδιάστατου κυματισμού.....	45
<b>Σχήμα 3.2.1</b>	Ορθογωνικός κάρναβος διακριτοποίησης των διαφορικών εξισώσεων κατά x και y.....	50
<b>Σχήμα 4.2.1</b>	Επιλογή δισδιάστατου μοντέλου Bussinesq (Module Selection).....	57
<b>Σχήμα 4.2.2</b>	Βαθυμετρία (Bathymetry).....	58
<b>Σχήμα 4.2.3</b>	Τύπος της εξίσωσης (Type of Equation).....	61
<b>Σχήμα 4.2.4</b>	Αριθμητικές Παράμετροι (Numerical Parameters).....	63
<b>Σχήμα 4.2.5</b>	Όρια (Boundary).....	64
<b>Σχήμα 4.2.6</b>	Χρόνος προσομοίωσης (Simulation Period).....	65
<b>Σχήμα 4.3.1</b>	Παράμετροι Βαθυμετρίας (Bathymetric Parameters).....	68
<b>Σχήμα 4.3.2</b>	Βαθυμετρία (χωρίς και με bw).....	69
<b>Σχήμα 4.3.3</b>	Δεδομένα για τα όρια (Boundary Data).....	70
<b>Σχήμα 4.3.4</b>	Ανύψωση Επιφανείας (Surface Elevation).....	71
<b>Σχήμα 4.3.5</b>	Εσωτερική παραγωγή κύματος (Internal Wave Generation).....	72
<b>Σχήμα 4.3.6</b>	Τριβή πυθμένα (Bottom Friction).....	74
<b>Σχήμα 4.3.7</b>	Ιξώδες στροβίλου (Eddy Viscosity).....	75
<b>Σχήμα 4.3.8</b>	Φίλτρο (Filtering).....	76
<b>Σχήμα 4.3.9</b>	Θραύση κύματος (Wave Breaking).....	77
<b>Σχήμα 4.3.10</b>	Μετακίνηση ακρογραμμής (Moving Shoreline).....	78

<b>Σχήμα 4.3.11</b> Πορώδες (Porosity).....	79
<b>Σχήμα 4.3.12</b> Απορροφητική ζώνη (Sponge).....	80
<b>Σχήμα 4.4.1</b> Deterministic parameters.....	82
<b>Σχήμα 4.4.2</b> Phase-averaged parameters.....	85
<b>Σχήμα 4.4.3</b> Wave disturbance parameters.....	87
<b>Σχήμα 4.4.4</b> Hot start parameters.....	88
<b>Σχήμα 5.1.1</b> Περιοχές κανάβου.....	91
<b>Σχήμα 5.2.1.1</b> $\alpha=90^\circ$ .....	93
<b>Σχήμα 5.2.1.2</b> $\alpha=100^\circ$ .....	93
<b>Σχήμα 5.2.1.3</b> $\alpha=120^\circ$ .....	93
<b>Σχήμα 5.2.1.4</b> $\alpha=120^\circ$ (μεγάλος κάρναβος).....	93
<b>Σχήμα 5.2.1.5</b> Κατευθυντικότητα $\theta=0^\circ$ .....	94
<b>Σχήμα 5.2.1.6</b> Κατευθυντικότητα $\theta=10^\circ$ .....	94
<b>Σχήμα 5.2.1.7</b> Κατευθυντικότητα $\theta=30^\circ$ .....	94
<b>Σχήμα 5.2.1.8</b> Ύψος κύματος $H=0,5\mu$ .....	95
<b>Σχήμα 5.2.1.9</b> Ύψος κύματος $H=1,2\mu$ .....	95
<b>Σχήμα 5.2.1.10</b> Ύψος κύματος $H=3,0\mu$ .....	95
<b>Σχήμα 5.3.1.1</b> Ύψος κύματος $H$ .....	96
<b>Σχήμα 5.3.1.2</b> Ύψος κύματος $H_{bw}$ .....	96
<b>Σχήμα 5.3.1.3</b> Λόγος υψών κύματος $H_{bw}/H$ για $H_o=0,5m$ και $\alpha=90^\circ$ .....	96
<b>Σχήμα 5.3.1.4</b> Λόγος υψών κύματος $H_{bw}/H$ για $H_o=0,5m$ και $\alpha=100^\circ$ .....	98
<b>Σχήμα 5.3.1.5</b> Λόγος υψών κύματος $H_{bw}/H$ για $H_o=0,5m$ και $\alpha=120^\circ$ .....	99
<b>Σχήμα 5.3.2.1</b> Λόγος υψών κύματος $H_{bw}/H$ για $H_o=1,2m$ και $\alpha=90^\circ$ .....	100
<b>Σχήμα 5.3.2.2</b> Λόγος υψών κύματος $H_{bw}/H$ για $H_o=3,0m$ και $\alpha=90^\circ$ .....	101
<b>Σχήμα 5.4.1.1</b> Λόγος υψών κύματος $H_{bw}/H$ για $H_o=0,5m$ , $\alpha=90^\circ$ και $\theta=0^\circ$ .....	102
<b>Σχήμα 5.4.1.2</b> Λόγος υψών κύματος $H_{bw}/H$ για $H_o=0,5m$ , $\alpha=90^\circ$ και $\theta=10^\circ$ .....	103
<b>Σχήμα 5.4.1.3</b> Λόγος υψών κύματος $H_{bw}/H$ για $H_o=0,5m$ , $\alpha=90^\circ$ και $\theta=30^\circ$ .....	104
<b>Σχήμα 5.4.1.4</b> Λόγος υψών κύματος $H_{bw}/H$ για $H_o=0,5m$ , $\alpha=100^\circ$ και $\theta=0^\circ$ .....	105
<b>Σχήμα 5.4.1.5</b> Λόγος υψών κύματος $H_{bw}/H$ για $H_o=0,5m$ , $\alpha=100^\circ$ και $\theta=10^\circ$ .....	106
<b>Σχήμα 5.4.1.6</b> Λόγος υψών κύματος $H_{bw}/H$ για $H_o=0,5m$ , $\alpha=100^\circ$ και $\theta=30^\circ$ .....	107
<b>Σχήμα 5.4.1.7</b> Λόγος υψών κύματος $H_{bw}/H$ για $H_o=0,5m$ , $\alpha=120^\circ$ και $\theta=0^\circ$ .....	108
<b>Σχήμα 5.4.1.8</b> Λόγος υψών κύματος $H_{bw}/H$ για $H_o=0,5m$ , $\alpha=120^\circ$ και $\theta=10^\circ$ .....	109

---

<b>Σχήμα 5.4.1.9</b> Λόγος υψών κύματος $H_{bw}/H$ για $H_o=0,5m$ , $\alpha=120^\circ$ και $\theta=30^\circ$ .....	110
<b>Σχήμα 5.4.2.1</b> Λόγος υψών κύματος $H_{bw}/H$ για $H_o=1,2m$ , $\alpha=90^\circ$ και $\theta=0^\circ$ .....	111
<b>Σχήμα 5.4.2.2</b> Λόγος υψών κύματος $H_{bw}/H$ για $H_o=1,2m$ , $\alpha=90^\circ$ και $\theta=10^\circ$ .....	112
<b>Σχήμα 5.4.2.3</b> Λόγος υψών κύματος $H_{bw}/H$ για $H_o=1,2m$ , $\alpha=90^\circ$ και $\theta=30^\circ$ .....	113
<b>Σχήμα 5.4.2.4</b> Λόγος υψών κύματος $H_{bw}/H$ για $H_o=3m$ , $\alpha=90^\circ$ και $\theta=0^\circ$ .....	114
<b>Σχήμα 5.4.2.5</b> Λόγος υψών κύματος $H_{bw}/H$ για $H_o=3m$ , $\alpha=90^\circ$ και $\theta=10^\circ$ .....	115
<b>Σχήμα 5.4.2.6</b> Λόγος υψών κύματος $H_{bw}/H$ για $H_o=3m$ , $\alpha=90^\circ$ και $\theta=30^\circ$ .....	116



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

<b>Πίνακας 2.2.1</b>	Προσδιορισμός του μήκους κύματος $L$ στη διάρκεια διαθλάσεως.....	23
<b>Πίνακας 2.2.2</b>	Προσδιορισμός της γωνίας μετάδοσης $\beta$ κύματος στη διάρκεια της διάθλασης.....	23
<b>Πίνακας 5.1.1</b>	Συγκεντρωτικός πίνακας κυματικών σεναρίων.....	91
	<u>Κανονικοί – γραμμικοί κυματισμοί</u>	
<b>Πίνακας 5.4.1</b>	Κλίση ( $H/L$ ) και σχετικό βάθος ( $H/d$ ) στα σημεία A και B...112	
	<u>Μη κανονικοί – γραμμικοί κυματισμοί</u>	
<b>Πίνακας 5.4.2</b>	Κλίση ( $H/L$ ) και σχετικό βάθος ( $H/d$ ) στα σημεία A και B...113	
	<u>Κανονικοί – Μη γραμμικοί κυματισμοί</u>	
<b>Πίνακας 5.4.3</b>	Κλίση ( $H/L$ ) και σχετικό βάθος ( $H/d$ ) στα σημεία A και B...114	
	<u>Μη κανονικοί – Μη γραμμικοί κυματισμοί</u>	
<b>Πίνακας 5.4.4</b>	Κλίση ( $H/L$ ) και σχετικό βάθος ( $H/d$ ) στα σημεία A και B...115	
<b>Πίνακας 5.4.5</b>	Μεταβολή $\max H_{bw}/H$ στην περιοχή A σε σχέση με την μεταβολή των κυματικών χαρακτηριστικών.....	117

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης της περίθλασης και της διάθλασης κατάντη του κυματοθραύστη στην περιοχή εκτός της σκιάς του, με τη χρήση του υπολογιστικού μοντέλου MIKE 21 και συγκεκριμένα της υπορουτίνας MIKE 21 BW. Μελετάται η επιρροή στην προαναφερθείσα περιοχή της γωνίας πρόσπτωσης  $\alpha$  του εισερχόμενου κυματισμού, της μέγιστης γωνίας κατευθυντικότητας  $\theta$  και της μη γραμμικότητας.

Γίνεται επεξεργασία των κυματικών χαρακτηριστικών στην περιοχή μελέτης χωρίς την παρουσία κυματοθραύστη και η διαδικασία επαναλαμβάνεται με την παρουσία του. Τα εξαγόμενα αποτελέσματα συγκρίνονται και οπτικοποιούνται κατάλληλα για την καλύτερη κατανόηση από τον αναγνώστη. Παρουσιάζεται συμπερασματικά η επιρροή των παραπάνω χαρακτηριστικών στην περιοχή ενδιαφέροντος.

Αρχικά γίνεται μια παρουσίαση των γενικών χαρακτηριστικών των λιμενικών εγκαταστάσεων καθώς και πειραματικών παρατηρήσεων για το φαινόμενο της κυματικής ενίσχυσης στα κατάντη του κυματοθραύστη και στην περιοχή της σκιάς του. Ακολούθως αναλύεται το φαινόμενο της περίθλασης αλλά και αυτό της διάθλασης.

Στη συνέχεια γίνεται η παρουσίαση των γενικών και των ειδικών χαρακτηριστικών του αριθμητικού μοντέλου MIKE 21 BW που χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία. Αναλύεται ο καθορισμός των παραμέτρων που επιλέχθηκαν.

Ακολουθεί η παρουσίαση της επιρροής της γωνίας πρόσπτωσης του εισερχόμενου κυματισμού, της μέγιστης γωνίας κατευθυντικότητας και της μη γραμμικότητας στην ενίσχυση της κυματικής δράσης στην περιοχή ενδιαφέροντος με την ανάλυση των αποτελεσμάτων και τον σχολιασμό που τα συνοδεύει. Παρατίθενται κατάλληλα οπτικοποιημένες εικόνες για την καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων και του σχολιασμού από τον αναγνώστη.

Η εργασία αυτή ολοκληρώνεται με τη σύνοψη των συμπερασμάτων για την επιρροή της παρουσίας του κυματοθραύστη και των παραπάνω μεταβαλλόμενων χαρακτηριστικών στην περιοχή που έγινε η μελέτη.

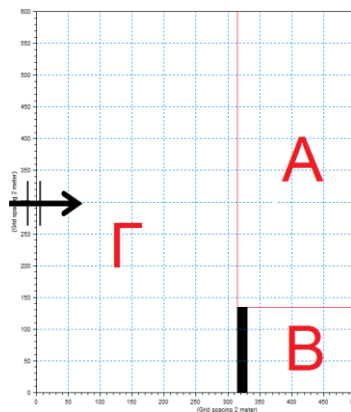
## EXTENDED ABSTRACT

### Introduction

Wind waves are one of the most important phenomena in the marine environment. Understanding wave hydrodynamics and their effects is important for designing marine structures and planning of coastal management. Transformation of wave profile is induced by complex phenomena due to the presence of solid boundaries (e.g. sea bottom, coastal structures). Such physical processes are shoaling, diffraction, refraction, wave breaking, wave-wave interactions, reflection etc. Wiegel studied the effect of diffraction inside the port basin, for different incident wave directions. However, this study did not include random sea bottom and assumed a constant water depth, ignoring refraction and shoaling.

In this research we study the effect of combined diffraction and refraction downstream of the breakwater in the region outside the shadow (area A) as shown in the Figure 1, considering a uniformly mild sloping bottom. Numerical model MIKE 21 is used and specifically BW module, based on the Boussinesq equations in order to describe the sea state in the area of interest. The effect of strengthening of wave characteristics is investigated paying attention to the following:

- The angle of incident wave,  $\alpha$
- The wave directional distribution,  $\theta$
- The nonlinearity,  $\varepsilon$



**Figure 1** – Grid divided in three sub areas

### Theoretical background

In the last 20 years a significant effort was undertaken by various researchers to accurately simulate wave conditions in the offshore region as well as in shallower waters and the surf zone. The Boussinesq-type wave models have proven to be the most accurate ones, especially when dealing with relatively shallow water regions. The most recent of these incorporate highly non-linear wave characteristics and can simulate fully dispersive conditions with great accuracy

MIKE 21 BW includes nonlinearity as well as frequency dispersion. Basically, the frequency dispersion is introduced in the momentum equations by taking into account the effect of vertical accelerations on the pressure distribution. The module solves the Boussinesq type equations using a flux-formulation with improved linear dispersion characteristics. These enhanced Boussinesq type equations (originally derived by Madsen et al, 1991, and Madsen and Sørensen, 1992) make the module suitable for simulation of the propagation of directional wave trains travelling from deep to shallow water. The maximum depth to deep-water wave length is  $h/L_0 \approx 0.5$ . For the classical Boussinesq equations the maximum depth to deep-water wave length is  $h/L_0 \approx 0.22$ .

The model has been extended into the surf zone by inclusion of wave breaking and moving shoreline as described in Madsen et al (1997a,b), Sørensen and Sørensen (2001) and Sørensen et al (1998, 2004).

The numerical model solves the equations in two horizontal dimensions calculating the surface elevation ( $\xi$ ) and the depth integrated velocity components (P) and (Q) at each node of the grid.

Continuity equation:

$$N \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

Momentum equation in x-dimension:

$$\begin{aligned} n \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{P^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{PQ}{h} \right) + \frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial x} + \\ + n^2 g H \frac{\partial \xi}{\partial x} + n^2 P \left[ \alpha + \beta \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{H} \right] + \frac{gP \sqrt{P^2 + Q^2}}{H^2 C^2} + n \Psi_1 = 0 \end{aligned} \quad (2)$$
$$(3)$$

Momentum equation in y-dimension:

$$n \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{Q^2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{PQ}{H} \right) + \frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial x} + \quad (4)$$

$$n^2 g H \frac{\partial \xi}{\partial y} + n^2 Q \left[ \alpha + \beta \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{H} \right] + \frac{g P \sqrt{P^2 + Q^2}}{H^2 C^2} + n \Psi_2 = 0 \quad (5)$$

Where the dispersive terms  $\Psi_1$  and  $\Psi_2$  are given by:

$$\begin{aligned} \Psi_1 = & - \left( -B + \frac{1}{3} \right) d^2 (P_{xxt} + Q_{xyt}) - n B g d^3 (\xi_{xxx} + \xi_{xyy}) \\ & - d d_x \left( \frac{1}{3} P_{xt} + \frac{1}{6} Q_{yt} + n B g d (2\xi_{xx} + \xi_{yy}) \right) \\ & - d d_y \left( \frac{1}{6} Q_{xt} + n B g d \xi_{xy} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Psi_2 = & - \left( B + \frac{1}{3} \right) d^2 (Q_{yyt} + P_{xyt}) - n B g d^3 (\xi_{yyy} + \xi_{xxy}) \\ & - d d_y \left( \frac{1}{3} Q_{yt} + \frac{1}{6} P_{xt} + n B g d (2\xi_{yy} + \xi_{xx}) \right) \\ & - d d_x \left( \frac{1}{6} P_{yt} + n B g d \xi_{xy} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

## Results and analysis

The goal of the present study is to examine the influence of the presence of a breakwater under miscellaneous wave scenarios in the area of interest. In Figure 2 and Figure 3 the special distribution of wave heights is depicted without and with the breakwater respectively. All figures presented in this thesis arise by the combination of the previous two, giving  $H_{bw}/H$ . A resulting figure is illustrated in Figure 4.

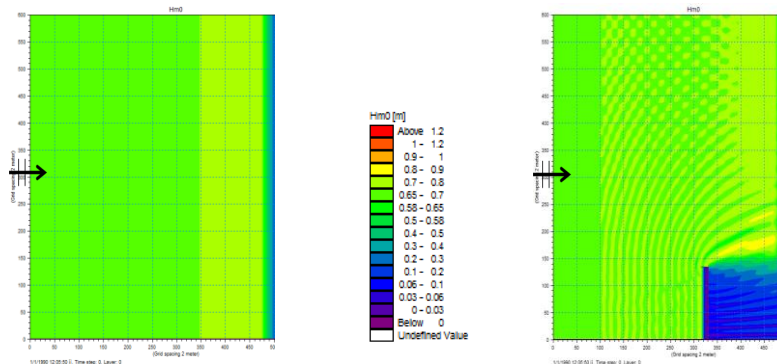
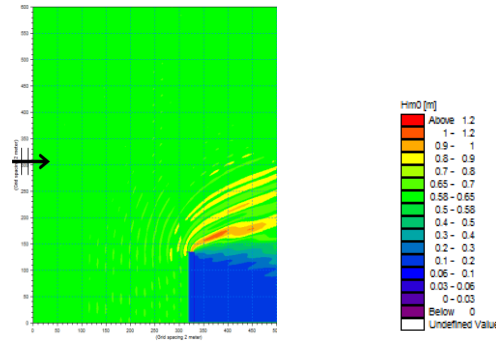


Figure 2 – Wave height  $H$

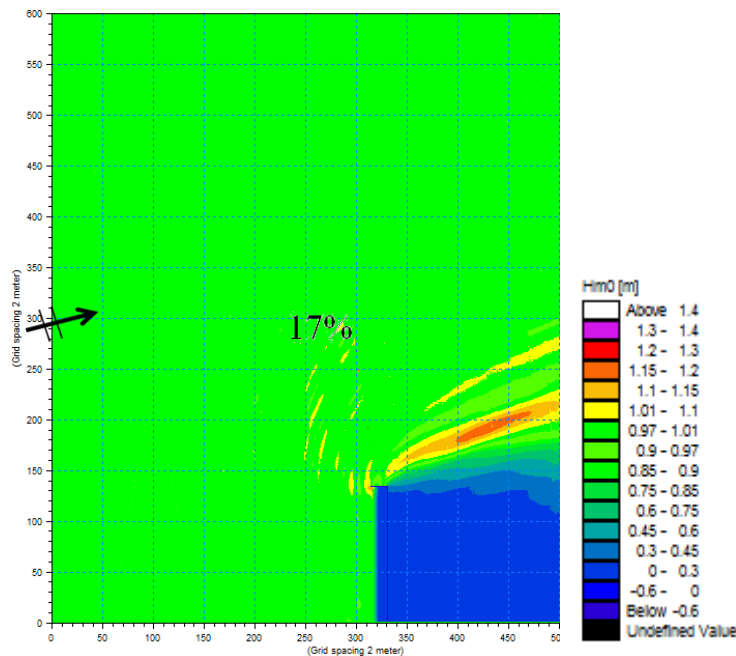
Figure 3 – Wave height  $H_{bw}$



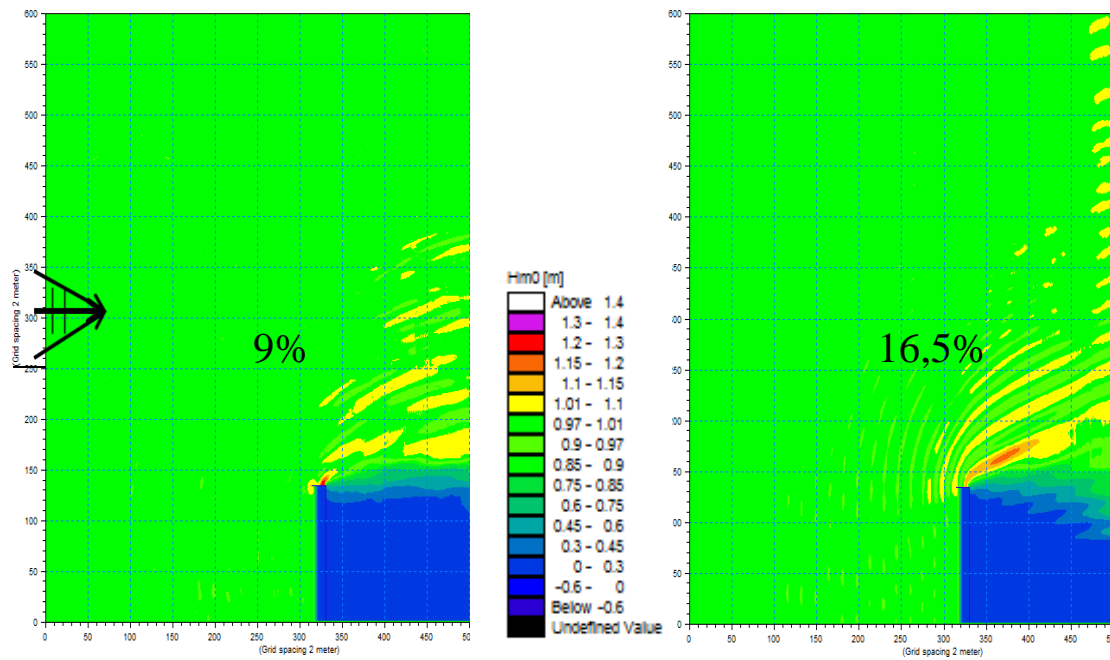
**Figure 4** – Wave height's ratio  $H_{bw}/H$

A number of cases were tested for simulation of wave propagation. The chosen wave climate refers to regular waves as well as irregular waves for a better representation of real life. Different types of wave characteristics were examined, linear and non-linear, unidirectional and multidirectional with different incident wave angle relative to the coast line.

In Figures 5, 6 and 7 representative results are shown for incident wave angle, directionality and non-linearity.



**Figure 5** –  $T=7\text{sec}$ ,  $H=0.5\text{m}$ ,  $\alpha=100^\circ$ ,  $\theta=0$



**Figure 6** –  $T=7\text{sec}$ ,  $H=0.5\text{m}$ ,  $\alpha=90^\circ$ ,  $\theta=30^\circ$     **Figure 7** –  $T=7\text{sec}$ ,  $H=1.2\text{m}$ ,  $\alpha=90^\circ$ ,  $\theta=0$

In Figure 5 an incident wave with characteristics  $T=7\text{sec}$ ,  $H=0.5\text{m}$ ,  $\alpha=100^\circ$ ,  $\theta=0$  results to an increase of 17% in the region A, though it doesn't spread far away from the basin. In the next Figure 6 a wave with almost the same characteristics (a slight difference in wave direction) but with a strong difference in directionality ( $\theta=30^\circ$ ), gives a peak of 9% increase in the same area followed by a greater spread downstream. Finally, in Figure 7 an initial non-linear incident wave ( $T=7\text{sec}$ ,  $H=1.2\text{m}$ ,  $\alpha=90^\circ$ ,  $\theta=0$ ) affects almost the whole downstream numerical domain.

## Conclusions

This thesis focuses on the combined effect of diffraction and refraction downstream of the breakwater and outside of its shadow. Numerical simulations have been done considering a number of wave scenarios for two cases of bathymetry (with and without breakwater presence). Afterwards, the ratio  $H_{bw}/H$  is illustrated in the whole grid and for a better inspection of wave conditions the wave steepness ( $H/L$ ) and the relative water depth ( $H/d$ ) were calculated.



As the angle ( $\alpha$ ) of the incident wave increases ( $90^\circ \rightarrow 120^\circ$ ) the ratio  $H_{bw}/H$  decreases but remains greater than unity. In contrast with the previous behavior the increase of non-linearity results to greater wave heights downstream in both A and B areas. Finally, the change of directionality seems to behave similar to the change of incident wave's angle, but with slight differences in ratio  $H_{bw}/H$ .

# *ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1*

*Εισαγωγή*

## 1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Κύριο χαρακτηριστικό της Ελλάδας είναι το μεγάλο μήκος και η ποικιλομορφία της ακτογραμμής της. Η Ελλάδα έχει τη μεγαλύτερη ακτογραμμή από όλες τις μεσογειακές χώρες, γεγονός που σε συνδυασμό με τη γεωγραφική της θέση έφερε σαν φυσικό επακόλουθο τη διαχρονική ενασχόληση των ελλήνων με τη ναυτιλία, τη ναυσιπλοΐα, το εμπόριο, καθώς και με άλλες επαγγελματικές δραστηριότητες. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι ποσοστό άνω του 80% της αστικής και κοινωνικής ζωής της χώρας συγκεντρώνεται στην ευρύτερη παράκτια ζώνη. Συνέπεια αυτού ήταν η αδήριτη ανάγκη για κατασκευή λιμενικών και λοιπών ακτομηχανικών έργων. Η προστασία των παράκτιων έργων από τις δράσεις της φύσης σε συνδυασμό με την μεγαλύτερη δυνατή περιβαλλοντική προστασία αποτελεί αντικείμενο της επιστήμης του πολιτικού μηχανικού.

Με την κατασκευή τέτοιων έργων όμως, παρουσιάζονται ανάλογα με την ιδιαίτερη μορφολογία της κάθε περιοχής και σημαντικά προβλήματα που χρίζουν σαφώς επιμελούς και αποτελεσματικής αντιμετώπισης. Πιο συγκεκριμένα, σε πολλές περιπτώσεις κατασκευής μόλου ή κυματοθραύστη σε αμμώδεις ακτές έχουν παρατηρηθεί προβλήματα διάβρωσης των ακτών αυτών.

Το φαινόμενο της διάβρωσης μιας αμμώδους ακτής στα κατάντη ενός μόλου ή ενός κυματοθραύστη οφείλεται σε δύο κυρίως μηχανισμούς. Ο πρώτος μηχανισμός αφορά στην αύξηση της κυματικής δράσης στα αμέσως κατάντη έργων όπως οι κυματοθραύστες, που έχει ως συνέπεια την αύξηση της διάβρωσης της ακτής. Ο δεύτερος μηχανισμός αφορά στην ελλιπή στερεομεταφορά στα κατάντη ενός λιμένα σε μια αμμώδη ακτή λόγω συγκρατήσεώς της στα ανάντη του έργου. Η παρούσα εργασία ασχολείται με τον πρώτο μηχανισμό.

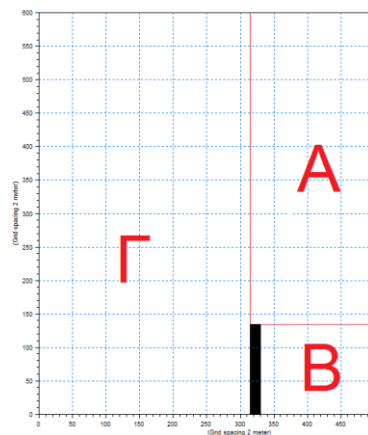
Τα προβλήματα διάβρωσης ακτών από την κατασκευή λιμενικών έργων έχουν αποτελέσει τα τελευταία χρόνια αντικείμενο συζήτησης για το αν πρέπει να κατασκευάζονται έργα σε αμμώδεις ακτές ή αν τελικά θα πρέπει να περιορίζεται η κατασκευή λιμένων σκαφών αναψυχής ή αλιευτικών καταφυγίων εντός ήδη υπάρχουσών λιμενικών εγκαταστάσεων ή τουλάχιστον σε περιοχές με βραχώδεις

ακτές, όπου το φαινόμενο της μετακίνησης ιζημάτων περιορίζεται στο ελάχιστο. Συχνά η κατασκευή ενός μικρού λιμενικού έργου, όπως είναι ένα αλιευτικό καταφύγιο, οδηγεί στην υποχρεωτική κατασκευή πρόσθετων έργων προστασίας των παρακείμενων ακτών, το κόστος των οποίων υπάρχει περίπτωση να υπερβαίνει το κόστος του αρχικού έργου και χωρίς εντέλει να διασφαλίζεται η προστασία της ακτής.

## 1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία μελετάται η επίδραση της περίθλασης και της διάθλασης κατόπιν του κυματοθραύστη στην περιοχή εκτός της σκιάς του (περιοχή A). Γίνεται χρήση του υπολογιστικού μοντέλου MIKE 21 και συγκεκριμένα της υπορουτίνας MIKE 21 BW, που βασίζεται στην επίλυση των εξισώσεων Boussinesq για την περιγραφή των κυματικών συνθηκών στην περιοχή ενδιαφέροντος. Ερευνάται η επίδραση στην κυματική ενίσχυση στην προαναφερθείσα περιοχή:

- Της γωνίας πρόσπτωσης  $\alpha$  του εισερχόμενου κυματισμού
- Της μέγιστης γωνίας κατευθυντικότητας  $\theta$
- Της μη γραμμικότητας



Σχήμα 1.2.1 – Περιοχές κανάβου

Γίνεται επεξεργασία των κυματικών χαρακτηριστικών στην περιοχή μελέτης χωρίς την παρουσία κυματοθραύστη και η διαδικασία επαναλαμβάνεται με την παρουσία του. Τα εξαγόμενα αποτελέσματα συγκρίνονται και οπτικοποιούνται κατάλληλα για την καλύτερη κατανόηση από τον αναγνώστη. Παρουσιάζεται συμπερασματικά η επιρροή των παραπάνω χαρακτηριστικών στην περιοχή ενδιαφέροντος.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται γενικά στοιχεία για τα λιμάνια καθώς και πειραματικές παρατηρήσεις για το φαινόμενο της κυματικής ενίσχυσης στα κατάντη του κυματοθραύστη και στην περιοχή της σκιάς του. Ακολουθεί η ανάλυση του φαινομένου της περίθλασης καθώς και αυτού της διάθλασης που αποτελούν τους κυρίαρχους μηχανισμούς.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται τα γενικά χαρακτηριστικά και η λειτουργία του αριθμητικού μοντέλου MIKE 21 BW καθώς και οι δυνατότητές του. Ακολουθεί μία ανάλυση των εξισώσεων Bussinesq τις οποίες επιλύει το μοντέλο για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται ο καθορισμός των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν από το MIKE 21 BW για την επεξεργασία που έγινε στην παρούσα εργασία. Περιγράφεται αναλυτικά η λειτουργία της κάθε μίας από αυτές καθώς και οι επιλογές που έγιναν με βάση τις ανάγκες της μελέτης.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης για τη διερεύνηση της ενίσχυσης της κυματικής δράσης στην περιοχή ενδιαφέροντος συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης των κυματισμών, τη μέγιστη γωνία κατευθυντικότητας και τη μη γραμμικότητα τους.

Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα για την ενίσχυση της κυματικής δράσης ανάλογα με τη μεταβολή των παραπάνω κυματικών χαρακτηριστικών, καθώς και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

# *ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2*

*Θεωρητικό υπόβαθρο*

## 2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Το λιμάνι είναι ένα απάνεμο μέρος του θαλάσσιου όγκου, αρκετά βαθύ ώστε να παρέχει καταφύγιο και αγκυροβόλιο για τα πλοία. Σκοπός του λιμανιού είναι να παρέχει ασφάλεια στο αγκυροβόλιο τους και να βοηθάει στο συνδυασμό δραστηριοτήτων της ξηράς με θαλάσσιες δραστηριότητες που σχετίζονται μεταξύ τους. Τα λιμάνια ποικίλουν όσον αφορά στην πολυπλοκότητά τους και το μέγεθός τους. Από ένα απλό λιμάνι – καταφύγιο, που δεν έχει από καμία έως ελάχιστη υποστήριξη από την ξηρά ή ένα μέσο λιμάνι που παρέχει προστασία από ακραία κυματικά φαινόμενα για την περιοχή μέχρι ένα σύμπλεγμα λιμενικών εγκαταστάσεων. Σε ένα τέτοιο σύμπλεγμα θα μπορούσαν να συμπεριληφθούν τμήματα λιμενικών εγκαταστάσεων για μεταφορά εμπορευματοκιβωτίων, μαρίνες για σκάφη αναψυχής, προβλήτες για μεταφορά καυσίμων και λοιπών φορτίων, ή ακόμα και πλωτά κανάλια για επικοινωνία με την ανοιχτή θάλασσα. Βασικά χαρακτηριστικά των λιμένων, από την πιο απλή μέχρι και την πιο πολύπλοκη εγκατάσταση που κατασκευάζεται για την προστασία από τα κυματικά φαινόμενα, είναι η ασφαλής και εύκολη πρόσβαση από και προς την ανοιχτή θάλασσα για όλες τις καιρικές συνθήκες, η παροχή επαρκούς βάθους και χώρου ελιγμών στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης.

Τα λιμάνια μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με την τοποθέτησή τους σχετικά με την ακτογραμμή. Το Σχήμα 2.1.11 παρουσιάζει 6 τύπους λιμενικών εγκαταστάσεων. Η κατασκευή λιμενολεκάνης τόσο σε εσοχές της ξηράς όσο και σε ανοιχτά σημεία της έχει μεγάλο βαθμό δυσκολίας. Συνήθως κατασκευάζονται εκεί που το επιτρέπουν τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά, πολλές φορές όμως πρέπει να κατασκευαστούν σε σημεία όπου το απαιτούν οι ανθρώπινες δραστηριότητες. Τέτοια παραδείγματα αποτελούν τα λιμάνια Port Canaveral στη Φλόριντα (Σχήμα 2.1.1), η Marina del Rey στην Καλιφόρνια (Σχήμα 2.1.2) και το Gulfport στον Μισισσιπή (Σχήμα 2.1.3).



**Σχήμα 2.1.1** – Port Canaveral (Florida)



**Σχήμα 2.1.2** – Marina del Rey (California)



**Σχήμα 2.1.3** – Gulfport (Mississippi)



Η γεωγραφία της περιοχής παίζει πολύ σημαντικό ρόλο, μιας και αυτή μπορεί να παρέχει από μόνη της μερική προστασία σε μία μελλοντική λιμενική εγκατάσταση ή να υπάρχουν στην περιοχή εκτάσεις που δίνουν τη δυνατότητα, λόγω της σύνθεσης π.χ. της γεωλογίας τους, να γίνει η κατασκευή εκεί. Σε αυτές τις περιπτώσεις μπορεί να μειωθεί πολύ το κόστος κατασκευής, όπως στο Half Moon Bay Harbor (Σχήμα 2.1.4) στην Καλιφόρνια, το Barcelona Harbor στη Νέα Υόρκη (Σχήμα 2.1.5), ή το Crescent City στην Καλιφόρνια (2.1.6).



**Σχήμα 2.1.4** – Half Moon Bay Harbor



**Σχήμα 2.1.5** – Barcelona Harbor



**Σχήμα 2.1.6** – Crescent City

Σε ορισμένες περιοχές η ξηρά μπορεί να παράσχει λιμάνια με πλήρη προστασία όπως στις περιπτώσεις των Panama City Harbor στη Φλόριντα (Σχήμα 2.1.7), Kings Bay στην Τζόρτζια (Σχήμα 2.1.8) (φυσικά λιμάνια) και Port of Portland στο Όρεγκον (Σχήμα 2.1.9), και New Orleans στη Λουιζιάνα (Σχήμα 2.1.10) (λιμάνια σε ποτάμια).



**Σχήμα 2.1.7** – Panama City Harbor



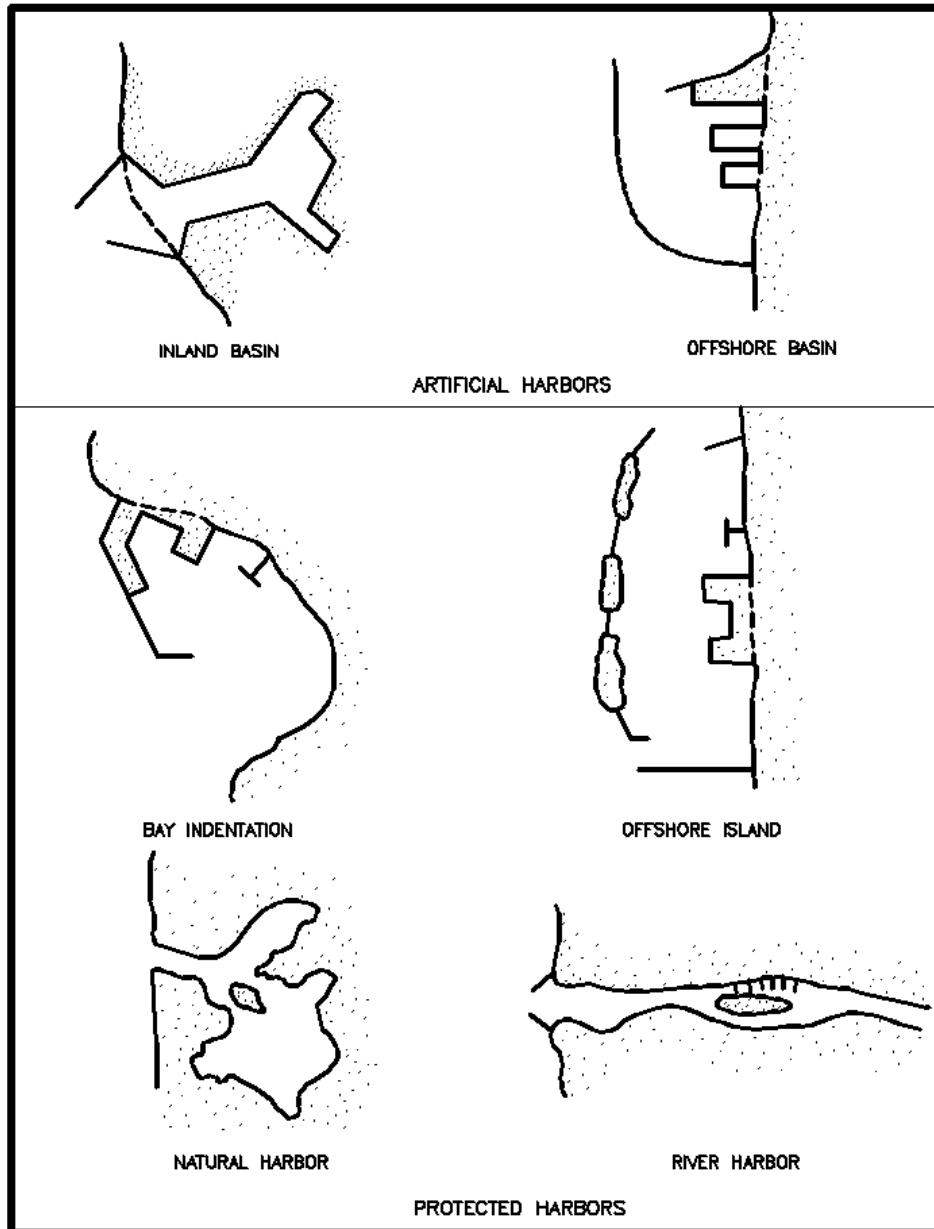
**Σχήμα 2.1.8** – Kings Bay



**Σχήμα 2.1.9** – Port of Portland



**Σχήμα 2.1.10** – New Orleans



Σχήμα 2.1.11 - Τύποι χωροθέτησης λιμένων (CEM 2008)

## 2.2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ

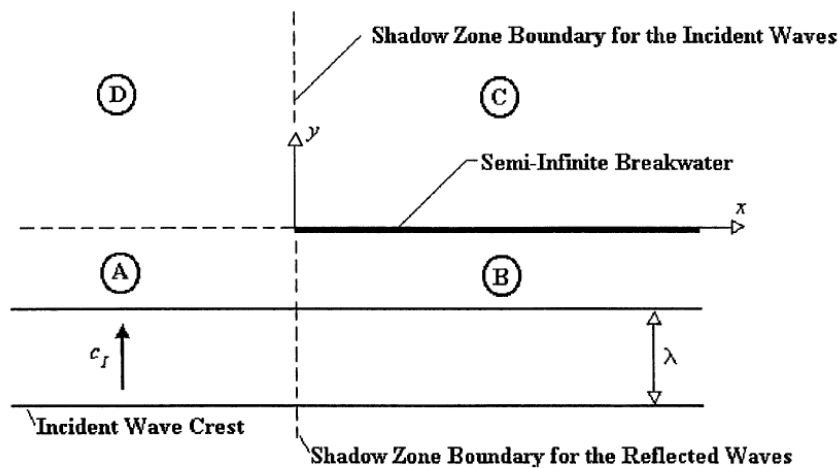
### 2.2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Είναι γνωστό ότι η παρουσία στερεών ορίων στο θαλάσσιο πεδίο προκαλεί μεταβολή στο πεδίο μετάδοσης του κυματισμού, τόσο στη διεύθυνση όσο και στα χαρακτηριστικά του. Αυτό οφείλεται στο φαινόμενο της διάθλασης, όταν συνοδεύεται από αντίστοιχη μεταβολή της βαθυμετρίας κοντά στο στερεό όριο και στο φαινόμενο της περίθλασης κατά την αλληλεπίδραση των εισερχόμενων κυματισμών με τον κυματοθραύστη.

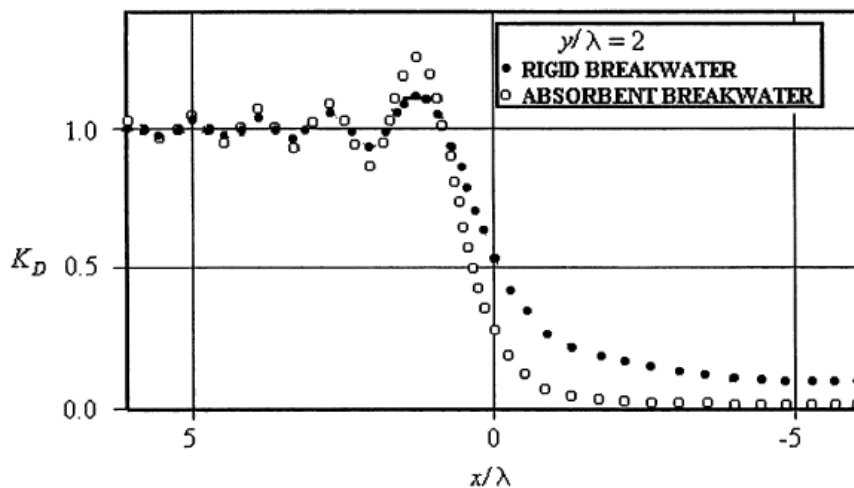
Για γραμμικούς και μονοχρωματικούς κυματισμούς ο μηχανισμός περίθλασης των κυματισμών είναι γνωστός. Ο Sommerfeld (1896) πρώτος παρουσίασε την περίθλαση του φωτός και οι Penny&Price (1952) εφάρμοσαν τη θεωρία αυτή για κανονικούς κυματισμούς υδάτινης επιφάνειας που προσπίπτουν σε ημιάπειρο κυματοθραύστη υπό διάφορες γωνίες για σταθερό βάθος πυθμένα. Η επίλυση των εξισώσεων αυτών, που περιλαμβάνουν τα λεγόμενα ολοκληρώματα Fresnel, είναι αρκετά περίπλοκη και γίνεται με αριθμητικές μεθόδους. Ο Wiegel (1962) διευκόλυνε τους μηχανικούς συντάσσοντας πίνακες και χαράσσοντας διαγράμματα περίθλασης για κανονικούς κυματισμούς, η χρήση των οποίων είναι εξαιρετικά δημοφιλής. Πιο πρόσφατα, οι McCormick&Kraemer (2000), βασισμένοι σε προτάσεις των Abramowitz & Stegun (1964), προσέγγισαν τα δυσεπίλυτα ολοκληρώματα Fresnel με πολυώνυμα, με εξαιρετική ακρίβεια, δίνοντας τη δυνατότητα στους μηχανικούς να αποφεύγουν τη δύσκολη επίλυσή τους ή τη μικρής ακρίβειας γραμμική παρεμβολή μεταξύ των γνωστών διαγραμμάτων περίθλασης.

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην επίδραση της περίθλασης και της διάθλασης κατάντη του κυματοθραύστη εκτός της σκιάς του, δηλαδή στην περιοχή “D” στο Σχήμα 2.2.1, όπου  $\lambda(L)$  είναι το μήκος κύματος,  $x$  η διεύθυνση του κυματοθραύστη και  $y$  ο κάθετος άξονας που ξεκινάει από την ακμή του ημιάπειρου κυματοθραύστη. Με τις προαναφερθείσες θεωρητικές προσεγγίσεις, γίνεται φανερό, ότι υπό ορισμένες προϋποθέσεις σε ημιάπειρο κυματοθραύστη, αναμένεται ενίσχυση της κυματικής δράσης σε σημεία της περιοχής “D”. Ειδικότερα, με βάση τα

διαγράμματα Wiegel (1962) αναμένεται ενίσχυση της κυματικής δράσης για προσπίπτοντες κυματισμούς με διεύθυνση ίση ή μεγαλύτερη των  $75^\circ$  σε μη απορροφητικό κυματοθραύστη έως και 15%. Η αύξηση αυτή, για απορροφητικό κυματοθραύστη και για κυματισμούς που προσπίπτουν κάθετα στον άξονά του, σύμφωνα με τους Penny&Price (1952) φτάνει, για απόσταση από τον άξονα του κυματοθραύστη 2 φορές το μήκος κύματος, έως και το 30% του προσπίπτοντος κυματισμού.



Σχήμα 2.2.1 - Διάγραμμα κυματισμών που προσεγγίζουν άμεσα έναν ημιάπειρο κυματοθραύστη (Penny & Price 1952)



Σχήμα 2.2.2 - Συντελεστές περίθλασης κατάντη απορροφητικού και μη απορροφητικού κυματοθραύστη σε απόσταση  $y/L=2$  από τον άξονα (Penny & Price 1952)

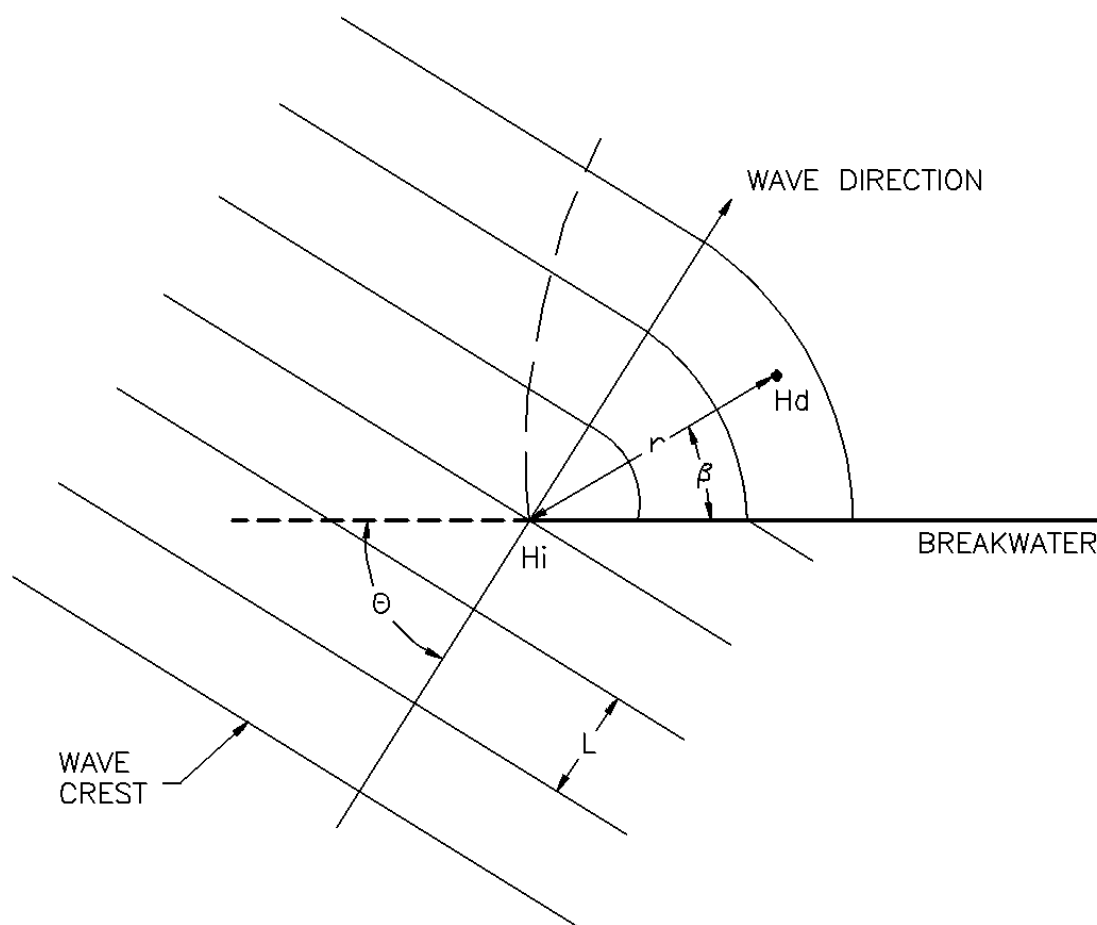


### 2.2.2 ΠΕΡΙΘΛΑΣΗ

Ένας κυματισμός με μεγάλη κορυφογραμμή έχει διαφορετικά ύψη κατά μήκος της. Κατά τη μετάδοση του κυματισμού έχουμε πλευρική μεταφορά ενέργειας κατά μήκος της κορυφογραμμής (κάθετα στη διεύθυνση μετάδοσης). Η μεταφορά αυτή της ενέργειας γίνεται από τα υψηλότερά της σημεία στα χαμηλότερα. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται περίθλαση του κυματισμού.

Η περίθλαση έχει σημαντική επιρροή στις κυματικές συνθήκες που επικρατούν στο εσωτερικό μιας λιμενολεκάνης. Όταν οι κυματισμοί μεταδίδονται κατάντη του άκρου του κυματοθραύστη, λόγω της περίθλασης η κορυφογραμμή των κυματισμών αλλάζει διεύθυνση. Έτσι έχουμε μετάδοση των κυματισμών στα κατάντη του κυματοθραύστη και στην υπήνεμη πλευρά του. Η διεύθυνση διάδοσης του κυματισμού αλλάζει σημαντικά στην περιοχή αυτή, όπως σημαντική μεταβολή παρουσιάζουν και τα κυματικά μεγέθη.

Το Σχήμα 2.2.3 παρουσιάζει ένα μονοχρωματικό κυματισμό με μεγάλη κορυφογραμμή που προσεγγίζει έναν ημιάπειρο κυματοθραύστη, όπου το βάθος είναι σταθερό. Ένα μέρος του κυματισμού προσπίπτει στον κυματοθραύστη και ένα ποσοστό από αυτό θραύεται και το υπόλοιπο ανακλάται. Το μέρος του κυματισμού που διαδίδεται κατάντη του κυματοθραύστη, περιθλάται και εισέρχεται στην υπήνεμη πλευρά του μόλου. Οι περιθλώμενοι κυματισμοί αποκτούν τοξοειδές σχηματισμό και το ύψος κύματος μικραίνει κατά μήκος της κορυφογραμμής τους. Με διακεκομμένη γραμμή διαχωρίζεται η περιοχή όπου η περίθλαση επηρεάζει τα ύψη των κυματισμών.



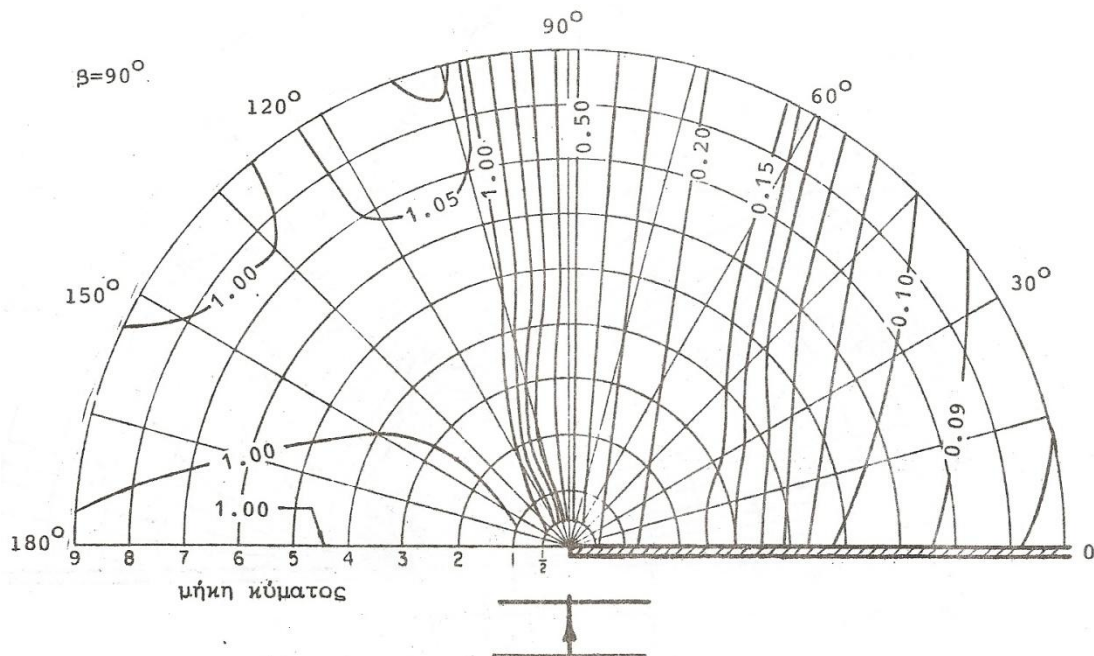
Σχήμα 2.2.3 - Περίθλαση κυματισμών (C.E.M. 2008)

Οι ανακλώμενες κορυφογραμμές των κυματισμών και αυτές περιθλώνται και σε σχηματισμό ομόκεντρων κύκλων περιστρέφονται γύρω από το άκρο του κυματοθραύστη και εισέρχονται στην υπήνεμη πλευρά του. Τα ύψη των κυματισμών αυτών είναι αρκετά μικρότερα από τον παραγόμενο κυματισμό και επηρεάζονται σημαντικά όταν προσεγγίζουν την υπήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη. Έτσι, στην περιοχή αυτή περιορίζεται σε μεγάλο βαθμό το ύψος κύματός τους.

Ο συντελεστής περίθλασης ορίζεται ως  $K' = H_d/H_i$ , όπου  $H_d$  είναι το ύψος του περιθλώμενου κυματισμού στην υπήνεμη περιοχή του κυματοθραύστη και  $H_i$  το ύψος του κυματισμού που προκαλεί το φαινόμενο. Θεωρούμε  $r$  την ακτινική απόσταση από την κορυφή του κυματοθραύστη μέχρι το σημείο που υπολογίζεται ο συντελεστής περίθλασης  $K'$  και  $\beta$  την γωνία μεταξύ του κυματοθραύστη και της ακτίνας που προαναφέρεται, οπότε ισχύει  $K' = fcn(r/L, \beta, \theta)$  όπου  $\theta$  η διεύθυνση μετάδοσης του

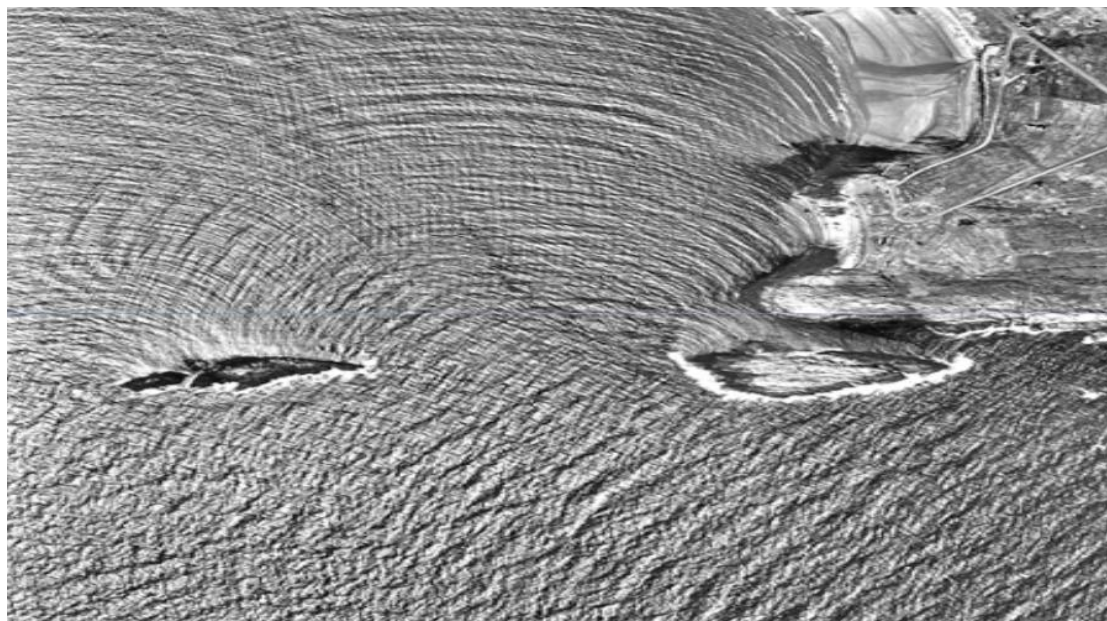
προσπίπτοντος κυματισμού και  $L$  το μήκος κύματός του. Συνεπώς για ένα συγκεκριμένο σημείο στην υπήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη, ο συντελεστής περίθλασης υπολογίζεται συναρτήσει της περιόδου και της διεύθυνσης του προσπίπτοντος κυματισμού.

Στο Σχήμα 2.2.4 παρουσιάζεται ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό της περίθλασης. Για κάθε σημείο κατά μήκος της γραμμής που εκτείνεται από την άκρη του κυματοθραύστη και προς την υπήνεμη πλευρά του κατά τη διεύθυνση μετάδοσης του προσπίπτοντος κυματισμού η τιμή που αντιστοιχεί στον συντελεστή περίθλασης είναι ίση με 0,5. Αυτή η τιμή ισχύει για κάθε γωνία κατά την οποία προσεγγίζει ο προσπίπτων κυματισμός των κυματοθραύστη. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι ένα μονοδιάστατο φάσμα κυματισμών που προσπίπτει υπό την ίδια γωνία, για μια δεδομένη τοποθεσία στην υπήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη θα υποστεί μια ακόμα μεγαλύτερη μείωση του ύψους σε διαδοχικά κύματα με μεγαλύτερη συχνότητα. Αύξηση των συχνοτήτων σημαίνει μικρότερα μήκη κύματος και κατά συνέπεια μεγαλύτερες τιμές του  $r/L$  (για δεδομένες τιμές των  $\beta$  και  $\theta$ ).

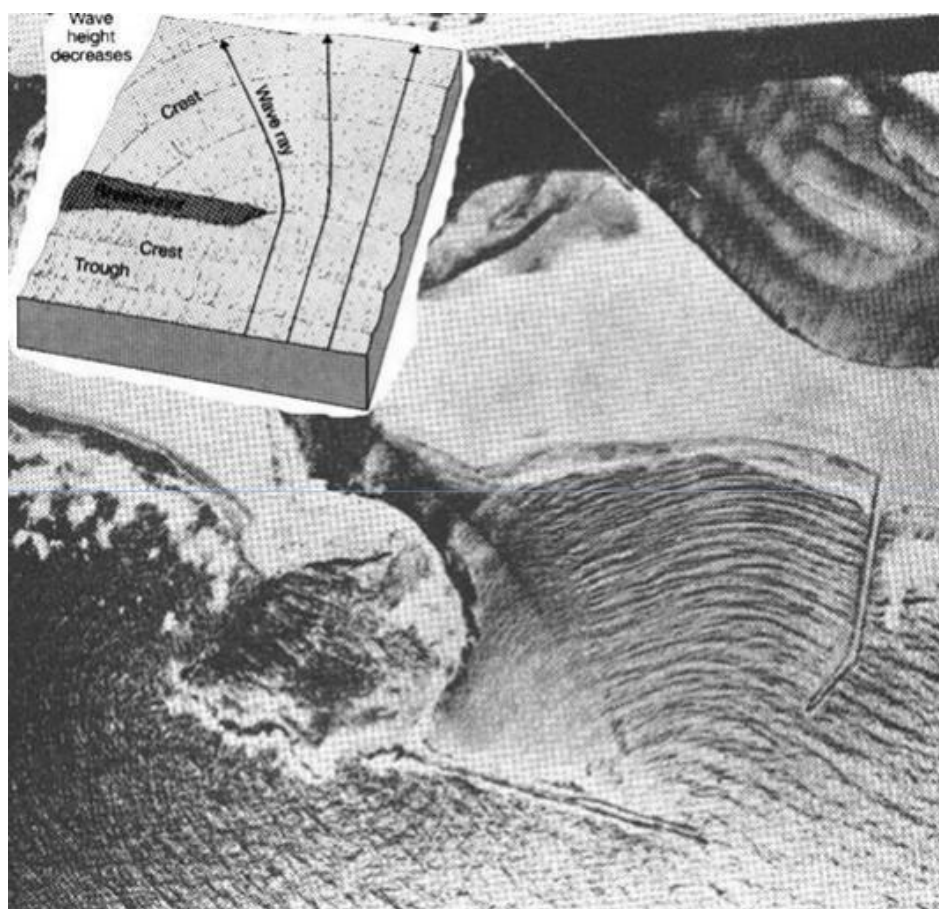


**Σχήμα 2.2.4** - Περίθλαση κυματισμών –  $90^\circ$  γωνία πρόσπτωσης (C.E.M. 2008)





Σχήμα 2.2.5 - Περίθλαση κυματισμών (C.E.M. 2008)



Σχήμα 2.2.6 - Περίθλαση κυματισμών (C.E.M. 2008)

### 2.2.3 ΔΙΑΘΛΑΣΗ

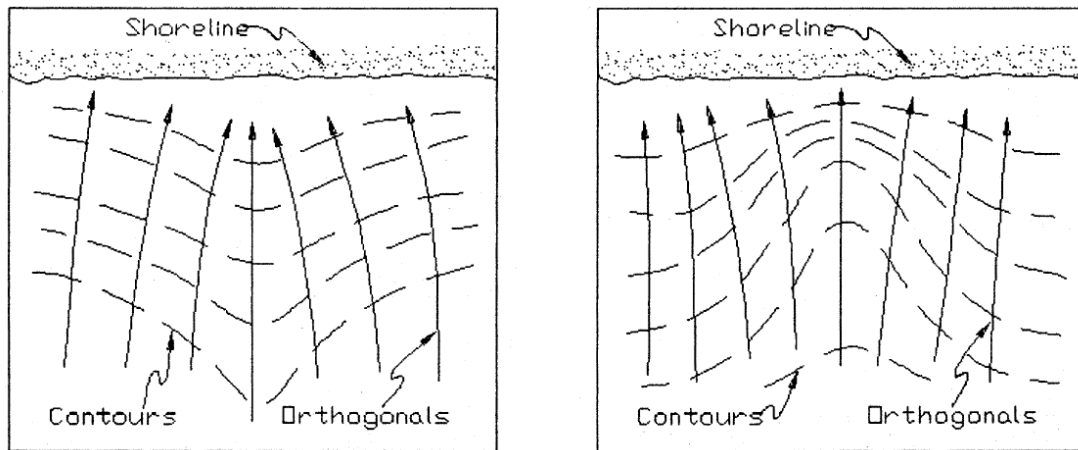
Οι θαλάσσιοι κυματισμοί αλλάζουν εν γένει διεύθυνση μετάδοσης, καθώς προσεγγίζουν στην ακτή: η γωνία μεταξύ των καθέτων στο μέτωπο κύματος και στις ισοβαθείς του πυθμένα συνεχώς μειώνεται. Η ορθογωνική του κύματος τείνει να κινηθεί κάθετα προς τις ισοβαθείς και να καμπυλωθεί. Ο τύπος αυτών των παραμορφώσεων των θαλάσσιων κυματισμών ονομάζεται διάθλαση και είναι ανάλογος με τη διάθλαση και στην οπτική.

Μια ποσοτική εξήγηση του φαινομένου της διαθλάσεως δίνεται αμέσως στη συνέχεια. Η ταχύτητα φάσεως ενός κύματος είναι συνάρτηση του βάθους του πυθμένα, δεδομένου ότι η ταχύτητα αυξάνει με το βάθος. Συνέπεια αυτού είναι ότι από δύο σημεία, που βρίσκονται στο μέτωπο ενός κύματος, κινείται ταχύτερα προς την ακτή το σημείο το ευρισκόμενο σε μεγαλύτερο βάθος πυθμένα. Αποτέλεσμα αυτής της ανισότητας στις ταχύτητες κινήσεως κατά μήκος του μετώπου είναι να καμπυλώνεται το μέτωπο και να τείνει να γίνει παράλληλο προς τις ισοβαθείς.

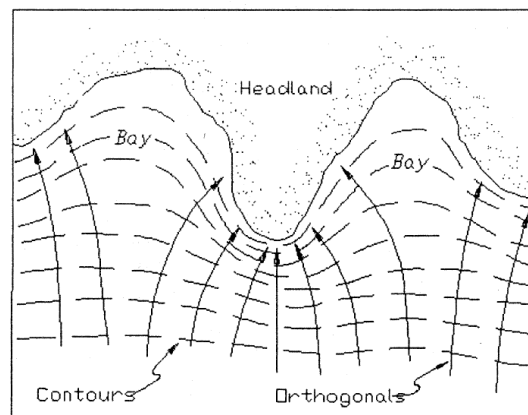
Στα Σχήματα 2.2.7 και 2.2.8 δίνονται χαρακτηριστικά παραδείγματα διάθλασης θαλάσσιων κυματισμών.

Στον υπολογισμό θαλάσσιων και ιδιαίτερα παράκτιων έργων υπεισέρχονται πάντα υπολογισμοί διαθλάσεως, δεδομένου ότι ο μηχανικός ενδιαφέρεται για τα χαρακτηριστικά των κυμάτων, όπως φθάνουν στα έργα μετά τη διάθλαση.

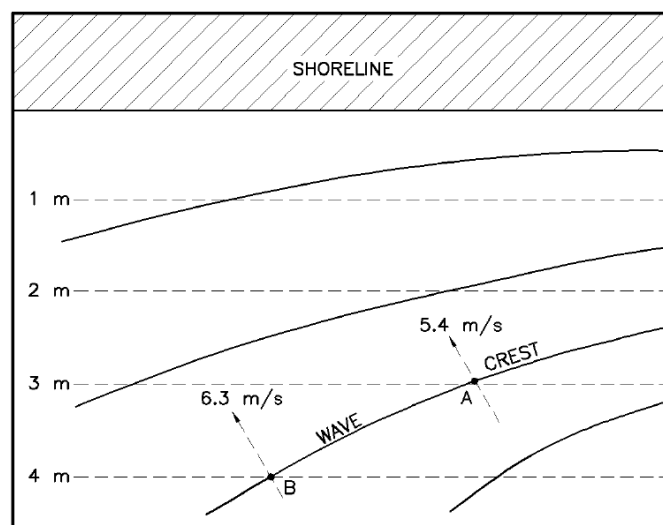
Στις επόμενες παραγράφους αναπτύσσεται η μεθοδολογία υπολογισμού των μεταβολών στην κίνηση και στα χαρακτηριστικά των κυμάτων λόγω διαθλάσεως. Θεωρείται ότι οι κυματισμοί αρχίζουν να υφίστανται διάθλαση, όταν το σχετικό βάθος  $h/L$  φτάσει σε τιμές μικρότερες του 0,5. Αυτό σημαίνει ότι για  $h/L \geq 0.5$  η διεύθυνση μεταδόσεως του κυματισμού είναι ευθύγραμμη.



Σχήμα 2.2.7 – Διαγράμματα διαθλάσεως για διάφορες τοπογραφίες πυθμένα (C.E.M. 2008)



Σχήμα 2.2.8 – Διάθλαση κυμάτων σε γειτονικούς κόλπους (C.E.M. 2008)



Σχήμα 2.2.9 – Διάθλαση κυματισμών (C.E.M. 2008)

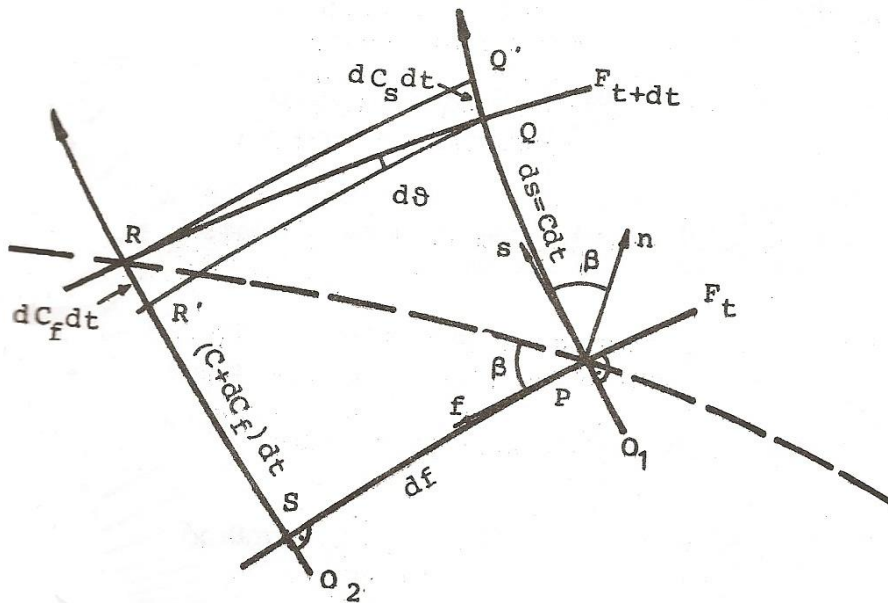
Γενικές εξισώσεις:

Στις αμέσως επόμενες παραγράφους θα καταστρωθεί η διαφορική εξίσωση, που περιγράφει την αλλαγή διεύθυνσης της μετάδοσης κύματος λόγω διάθλασης.

Σε μία χρονική στιγμή  $t$  ένα μέτωπο κύματος  $F_t$  τέμνει μία ορισμένη ισοβαθή στο σημείο  $P$  (Σχήμα 2.2.9). Έστω  $C$  η ταχύτητα φάσεως, που αντιστοιχεί σ' αυτή την ισοβαθή. Στο σημείο  $P$ ,  $n$  είναι η κάθετη ορθογωνική,  $s$  η κάθετη στο μέτωπο κύματος και  $f$  η εφαπτόμενη στο μέτωπο κύματος. Ο γεωμετρικός τόπος των διαδοχικών θέσεων της  $s$ , στη διάρκεια της μεταδόσεως του κύματος, είναι η ορθογωνική του κύματος. Η γωνία  $\beta$  μεταξύ των  $s$  και  $n$  είναι η γωνία μεταξύ της ορθογωνικής και μίας τυχαίας και ορισμένης διευθύνσεως (π.χ. της ισάλου γραμμής), δηλαδή  $\beta$  είναι η γωνία μεταξύ της κορυφογραμμής και της ισοβαθούς.

Στη χρονική στιγμή  $t+dt$  το ίδιο μέτωπο κύματος βρίσκεται στη θέση  $F_{t+dt}$  και τέμνει την ισοβαθή στο σημείο  $R$ .

Οι ορθογωνικές  $O_1$ ,  $O_2$  απέχουν μεταξύ τους απόσταση  $df$  και τα δύο μέτωπα  $F_t$  και  $F_{t+dt}$  απόσταση  $ds$ . Η αλλαγή της διευθύνσεως της ορθογωνικής  $O_1$  μεταξύ  $P$  και  $Q$  είναι ίση με  $d\theta$ .



Σχήμα 2.2.10 – Σκίτσο ορισμών (Θαλάσσια Υδραυλική)

Αν  $dC_f$  είναι η μεταβολή της ταχύτητας φάσεως μεταξύ των P και S, τότε:

$$dC_f = \frac{\partial C}{\partial f} df \quad (1)$$

Από τα τρίγωνα QRR' και PRS λαμβάνεται αντιστοίχως:

$$d\theta = -\frac{dC_f \cdot dt}{df} \quad (2)$$

$$\tan \beta = \frac{(C+dC_f)dt}{df} \approx \frac{Cdt}{df} + 0(dt^2) \quad (3)$$

Οι σχέσεις (2) και (3) δίνουν:

$$d\theta = -\frac{dC_f}{C} \tan \beta \quad (4)$$

Η μεταβολή της C κατά μήκος της ισοβαθούς είναι μηδέν:

$$dC|_{PR} \equiv 0 = dC|_{PS} + dC|_{SR} = dC_f + dC_s + 0(dt^2) \quad (5)$$

Από τις σχέσεις (4) και (5) προκύπτει:

$$d\theta = \frac{dC_s}{C} \tan \beta \quad (6)$$

$$\text{Ή} \quad d\theta = \frac{dL_s}{L} \tan \beta \quad (7)$$

Η σχέση (7) αποτελεί τη διαφορική εξίσωση διαθλάσεως. Ισχύει σε περιπτώσεις καμπύλων και μη παράλληλων ισοβαθών.

Σε περιπτώσεις ευθύγραμμων και παράλληλων ισοβαθών, όπου  $d\theta=d\beta$ , η εξίσωση (7) μπορεί να ολοκληρωθεί αμέσως. Αν ληφθεί  $\theta=\beta$  και αγνοηθεί ο δείκτης s, τότε η εξίσωση (7) γράφεται:

$$d\beta = \frac{dC}{C} \tan \beta \quad (8)$$

$$\text{Ή} \quad \frac{d\beta}{\tan \beta} = \frac{d \sin \beta}{\sin \beta} = \frac{dC}{C}$$

Το ολοκλήρωμα αυτής της εξίσωσης είναι:

$$\frac{c}{\sin \beta} = \text{σταθερά} \quad (9)$$

$$H \quad \frac{L}{\sin \beta} = \text{σταθερά}$$

Η σχέση 8 είναι γνωστή σαν νόμος του Snell.

Υπολογισμός διαθλάσεως σε επίπεδο πυθμένα:

Έστω  $L_0$  και  $H_0$  το μήκος και το ύψος κύματος στην περιοχής βαθέως ύδατος ( $H_0 \geq 0,5L_0$ ) και  $\beta_0$  η γωνία προσπτώσεως του κύματος στην ισοβαθή, που αντιστοιχεί στο όριο βαθέως ύδατος ( $h=0,5L$ ). Έστω ακόμα  $L$  και  $H$  το μήκος και το ύψος κύματος πάνω από μία ορισμένη ισοβαθή, όπου  $h < 0,5$  και  $\beta$  η γωνία προσπτώσεως του κύματος στην ισοβαθή.

Για τον υπολογισμό του  $L$  λαμβάνεται υπ' όψη ότι η περίοδος ενός κύματος δεν μεταβάλλεται και ότι:

$$\tan h \frac{2\pi h_0}{L_0} = 1$$

Οπότε:

$$\frac{L}{L_0} = \tanh \left\{ \frac{2\pi h}{L_0} \left( \frac{L}{L_0} \right)^{-1} \right\} \quad (10)$$

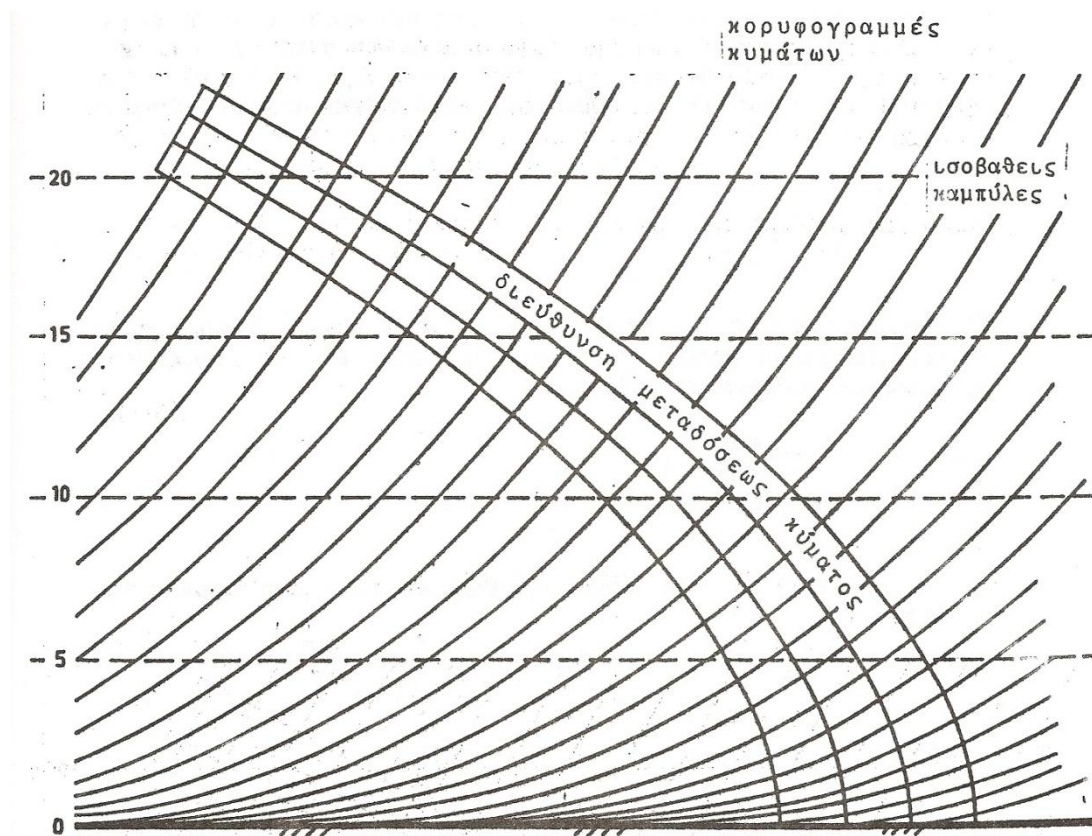
Στον Πίνακα 2.2.1 δίνονται οι τιμές του λόγου  $L/L_0$  σε συνάντηση με τον λόγο  $h/L_0$

Για τον υπολογισμό του  $\beta$  εφαρμόζεται ο νόμος του Snell:

$$\frac{\sin \beta_0}{\sin \beta} = \frac{C_0}{C} = \frac{1}{\tanh 2\pi \left\{ \frac{h}{L_0} \left( \frac{L}{L_0} \right)^{-1} \right\}}$$

$$\sin \beta = \sin \beta_0 \cdot \tanh \left\{ 2\pi \frac{h}{L_0} \left( \frac{L}{L_0} \right)^{-1} \right\} \quad (11)$$





Σχήμα 2.2.11 – Διάγραμμα διάθλασης (Θαλάσσια Υδραυλική)

Στον Πίνακα 2.2.2 δίνονται οι τιμές της γωνίας  $\beta$  σε συνάρτηση με τον λόγο  $h/L_0$  και τη γωνία  $\beta_0$ .

Για τον υπολογισμό του  $H$  γίνεται η παραδοχή, ότι στη διάρκεια της διαθλάσεως δεν υπάρχουν απώλειες ενέργειας των κυμάτων και ότι όλη η ενέργεια μεταδίδεται κατά μήκος των ορθογωνικών. Με αυτές τις παραδοχές ισχύει η σχέση των Munk and Taylor, 1947, για το ύψος  $H$  σε βάθος  $h$  σε συνάρτηση με το ύψος  $H_0$  στα βαθιά νερά, αφού ληφθεί υπόψη η διάθλαση και η ρήγωση:

$$\frac{H^2}{H_0^2} = \frac{1}{1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh}} \frac{L_0}{L} \frac{m_0}{m} \quad (12)$$

Όπου  $m$  είναι η απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών ορθογωνικών. Ο λόγος  $m_0/m$  υπολογίζεται με τη βοήθεια του νόμου του Snell και του γεωμετρικού σχήματος των ισοβαθών και ορθογωνικών:

$$\frac{m_0}{m} = \left\{ \frac{\cos^2 \beta_0}{1 - \left(\frac{L}{L_0} \sin \beta_0\right)^2} \right\}^{0,5} \quad (13)$$

Οι εξισώσεις (12) και (13) δίνουν τη μεταβολή του  $H$  στη διάρκεια της διαθλάσεως.

**Πίνακας 2.2.1** – Προσδιορισμός του μήκους κύματος  $L$  στη διάρκεια διαθλάσεως

$h/L_0$	$L/L_0$	$h/L_0$	$h/L_0$
0,5	1	0,07	0,61
0,4	0,99	0,06	0,58
0,3	0,97	0,05	0,53
0,2	0,89	0,04	0,48
0,15	0,82	0,03	0,41
0,1	0,71	0,02	0,35
0,09	0,68	0,01	0,25
0,08	0,65	0,005	0,17

**Πίνακας 2.2.2** – Προσδιορισμός της γωνίας μετάδοσης  $\beta$  κύματος στη διάρκεια της διάθλασης

$h/L_0$	$\beta_0$						
	$0^\circ$	$15^\circ$	$30^\circ$	$45^\circ$	$60^\circ$	$75^\circ$	$85^\circ$
0,4	0	15	29	44	59	73	81
0,3	0	14	28	43	58	70	75
0,2	0	13	26	38	50	60	63
0,15	0	12	23	34	45	51	54
0,1	0	10	21	30	38	43	45
0,05	0	8	15	22	28	31	32
0,04	0	7	13	19	23	26	27
0,03	0	6	12	17	21	23	24
0,02	0	4	9	13	17	19	20
0,01	0	4	7	10	13	14	16



Υπολογισμός διαθλάσεως σε ανώμαλο πυθμένα:

- Προεργασία

Προσδιορίζονται το μήκος κύματος  $L_0$  και η ευθύγραμμη ορθογωνική των κυματισμών στα ανοιχτά.

Στον χάρτη των ισοβαθών απαλείφονται αρχικά οι ανωμαλίες, που είναι μικρές σε σχέση με το μήκος κύματος  $L_0$ .

Προεκτείνεται η ευθύγραμμη ορθογωνική, ώστε να τιμήσει την ισοβαθή βάθους  $h_0$  τέτοιου, ώστε  $h_0/L_0=0,50$ .

Υπολογίζεται το μήκος κύματος  $L_i$  και η ταχύτητα φάσεως  $C_i$  σε κάθε ισοβαθή  $i$  μεταξύ της ισοβαθούς  $o$  και της ισάλου γραμμής.

Χαράσσονται οι μέσες ισοβαθείς ανάμεσα στις διαδοχικές ισοβαθείς του χάρτου.

- Προσδιορισμός της ορθογωνικής ανάμεσα στις ισοβαθείς  $i+1$  και  $i$ .

Η παρακάτω μεθοδολογία ισχύει και γωνίες προσπτώσεως  $\beta < 80^\circ$  ( $\beta$  είναι η γωνία μεταξύ της κορυφογραμμής και της ορθογωνικής).

Προεκτείνεται η ορθογωνική από το σημείο  $A$  της ισοβαθούς  $i+1$ , ώστε να τιμήσει τη μέση ισοβαθή ανάμεσα στις  $i+1$  και  $i$  στο σημείο  $B$ . Χαράσσεται η εφαπτόμενη στο σημείο  $B$ .

Τοποθετείται στο χάρτη το Σχήμα 2.2.11 με τέτοιο τρόπο, ώστε η ορθογωνική του να συμπέσει με την προσπίπτουσα ορθογωνική και το σημείο 1.0 με το σημείο  $B$ .

Περιστρέφεται το Σχήμα γύρω από το σημείο του  $0$ , ώσπου το σημείο του άξονά του με την τετμημένη ίση με το λόγο  $C_{i+1}/C_i$  να τιμήσει την εφαπτόμενη (σημείο  $\Gamma$ ). Στη θέση αυτή η ορθογωνική της διατάξεως ονομάζεται περιστραμμένη ορθογωνική.

Βρίσκεται το σημείο  $\Delta$  πάνω στην προσπίπτουσα ορθογωνική, που έχει την ιδιότητα  $(A\Delta)=(\Delta E)$ . Το μήκος  $(\Delta E)$  βρίσκεται πάνω σε παράλληλο προς την περιστραμμένη ορθογωνική.

Η τεθλασμένη γραμμή  $ABE$  είναι η ορθογωνική του κυματισμού μεταξύ των ισοβαθών  $i$  και  $i+1$  μετά τη διάθλαση.

Η ορθογωνική  $\Delta E$  αποτελεί την προσπίπτουσα ορθογωνική της ισοβαθούς  $i$ .

Με την παραπάνω μεθοδολογία συνεχίζεται ο γραφικός προσδιορισμός της διαθλάσεως μεταξύ των ισοβαθών  $i$  και  $i-1$ .

- Προσδιορισμός διαγράμματος διαθλάσεως

Προσδιορίζονται οι μεταβολές ενός σημαντικού αριθμού ορθογωνικών ανάμεσα σ' όλες τις ισοβαθείς της περιοχής.

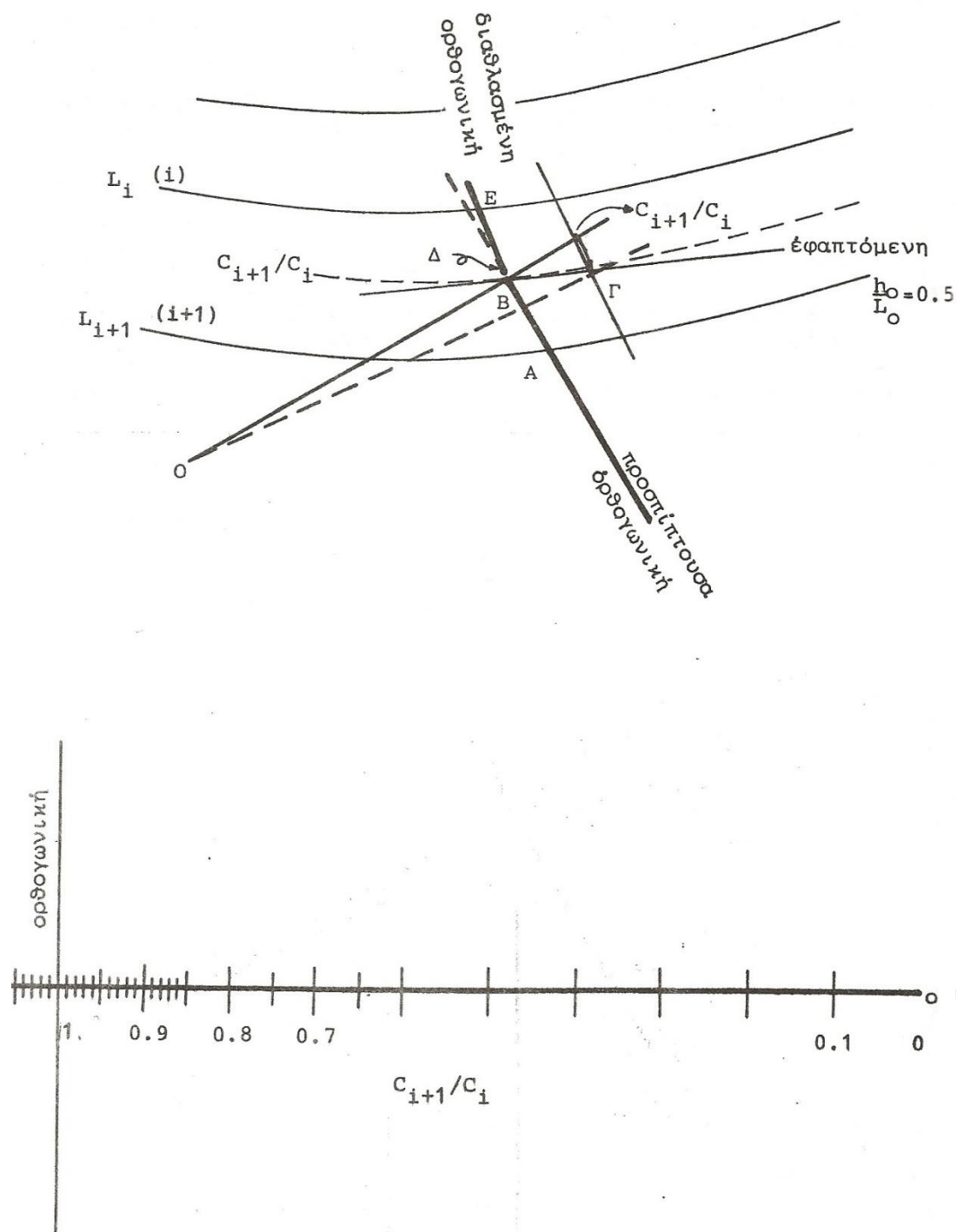
Χαράσσονται οι κάθετες καμπύλες προς τις νέες ορθογωνικές. Οι καμπύλες αυτές παριστάνουν τα μέτωπα των κυματισμών, όπως διαμορφώνονται μετά τη διάθλαση.

Το ύψος κύματος σε κάθε ισοβαθή υπολογίζεται από την εξίσωση (12)

- Κριτική των μεθόδων υπολογισμού διαθλάσεως

Τα διαγράμματα διαθλάσεως δίνουν μια ιδέα της μεταβολής της διαυθύνσεως μεταδόσεων των κυματισμών, όταν πλησιάζουν προς την ακτή υπό γωνία.

Η ακρίβεια τους περιορίζεται από τη γραμμικοποίηση του φαινομένου, που γίνονται.

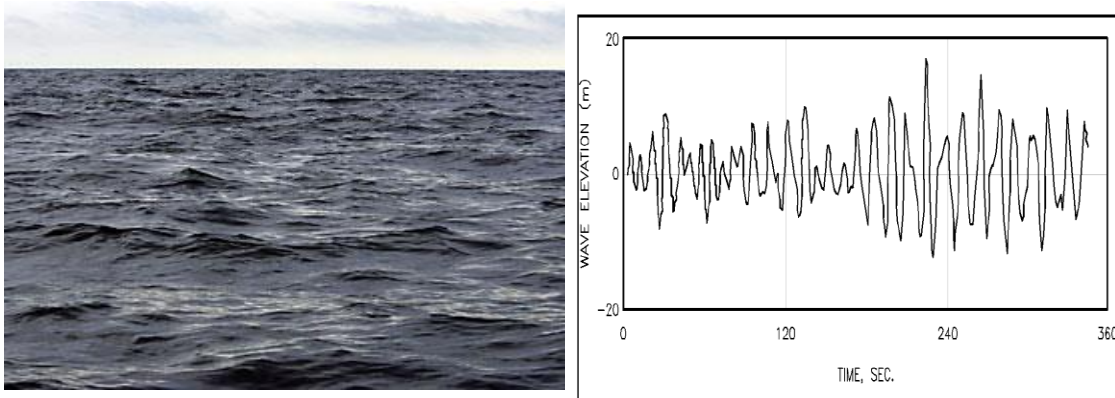


Σχήμα 2.2.12 – Διάταξη υπολογισμού διαγράμματος διαθλάσεως (Θαλάσσια Υδραυλική)

### 2.3 ΘΕΩΡΙΕΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΥΧΑΙΩΝ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ

Κύματα στην επιφάνεια της θάλασσας με περίοδο 3-25 δευτερόλεπτα, παράγονται κυρίως από την επίδραση του ανέμου και είναι ένα θεμελιώδες γνώρισμα όλων των παράκτιων περιοχών του κόσμου. Άλλα γενεσιουργά αίτια ταλάντωσης της ελεύθερης επιφάνειας είναι οι σεισμοί, οι παλίρροιες και οι γρήγορες μεταβολές της ατμοσφαιρικής πίεσεως. Στο εξής οι κυματισμοί που αναφέρονται στην παρούσα εργασία είναι μόνο ανεμογενείς. Η πρόβλεψη και εκτίμηση των κυματικών συνθηκών, είναι απαραίτητη σχεδόν σε όλες τις ακτομηχανικές μελέτες.

Στις περισσότερες προσεγγίσεις γίνεται η παραδοχή ότι οι κυματισμοί στην επιφάνεια της θάλασσας έχουν προφίλ περίπου ημιτονοειδές με σταθερό ύψος, περίοδο και κατεύθυνση (μονοχρωματικοί). Όμως, οπτική παρατήρηση της θαλάσσιας επιφάνειας (Σχήμα 2.3.1) όπως επίσης και εργαστηριακές μετρήσεις (Σχήμα 2.3.2) δείχνουν ότι αποτελείται από μια επαλληλία πολλών κυματισμών με ποικίλα ύψη και περιόδους, κινούμενα προς διαφορετικές κατευθύνσεις.



**Σχήμα 2.3.1 – 2.3.2** - Αριστερά: φωτογραφικό στιγμιότυπο θαλάσσιας διαταραχής. Δεξιά: εργαστηριακές μετρήσεις ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας με την πάροδο του χρόνου. Και οι δύο εικόνες φανερώνουν ότι οι κυματισμοί στη φύση δεν έχουν ημιτονοειδές προφίλ.

Τα χαρακτηριστικά του κύματος (ύψος  $H$ , περίοδος  $T$ , διεύθυνση) στους απλούς κυματισμούς μελετώνται σαν ντετερμινιστικές ποσότητες, αντίθετα τα χαρακτηριστικά των πραγματικών κυματισμών πρέπει να μελετηθούν με

στατιστικούς όρους. Αυτό, κάνει περίπλοκη τη προσέγγισή τους αλλά περιγράφει ρεαλιστικότερα την κατάσταση στη φύση, αφού μονοχρωματικοί κυματισμοί με σταθερές ιδιότητες είναι πολύ σπάνιοι στην πραγματικότητα και παράγονται κυρίως στα εργαστήρια. Κυματισμοί που έχουν διαδοθεί μακριά από τη περιοχή γένεσής τους ονομάζονται «αποθάλασσα» (swell). Η αποθάλασσα περιγράφει φυσικούς κυματισμούς που εμφανίζονται με ιδιότητες παρόμοιες των μονοχρωματικών στα βαθιά νερά. Συνήθως όμως, η επιφάνεια της θάλασσας είναι ένας συνδυασμός κυματισμών ποικίλων χαρακτηριστικών, τα οποία δημιουργούνται από την αλληλεπίδραση της διεπιφάνειας ανέμου-θαλάσσης.

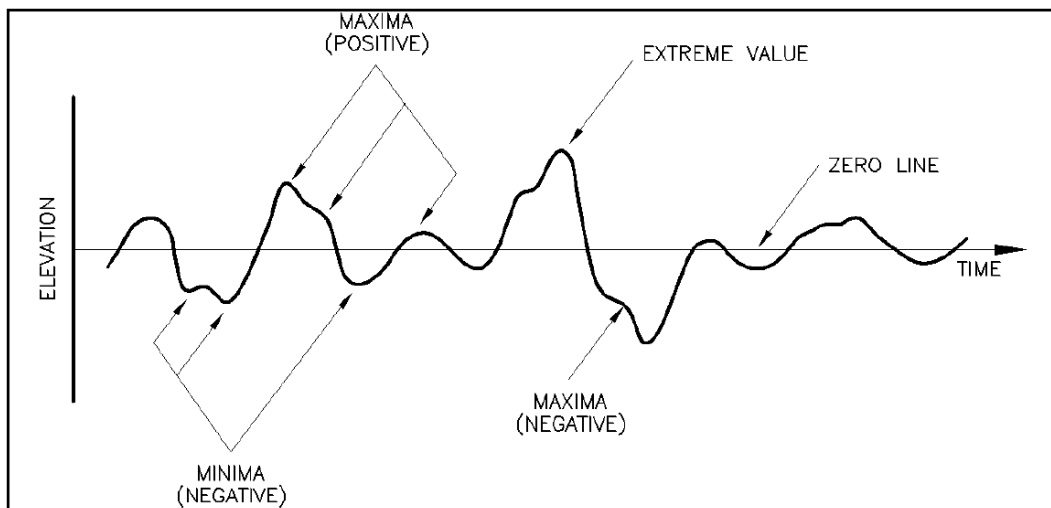
Δυο προσεγγίσεις υπάρχουν για την επεξεργασία των σύνθετων κυματισμών: η ανάλυση στο χρόνο και η φασματική ανάλυση. Η τελευταία βασίζεται στον μετασχηματισμό Fourier της θαλάσσιας επιφάνειας. Όντως, αυτή αποτελεί την πιο κατάλληλη, μαθηματικά, επεξεργασία για την ανάλυση μιας χρονικά εξαρτώμενης, τρισδιάστατης καταγραφής της ελεύθερης επιφάνειας. Στην ανάλυση στο χρόνο χρησιμοποιείται μια καταγραφή χρονοσειράς της θαλάσσιας επιφάνειας σε ένα συγκεκριμένο σημείο και τα στατιστικά της εξάγονται. Είναι μια πολύ φυσική εισαγωγή στους σύνθετους κυματισμούς και θα παρουσιαστεί στην επόμενη υποενότητα πριν τις πιο πολύπλοκες φασματικές προσεγγίσεις, το μέγιστο μειονέκτημα της όμως είναι ότι δεν μπορεί να αναδείξει πλήρως την κατεύθυνση των κυματισμών. Έτσι, κάτι που εμφανίζεται σαν απλός κυματισμός σε ένα σημείο μπορεί να είναι τοπική υπέρθεση δυο μικρότερων κυματισμών από διαφορετικές κατευθύνσεις που έτυχε να διασταυρωθούν τη δεδομένη χρονική στιγμή. Από την άλλη μεριά μειονέκτημα της φασματικής προσέγγισης αποτελεί το γεγονός ότι είναι γραμμική και μπορεί να παραποιήσει την αναπαράσταση των μη γραμμικών κυματισμών.

Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι να παραθέσει τις θεωρίες και τους μαθηματικές σχέσεις που έχουν αναπτυχθεί για να περιγράψουν τα επιφανειακά κύματα, τις ταχύτητες και τις επιταχύνσεις τους, καθώς και τις δυνάμεις που αυτά προκαλούν. Αυτό το κεφάλαιο έχει βασιστεί κυρίως στο εγχειρίδιο CEM (2008), και στα βιβλία Goda (1985b) και D.E. Newland (1984). Αναπτύσσει τις δυο μεθόδους ανάλυσης των τυχαίων κυματισμών, παρουσιάζει τη μαθηματική μετάβαση από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο συχνοτήτων και αντίστροφα και τέλος αναφέρεται στη

θραύση των κυματισμών λόγω ρήξης, εξηγώντας τα κριτήρια και τους τύπους θραύσης.

#### Ανάλυση στην περιοχή του χρόνου:

Η συγκεκριμένη προσέγγιση απαιτεί κατευθείαν μετρήσεις από τη θάλασσα. Η χρονοσειρά ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας σε ένα σημείο είναι ένα τυχαία εμφανιζόμενο σήμα εμφανίζοντας πολλά μέγιστα και ελάχιστα (**Σχήμα 2.3.3**).



**Σχήμα 2.3.3** - Χαρακτηριστικό σχέδιο χρονικής εξέλιξης τυχαίου κυματισμού (Ochi 1973).

Στην ανάλυση του χρόνου οι χρονοσειρές της επιφάνειας πρέπει να χωριστούν σε διακριτά τμήματα που στη συνέχεια θεωρούνται ως ξεχωριστά κύματα. Το ύψος και η περίοδος τους προσδιορίζονται. Προσοχή πρέπει να δοθεί στον υπολογισμό της περιόδου, καθώς μπορούν να εμφανίζονται δυο κορυφές σε μια κοιλία κάτω από τη μέση στάθμη ύδατος (ΜΣΥ). Ένας τρόπος υπολογισμού της περιόδου είναι το χρονικό διάστημα μεταξύ διαδοχικών τομών της ελεύθερης επιφάνειας με τη ΜΣΥ με καθοδική διεύθυνση (zero down-crossing period) ή με ανοδική κλίση (zero up-crossing period). Έπειτα υπολογίζονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά της καταγραφής, τα οποία όπως θα δούμε ακολουθούν γνωστές στατιστικές κατανομές.

Δυο από τις πιο σημαντικές παραμέτρους, που είναι απαραίτητες για τον επαρκή καθορισμό μιας δεδομένης θαλάσσιας διακύμανσης, είναι το χαρακτηριστικό ύψος κύματος και η χαρακτηριστική περίοδος. Το πρώτο μπορεί να οριστεί ποικιλοτρόπως, όπως: το μέσο ύψος όλων των κυμάτων  $H_m$ , το μέσο τετραγωνικό ύψος  $H_{rms}$ , το μέγιστο ύψος  $H_{max}$  και το μέσο ύψος των ένα-τρίτο υψηλότερων κυματισμών  $H_{1/3}$ , γνωστό ως σημαντικό ύψος κύματος  $H_s$  όπως πρωτοπαρουσιάστηκε από τους Sverdrup και Munk (1947).

$$H_s = \frac{1}{N/3} \sum_{i=1}^{N/3} H_i \quad (1.1)$$

Όπου  $H_i$  τα ύψη κύματος σε φθίνουσα σειρά και  $N$  ο συνολικός αριθμός των κυματισμών της καταγραφής.

Η πιθανότητα ένα κύμα να έχει μεγαλύτερο ή ίσο ύψος από αυτό του σχεδιασμού  $H_d$ , μπορεί να υπολογιστεί από:

$$P(H > H_d) = m/N \quad (1.2)$$

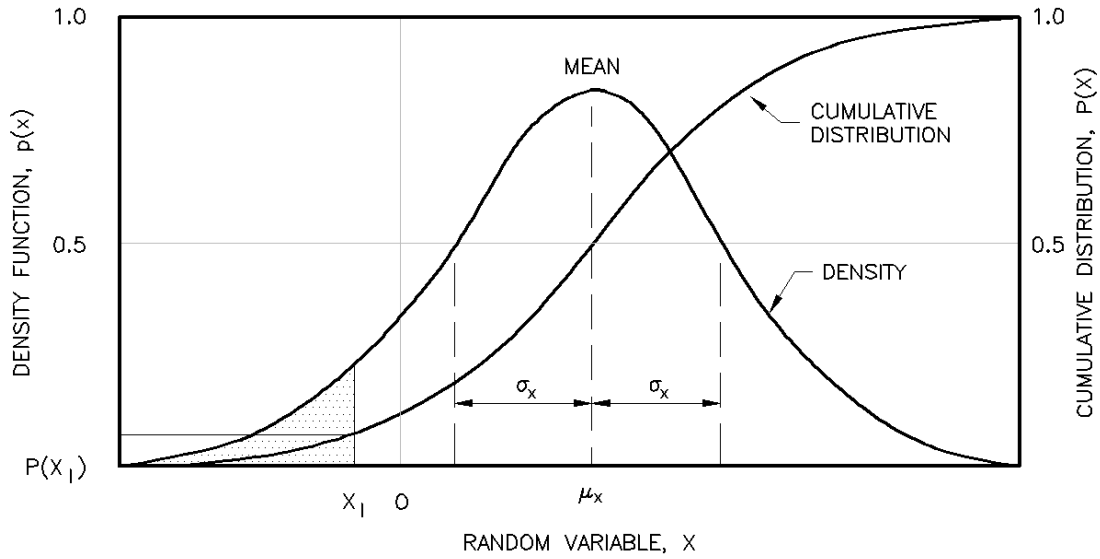
$$P(H \leq H_d) = 1 - m/N \quad (1.3)$$

Όπου  $m$  ο αριθμός των κυμάτων μεγαλύτερα από το  $H_d$ . Το μέσο τετραγωνικό ύψος μπορεί να οριστεί ως:

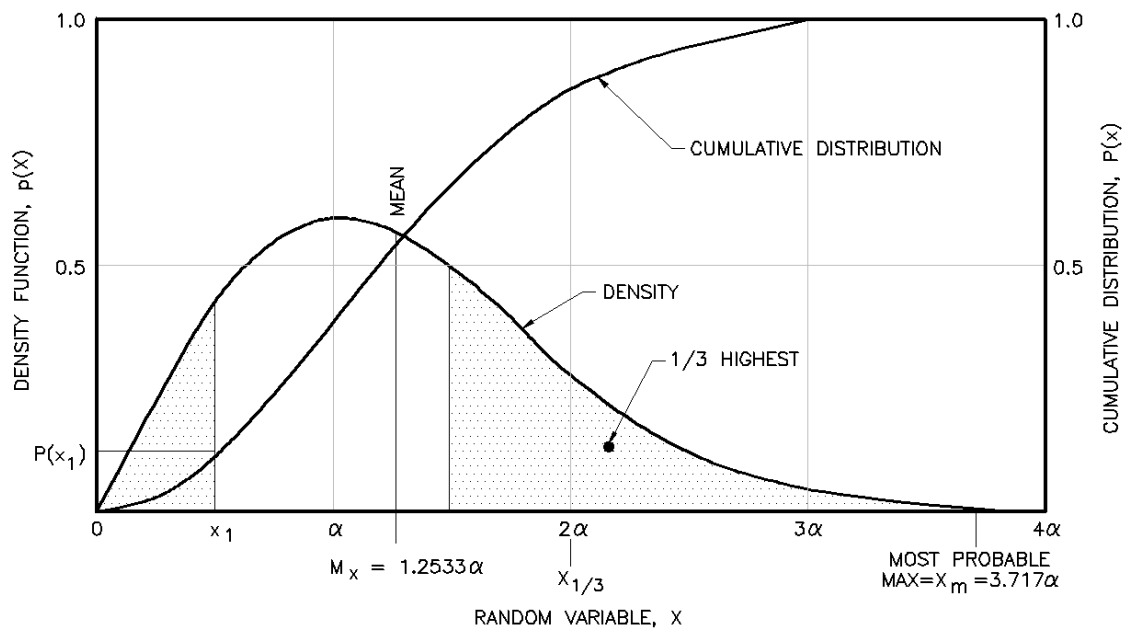
$$H_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N H_j^2} \quad (1.4)$$

Όπου  $H_j$  τα ξεχωριστά ύψη κύματος της καταγραφής.

Οι πιο κοινές κατανομές στη μελέτη τυχαίων θαλάσσιων κυματισμών είναι η κανονική κατανομή (Gaussian) (Σχήμα 2.3.4) και η κατανομή Rayleigh (Σχήμα 2.3.5).



**Σχήμα 2.3.4** - Κανονική κατανομή (Gauss) που ακολουθεί η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας (CEM 2008).



**Σχήμα 2.3.5** - Κατανομή Rayleigh που ακολουθεί το ύψος κύματος και αθροιστική κατανομή (CEM 2008).

Η πρώτη είναι κατάλληλη να περιγράψει τις βραχυχρόνιες πιθανότητες της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας  $\zeta$ , ενώ η δεύτερη περιγράφει την κατανομή των



υψών κυματισμού προσδιορίζοντας ταυτόχρονα και κάποιες εκτιμήσεις για τα ύψη κύματος.

$$H_{1/3} \approx 4.00\sqrt{m_0} = 1.416H_{\text{rms}} \quad (1.5)$$

$$H_{1/10} = 1.27H_{1/3} = 1.80H_{\text{rms}} = 5.091\sqrt{m_0} \quad (1.6)$$

$$H_{1/100} = 1.67H_{1/3} = 2.36H_{\text{rms}} = 6.672\sqrt{m_0} \quad (1.7)$$

$$H_{\text{max}} = 1.86H_{1/3} \quad (1.8)$$

#### Ανάλυση στην περιοχή των συχνοτήτων:

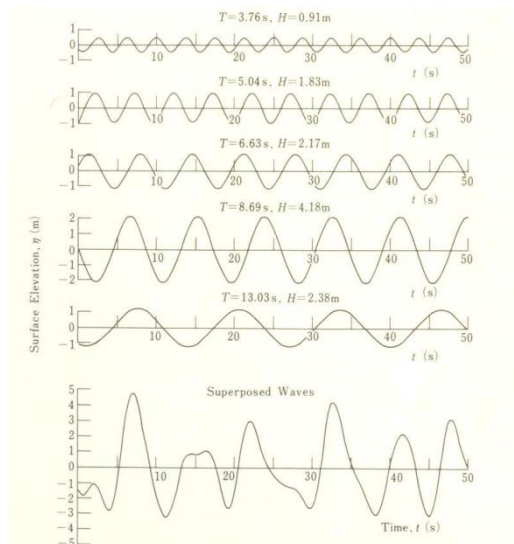
Αντίθετα με την παραπάνω ανάλυση, η φασματική ανάλυση προσδιορίζει την κατανομή της κυματικής ενέργειας και τα μέσα στατιστικά χαρακτηριστικά για κάθε συχνότητα μετατρέποντας τις χρονοσειρές σε φάσμα. Ουσιαστικά πρόκειται για μια μετατροπή από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο συχνοτήτων και εφαρμόζεται όπως θα δούμε παρακάτω με την τεχνική των μετασχηματισμών Fourier.

Η σύλληψη της ιδέας του φάσματος μπορεί να αποδοθεί στον Newton, που ανακάλυψε ότι το φως του ήλιου μπορεί να αποσυντεθεί σε ένα φάσμα χρωμάτων από το κόκκινο ως το βιολετί με τη βοήθεια ενός πρίσματος (Encyclopedia Britannica, 1964). Η ιδέα βασίζεται στην αρχή ότι το λευκό χρώμα αποτελείται από πολυάριθμες συνιστώσες φωτός ποικίλων χρωμάτων (μηκών κύματος). Η τεχνική της αποσύνθεσης ενός πολύπλοκου φυσικού φαινομένου σε μεμονωμένα μέρη έχει επεκταθεί σε πολλά φυσικά προβλήματα.

Οι θαλάσσιοι κυματισμοί, που αρχικά εμφανίζονται πολύ τυχαίοι, μπορούν να αναλυθούν, θεωρώντας ότι αποτελούνται από ένα πεπερασμένο αριθμό κυματιδίων με διαφορετικές συχνότητες και κατευθύνσεις. Η διανομή της ενέργειας των κυματιδίων αυτών, όταν απεικονιστεί συγκριτικά με τη συχνότητα και την κατεύθυνση ονομάζεται κυματικό φάσμα. Πιο συγκεκριμένα, η διανομή της κυματικής ενέργειας αναφορικά μόνο με τη συχνότητα ονομάζεται φάσμα

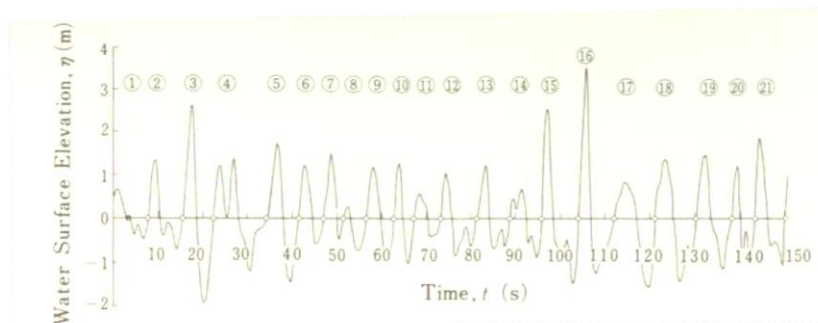
συχνοτήτων, ενώ σαν συνάρτηση και της συχνότητας και της κατεύθυνσης ονομάζεται κατευθυντικό φάσμα.

Στο Σχήμα 2.3.6 δίνεται παράδειγμα ενός σύνθετου κυματικού προφίλ, το οποίο προήλθε από την άθροιση πέντε ημιτονοειδών κυμάτων με διαφορετικά ύψη κύματος και διαφορετικές περιόδους.



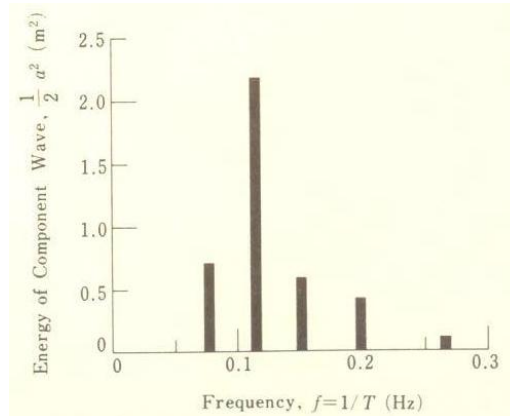
**Σχήμα 2.3.6** - Προσομοίωση τυχαίων κυματισμών με επαλληλία ημιτονοειδών (Goda 1985).

Παρόλο που το συγκεκριμένο προφίλ δεν είναι πολύ τυχαίο, μπορούμε να παράγουμε σύνθετα προφίλ παρόμοια με αυτά των πραγματικών θαλάσσιων κυματισμών, αυξάνοντας τον αριθμό των κυματιδίων που αθροίζονται. Η αντίστροφη διαδικασία είναι επίσης εφικτή, και τυχαία κυματικά προφίλ όπως το Σχήμα 2.3.7 μπορούν να αναλυθούν σε ένα αριθμό ξεχωριστών κυματισμών.



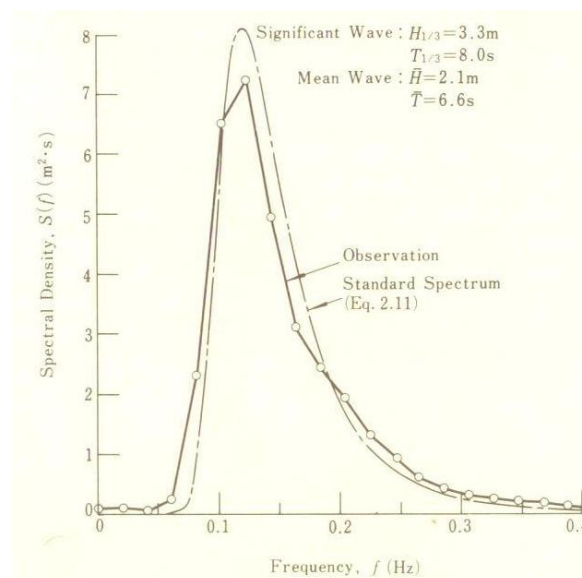
**Σχήμα 2.3.7** - Καταγραφή χρονοσειράς ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας (Goda 1985).

Το τυχαίο κυματικό προφίλ του Σχήματος 2.3.6 αντιπροσωπεύεται από το παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 2.3.8) με τις πέντε στήλες που απεικονίζουν την ενέργεια των κυματιδίων για την αντίστοιχη συχνότητα.



**Σχήμα 2.3.8** - Φασματική αναπαράσταση υπερτιθέμενων κυματισμών (Goda 1985).

Στην περίπτωση των πραγματικών κυματισμών η κατανομή της ενέργειας απεικονίζεται με μια συνεχή καμπύλη επειδή αποτελείται από ένα άπειρο αριθμό συχνοτήτων. Η καταγραφή της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας χρησιμοποιήθηκε για να υπολογιστεί το συνεχές φάσμα του (Σχήμα 2.3.9), και με πιο ακριβή ορολογία ονομάζεται συνάρτηση πυκνότητας φάσματος συχνοτήτων και έχει μονάδες  $m^2s$  στον κάθετο άξονα και  $s^{-1}$  στον οριζόντιο.



**Σχήμα 2.3.9** - Παράδειγμα φάσματος θαλάσσιων κυματισμών (Goda 1985).

Στο παραπάνω φάσμα ορίζεται ως ροπή μηδενικής τάξης το εμβαδόν της καμπύλης του φάσματος.

$$\int_0^{\infty} E(f)df = m_0 \quad (1.9)$$

Οι ροπές ανώτερων τάξεων υπολογίζονται ως εξής:

$$\int_0^{\infty} f^i E(f)df = m_i \quad i=0,1,2,\dots \quad (1.10)$$

Χρησιμοποιώντας αυτό τον ορισμό προσδιορίζεται το σημαντικό ύψος κύματος για κατανομή Rayleigh (Longuet-Higgins 1952):

$$H_s = 3.8\sqrt{m_0} \approx 4\sqrt{m_0} \quad (1.11)$$

Κατά τη διάρκεια έντονων ανεμολογικών γεγονότων το φάσμα τείνει να έχει μια κεντρική κορυφή και ένα αρκετά προβλέψιμο σχήμα. Για την «αποθάλασσα» (swell) που έχει διαδοθεί σε μεγάλη απόσταση από τη πηγή γένεσης, οι κυματισμοί τείνουν να έχουν μια απότομη κορυφή. Οι κυματισμοί στα ρηγά κοντά στη ζώνη θραύσης τείνουν να έχουν μια απότομη κορυφή στην αντίστοιχη συχνότητα κορυφής  $f_p$  και συγχρόνως μια σειρά από μικρότερες κορυφές στις συχνότητες  $2f_p, 3f_p$  κοκ. τα οποία αποτελούν αρμονικά του κύριου κυματισμού. Η παρουσία των αρμονικών υποδεικνύει ότι το κύμα έχει την απότομη κορυφή και επίπεδη κοιλία υψηλά μη γραμμικών κυματισμών όπως κοντά στη θραύση.

Δυο παράμετροι χρησιμοποιούνται συχνά στην στοχαστική απεικόνιση των κυματισμών. Το φασματικό πλάτος  $\nu$  και το φασματικό εύρος  $\varepsilon$  και χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του πλάτους του φάσματος. Αυτοί οι παράμετροι κυμαίνονται μεταξύ της μονάδας και του μηδέν και μπορούν να προσεγγιστούν με τις ροπές:

$$\nu = \sqrt{\frac{m_0 m_2}{m_1^2} - 1} \quad (1.12)$$

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4}} \quad (1.13)$$

Για ένα στενό φάσμα και τα δυο πλησιάζουν στο 0. Για παράδειγμα για τα δυο πιο κοινά εμπειρικά φάσματα Pierson-Moskowitz (PM) (Pierson και Moskowitz 1964) και JONSWAP (Hasselmann et al. 1973), που παρουσιάζονται παρακάτω  $\nu=0.425$  και  $0.389$  αντίστοιχα και  $\epsilon=1$  και για τα δυο. Ο Goda (1974) πρότεινε μια φασματική παράμετρο κορυφής  $Q_p$  που ορίζεται:

$$Q_p = \frac{2}{m_0^2} \int_0^{\infty} f E^2(f) df \quad (1.14)$$

Η οποία εξαρτάται μόνο από την ροπή μηδενικής τάξης του φάσματος και δεν συνδέεται άμεσα από το φασματικό εύρος  $\epsilon$ . Γενικά ένα μικρό  $\epsilon$  σημαίνει ότι το  $Q_p$  είναι μεγάλο και το αντίθετο.

Στα βαθιά και ενδιάμεσα νερά, το σημαντικό ύψος κύματος που υπολογίζεται από τη φασματική ανάλυση είναι συνήθως μεγαλύτερο από αυτό που εξάγει η ανάλυση στο χρόνο.

#### Τύποι φασμάτων:

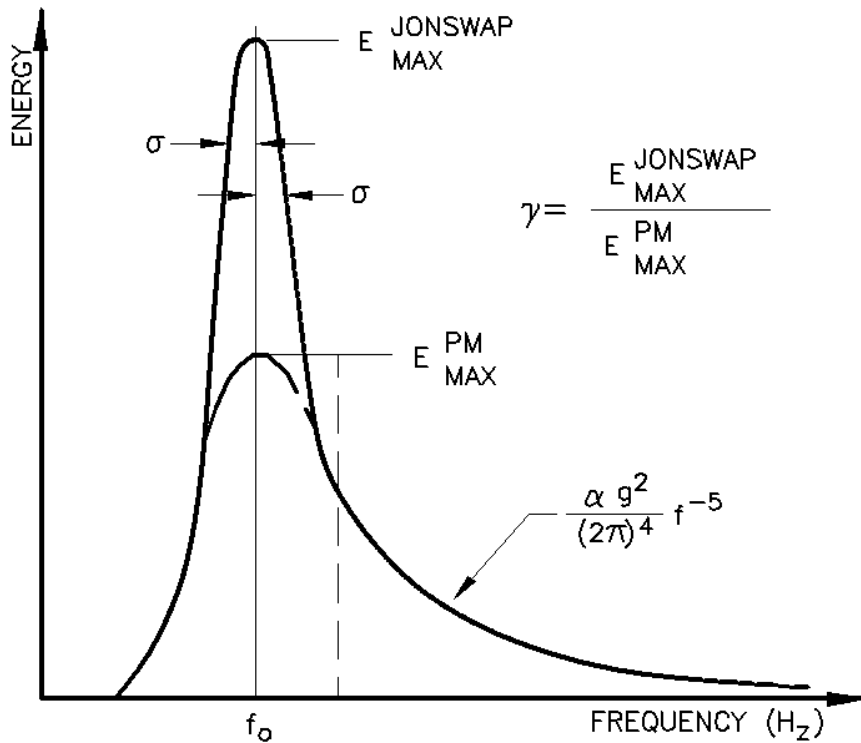
Υπάρχουν πολλοί τύποι ενεργειακών φασμάτων που χρησιμοποιούνται πρακτικά και βασίζονται σε μια ή παραπάνω παραμέτρους όπως η ταχύτητα ανέμου, το σημαντικό ύψος κύματος, η περίοδος, συντελεστές σχήματος κ.α. Τα πιο γνωστά από αυτά παρουσιάζονται παρακάτω.

Ο Phillips (1958) κατέστρωσε μια εξίσωση για το ισοδύναμο πεδίο φάσματος για πλήρως ανεπτυγμένη θάλασσα στα βαθιά νερά. Το οποίο αποτέλεσε τη βάση για τις περισσότερες μεταγενέστερες προσεγγίσεις και γράφεται σε όρους της γωνιακής συχνότητας:

$$E(\omega) = \alpha g^2 \omega^{-5} \quad (1.15)$$

Όπου  $\alpha$  είναι η σταθερά Phillip ( $=0.0081$ ) και  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Ένα ευρέως διαδεδομένο φάσμα είναι το φάσμα με μια παράμετρο Pierson-Moskowitz (PM) (Pierson και Moskowitz 1964). Μια επέκταση του είναι το JONSWAP (Hasselmann et al. 1973) με πέντε παραμέτρους, παρόλο που οι τρεις από αυτές συνήθως παραμένουν σταθερές. Η σχέση μεταξύ τους φαίνεται στο (Σχήμα 2.3.10).



Σχήμα 2.3.10 - Σύγκριση φασμάτων PM και JONSWAP (Chakrabarti 1987).

Άλλα φάσματα με δυο παραμέτρους παράγωγα των προηγούμενων είναι αυτά που προτάθηκαν από τους: Bretschneider (1959), ISSC (1964), Scott (1965), ITTC (1966), Liu (1971), Mitsuyasu (1972), Goda (1985a) και Bouws et al. (1985).

Ένα φάσμα με έξι παραμέτρους προτάθηκε από τους Ochi και Hubble (1976). Η χρησιμότητα του συγκεκριμένου είναι ότι μπορεί να περιγράψει ενεργειακό φάσμα με πολλές κορυφές συνδυάζοντας θαλάσσιους κυματισμούς και «αποθάλασσα».

Ο τύπος του φάσματος PM για πλήρως ανεπτυγμένη θάλασσα ορίζεται:

$$E(f) = \frac{0.0081g^2}{(2\pi)^4 f^5} \exp\left(-0.74 \left[\frac{2U_w \pi f}{g}\right]^{-4}\right) \quad (1.16)$$

Όπου  $U_w$ , η ταχύτητα του ανέμου 19,5 μέτρα πάνω από τη ΜΣΥ. Το φάσμα PM περιγράφει μια πλήρως ανεπτυγμένη θάλασσα με μια παράμετρο, την ταχύτητα ανέμου και υποθέτει ότι το ανάπτυγμα πελάγους και η διάρκεια τείνουν στο άπειρο. Αυτή η εξιδανίκευση απαντάται όταν ο άνεμος πνέει σε μια μεγάλη περιοχή με σταθερή ταχύτητα χωρίς ουσιώδη αλλαγή κατεύθυνσης.

Το φάσμα JONSWAP για θάλασσες με πεπερασμένο ανάπτυγμα πελάγους αποκτήθηκε από το Joint North Sea Wave Project (Hasselmann et al. 1973) και μπορεί να εκφραστεί:

$$E(f) = \frac{ag^2}{(2\pi)^4 f^5} \exp\left[-1.25\left(\frac{f}{f_p}\right)^{-4}\right] \gamma^{\exp\left[-\frac{\left(\frac{f}{f_p}-1\right)^2}{2\sigma^2}\right]} \quad (1.17)$$

$$f_p = 3.5 \left[ \frac{g^2 F}{U_{10}^3} \right]^{-0.33}, \quad a = 0.076 \left[ \frac{gF}{U_{10}^2} \right]^{-0.22}, \quad 1 \leq \gamma \leq 7$$

$$\sigma = 0.07 \text{ για } f \leq f_p \text{ και } \sigma = 0.09 \text{ για } f \geq f_p$$

Στην εξίσωση αυτή,  $a$  είναι η παράμετρος κλίμακας,  $\gamma$  ο συντελεστής αιχμής της κορυφής με μέση τιμή 3.3,  $f_p$  η συχνότητα κορυφής,  $U_{10}$  η ταχύτητα ανέμου 10 μέτρα πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας,  $F$  το μήκος του αναπτύγματος πελάγους.

Ο Goda βασιζόμενος σε αριθμητική ανάλυση κυματικών προφίλ, επαναδιατύπωσε την έκφραση του παραπάνω φάσματος σε όρους σημαντικού ύψους κύματος  $H_s$  και περιόδου  $T_p$ :

$$E(f) = \beta_J H_s^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp\left[-1.25(T_p f)^{-4}\right] \gamma^{\exp\left[-\frac{(T_p f - 1)^2}{2\sigma^2}\right]} \quad (1.18)$$

Όπου

$$\beta_J = \frac{0.0624[1.094 - 0.01915 \ln \gamma]}{0.23 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1}} \quad (1.19)$$

Στα ρηγά νερά το κυματικό φάσμα διαφέρει από τις κλασσικές μορφές που παρουσιάστηκαν, εξαιτίας της επίδρασης του πυθμένα στους κυματισμούς και την συνεπαγόμενη αλληλεπίδραση των συνιστωσών του φάσματος μεταξύ τους. Οι Bouws et al. (1984) πρότειναν μια αλλαγή στο JONSWAP για την αναπαράσταση του φάσματος στα ρηγά και ονομάστηκε φάσμα TMA από τις τρεις πηγές δεδομένων που χρησιμοποίησαν στην επεξεργασία τους (Texel, Marsen και Arsløe) και η εξίσωση του δίνεται:

$$S_{TMA}(\omega, d) = S_{JONSWAP}(\omega) \Phi(\omega^*, d) \quad (1.20)$$

$$\Phi(\omega^*, d) = \frac{1}{[f(\omega^*)]^2} \left[ 1 + \frac{K}{\sinh K} \right]^{-1}, \quad \omega^* = \omega \sqrt{\frac{d}{g}}, \quad \omega = 2\pi/T$$

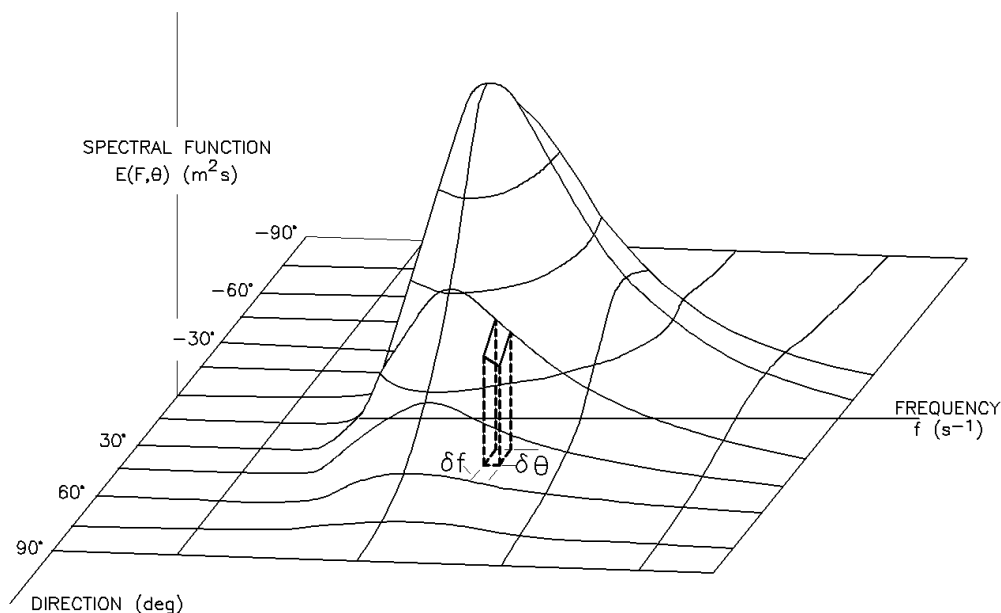
$$f(\omega^*) = \tanh^{-1} [k(\omega^* d)], \quad K = 2\omega^{*2} f(\omega^*), \quad k = 2\pi/L$$

Αυτή η αλλαγή μεταμορφώνει την απώλεια ή την κλίση της συνάρτησης πυκνότητας φάσματος (JONSWAP) στην πλευρά των υψίσυχνων, από  $\omega^{-5}$  σε  $\omega^{-3}$  κατά τη διάρκεια της ρήγωσης, που προσεγγίζεται από τη γραμμική θεωρία.

#### Κατευθυντικά φάσματα:

Τα κυματικά φάσματα παραπάνω θεωρήθηκαν μονοδιάστατα φάσματα συχνότητας. Η διεύθυνση του κυματισμού δεν εμφανίζεται σε αυτές τις απεικονίσεις, συνεπώς η αλλαγή της κυματικής ενέργειας συναρτήσει της διεύθυνσης δεν αξιολογήθηκε. Η θαλάσσια επιφάνεια όμως συχνά αποτελείται από πολλούς κυματισμούς προερχόμενους από διαφορετικές διευθύνσεις. Έτσι τα φάσματα που συμπεριλαμβάνουν και τη διεύθυνση  $\theta$  ονομάζονται δισδιάστατα  $E(f, \theta)$  (Σχήμα 2.3.11).





**Σχήμα 2.3.11** - Σχηματική απεικόνιση δυσδιάστατου φάσματος (CEM 2008).

Μια μαθηματική περιγραφή της κατευθυντικής κατάστασης της θάλασσας είναι δυνατή θεωρώντας ότι αυτή αποτελείται από υπέρθεση μεγάλου αριθμού ημιτονοειδών κυματισμών με διαφορετικές συχνότητες και κατευθύνσεις. Είναι κατάλληλο να εκφράζεται το φάσμα  $E(f, \theta)$ , που περιγράφει τη γωνιακή κατανομή ενέργειας στις αντίστοιχες συχνότητες, ως εξής:

$$E(f, \theta) = E(f)G(f, \theta) \quad (1.21)$$

Όπου  $G(f, \theta)$  είναι η κατευθυντική συνάρτηση διάχυσης για την οποία ισχύει

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} G(f, \theta) d\theta = 1 \quad (1.22)$$

Μια πρώτη προσέγγιση σε σχέση με τη μορφή της κατευθυντικής συνάρτησης διάχυσης έγινε από τους Pierson et al. (1952) οι οποίοι εισήγαγαν την παρακάτω  $\cos^2\theta$  συνάρτηση στην ανάλυση της διάθλασης κυματισμών με κατευθυντικότητα:

$$D(\theta) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \cos^2\theta & |\theta| \leq \pi/2 \\ 0 & |\theta| > \pi/2 \end{cases} \quad (1.23)$$

Η συνάρτηση αυτή εξελίχθηκε στη συνέχεια από αρκετούς ερευνητές σε τύπο συνημίτονου δύναμης  $2I$ , ώστε να εκφράζει διάφορους βαθμούς κατευθυντική διάχυσης. Ο Nagai (1972) για παράδειγμα, χρησιμοποίησε μια συνάρτηση τέτοιου τύπου για τον υπολογισμό της περίθλασης κατευθυντικών κυματισμών γύρω από κυματοθραύστες, η οποία εκφράζεται ως εξής:

$$D(\theta) = \begin{cases} \frac{2!!!}{\pi(2I-1)!!} \cos^2 \theta & |\theta| \leq \pi/2 \\ 0 & |\theta| > \pi/2 \end{cases} \quad (1.24)$$

Όπου η γωνία κατευθυντικότητας  $\theta$  μετράται από την κύρια διεύθυνση διάδοσης των κυματισμών.

Η εξίσωση (1.23) εφαρμόζεται στο ημιεπίπεδο  $|\theta| \leq \pi/2$ , όπως νοείται διαισθητικά για κύματα που προωθούνται γύρω από μια κύρια διεύθυνση. Όμως στην ανάλυση μετρήσεων πεδίου η διεύθυνση των κυματικών συνιστωσών δεν μπορεί να περιορίζεται στο ημιεπίπεδο αλλά πρέπει να επιτρέπεται να παίρνει τιμές σε ολόκληρο το διάστημα  $0 \leq \theta \leq 2\pi$ . Για το λόγο αυτό, πολλοί ερευνητές με πρώτους τους Longuet-Higgins et al. (1962) υιοθέτησαν την ακόλουθη συνάρτηση διάχυσης

$$D(\theta) = \frac{2^{2s-1}}{\pi} \frac{\Gamma^2(s+1)}{\Gamma(2s+1)} \cos^{2s} \left( \frac{\theta}{2} \right) \quad (1.25)$$

Η παράμετρος διάχυσης  $s$  έχει αποδειχθεί ότι εξαρτάται από τη συχνότητα όπως θα παρουσιαστεί στη συνέχεια κατά την ανάπτυξη της συνάρτησης διάχυσης τύπου Mitsuyasu.

Ο Borgman (1965) εξάλλου, χρησιμοποίησε την παρακάτω κυκλική – κανονική συνάρτηση διάχυσης για την προσομοίωση τυχαίων κατευθυντικών κυματισμών

$$D(\theta) = \frac{\exp(\kappa \cos \theta)}{2\pi I_0(\kappa)} \quad (1.26)$$

Όπου  $I_0$  είναι η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel μηδενικής τάξης και  $\kappa$  μια παράμετρος διάχυσης.

Η ανάλυση πολλών μετρήσεων πεδίου κατευθυντικών κυματισμών, κατέδειξε ότι η κατευθυντική διάχυση είναι στενότερη γύρω από τη φασματική συχνότητα κορυφής  $f_p$ , ενώ διευρύνεται καθώς η συχνότητα απομακρύνεται από την κορυφή και προς τις χαμηλές και τις υψηλές τιμές. Έτσι η παράμετρος διάχυσης  $s$  παίρνει την υψηλότερη της τιμή στην συχνότητα κορυφής και η τιμή της μειώνεται καθώς μεταβαίνουμε τόσο προς υψηλότερες όσο και προς χαμηλότερες συχνότητες.

Οι Mitsuyasou et al. (1975) ήταν οι πρώτοι οι οποίοι τυποποίησαν την μεταβολή της κατευθυντικής διάχυσης συναρτήσει της συχνότητας, σε όρους της παραμέτρου  $s$  ως εξής

$$s = \begin{cases} s_{\max} \left( \frac{f}{f_p} \right)^5 & f \leq f_p \\ s_{\max} \left( \frac{f}{f_p} \right)^{-2/5} & f > f_p \end{cases} \quad (1.27)$$

Στην ίδια εργασία η τιμή της παραμέτρου  $s_{\max}$  προσδιορίστηκε μεταξύ 5 και 30, με μέση τιμή 10 για ανεμογενείς κυματισμούς, παράλληλα δε η  $s_{\max}$  εκφράστηκε σαν συνάρτηση της αδιάστατης ταχύτητας ανέμου.

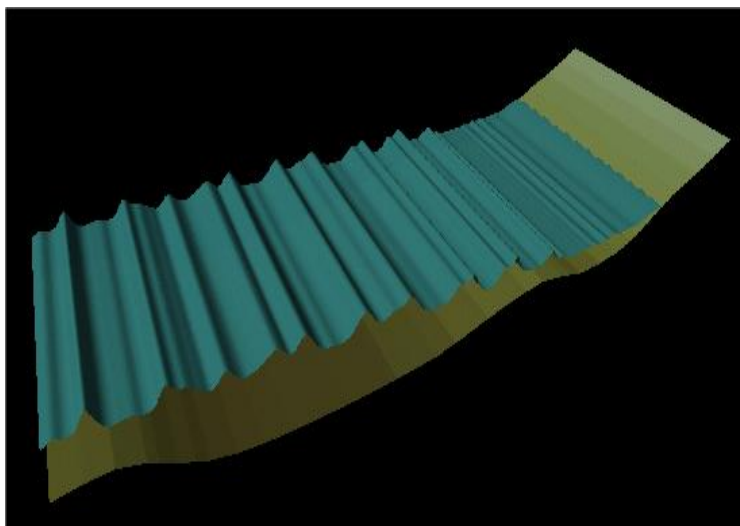
# *ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3*

*Περιγραφή του μοντέλου MIKE 21 BW*

### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για να μελετηθεί η κυματική διαταραχή στην περιοχή εντός και εκτός λιμενολεκάνης και η επίδραση που έχει η τοποθέτηση του προσήνεμου μόλου στην περιοχή αυτή, χρησιμοποιήθηκε το αριθμητικό μοντέλο MIKE 21 BW που αποτελεί υπορουτίνα του υπολογιστικού πακέτου MIKE 21. Η εταιρεία DHI (Danish Hydraulic Institute Water & Environment) είναι αυτή που προσφέρει το συγκεκριμένο λογισμικό. Στην αγορά χρησιμοποιείται ευρέως για τη μελέτη των κυματικών φαινομένων το μοντέλο MIKE 21 BW, τόσο σε λιμενικά όσο και σε ακτομηχανικά – παράκτια έργα. Το MIKE 21 BW βασίζεται στην αριθμητική επίλυση των δισδιάστατων εξισώσεων Boussinesq. Η έκδοση που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία είναι αυτή του 2004 και περιλαμβάνει 2 μοντέλα, ανάλογα με τις διαστάσεις στις οποίες πραγματοποιείται η επεξεργασία. Τα 2 αυτά αριθμητικά μοντέλα είναι:

#### Boussinesq 1DH

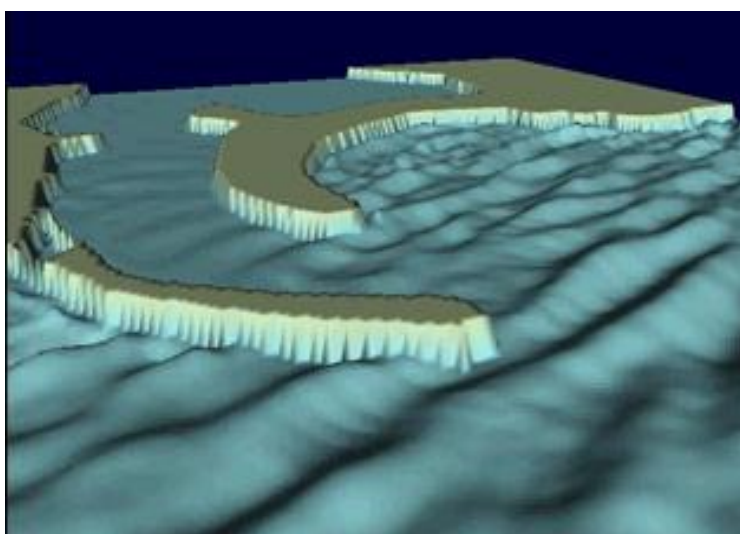


**Σχήμα 3.1.1** – Οπτικοποίηση μονοδιάστατου κυματισμού (MIKE 21 BW Manual)

Περιλαμβάνει:

- Υπολογισμό της μετάδοσης μη γραμμικών κυματισμών από τα βαθιά στη ζώνη θραύσης και μέχρι την ακτή
- Ανάλυση της παραγωγής χαμηλής συχνότητας κυματισμών
- Μελέτη και αξιολόγηση κυματοθραυστών

### Boussinesq 2DH



**Σχήμα 3.1.2** – Οπτικοποίηση δισδιάστατου κυματισμού (MIKE 21 BW manual)

Περιλαμβάνει:

- Προσδιορισμό της κυματικής διαταραχής εξαιτίας του ανέμου
- Ανάλυση χαμηλής συχνότητας κυματισμών
- Μελέτη της μετάδοσης των κυματισμών σε παράκτιες ζώνες όπου τα φαινόμενα της ανάκλασης, της διάθλασης και της περίθλασης παίζουν σημαντικό ρόλο
- Μελέτη των κυματισμών στη ζώνη θραύσης
- Υπολογισμό παραγωγής και μετάδοσης κυματισμών που οφείλονται σε διάφορα αίτια (π.χ. κίνηση πλοίων, σεισμοί, κ.τ.λ.)

### 3.2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Οι εξισώσεις Boussinesq περιλαμβάνουν τόσο τη μη γραμμικότητα των κυματισμών όσο και τη διασπορά των συχνοτήτων. Γενικά η διασπορά των συχνοτήτων εισάγεται στις εξισώσεις ποσότητας κίνησης λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση των κατακόρυφων επιταχύνσεων στην κατανομή της πίεσης. Το μοντέλο επιλύει τις εξισώσεις Boussinesq (Madsen et al. 1991; Madsen and Sorensen, 1992) που χρησιμεύουν σε περιπτώσεις προσομοίωσης διάδοσης κατευθυντικών κυματοσυρμών που οδεύουν από τα βαθιά στα ρηγά νερά. Οι εξισώσεις του μοντέλου επεκτάθηκαν ώστε να λαμβάνεται υπόψη και η θραύση των κυμάτων και η μετακίνηση της ακτογραμμής (Madsen et al., 1997; Sorensen, 2001).

Το μοντέλο είναι ικανό να αναπαράγει τη συνδυασμένη δράση των περισσότερων κυματικών φαινομένων που ενδιαφέρουν τα παράκτια και λιμενικά έργα. Τα φαινόμενα αυτά μπορεί να είναι:

- Ρήγωση
- Διάθλαση
- Περίθλαση
- Τριβή πυθμένα
- Μερική ανάκλαση και μετάδοση ενέργειας
- Μη γραμμική αλληλεπίδραση κυματισμών
- Διασπορά συχνοτήτων
- Διασπορά διεύθυνσης

Μη γραμμικά φαινόμενα όπως η ομαδοποίηση κυμάτων, η γένεση υποαρμονικών και υπεραρμονικών καθώς επίσης και φαινόμενα αλληλεπιδράσεων συντονισμού μπορούν επίσης να προσομοιωθούν από το πρόγραμμα MIKE 21 BW.

**Βασικές Εξισώσεις:**

Τα μοντέλα Boussinesq επιλύουν τις εξισώσεις που εκφράζονται σε μία ή δύο διαστάσεις σε όρους ελεύθερης επιφάνειας ( $\xi$ ) και τους όρους ταχύτητας (P) και (Q) που ολοκληρώνονται στο βάθος:

Εξισώσεις Συνέχειας:

$$N \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0 \quad (3.2.1)$$

Ποσότητα κίνησης κατά  $x$ :

$$n \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{P^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{PQ}{h} \right) + \frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial x} + \quad (3.2.2)$$

$$+ n^2 g H \frac{\partial \xi}{\partial x} + n^2 P \left[ \alpha + \beta \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{H} \right] + \frac{gP \sqrt{P^2 + Q^2}}{H^2 C^2} + n \Psi_1 = 0 \quad (3.2.3)$$

Ποσότητα κίνησης κατά  $y$ :

$$n \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{Q^2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{PQ}{H} \right) + \frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial x} + \quad (3.2.4)$$

$$n^2 g H \frac{\partial \xi}{\partial y} + n^2 Q \left[ \alpha + \beta \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{H} \right] + \frac{gP \sqrt{P^2 + Q^2}}{H^2 C^2} + n \Psi_2 = 0 \quad (3.2.5)$$

Όπου οι όροι διασποράς των εξισώσεων Boussinesq  $\Psi_1$  και  $\Psi_2$  ορίζονται ως εξής:

$$\Psi_1 = - \left( -B + \frac{1}{3} \right) d^2 (P_{xxt} + Q_{xyt}) - n B g d^3 (\xi_{xxx} + \xi_{xyy}) \quad (3.2.6)$$



$$\begin{aligned}
 & -dd_x \left( \frac{1}{3} P_{xt} + \frac{1}{6} Q_{yt} + nBgd(2\xi_{xx} + \xi_{yy}) \right) \\
 & \quad -dd_y \left( \frac{1}{6} Q_{xt} + nBgd\xi_{xy} \right) \\
 \Psi_2 = & - \left( B + \frac{1}{3} \right) d^2 (Q_{yyt} + P_{xyt}) - nBgd^3 (\xi_{yyy} + \xi_{xxy}) \\
 & -dd_y \left( \frac{1}{3} Q_{yt} + \frac{1}{6} P_{xt} + nBgd(2\xi_{yy} + \xi_{xx}) \right) \\
 & \quad -dd_x \left( \frac{1}{6} P_{yt} + nBgd\xi_{xy} \right)
 \end{aligned} \tag{3.2.7}$$

όπου:

- $P$  : η ροή ενέργειας στη διεύθυνση x (m<sup>3</sup>/m/sec)
- $Q$  : η ροή ενέργειας στη διεύθυνση y (m<sup>3</sup>/m/sec)
- $B$  : ο συντελεστής διάχυσης Boussinesq
- $x, y$  : οι καρτεσιανές συντεταγμένες (m)
- $t$  : ο χρόνος (sec)
- $H$  : το συνολικό βάθος (m)
- $d$  : το βάθος ΜΣΘ (m)
- $g$  : η επιτάχυνση βαρύτητας (m/sec<sup>2</sup>)
- $n$  : η διαπερατότητα
- $C$  : ο συντελεστής τριβής Chezy (m<sup>0.5</sup>/sec)
- $a$  : ο συντελεστής αντίστασης για στρωτή ροή σε πορώδες μέσο
- $\beta$  : ο συντελεστής αντίστασης για τυρβώδη ροή σε πορώδες μέσο
- $\xi$  : η ανύψωση επιφάνειας πάνω από τη στάθμη της θάλασσας

Οι όροι  $R_{xx}$ ,  $R_{yy}$  και  $R_{xy}$  συμβολίζουν την επιπρόσθετη ποσότητα κίνησης που προέρχεται από την ανομοιόμορφη κατανομή ταχυτήτων λόγω της παρουσίας των στροβίλων και ορίζονται από τις σχέσεις:

$$R_{xx} = \frac{\delta}{1-\frac{\delta}{a}} \left( c_x - \frac{p}{a} \right)^2 \quad (3.2.8)$$

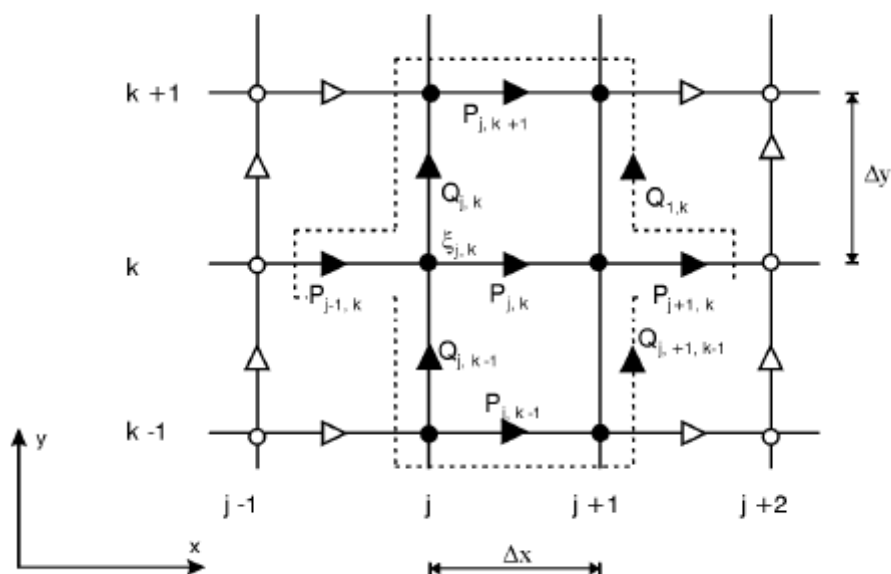
$$R_{xy} = \frac{\delta}{1-\frac{\delta}{a}} \left( c_x - \frac{p}{a} \right) \left( c_y - \frac{q}{a} \right) \quad (3.2.9)$$

$$R_{yy} = \frac{\delta}{1-\frac{\delta}{a}} \left( c_y - \frac{q}{a} \right)^2 \quad (3.2.10)$$

Όπου  $\delta = \delta(t,x,y)$  είναι το πάχος του επιφανειακού στρωβίλου και  $c_x$  και  $c_y$  είναι οι συνιστώσες της ταχύτητας του στρωβίλου.

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για την επίλυση βασίζεται στη λεγόμενη μέθοδο SYSTEM 21, η οποία ξεκίνησε από τους Abbott et.al. (1973) και επεκτάθηκε σε προσομοιώσεις κυμάτων μικρού μήκους. Από τότε η μέθοδος αυτή βρίσκεται υπό συνεχή βελτίωση (Madsen et al., 1991; Madsen and Sorensen, 1992).

Οι διαφορικές εξισώσεις διακριτοποιούνται χωρικά σε ορθογωνικό κάναβο όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2.1. Βαθμωτές ποσότητες όπως η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας ορίζονται στους κόμβους, ενώ οι συνιστώσες της ροής ορίζονται στο μεσοδιάστημα δύο συνεχόμενων κόμβων στις αντίστοιχες διευθύνσεις. Η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών των χωρικών διαφορικών πραγματοποιείται με ρητή αριθμητική επίλυση των κεντρικών μέσων όρων εκτός από τους όρους μετάδοσης.



**Σχήμα 3.2.1** - Ορθογωνικός κানাβος διακριτοποίησης των διαφορικών εξισώσεων κατά x και y

Η ολοκλήρωση στο χρόνο επιτυγχάνεται με τη χρήση κεντρικής-χρονικής άμεσης μεθόδου.

Η εφαρμοζόμενη τεχνική επίλυσης είναι ένας αλγόριθμος εναλλασσόμενης κατεύθυνσης (ADI) που χρησιμοποιείται μια τεχνική «βήματος λόγων». Τα προκύπτοντα τρισδιάγωνα συστήματα εξισώσεων επιλύονται από τον γνωστό αλγόριθμο Double Sweep 3 Algorithm.

Το μοντέλο έχει ελεγχθεί και επαληθευτεί με αναλυτικά και πραγματικά δεδομένα. Αποτελέσματα προσομοιώσεων έχουν συγκριθεί με φυσικά ομοιώματα και μετρήσεις πεδίου σε περιπτώσεις πολύπλοκων γεωμετρικών λιμένων.

Γενικά η σύγκριση αποτελεσμάτων από το αριθμητικό και το φυσικό ομοίωμα ήταν πολύ ικανοποιητική. Έτσι, η χρήση του μοντέλου MIKE 21 BW για τον προσδιορισμό κυματικής διαταραχής τόσο από μακρά όσο και μικρού μήκους κύματα σε λιμένες κρίνεται αξιόπιστη.

### **3.3 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ MIKE 21 BW**

Τα απαιτούμενα δεδομένα για τον υπολογισμό των κυματικών συνθηκών είναι:

#### **3.3.1 Η βαθυμετρία**

Η προετοιμασία της βαθυμετρίας γίνεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο γίνεται η ψηφιοποίηση της περιοχής ενδιαφέροντος. Η ψηφιοποίηση γίνεται από υδρογραφικούς χάρτες με εισαγωγή δύο ομάδων γραμμών: μία που αντιπροσωπεύει τις ισοβαθείς και μια ομάδα που αντιπροσωπεύει τις γραμμές ξηράς. Στην παρούσα εργασία έγινε ψηφιοποίηση των τιμών που δόθηκαν στον κανάβο έτσι ώστε να δημιουργηθεί ο πυθμένας ήπιας κλίσης που χρησιμοποιήθηκε. Στο δεύτερο στάδιο, γίνεται η προετοιμασία του αρχείου που εισάγεται στο πρόγραμμα με γραμμική παρεμβολή στους κόμβους του δισδιάστατου κανάβου. Η πυκνότητα του κανάβου καθορίζεται από τη βαθυμετρία και το μήκος κύματος του προσπίπτοντος κυματισμού.

#### **3.3.2 Η περίοδος προσομοίωσης**

Ο προσδιορισμός της περιόδου προσομοίωσης επιτυγχάνεται με την εισαγωγή τέτοιου χρονικού βήματος, ώστε καταρχήν να ικανοποιείται το κριτήριο Courant (Courant,R.;Friedrichs,K.; Lewy,H. (1928)), και να έχουμε περίπου 35 ως 50 διαδοχικά βήματα ανά περίοδο κύματος. Επίσης, η συνολική διάρκεια προσομοίωσης ορίζεται έτσι ώστε το φαινόμενο να αναπτυχθεί πλήρως χρονικά και να φθάσει σε κατάσταση δυναμικής ισορροπίας.

### 3.3.3 Οριακές συνθήκες

Ο προσδιορισμός των οριακών συνθηκών στο μοντέλο πραγματοποιείται με τον καθορισμό των φασματικών κυματικών μεγεθών, στα όρια της περιοχής ενδιαφέροντος. Δίδεται έτσι το ύψος κύματος  $H_m$ , η περίοδος αιχμής  $T_p$ , η κύρια διεύθυνση  $D$  και η κατευθυντήρια κατανομή του φάσματος κυματισμών.

### 3.3.4 Ανάκλαση – απορρόφηση

Η μερική ανάκλαση, απορρόφηση και μείωση της ενέργειας που προέρχεται από την ύπαρξη κυματοθραυστών, μπορεί να εισαχθεί στο πρόγραμμα σαν αρχείο με τους αντίστοιχους συντελεστές γραμμικής τριβής για όλα τα σημεία του κανάβου. Οι τιμές των συντελεστών για τα σημεία των κυματοθραυστών υπολογίζονται από τις εξής παραμέτρους: περίοδος  $T$ , ύψος κύματος μπροστά από την κατασκευή  $H$ , βάθος νερού στον πόδα της κατασκευής  $d$  και εύρος ζώνης τριβής  $w$ .

Τα βασικά αποτελέσματα του MIKE 21 BW δίνονται υπό μορφή δισδιάστατων αρχείων που περιέχουν την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας, τις ροές κατά  $x$  και  $y$ , και το ύψος κύματος, απόλυτο ή σχετικό (συντελεστής αναλογίας), σε όλα τα σημεία του κανάβου που βρίσκονται στη θάλασσα, στο τέλος της επαναληπτικής διαδικασίας λύσεως.

# *ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4*

*Εφαρμογή του μοντέλου MIKE 21 BW*

## 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα εργασία, όπως προαναφέρθηκε, εξετάζεται η ενίσχυση της κυματικής δράσης εξαιτίας ύπαρξης μολών ή κυματοθραυστών, στην περιοχή εκτός λιμενολεκάνης με τη χρήση του αριθμητικού μοντέλου MIKE 21 BW.

Με το αριθμητικό μοντέλο είναι δυνατή η προσομοίωση μονοχρωματικών και φασματικών κυματισμών, γραμμικών και μη γραμμικών καθώς και κυματισμών με κατευθυντικότητα.

Στη συνέχεια περιγράφονται οι απαιτήσεις του προγράμματος MIKE 21 BW για την εισαγωγή των απαραίτητων δεδομένων με τη σειρά που αυτά ζητούνται από το πρόγραμμα, καθώς και οι αντίστοιχες επιλογές που έγιναν για την εφαρμογή του.

Τα δεδομένα διαχωρίζονται σε:

- Basic Parameters (Βασικές παράμετροι)
- Calibration Parameters (Παράμετροι βαθμονόμησης)
- Output Parameters (Εξαγόμενες παράμετροι)

## 4.2 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΒΑΣΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Στις βασικές παραμέτρους περιλαμβάνονται δεδομένα που σχετίζονται κυρίως με τον τρόπο επίλυσης που θα χρησιμοποιήσει το πρόγραμμα και λιγότερο με την προσομοίωση της περιοχής μελέτης, με εξαίρεση την εισαγωγή της βαθυμετρίας και τον προσδιορισμό των ορίων:

- Module Selection (Επιλογή μοντέλου)
- Bathymetry (Βαθυμετρία)
- Type of equation (Τύπος της εξίσωσης)
- Numerical Parameters (Αριθμητικές παράμετροι)
- Boundary (Ορια)
- Simulation Period (Χρόνος προσομοίωσης)



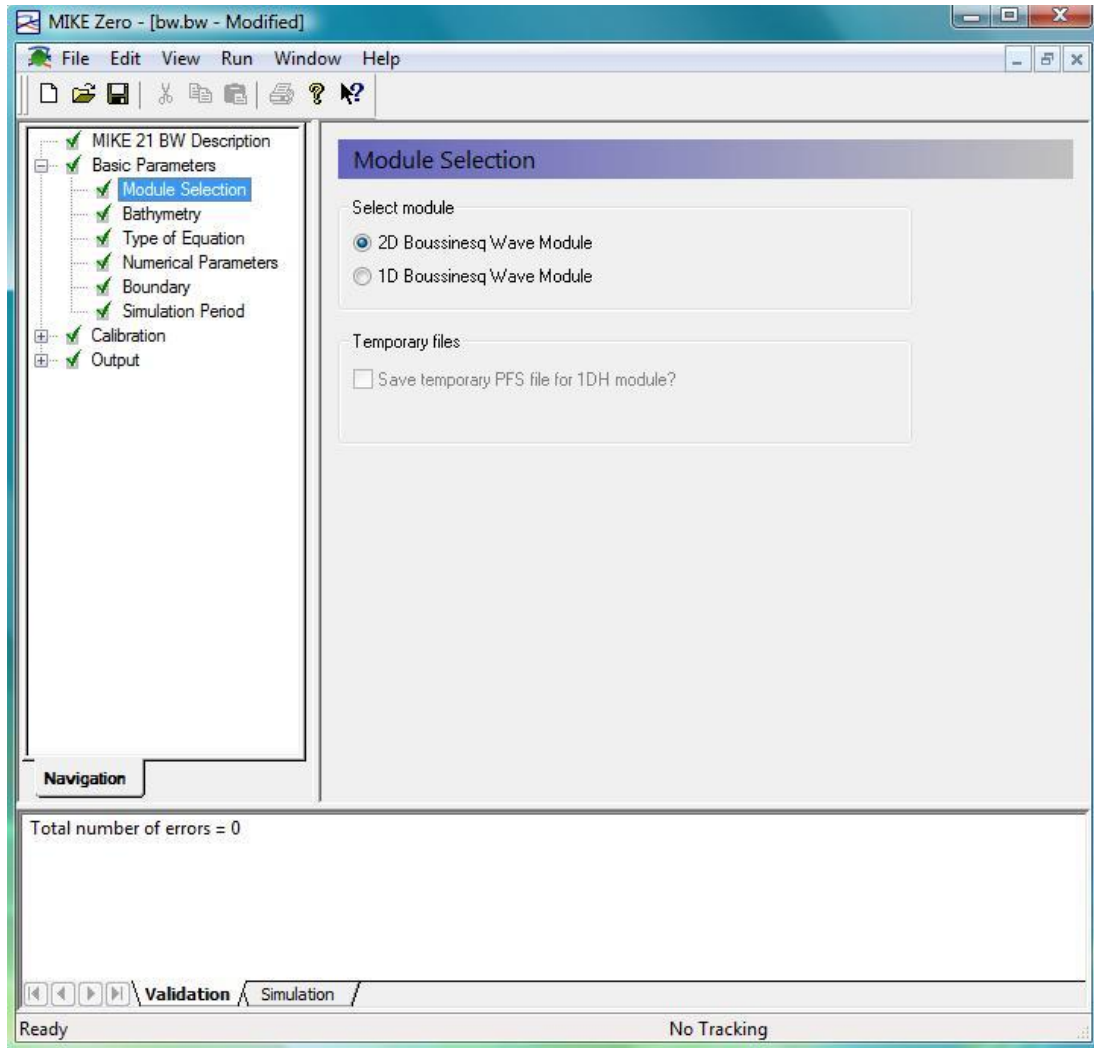
### **Επιλογή μοντέλου**

Στο πρώτο βήμα ο χρήστης του μοντέλου MIKE 21 BW καλείται να επιλέξει ανάμεσα σε δύο μοντέλα:

- Το μοντέλο 2DH MIKE 21 BW
- Το μοντέλο 1DH MIKE 21 BW

Έχει αναφερθεί προηγούμενα πως το μοντέλο 1DH χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της μετάδοσης των κυματισμών από τα βαθιά προς την ακτή με στόχο τη μελέτη των φαινομένων που εκτυλίσσονται στη ζώνη θραύσης. Για τις περιπτώσεις όμως υπολογισμού των κυματισμών σε παράκτιες ζώνες και λιμενικά έργα χρησιμοποιείται το 2DH.

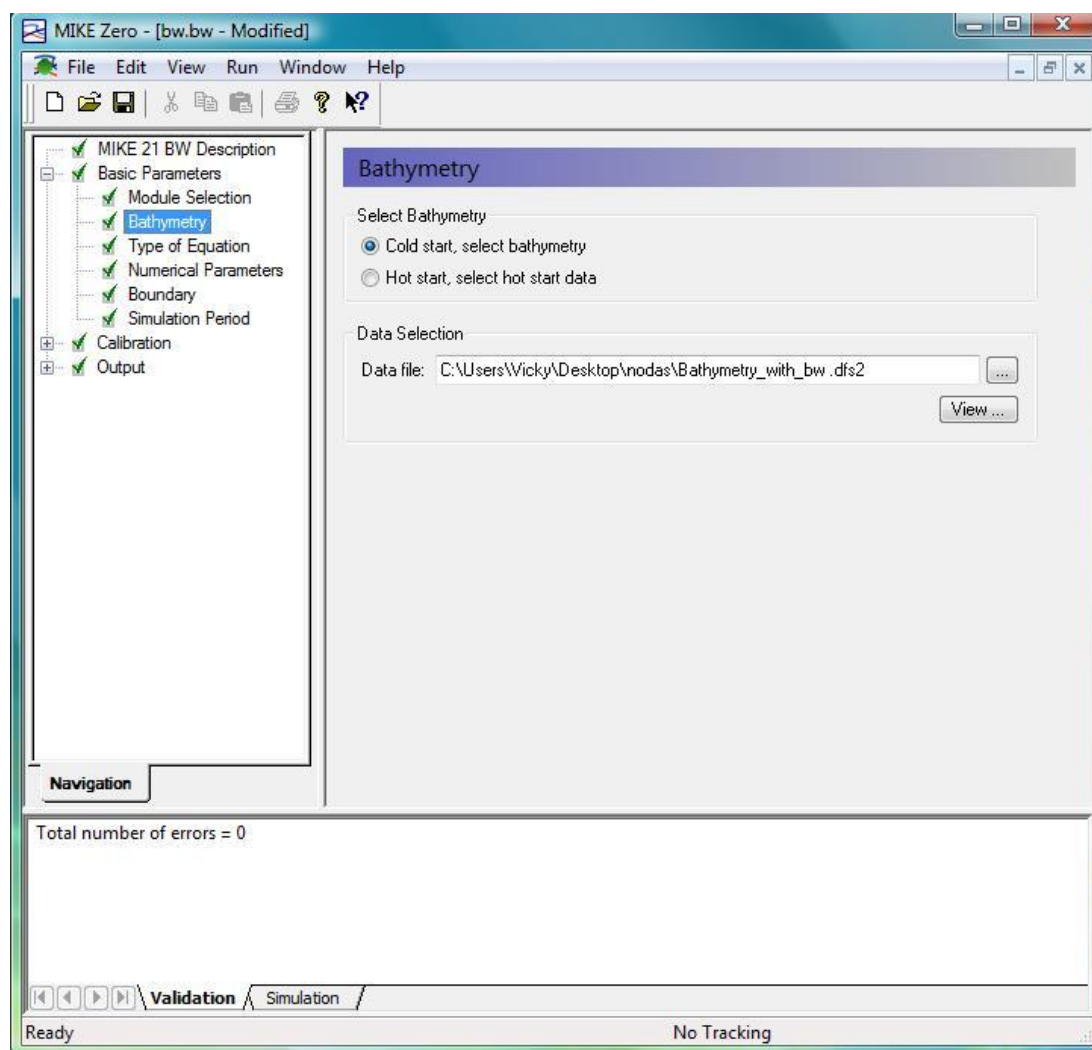
Η προσομοίωση ενός λιμένα προϋποθέτει τη γνώση των μορφολογικών και κυματικών συνθηκών σε μια ευρύτερη περιοχή, όπως ακριβώς συμβαίνει στην περίπτωση των τρισδιάστατων φυσικών προσομοιωμάτων. Για το σκοπό αυτό επιλέχθηκε για το σύνολο της επεξεργασίας το μοντέλο MIKE 21 BW 2DH.



**Σχήμα 4.2.1** – Επιλογή διαστάτου μοντέλου Bussinesq (Module Selection)

## Βαθυμετρία

Στη συνέχεια ο χρήστης δίνει ως δεδομένο στο πρόγραμμα το αρχείο της βαθυμετρίας που ο ίδιος δημιούργησε στο πρόγραμμα MIKE Zero. Η ύπαρξη μιας σωστής και κατάλληλης βαθυμετρίας είναι απαραίτητη για αξιόπιστα αποτελέσματα. Η δημιουργία της βαθυμετρίας δεν περιορίζεται στον ακριβή προσδιορισμό του βάθους σε κάθε σημείο του κανάβου. Περιλαμβάνει επίσης και τον ακριβή προσδιορισμό της περιοχής μελέτης, τις διαστάσεις του κανάβου, τον καθορισμό των ορίων κ.τ.λ.



Σχήμα 4.2.2 – Βαθυμετρία (Bathymetry)

Σύμφωνα με το πρόγραμμα μπορούμε να αρχίσουμε τον υπολογισμό:

- Με ψυχρή έναρξη (*as a cold start*)
- Με θερμή έναρξη (*as a hot start*)

Με την ψυχρή έναρξη η ροή αρχικά θεωρείται μηδενική και οι υπολογισμοί εκκινούν για πρώτη φορά. Η θερμή έναρξη προϋποθέτει την ύπαρξη του λεγόμενου “hot start” φακέλου που περιέχει τις απαραίτητες πληροφορίες για τη συνέχεια επεξεργασίας που είχε προηγηθεί. Δεδομένου ότι στα πλαίσια της παρούσας εργασίας δεν έχει υπάρξει προηγούμενη επεξεργασία, επιλέγεται ψυχρή έναρξη (*cold start*).

Κατά τη δημιουργία της βαθυμετρίας πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι τα βάθη στην περιοχή μελέτης καθορίζουν τις κυματικές συνθήκες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από το μοντέλο. Το μέγιστο βάθος προσδιορίζει την ελάχιστη περίοδο κύματος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από το μοντέλο και αντίστοιχα το ελάχιστο βάθος μπορεί να περιορίσει το ύψος κύματος στο μοντέλο εάν δε ληφθεί υπόψη η θραύση του κύματος. Επιπλέον τα ρηγά νερά έχουν ως αποτέλεσμα μικρά μήκη κύματος που επιβάλλουν μικρό κánaβο ο οποίος αυξάνει το χρόνο υπολογισμού. Μπορεί επίσης να είναι απαραίτητο να τροποποιηθεί η βαθυμετρία ώστε να υπάρξει ένας αποτελεσματικός συνδυασμός ανάμεσα σε μια σωστή βαθυμετρία και στις σωστές κυματικές συνθήκες.

Για την επιλογή της περιοχής που θα επεξεργαστεί το μοντέλο πρέπει να οριοθετηθεί τόσο η περιοχή μελέτης, καθώς επίσης και τα όρια της περιοχής μελέτης όπως αναπτύσσεται στη συνέχεια. Σε περιοχές με μικρά κύματα όπως είναι οι λιμενολεκάνες, η επιλογή της περιοχής είναι πιο εύκολη και περιορίζεται στον καθορισμό της θέσης και των ορίων.

Πρέπει επίσης να τονιστεί ότι τα μικρά βάθη σε λιμάνια μπορούν να μετατρέπονται σε «τεχνητή» ξηρά για δύο λόγους:

- Έχει παρατηρηθεί ότι τα μικρά βάθη απορροφούν μέρος της κυματικής ενέργειας και ως εκ τούτου μετατρέπονται σε ξηρά και χρησιμοποιούνται “sponge layers” μπροστά από την ξηρά. Η λειτουργία των “sponge layers” περιγράφεται αναλυτικά στη συνέχεια.
- Επιπλέον τα μικρά βάθη κοντά στην ακτογραμμή, αυξάνουν σημαντικά το χρόνο επεξεργασίας από το μαθηματικό μοντέλο και συνεπώς συνίσταται να αποφεύγονται.

Είναι σημαντικό επίσης η περιοχή που επεξεργάζεται το μοντέλο να επεκτείνεται αρκετά μακριά από την περιοχή μελέτης ώστε η εγγύτητα με τα όρια να μην επηρεάζει τα κυματικά χαρακτηριστικά. Εμπειρικά, μπορεί να γίνει η παραδοχή ότι η ελάχιστη απόσταση μεταξύ του τελευταίου άκρου της περιοχής μελέτης και του ορίου πρέπει να είναι πέντε ή έξι φορές ένα χαρακτηριστικό μήκος κύματος. Ως

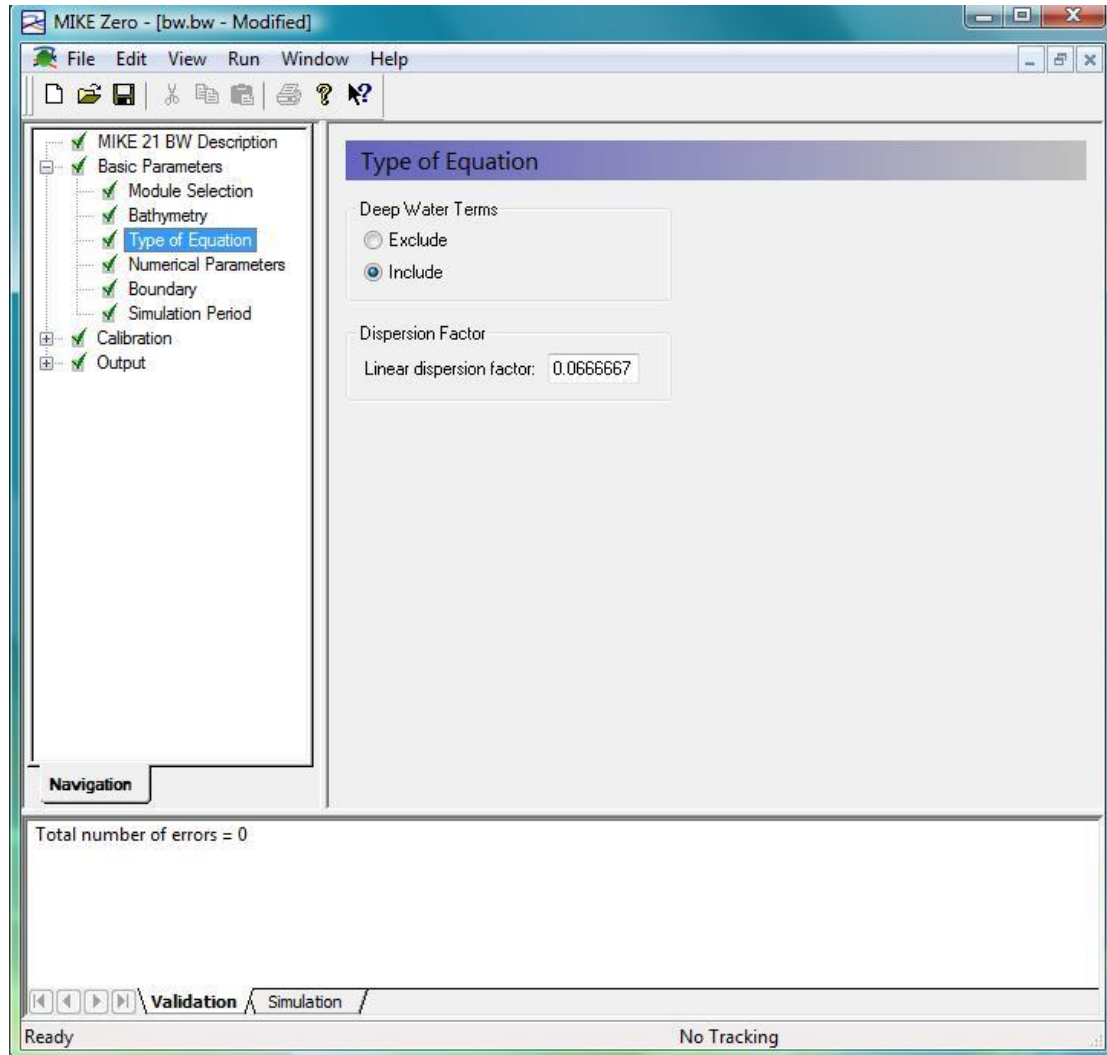
χαρακτηριστικό κύμα λαμβάνεται το κύμα με το μικρότερο μήκος στην περιοχή μελέτης και έχει τη μικρότερη περίοδο κύματος.

Για την επιλογή της διάστασης του τετραγωνικού κανάβου είναι σημαντικό το μέγεθός του να εξασφαλίζει επαρκή ανάλυση των χαρακτηριστικών των κυμάτων που χρησιμοποιούνται. Για τις περισσότερες 2DH εφαρμογές απαιτούνται 7-10 σημεία για κάθε μήκος κύματος.

### Τύπος της εξίσωσης

Στο επόμενο βήμα θα πρέπει να επιλεγεί αν στους υπολογισμούς θα συμπεριληφθούν συνθήκες που επικρατούν στα βαθιά νερά, καθώς επίσης και το συντελεστή γραμμικής απόσβεσης (*linear dispersion factor*) όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.2.3. Από τις επιλογές αυτές εξαρτώνται και οι εξισώσεις που θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια από το πρόγραμμα, κλασσικές ή βελτιωμένες εξισώσεις Boussinesq, για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

Οι κλασσικές εξισώσεις χρησιμοποιούνται στην περίπτωση που ο λόγος ανάμεσα στο μέγιστο βάθος και το μήκος κύματος στα βαθιά  $h_{\max}/L_0$  είναι μικρότερος από 0.22. Στην περίπτωση των βελτιωμένων εξισώσεων Boussinesq περιλαμβάνονται συνθήκες για τα βαθιά νερά με αποτέλεσμα η λειτουργία του μοντέλου να επεκτείνεται σε ακόμα μεγαλύτερα βάθη και ακόμα μικρότερες περιόδους κύματος. Ο λόγος μεταξύ του μέγιστου βάθους και του μήκους κύματος στα βαθιά φθάνει την τιμή  $h_{\max}/L_0 = 0,5$ .



**Σχήμα 4.2.3** – Τύπος της εξίσωσης (Type of Equation)

Πρέπει να τονιστεί ότι συμπεριλαμβάνοντας τα βαθιά νερά στους υπολογισμούς καθώς και τη θραύση των κυματισμών, αυξάνεται σημαντικά ο χρόνος επεξεργασίας δεδομένου ότι απαιτούνται μικρότερα κελιά στον κάναβο και μικρότερα χρονικά βήματα, για την επίτευξη της απαιτούμενης ακρίβειας.

Για τις περισσότερες εφαρμογές συνίσταται ο συντελεστής γραμμικής διασποράς (*linear dispersion factor*) να λαμβάνεται ίσος με την τιμή 0.067, τιμή η οποία συνήθως δίνεται απευθείας από το πρόγραμμα σαν αρχική τιμή.

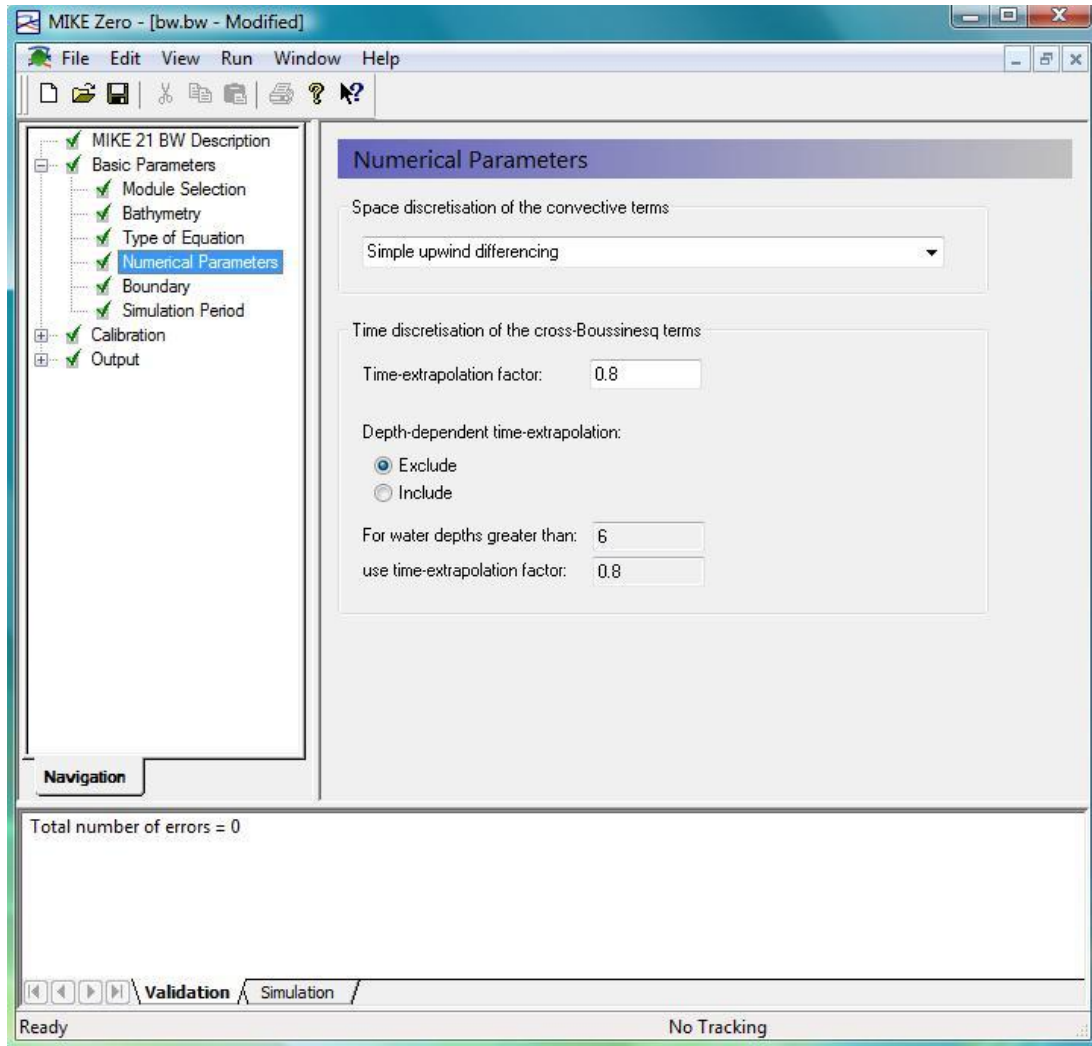
Στη συγκεκριμένη εφαρμογή επιλέγεται να συμπεριληφθούν οι συνθήκες για τα βαθιά νερά και το πρόγραμμα να επιλύσει σύμφωνα με τις βελτιωμένες εξισώσεις Boussinesq αφού ο λόγος  $h_{\max}/L_0$  είναι επαρκώς μεγάλος.

### Αριθμητικές Παράμετροι

Σε αυτό το βήμα προσδιορίζεται η μέθοδος για την επίλυση των εξισώσεων Boussinesq. Εξ αρχής το πρόγραμμα λύνει τις εξισώσεις χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών που ωστόσο σε ορισμένες εφαρμογές που περιλαμβάνουν κανάβους με μεγάλη χωρική ανάλυση  $dx=0.1m-0.2m$  ή κύματα με μικρές περιόδους για μεγάλα χρονικά διαστήματα οδηγούν στο λεγόμενο “blow up”, στην αδυναμία δηλαδή του προγράμματος να επιλύσει τις εξισώσεις και να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα. Για να ξεπεραστούν αυτά τα προβλήματα το MIKE 21 BW χρησιμοποιεί μια σειρά από μεθόδους επίλυσης που είναι οι παρακάτω:

- Central differencing with side-feeding.
- Central differencing with simple upwinding at steep gradients and near land.
- Quadratic upwinding with simple upwinding at steep gradients and near land.
- Simple upwinding differencing

Η πρώτη μέθοδος, η οποία είναι και η ακριβέστερη, οδηγεί συχνότερα σε αδυναμία του προγράμματος ως προς την επίλυση των εξισώσεων. Σε αυτή την περίπτωση πρέπει να επιλέγονται οι επόμενες τρεις μέθοδοι, οι οποίες είναι κατά σειρά απλούστερες ως προς την επίλυση των εξισώσεων και λιγότερο ακριβείς ως προς τα αποτελέσματα. Τελικά επιλέχθηκε η τέταρτη μέθοδος με αποτελέσματα αρκετά σαφή για την επεξεργασία των δεδομένων της παρούσας εργασίας.

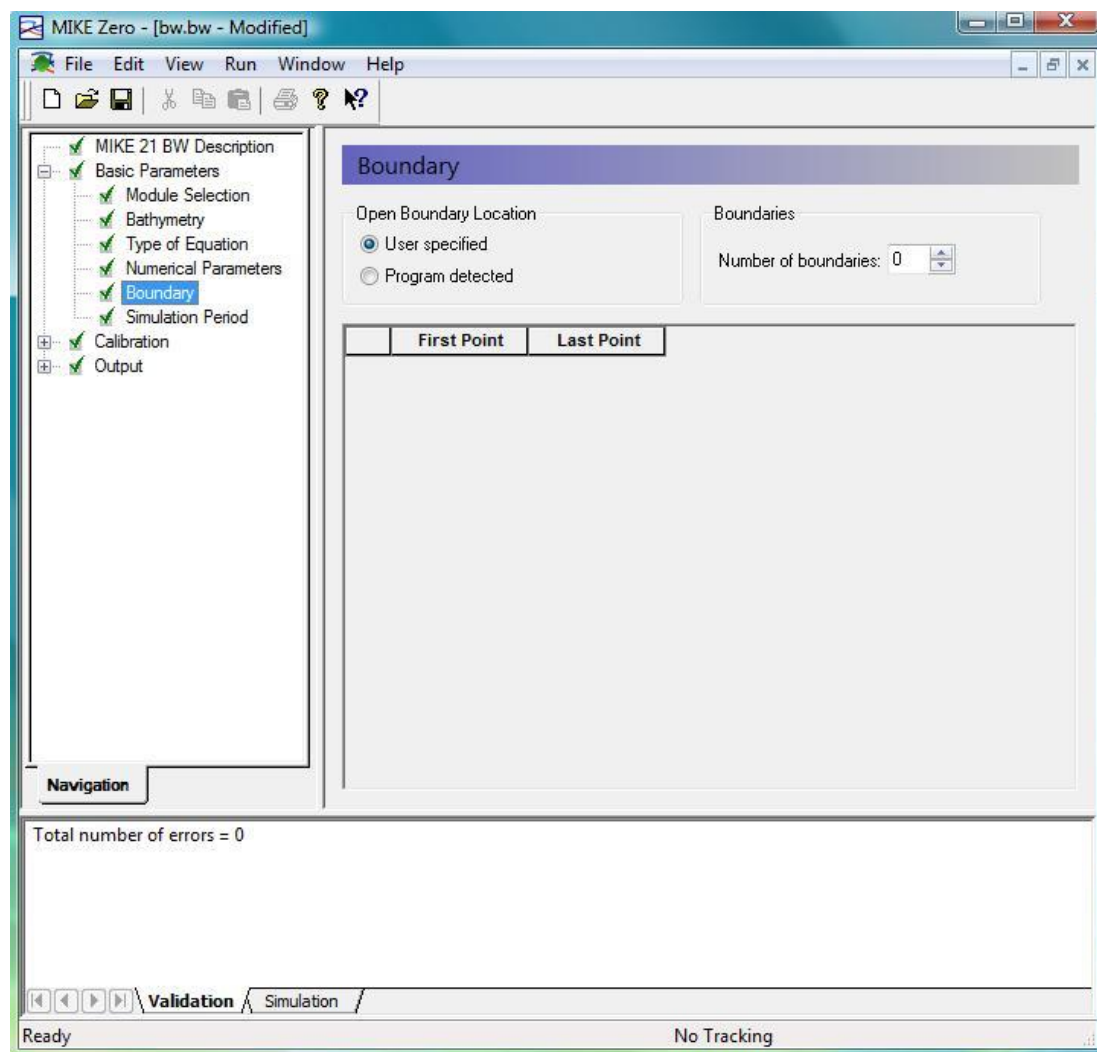


Σχήμα 4.2.4 – Αριθμητικές Παράμετροι (Numerical Parameters)

## Όρια

Στο βήμα αυτό προσδιορίζονται τα όρια της περιοχής στην οποία είναι επιθυμητό να περιοριστεί η επεξεργασία. Στις περισσότερες περιπτώσεις ο αριθμός και οι θέσεις των ορίων προσδιορίζονται από το πρόγραμμα το οποίο χρησιμοποιεί τις τιμές της βαθυμετρίας, ωστόσο είναι δυνατό να προσδιορίσει ο χρήστης τα ακριβή όρια. Αυτό μπορεί να απαιτηθεί όταν υπάρχει κάποιο εσωτερικό όριο όπως για παράδειγμα σε ένα σύμπλεγμα νησιών.





Σχήμα 4.2.5 – Όρια (Boundary)

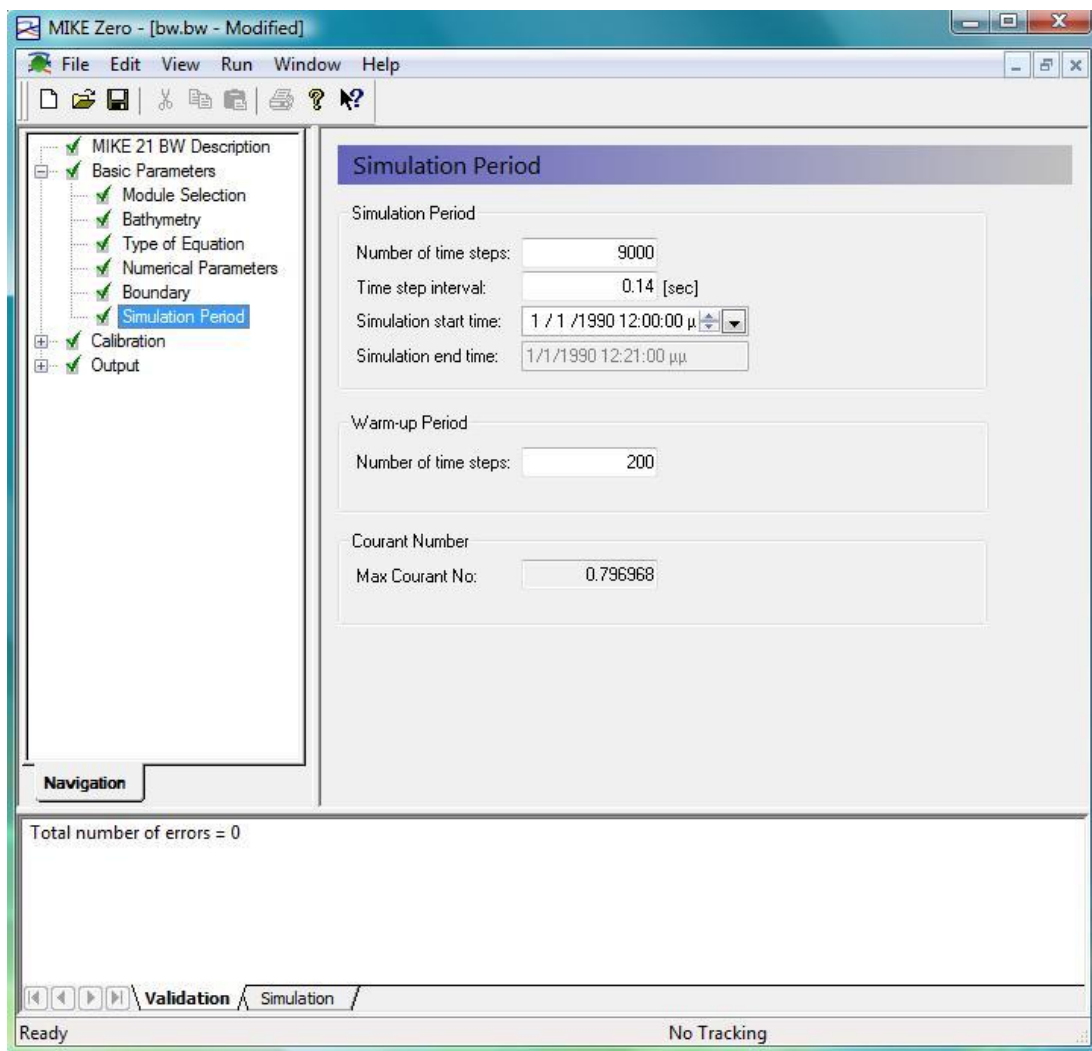
Για την προετοιμασία των αρχείων που θα περιλαμβάνουν τα όρια τα οποία θα επεξεργαστεί το πρόγραμμα, χρησιμοποιείται η εφαρμογή MIKE 21 Toolbox.

Στη συγκεκριμένη επεξεργασία δόθηκαν ανοιχτά όρια, ωστόσο επιλέχθηκε τα ακρότατα κελιά περιμετρικά της περιοχής μελέτης που αναπαριστούν υδάτινη επιφάνεια να έχουν την τιμή 2 της ξηράς. Για να αποφευχθεί το φαινόμενο της ανάκλασης, τοποθετήθηκε “sponge layer” στην περιοχή μπροστά από τα ακρότατα κελιά, λειτουργία που αναλύεται στη συνέχεια.

## Χρόνος Προσομοίωσης

Στο σημείο αυτό εισάγονται στο πρόγραμμα πληροφορίες σχετικά με:

- Τον αριθμό των χρονικών βημάτων (*Number of time steps*)
- Τη διάρκεια του χρονικού βήματος (*Time step interval*)
- Την χρονική στιγμή έναρξης της επεξεργασίας
- Αριθμό των χρονικών βημάτων προθέρμανσης (*Number Of Warm-up period time steps*)



Σχήμα 4.2.6 – Χρόνος προσομοίωσης (Simulation Period)

Ο αριθμός των χρονικών βημάτων (*number of timer steps*) προσδιορίζεται αν διαιρεθεί ο συνολικός χρόνος προσομοίωσης με τη διάρκεια του χρονικού βήματος.

Ο συνολικός χρόνος προσομοίωσης πρέπει να είναι επαρκής ώστε αρχικά όλα τα κύματα να φθάσουν σε κάθε σημείο της περιοχής μελέτης και από αυτή τη χρονική στιγμή (*start-up period*) απαιτούνται επιπλέον περίπου 15 με 20 λεπτά για τον υπολογισμό όλων των στατιστικών παραμέτρων. Για τυπικά ανεμογενή κύματα περιόδου ως  $T=10\text{sec}$ , ο χρόνος προσομοίωσης υπολογίζεται στα 20 με 30 λεπτά.

Η επιλογή της διάρκειας του χρονικού βήματος (*time step interval*) εξαρτάται από το μοντέλο που έχει επιλεγεί και τις εξισώσεις Boussinesq που θα επιλύσει το πρόγραμμα. Οι παρακάτω οδηγίες αναφέρονται κυρίως στο μοντέλο 2DH. Ο βασικός περιορισμός για το μοντέλο 1DH συνίσταται στο να είναι ο αριθμός Courant μικρότερος από 0.5.

Χωρίς να συμπεριλαμβάνονται τα βαθιά νερά (*deep water terms*) στους υπολογισμούς, βασική απαίτηση αποτελεί η διάρκεια του χρονικού βήμα να είναι επαρκώς μικρή ώστε να επιλύονται οι εξισώσεις και για μικρότερες περιόδους κύματος από  $T=1-2\text{sec}$ . Για τις περισσότερες εφαρμογές, 8-10 χρονικά βήματα για κάθε περίοδο κύματος επαρκούν. Απαιτείται επιπλέον ο αριθμός Courant να μην ξεπερνάει την τιμή 1.

Στην περίπτωση όπου στους υπολογισμούς συμπεριλαμβάνονται τα βαθιά νερά, για να αποφευχθούν τυχόν προβλήματα στην επίλυση των εξισώσεων, απαιτούνται τουλάχιστον 25-30 χρονικά βήματα για το κύμα με τη μικρότερη περίοδο. Πρέπει επίσης να ικανοποιείται ο περιορισμός για τον αριθμό Courant.

Σε εφαρμογές που λαμβάνονται υπόψη η θραύση των κυματισμών (*wave breaking*) και η μετακίνηση της ακτογραμμής (*moving shoreline*) το κάθε κελί του κανάβου έχει διαστάσεις περίπου 1-2m και η διάρκεια του χρονικού βήματος κυμαίνεται από 0.05 ως 0.1 sec. Οι χαμηλότερες τιμές προτείνονται όταν συμπεριλαμβάνεται η μετακίνηση της ακτογραμμής.

Η περίοδος προθέρμανσης (*warm-up period*) αποτελεί μια περίοδο κατά την οποία το πρόγραμμα επεξεργάζεται τα εισερχόμενα από το χρήστη δεδομένα και χρησιμοποιείται για να μην υπάρξουν προβλήματα “blow up” στα πρώτα χρονικά βήματα. Το χρονικό αυτό διάστημα δε σχετίζεται με το διάστημα που απαιτείται για

τη μετάδοση των παραγόμενων κυματισμών σε ολόκληρη την περιοχή μελέτης (*Start-up period*). Στην παρούσα επεξεργασία χρησιμοποιήθηκαν κυματισμοί με περίοδο  $T=7\text{sec}$ .

### 4.3 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Οι παράμετροι προσομοίωσης που περιγράφονται στη συνέχεια, σχετίζονται με τις συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή μελέτης με σκοπό την καλύτερη δυνατή προσομοίωσή της και τη βελτιστοποίηση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων.

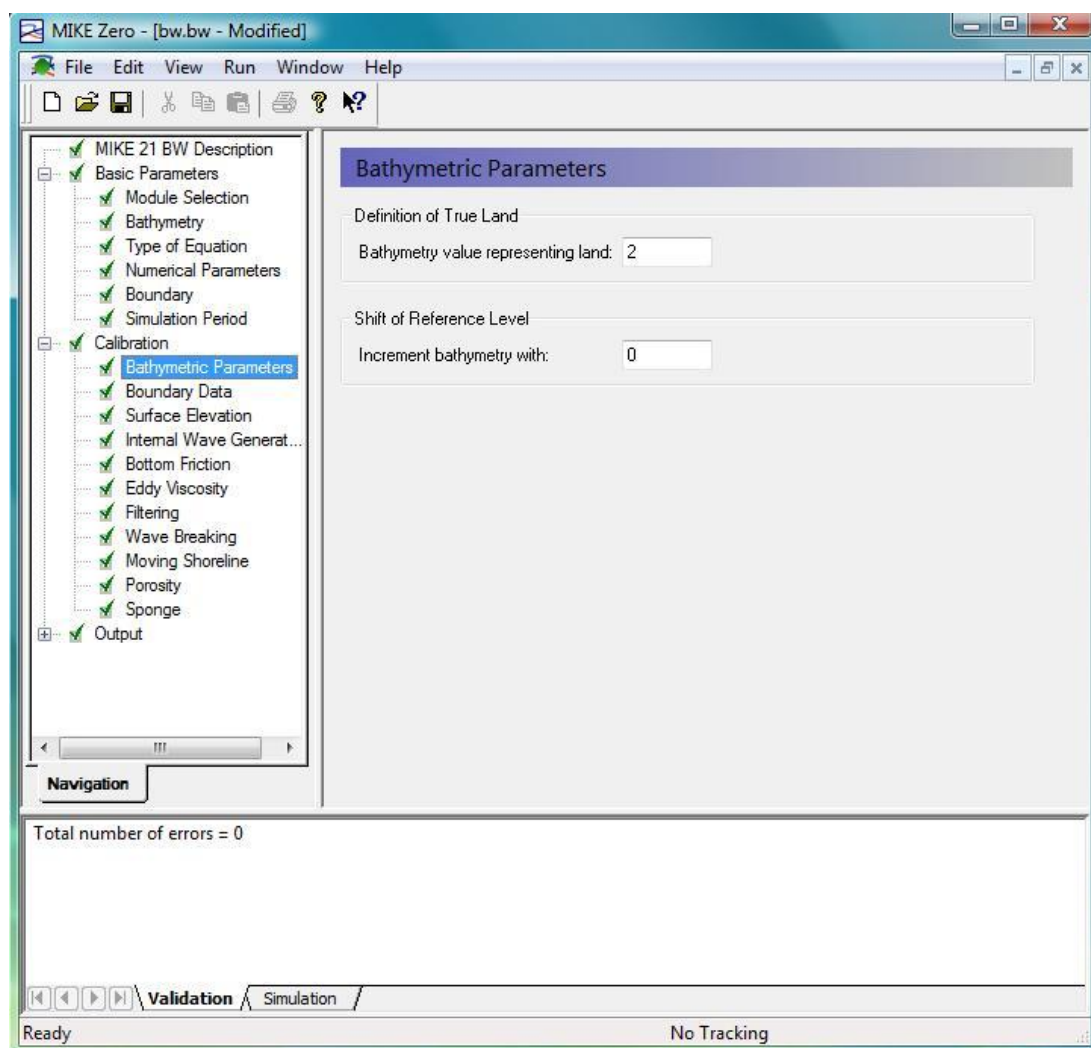
Αναλυτικά περιλαμβάνονται:

- Bathymetric Parameters (Παράμετροι Βαθυμετρίας)
- Boundary Data (Δεδομένα για τα όρια)
- Surface Elevation (Ανύψωση Επιφάνειας)
- Internal Wave Generation (Εσωτερική Παραγωγή Κύματος)
- Bottom Friction (Τριβή Πυθμένα)
- Eddy Viscosity (Ιξώδες Στροβίλου)
- Filtering (Φίλτρο)
- Wave Breaking (Θραύση Κύματος)
- Moving Shoreline (Μετακίνηση Ακτογραμμής)
- Porosity (Πορώδες)
- Sponge (Απορροφητική Ζώνη)

## Παράμετροι Βαθυμετρίας

Στο πρώτο αυτό βήμα δίνονται πληροφορίες που σχετίζονται με τη βαθυμετρία όπως ο καθορισμός των σημείων της ξηράς και η αλλαγή του επιπέδου αναφοράς για τα βάθη αν χρειάζεται.

Η τιμή της «πραγματικής» ξηράς (bathymetry value representing land) που εισάγεται είναι η ελάχιστη τιμή που χρησιμοποιείται για τα σημεία της ξηράς όταν γίνεται επεξεργασία της βαθυμετρίας. Για τους υπολογισμούς που κάνει το μοντέλο, οποιαδήποτε τιμή μεγαλύτερη από την παραπάνω θεωρείται ως ξηρά. Στη συγκεκριμένη επεξεργασία η τιμή που αντιπροσωπεύει την ξηρά είναι η τιμή 2.

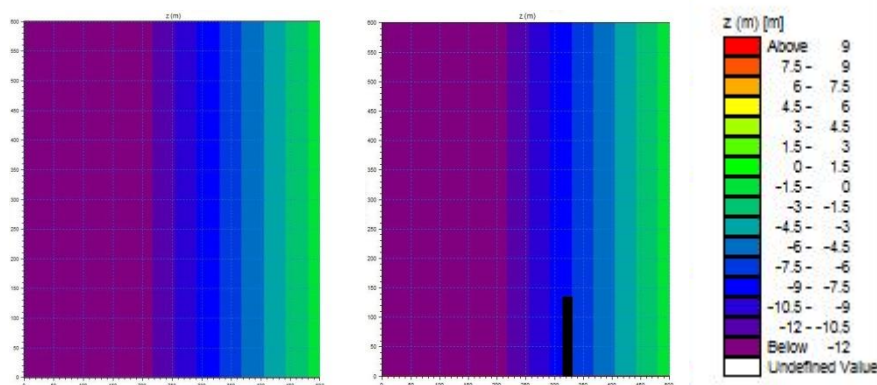


Σχήμα 4.3.1 – Παράμετροι Βαθυμετρίας (Bathymetric Parameters)

Η στάθμη των υδάτων σε ηρεμία θεωρείται συνήθως ως επίπεδο αναφοράς για τα διάφορα βάθη κατά τους υπολογισμούς Boussinesq. Υπάρχει ωστόσο η δυνατότητα να θεωρηθεί οποιαδήποτε βολική τιμή για το χρήστη κατά τη δημιουργία της βαθυμετρίας ως επίπεδο αναφοράς από το οποίο μετρούνται τα διάφορα βάθη, όπως η χαμηλότερη στάθμη λόγω της παλίρροιας, ή η τιμή της στάθμης που στατιστικά εμφανίζεται συχνότερα.

Αυτό επιτυγχάνεται αξιοποιώντας τη συγκεκριμένη επιλογή αλλαγής επιπέδου αναφοράς (shift of reference level), όπως και το πρόγραμμα στη συνέχεια κάνει τους απαραίτητους υπολογισμούς. Με την επιλογή αυτή είναι η δυνατή η επεξεργασία ενός εύρους περιπτώσεων (περιοχές μελέτης με έντονο το φαινόμενο της παλίρροιας) με διαφορετικές στάθμες ύδατος χωρίς να χρειάζεται να τροποποιείται κάθε φορά βαθυμετρία.

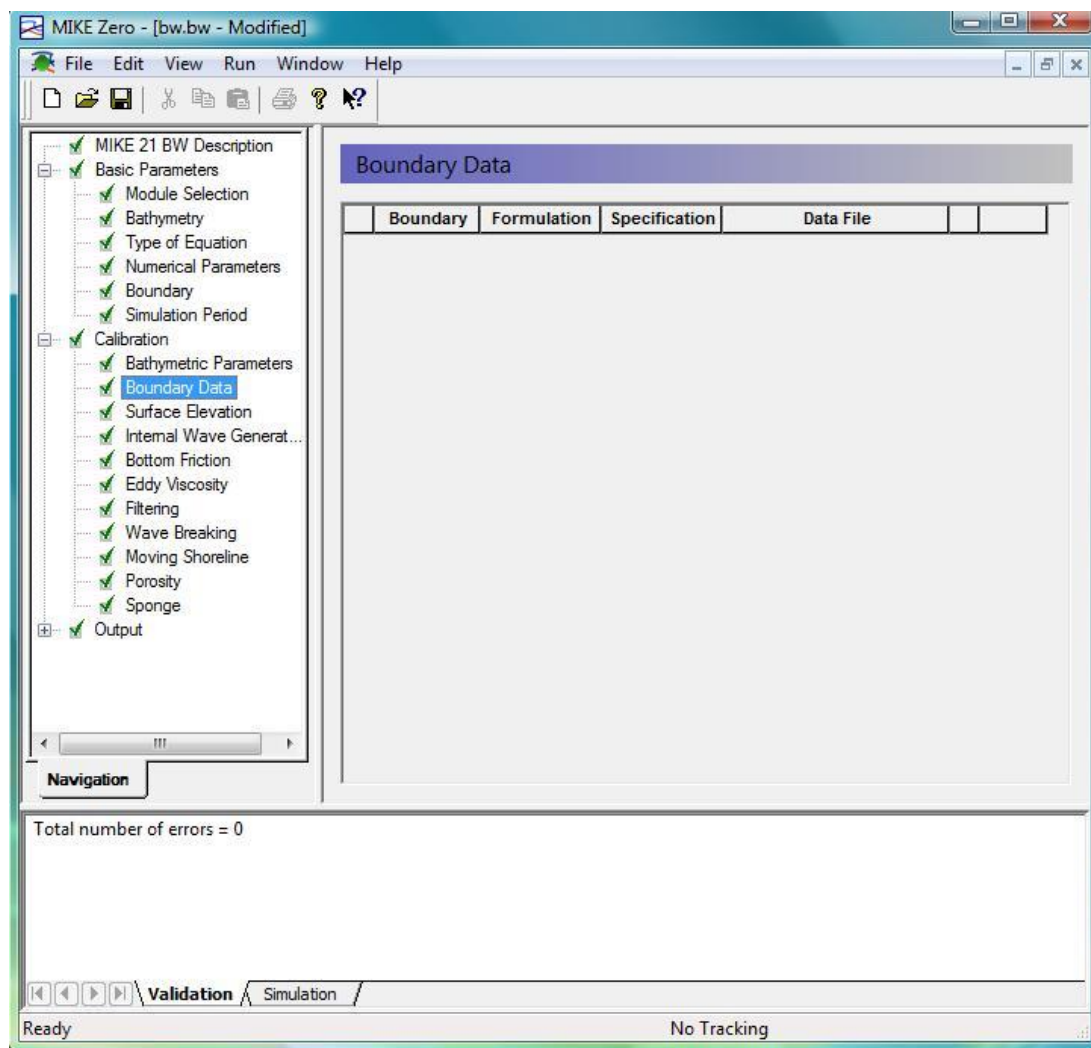
Για τις ανάγκες της παρούσας επεξεργασίας δεν επιλέχθηκε καμία αλλαγή του επιπέδου αναφοράς, αφού δεν λήφθηκαν υπόψη η επίδραση της παλίρροιας και άλλων παραμέτρων ικανών να μεταβάλουν σημαντικά τη στάθμη της επιφάνειας των υδάτων σε ηρεμία.



Σχήμα 4.3.2 – Βαθυμετρία (χωρίς και με bw)

#### Δεδομένα για τα όρια

Στο βήμα αυτό ο χρήστης δίνει προς επεξεργασία στο πρόγραμμα τις απαραίτητες πληροφορίες για τα όρια που έχει επιλέξει. Στη συγκεκριμένη επεξεργασία επιλέχθηκαν ανοιχτά όρια περιμετρικά της περιοχής μελέτης, χωρίς να απαιτούνται από το πρόγραμμα επιπλέον πληροφορίες.



Σχήμα 4.3.3 – Δεδομένα για τα όρια (Boundary Data)

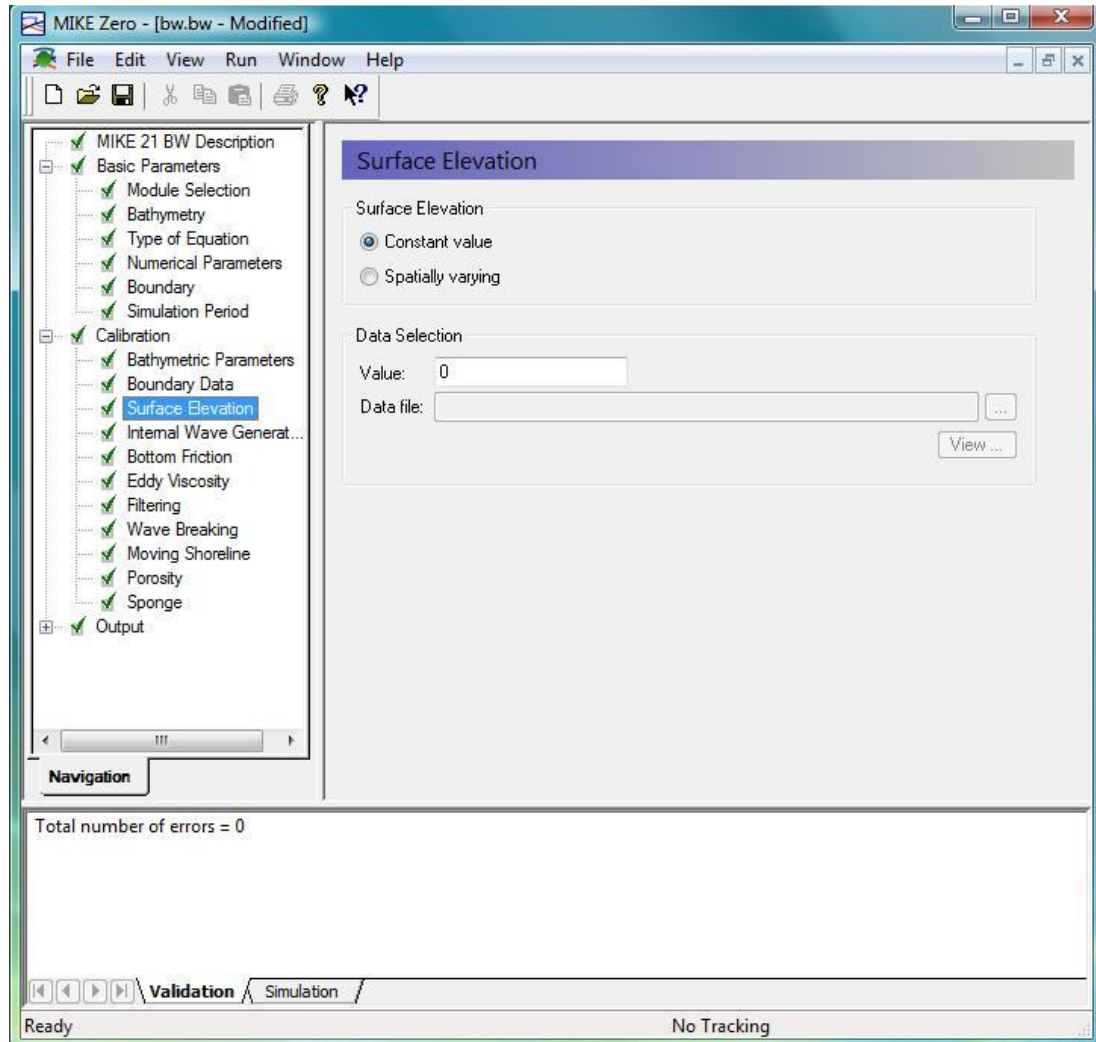
### Ανύψωση επιφάνειας

Η εφαρμογή αυτή χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις που προσομοιώνονται τυχαία και παροδικά φαινόμενα όπως η παραγωγή ενός μεγάλου κύματος λόγω σεισμού. Το επίπεδο αναφοράς για τους υπολογισμούς Boussinesq σύμφωνα με το οποίο δίνεται η ανύψωση της επιφάνειας είναι η στάθμη των υδάτων σε ηρεμία εάν δεν έχει τροποποιηθεί από το χρήστη (*shift of reference level*).

Η ανύψωση της αρχικής επιφάνειας γίνεται με δύο τρόπους: είτε με μία σταθερή τιμή (*constant value*) για ολόκληρη την περιοχή του μοντέλου, είτε



εισάγοντας στο πρόγραμμα έναν δισδιάστατο κανάβο, αντίστοιχο της βαθυμετρίας με μία τιμή για κάθε κελί (*spatially varying*).



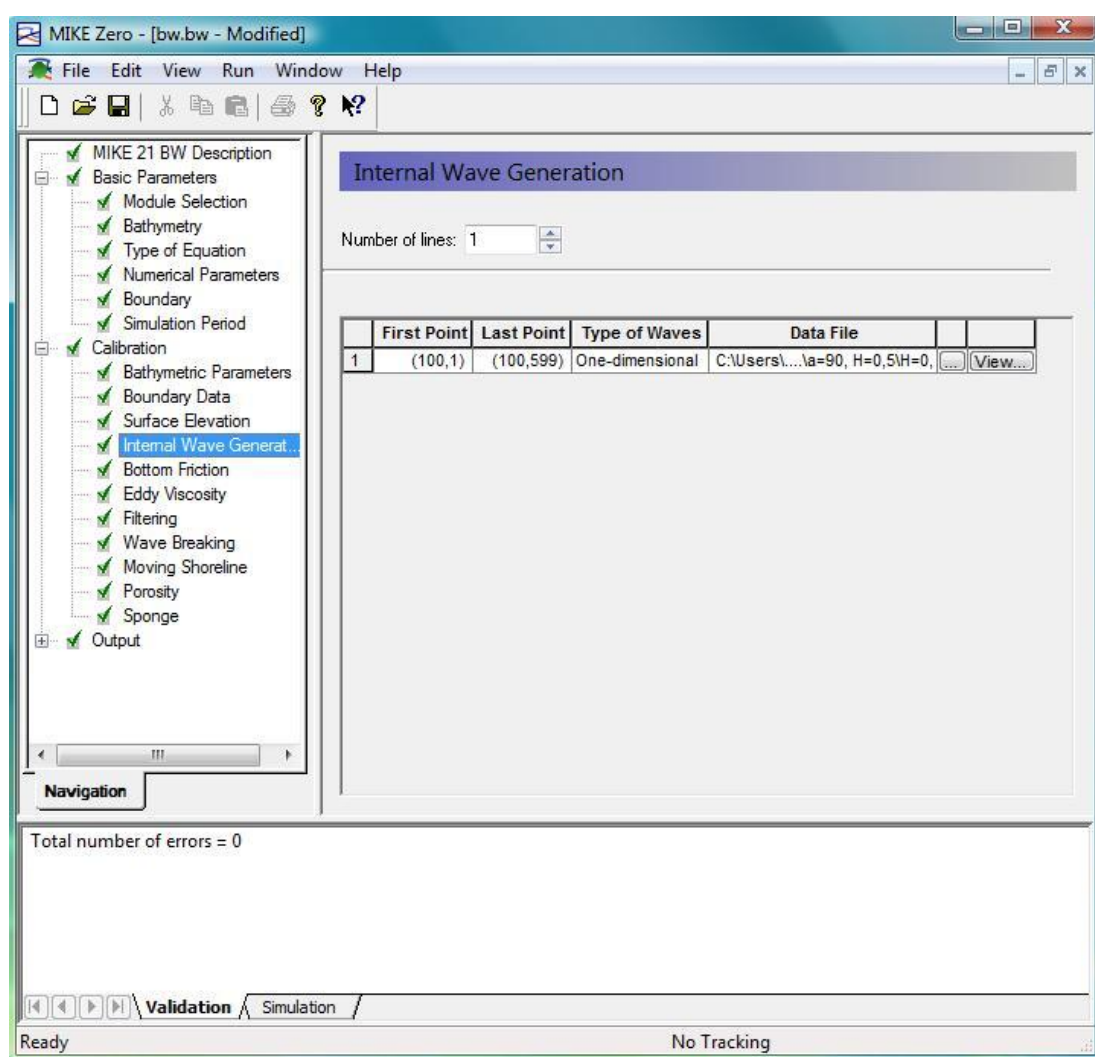
**Σχήμα 4.3.4** – Ανύψωση Επιφανείας (Surface Elevation)

Στη συγκεκριμένη επεξεργασία κάτι τέτοιο δεν ήταν ζητούμενο, οπότε επιλέχθηκε σταθερή και μηδενική τιμή ανύψωσης επιφάνειας για το σύνολο του κανάβου.



### Εσωτερική παραγωγή κύματος

Στο βήμα αυτό, ο χρήστης καλείται να δώσει τα απαραίτητα δεδομένα για το κύμα που θα χρησιμοποιήσει το πρόγραμμα κατά τους υπολογισμούς. Ένα από τα πλεονεκτήματα της παραγωγής κυματισμών στο εσωτερικό της περιοχής μελέτης, είναι η δυνατότητα τοποθέτησης “sponge layer” πίσω από τους κυματιστήρες ώστε να απορροφούν τη διαφεύγουσα κυματική ενέργεια. Η λειτουργία του “sponge layer” περιγράφεται στη συνέχεια.



Σχήμα 4.3.5 – Εσωτερική παραγωγή κύματος (Internal Wave Generation)

Για την παραγωγή των κυμάτων χρησιμοποιήθηκε η εφαρμογή MIKE 21 Toolbox όπου επιλέξαμε την παραγωγή μονοχρωματικών κυμάτων αντίστοιχων με του φυσικού προσομοιώματος. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή δίνονται πληροφορίες για τα κύματα όπως το ύψος και η περίοδος κύματος, το βάθος στην περιοχή της κυματογεννήτριας καθώς και τον αριθμό και τη διάρκεια των χρονικών βημάτων που έχουν επιλεγεί για την επεξεργασία. Το κύμα που παράγεται σε κάθε περίπτωση αποθηκεύεται σε ξεχωριστό φάκελο χωρίς να χρειάζεται να δημιουργείται από την αρχή κάθε φορά.

### Τριβή πυθμένα

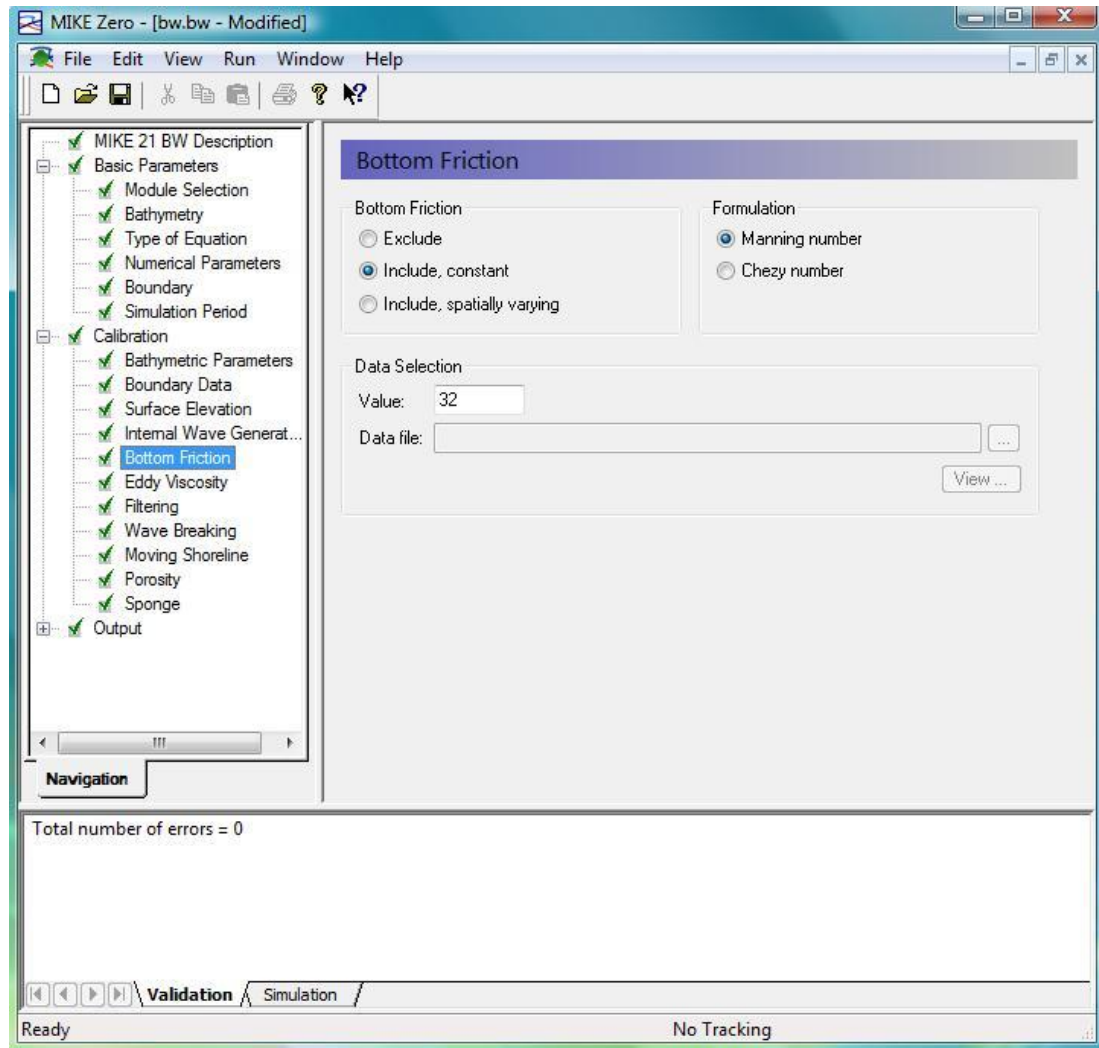
Συνήθως το αποτέλεσμα της τριβής του πυθμένα σε ανεμογενή κύματα περιόδου μικρότερης από 2 sec, όπως είναι τα κύματα που αναπτύσσονται στο εσωτερικό μιας τυπικής λιμενολεκάνης, είναι ασήμαντο. Κατά συνέπεια παραλείπεται για τέτοιου είδους κυματικά φαινόμενα. Για την προσομοίωση μεγαλύτερων κυμάτων η επίδραση της τριβής του πυθμένα θα πρέπει να συμπεριλαμβάνεται στους υπολογισμούς.

Στην περίπτωση που η τριβή πυθμένα συμπεριληφθεί στους υπολογισμούς, τότε θα πρέπει αρχικά να προσδιοριστεί αν αυτή παραμένει σταθερή (*constant*) ή διαφοροποιείται στα διάφορα κελιά του τετραγωνικού κανάβου που αναπαριστά τη βαθυμετρία της περιοχής μελέτης (*spatially varying*). Στη συνέχεια θα πρέπει να επιλεγεί η τάξη μεγέθους της τριβής χρησιμοποιώντας είτε τον αριθμό Chezy (C) είτε τον αριθμό Manning (M):

$$M = \frac{C}{H^{1/6}} \quad (1)$$

όπου σύμφωνα με την εξίσωση, C ο αριθμός Chezy, M ο αριθμός Manning και H το ύψος κύματος.

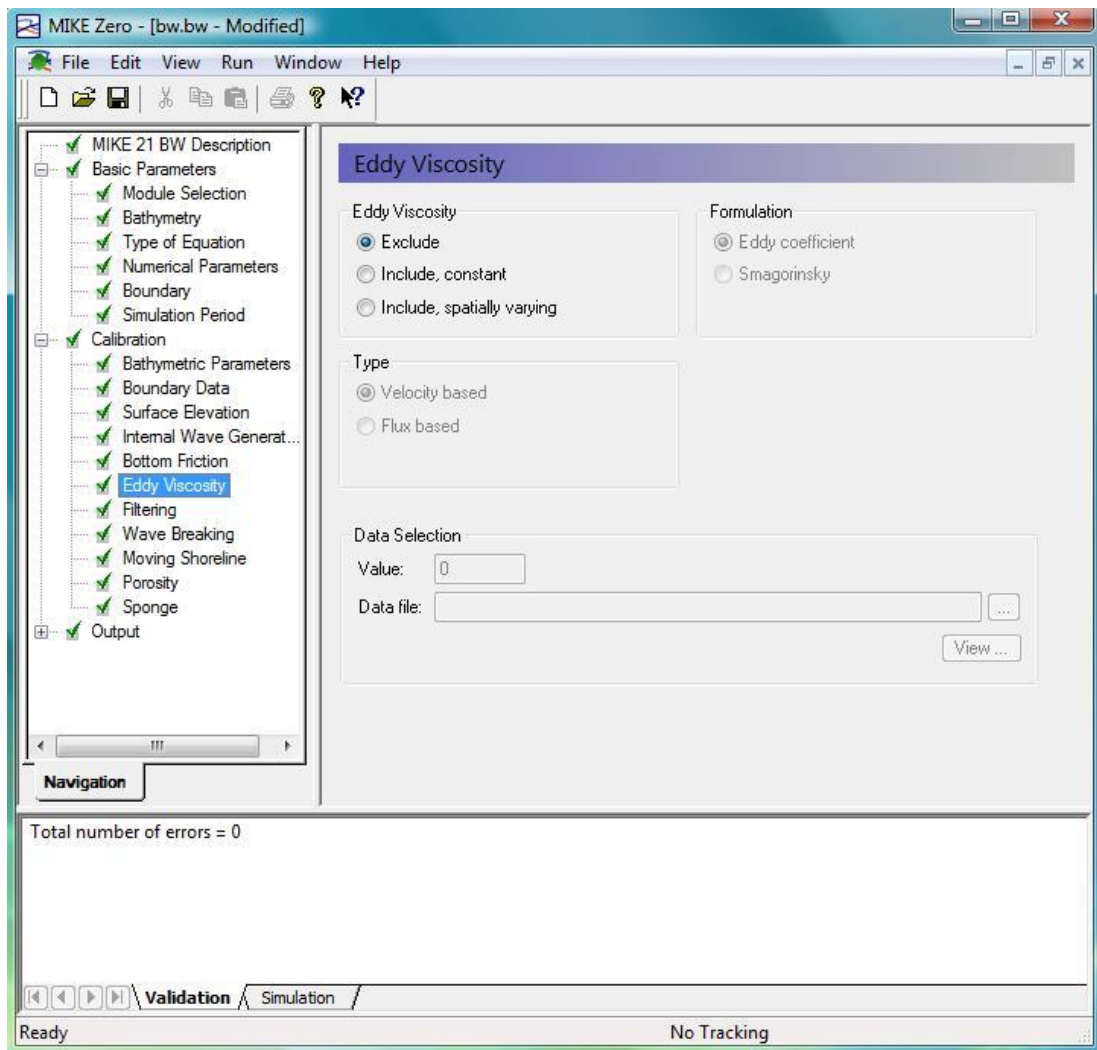
Στην συγκεκριμένη επεξεργασία επιλέχθηκε σε όλες τις αναλύσεις, ο όρος της τριβής του πυθμένα να συμπεριλαμβάνεται στην εξίσωση της ορμής, με αριθμό Manning σταθερό σε όλο το χωριό πεδίο και ίσο με 32.



Σχήμα 4.3.6 – Τριβή πυθμένα (Bottom Friction)

## Ιξώδες στροβίλου

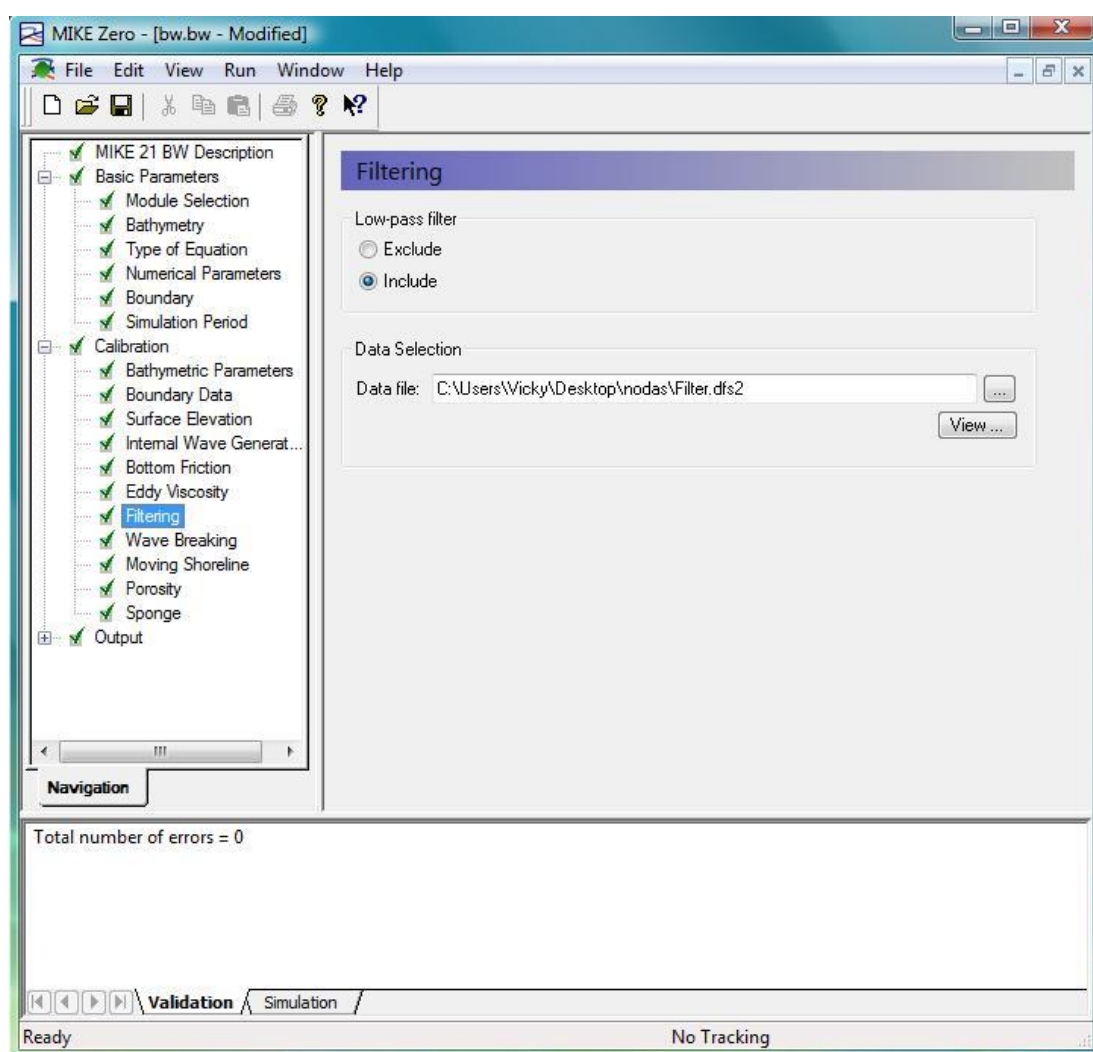
Η επιλογή αυτή χρησιμοποιείται για να περιγράψει περίπλοκες διαδικασίες αλληλεπίδρασης των κυμάτων εξαιτίας διαφόρων παραμέτρων όπως η τριβή του πυθμένα. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εισάγει είτε σταθερή είτε μεταβαλλόμενη τιμή σε όλη την έκταση του κανάβου. Στην παρούσα επεξεργασία οι όροι του ιξώδους στροβίλου δεν επηρεάζουν την περιοχή ενδιαφέροντος, συνεπώς παραλείπονται.



Σχήμα 4.3.7 – Ιξώδες στροβίλου (Eddy Viscosity)

## Φίλτρο

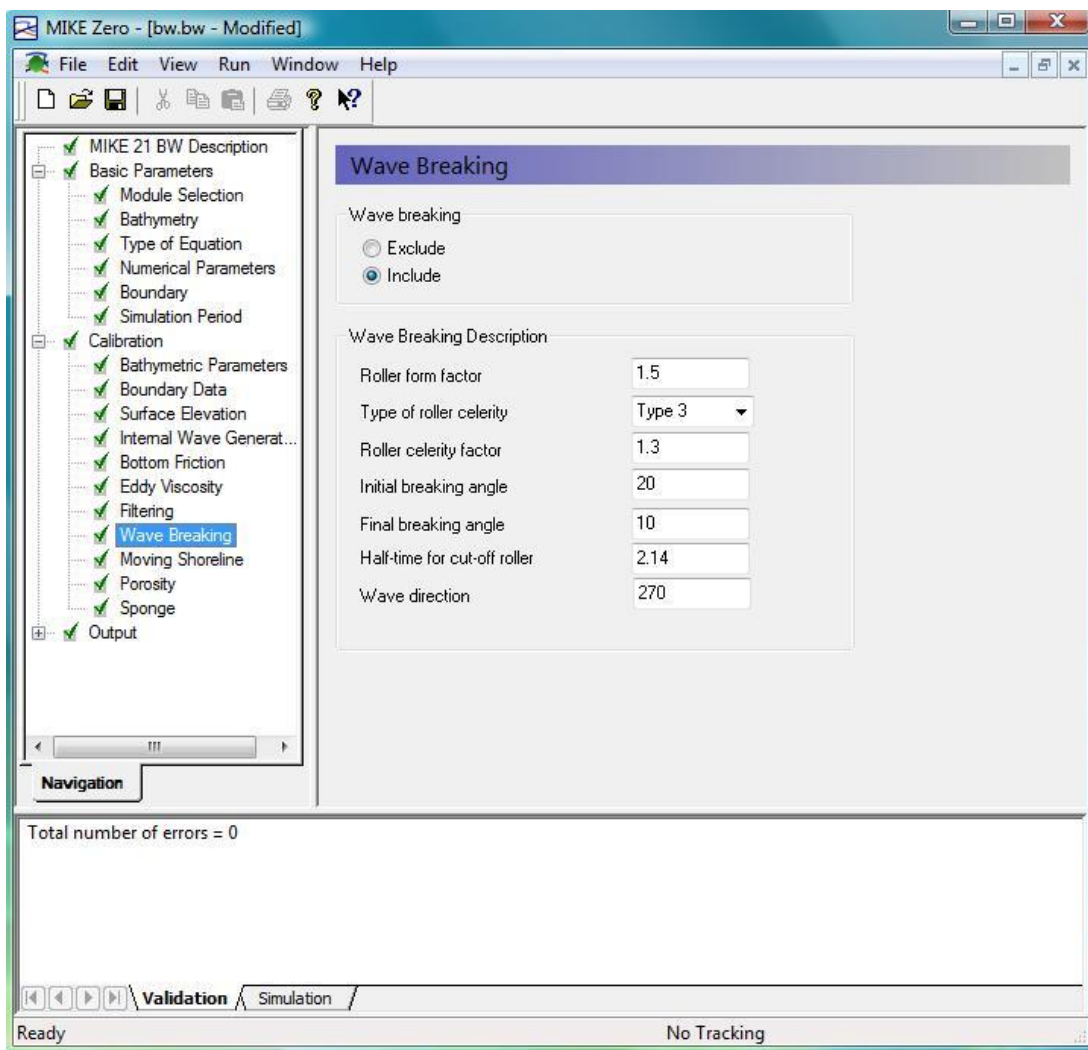
Η συγκεκριμένη επιλογή αντιμετωπίζει προβλήματα που εμφανίζονται συχνά όταν στους υπολογισμούς συμπεριλαμβάνεται η θραύση του κύματος και η μετακίνηση της ακτογραμμής. Στη συγκεκριμένη επεξεργασία η επιλογή χρησιμοποιήθηκε σε μια μικρή περιοχή κοντά στην ακτογραμμή για την αποφυγή σφαλμάτων που εμφανίζονταν κατά την επίλυση των αριθμητικών εξισώσεων από το μοντέλο.



Σχήμα 4.3.8 – Φίλτρο (Filtering)

## Θραύση κύματος

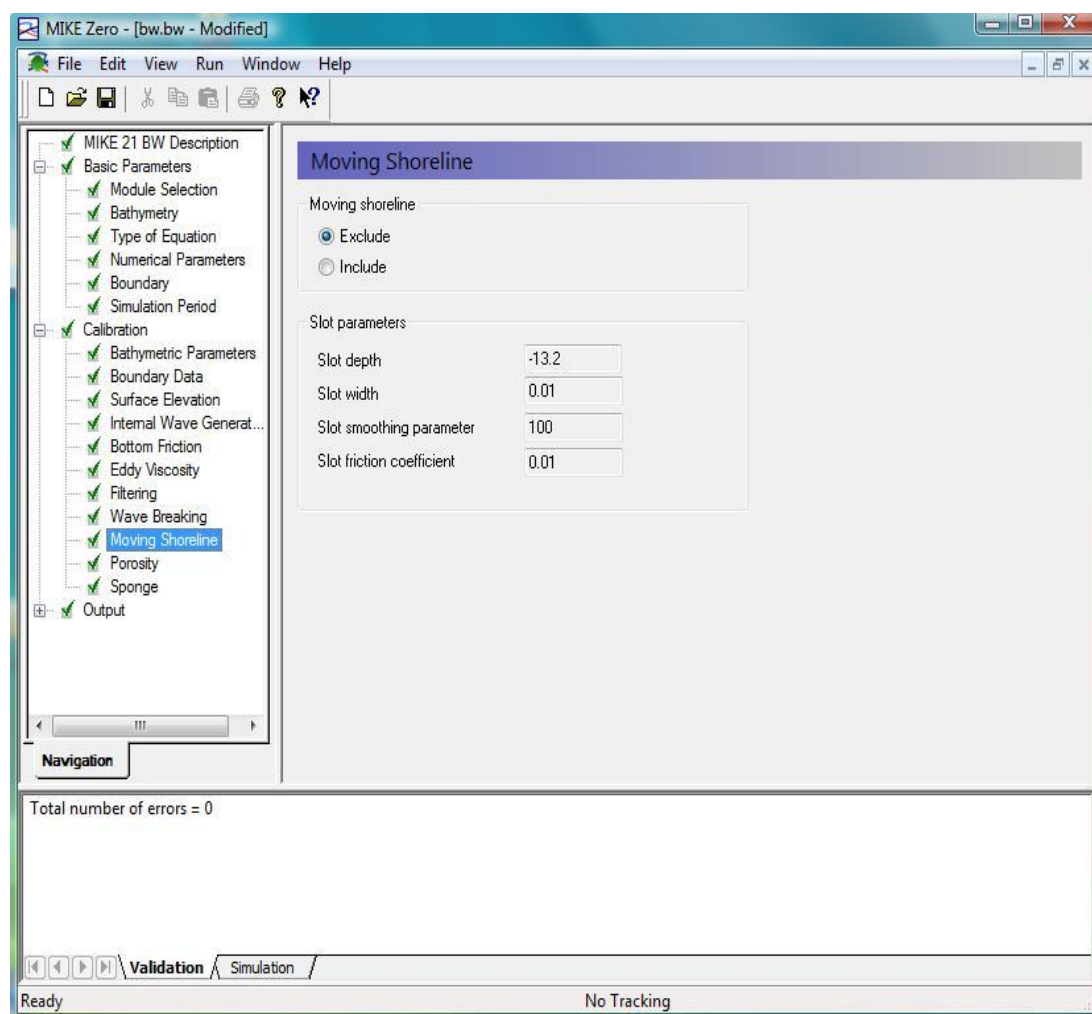
Στη συγκεκριμένη επιλογή ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εισάγει δεδομένα σχετικά με το φαινόμενο της θραύσης των κυματισμών στην περιοχή της μελέτης. Στην παρούσα επεξεργασία λήφθηκε υπόψη η θραύση του κυματισμού για να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή προσομοίωση της απομείωσης της κυματικής ενέργειας που συμβαίνει στην περιοχή της ζώνης θραύσης κοντά στην ακτογραμμή.



Σχήμα 4.3.9 – Θραύση κύματος (Wave Breaking)

## Μετακίνηση ακτογραμμής

Η εφαρμογή αυτή χρησιμοποιείται στην περίπτωση που το ίζημα της ακτής αντικαθίσταται με άλλο μεγαλύτερου πορώδους με αποτέλεσμα η επιφάνεια της θάλασσας και συνεπώς ο βυθός να μετατοπίζονται προς την ξηρά. Σχετίζεται κυρίως με ακτομηχανικά έργα και μελέτη φαινομένων πλησιέστερα στην ακτή. Στην παρούσα επεξεργασία μελετά κατά κύριο λόγο την ενίσχυση της κυματικής δράσης μετά την κατασκευή των λιμενικών έργων και συνεπώς η εφαρμογή αυτή παραλείπεται.

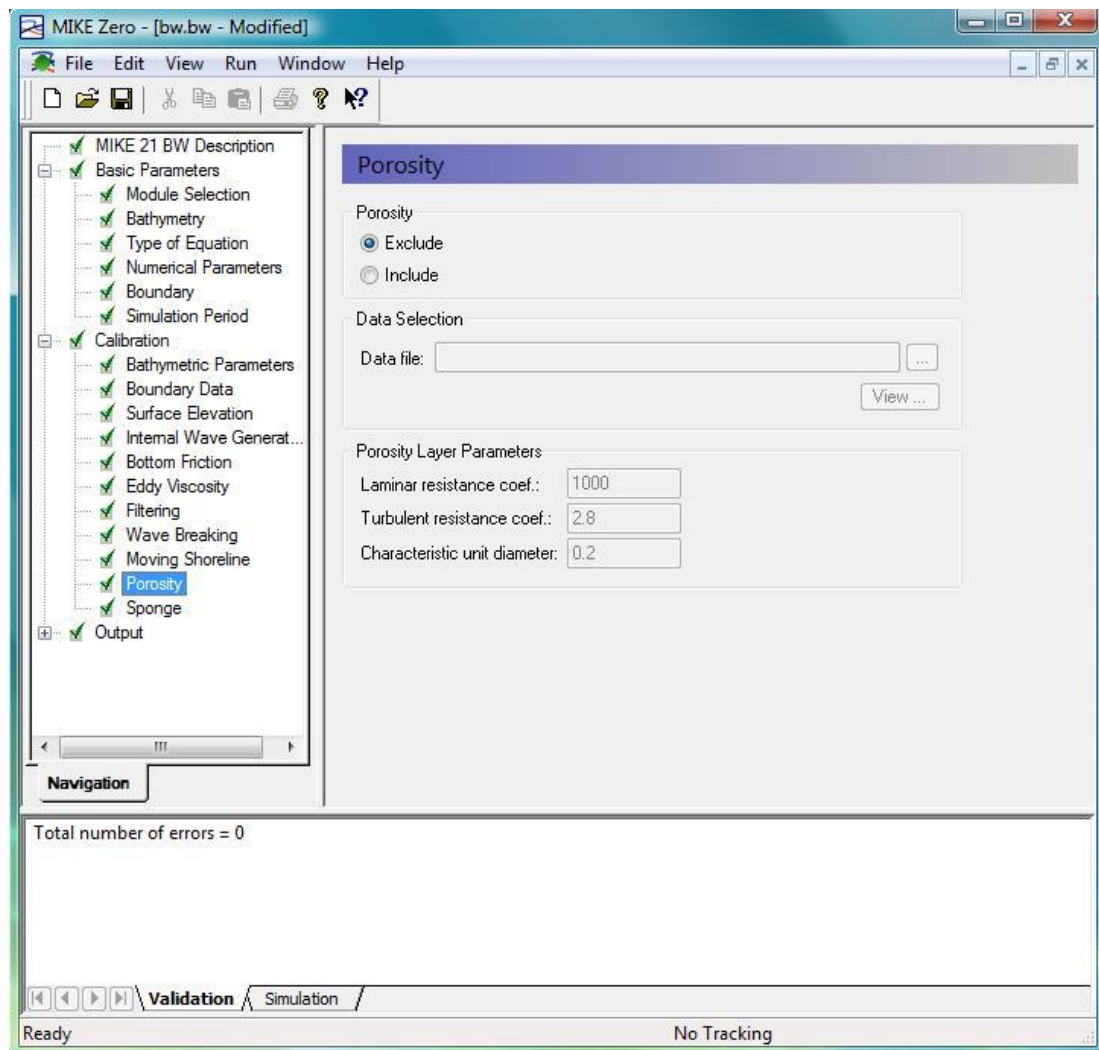


Σχήμα 4.3.10 – Μετακίνηση ακτογραμμής (Moving Shoreline)



## Πορώδες

Μέσα από τη συγκεκριμένη εφαρμογή δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη του προγράμματος MIKE 21 BW να προσομοιώσει τη μερική ανάκλαση, την απορρόφηση και τη μετάδοση της κυματικής ενέργειας μέσα από πορώδεις διατάξεις όπως είναι οι κυματοθραύστες.

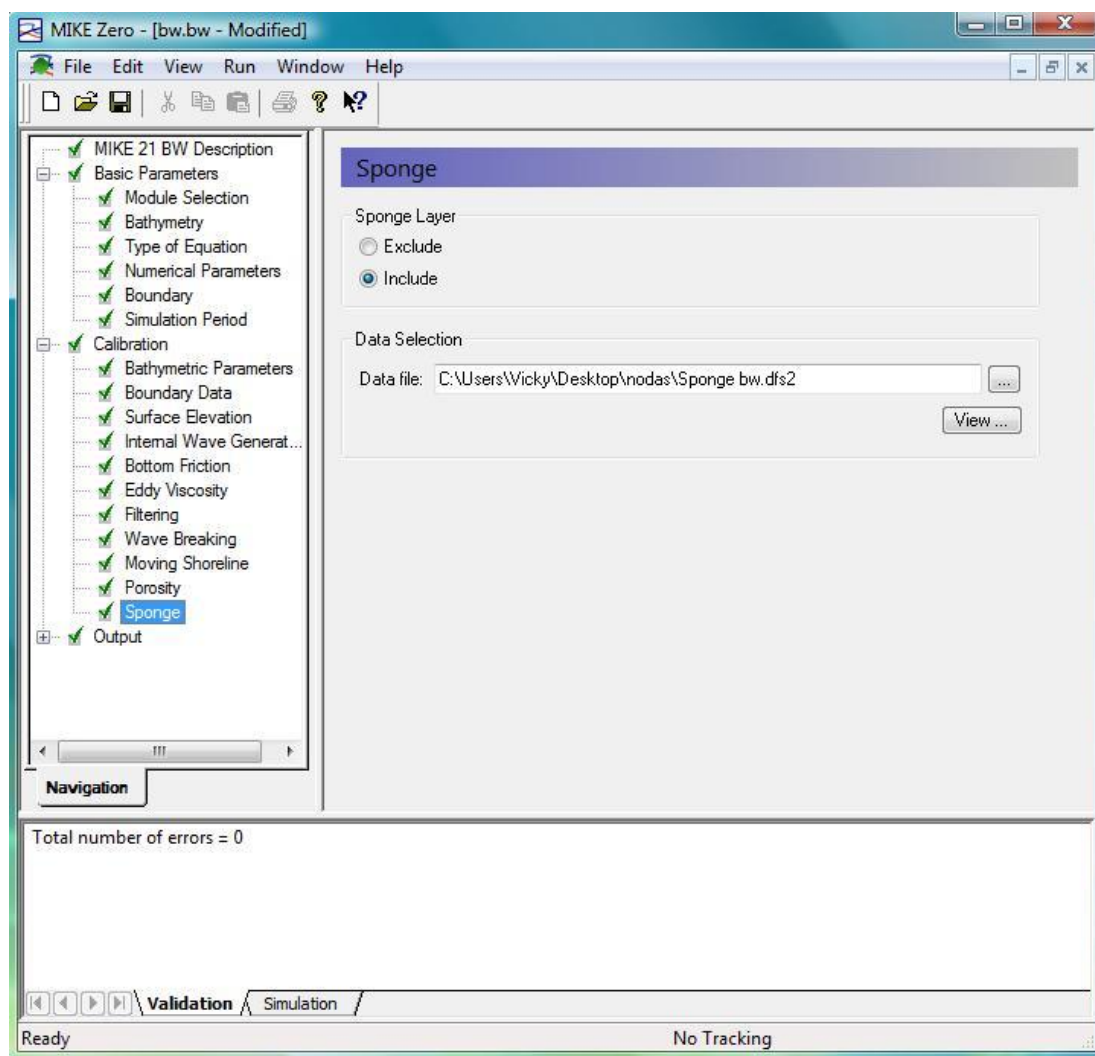


Σχήμα 4.3.11 – Πορώδες (Porosity)



### Απορροφητική ζώνη

Η συγκεκριμένη εφαρμογή δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να δημιουργήσει ζώνες όπου η εισερχόμενη κυματική ενέργεια απορροφάται, στην περίπτωση όπου η ανάκλαση δεν είναι επιθυμητή. Τέτοιες ζώνες μπορεί να είναι στα όρια της περιοχής μελέτης όπου ζητούμενο είναι οι εξερχόμενοι κυματισμοί να μην ανακλώνται επηρεάζοντας τις επικρατούσες κυματικές συνθήκες.



Σχήμα 4.3.12 – Απορροφητική ζώνη (Sponge)

Η λειτουργία του “sponge layer” στηρίζεται στη δημιουργία ενός κανάβου πανομοιότυπου με αυτόν της βαθυμετρίας όπου όλες οι τιμές των κελιών εξισώνονται

με τη μονάδα, εκτός από τις ζώνες κελιών στα οποία είναι επιθυμητή η απορρόφηση της κυματικής ενέργειας και την περιοχή της ξηράς όπου λαμβάνουν τιμές μεγαλύτερες της μονάδας. Στα κελιά αυτά το μετρημένο ύψος κύματος διαιρείται με την τιμή του κελιού στο sponge layer με αποτελέσματα να επιτυγχάνεται απομείωση της κυματικής δράσης.

Για τη δημιουργία ενός “sponge layer” χρησιμοποιείται το MIKE 21 Toolbox όπου εισάγεται το αρχείο της βαθυμετρίας και στη συνέχεια το πρόγραμμα δημιουργεί τον κানাβο. Ωστόσο ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να τροποποιήσει τις τιμές των κελιών ανάλογα με την ιδιαιτερότητα της περιοχής μελέτης και τα επιθυμητά εξαγόμενα αποτελέσματα.

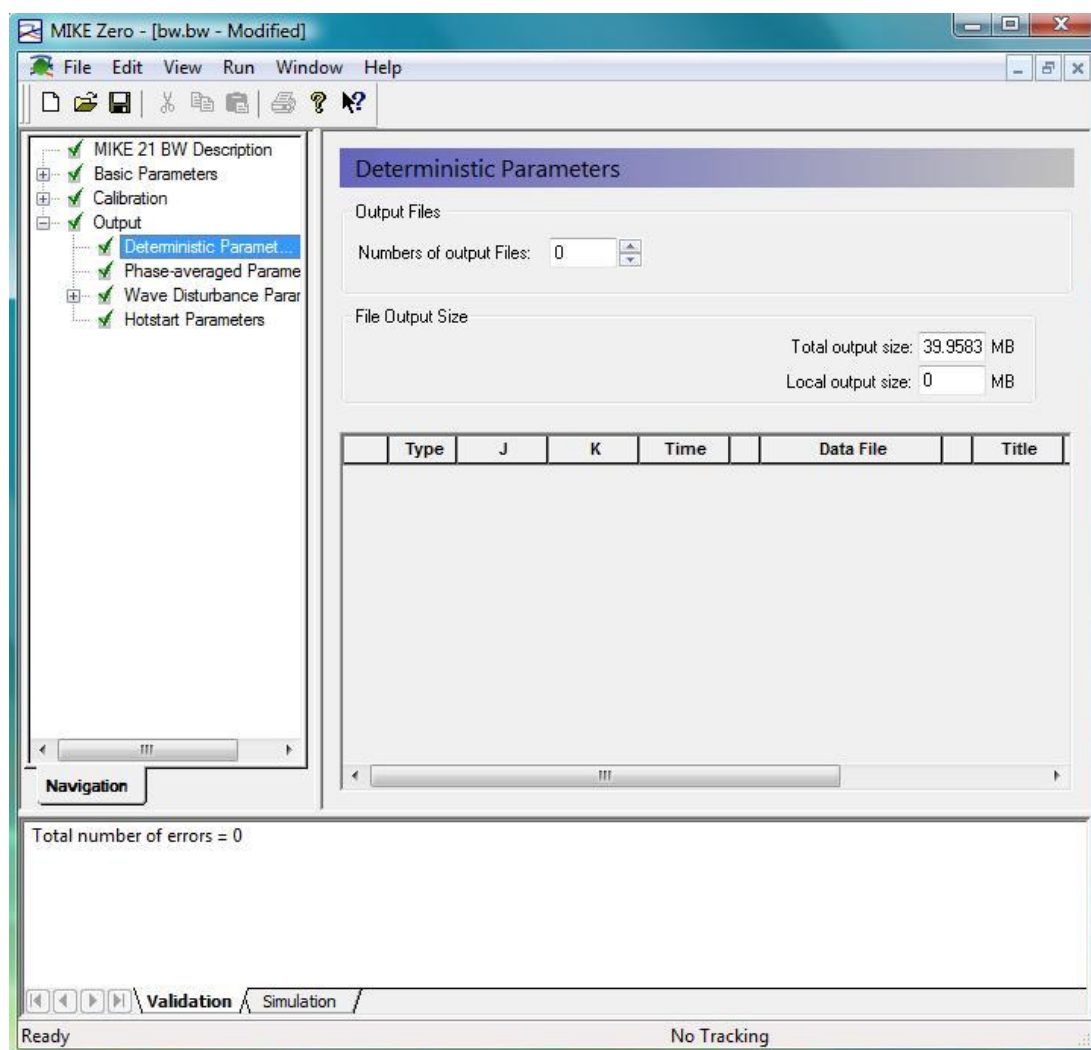
#### **4.4 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΕΞΑΓΟΜΕΝΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ**

Το μαθηματικό μοντέλο MIKE21 BW διαθέτει ένα εύρος από αποτελέσματα που μπορούν να περιγράψουν με μεγάλη ακρίβεια μια σειρά από κυματικά φαινόμενα στην παράκτια ζώνη και χωρίζονται σε 4 κύριες ενότητες:

- Deterministic parameters
- Phase – averaged parameters
- Wave disturbance parameters
- Hot start parameters

Για τις ανάγκες της παρούσας επεξεργασίας υπολογίστηκαν οι παράμετροι που περιλαμβάνονται στις δύο πρώτες ενότητες και οι οποίες αναλύονται στη συνέχεια:

## Deterministic Parameters



Σχήμα 4.4.1 – Deterministic parameters

Στην πρώτη ενότητα ο χρήστης επιλέγει αρχικά τον αριθμό των εξαγόμενων αρχείων (*number of output files*) που θα δημιουργηθούν κατά την επεξεργασία του αριθμητικού μοντέλου. Στη συνέχεια επιλέγει τον τύπο (*type*) του αρχείου ανάλογα με το εύρος των αποτελεσμάτων που επιθυμεί:

- Τύπος 0 (type 0): Αν τα εξαγόμενα αποτελέσματα αφορούν σημείο του κανάβου. Το αρχείο που δημιουργείται είναι της μορφής .dfs0.

- Τύπος 1 (type 1): Αν τα εξαγόμενα αποτελέσματα δίνονται κατά μήκος μιας γραμμής κελιών του κανάβου. Το αρχείο που δημιουργείται είναι της μορφής .dfs1.
- Τύπος 2 (type 2): Αν τα εξαγόμενα αποτελέσματα αφορούν μια δισδιάστατη περιοχή του κανάβου. Το αρχείο που δημιουργείται είναι της μορφής .dfs2.

Ο χρήστης πρέπει έπειτα να καθορίσει τις συντεταγμένες των κελιών για τα οποία επιθυμεί να έχει αποτελέσματα, τον αριθμό των χρονικών βημάτων στα οποία θα αποδίδει το πρόγραμμα τιμές, τον τόπο αποθήκευσης καθώς και το όνομα του αρχείου και τέλος τις εξαγόμενες παραμέτρους που θα υπολογιστούν. Οι εξαγόμενες παράμετροι που υπολογίζονται είναι οι εξής:

- Ανύψωση επιφάνειας – Surface Elevation

Αποτελεί μία από τις σημαντικότερες εξαγόμενες παραμέτρους και χρησιμοποιείται στις περισσότερες επεξεργασίες. Απεικονίζει τη μεταβολή της ελεύθερης επιφάνειας με το χρόνο η οποία βασίζεται στον υπολογισμό της στάθμης των υδάτων σε κάθε χρονικό βήμα σε σχέση με τη βαθυμετρία και προσεγγίζει τη μορφή ημιτονοειδούς συνάρτησης.

- Στάθμη ύδατος – Water Level

Η συγκεκριμένη εφαρμογή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την παρουσίαση της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας στις τρεις διαστάσεις και δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να υπολογίζει τη στάθμη των υδάτων σε κάθε χρονική στιγμή.

- Ροή ενέργειας P, Q – P, Q Flux

Υπολογίζεται η ροή ενέργειας για τις δύο κάθετες διευθύνσεις του κανάβου x και y (Μονάδες SI:  $m^3/s/m$ ).

- Στάθμη ύδατος σε ηρεμία – Still Water Depth

Υπολογίζεται η στάθμη των υδάτων σε ηρεμία χωρίς την επίδραση των κυματισμών, η οποία ταυτίζεται πρακτικά με τα βάθη που δίνονται σε κάθε σημείο του κανάβου της βαθυμετρίας. Η συγκεκριμένη παράμετρος υπολογίζεται κυρίως σε εφαρμογές 1DH μοντέλων.

### **Phase - averaged Parameters**

Στη συγκεκριμένη ενότητα ο χρήστης επιλέγει αρχικά τον αριθμό των εξαγόμενων αρχείων που θα δημιουργηθούν κατά την επεξεργασία του αριθμητικού μοντέλου (*number of output files*). Στη συνέχεια ο χρήστης επιλέγει αν οι εξαγόμενες τιμές σε κάθε χρονικό βήμα θα ανανεώνονται σύμφωνα με τις τιμές του προηγούμενου βήματος (*cumulative statistics*) ή θα μηδενίζονται και θα υπολογίζονται σε κάθε χρονικό βήμα από την αρχή (*subseries statistics*). Επιλέγεται επίσης ο αριθμός των χρονικών βημάτων (*update interval*) στα οποία το πρόγραμμα θα ενημερώνει τις εξαγόμενες τιμές και θα τις αποδίδει στο χρήστη.

Καθορίζεται επίσης ο τύπος των εξαγόμενων αρχείων, οι συντεταγμένες των κελιών, το όνομα και ο τρόπος αποθήκευσης των αρχείων σύμφωνα με τα προηγούμενα. Οι εξαγόμενες παράμετροι που μπορούν να υπολογιστούν είναι οι εξής:

- Σημαντικό ύψος κύματος – Significant wave height

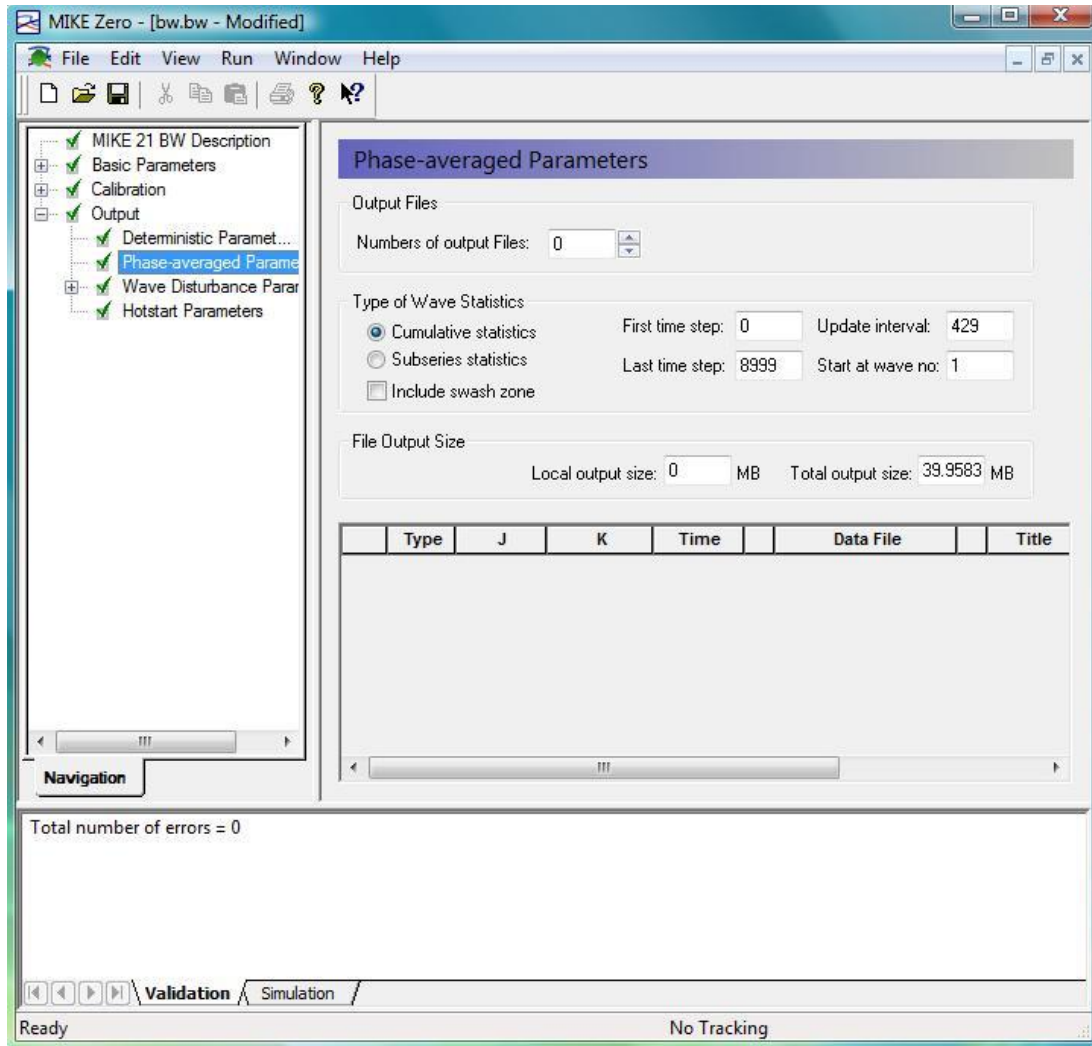
Το σημαντικό ύψος κύματος ( $H_{m0}$ ) προσδιορίζεται από τη σχέση από τη σχέση  $H_{m0}=4\sigma$ , όπου  $\sigma$  η τυπική απόκλιση της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας.

- Μέγιστο ύψος κύματος – Maximum wave height

Το μέγιστο ύψος κύματος ( $H_{max}$ ) είναι το μεγαλύτερο ύψος κύματος που μετρήθηκε στην περιοχή μελέτης κατά την επεξεργασία.

- Μέγιστη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας – Maximum surface elevation

Πρόκειται για τη μέγιστη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας ( $\eta_{max}$ ) που μετρήθηκε στο χρονικό διάστημα της επεξεργασίας.



Σχήμα 4.4.2 – Phase-averaged parameters

- Ελάχιστη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας – Minimum surface elevation

Πρόκειται για την ελάχιστη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας ( $\eta_{\min}$ ) που μετρήθηκε στο χρονικό διάστημα της επεξεργασίας.

- Μέση ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας – Mean surface elevation

Πρόκειται για την μέση ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας ( $\eta_{\text{mean}}$ ) που μετρήθηκε στο χρονικό διάστημα της επεξεργασίας.

- Μέση ροή ενέργειας P, Q – Mean flux P, Q

Υπολογίζεται η μέση τιμή της παροχής στις διευθύνσεις x και y αντίστοιχα

### Wave Disturbance Parameters

Στη συγκεκριμένη ενότητα μπορούν να υπολογιστούν χρήσιμα δεδομένα για την κυματική διαταραχή στο εσωτερικό προστατευόμενων παράκτιων έργων όπως τα εξής:

- Σημαντικό ύψος κύματος – Significant wave height

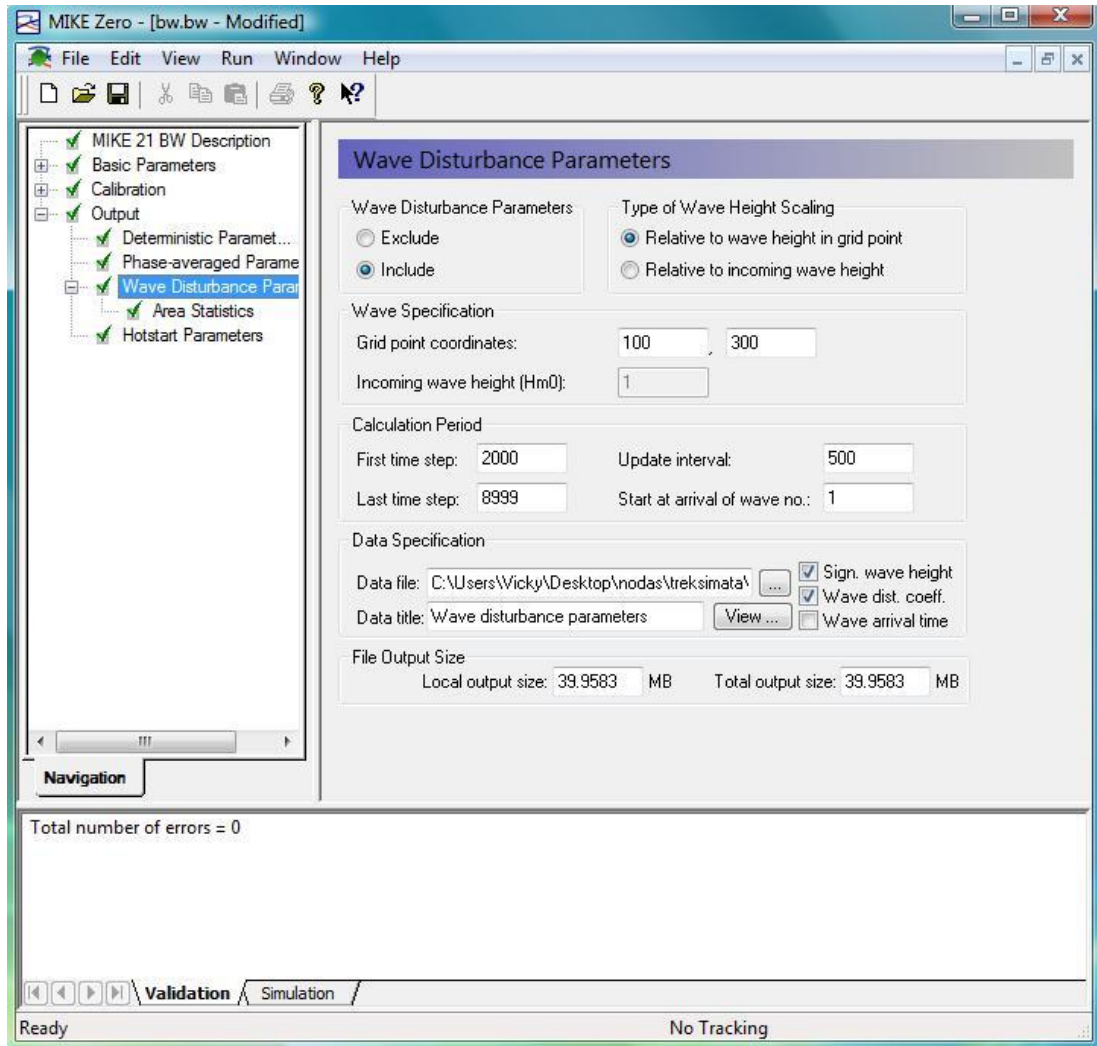
Το σημαντικό ύψος κύματος ( $H_{m0}$ ) προσδιορίζεται από τη σχέση από τη σχέση  $H_{m0}=4\sigma$ , όπου  $\sigma$  η τυπική απόκλιση της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας.

- Συντελεστής κυματικής διαταραχής – Wave disturbance coefficient

Πρόκειται για το λόγο του σημαντικού ύψους κύματος σε δοσμένο σημείο στην προστατευόμενη από τους κυματισμούς περιοχή ενός παράκτιου έργου, προς το σημαντικό ύψος του εισερχόμενου κυματισμού.

- Χρόνος άφιξης κύματος – Wave arrival time

Πρόκειται για το χρόνο που απαιτείται για να φθάσει ένα κύμα από ένα σημείο του κανάβου σε κάποιο άλλο.



Σχήμα 4.4.3 – Wave disturbance parameters

Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να προσδιορίσει το σημαντικό ύψος του εισερχόμενου κυματισμού είτε απευθείας (*incoming wave height*), είτε προσδιορίζοντας τις συντεταγμένες του κελιού από το οποίο λαμβάνεται το σημαντικό ύψος του εισερχόμενου κυματισμού (*grid point coordinates*). Επιλέγεται επίσης το χρονικό βήμα στο οποίο το πρόγραμμα αποδίδει στο χρήστη τις ζητούμενες εξαγόμενες τιμές.

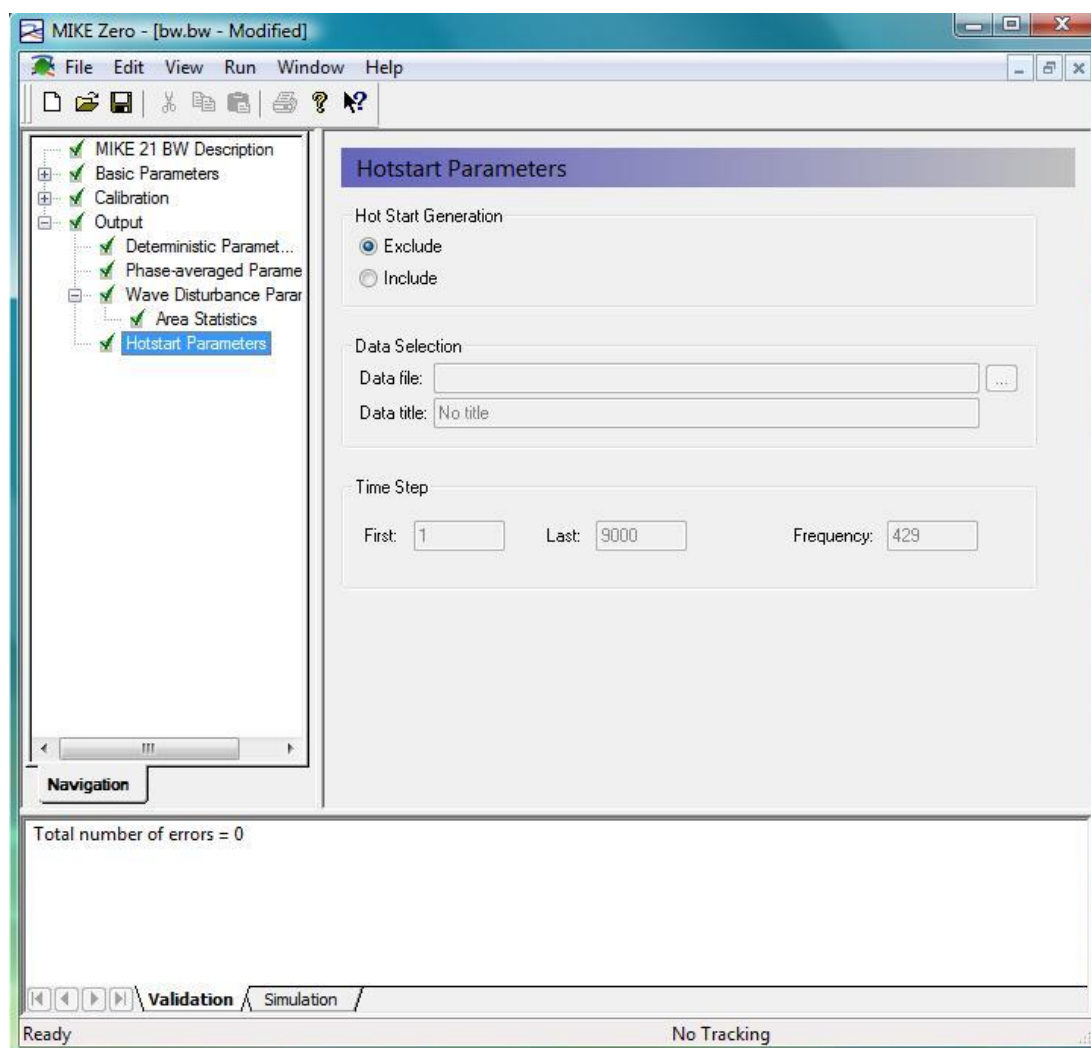
Στην παρούσα έρευνα επιλέχθηκαν ως δεδομένα εξόδου τα ύψη του κυματισμού σε όλα τα κελιά του κανάβου και το κανονικοποιημένο ύψος κύματος στα κελιά αυτά.



## Hot Start Parameters

Η συγκεκριμένη ενότητα επιτρέπει στο χρήστη να εκκινήσει μια επεξεργασία σε συνέχεια μιας άλλης επεξεργασίας που έχει προηγηθεί. Για το σκοπό αυτό, οι πληροφορίες της τελευταίας επεξεργασίας πρέπει να αποθηκεύονται σε φάκελο δεδομένων (*hot data file*).

Στο συγκεκριμένο φάκελο περιλαμβάνονται πληροφορίες σχετικά με τη βαθυμετρία, την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας, τις διαστάσεις του κανάβου, τα χρονικά βήματα κ.ά. που χρησιμοποιούνται απευθείας από το πρόγραμμα χωρίς να μπορούν να τροποποιηθούν. Στην παρούσα επεξεργασία η συγκεκριμένη ενότητα δε χρησιμοποιήθηκε.



Σχήμα 4.4.4 – Hot start parameters

# *ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5*

*Αποτελέσματα - Σχολιασμός*

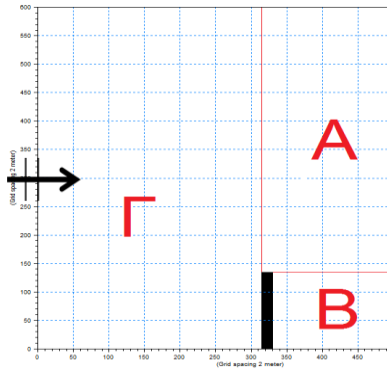
## 5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται αρχικά τα αποτελέσματα καθώς και η επεξεργασία των αποτελεσμάτων της διερεύνησης της εντατικοποίησης των κυματικών μεγεθών κατάντη του κυματοθραύστη μέσω του μοντέλου BW (MIKE 21 BW, 2005).

Πιο συγκεκριμένα με όσα αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 4 για τον καθορισμό των βασικών παραμέτρων (§4.2) και των παραμέτρων προσομοίωσης (§4.3) εξετάστηκαν η μεταβολή του κυματικού πεδίου στην περιοχή ημιάπειρου κυματοθραύστη για κανονικούς (regular waves) και πραγματικούς (irregular waves) κυματισμούς, συναρτήσει της μεταβολής του ύψους κύματος ( $H$ ), της γωνίας πρόσπτωσης ( $\alpha$ ), καθώς επίσης και της κατευθυντικότητας ( $\theta$ ) των κυματισμών, όπως φαίνεται αναλυτικά στον Πίνακα 5.1.1.

Στη συνέχεια, στην §5.2 και για τον έλεγχο των αρχικών και οριακών συνθηκών (π.χ. αποφυγή ανακλάσεων, απορροφητικότητα κυματοθραύστη) που εφαρμόστηκαν στο μοντέλο, παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα από τις διαφορετικές κυματικές συνθήκες που εξετάστηκαν σε ολόκληρο τον κάρναβο και για κάθε σημείο της βαθυμετρίας τα ύψη κύματος ( $H$ ) με την παρουσία του ημιάπειρου κυματοθραύστη ( $H_{bw}$ ).

Τέλος, στην §5.3 και προκειμένου να υπάρχει άμεση σύγκριση της επίδρασης του κυματοθραύστη στη μεταβολή του κυματικού πεδίου στην περιοχή κατάντη του κυματοθραύστη και εκτός της σκιάς του για όλες τις κυματικές συνθήκες που εξετάστηκαν, έγινε συνένωση των αποτελεσμάτων του ύψους κύματος των δύο μοντέλων (με και χωρίς την παρουσία του κυματοθραύστη) και μέσω του αδιάστατου συντελεστή  $H_{bw}/H$  οπτικοποίησή τους μετά από κατάλληλη επεξεργασία σε φύλλο επεξεργασίας του Microsoft Excel.



Σχήμα 5.1.1 – Περιοχές καννάβου

Πίνακας 5.1.1 – Συγκεντρωτικός πίνακας κυματικών σεναρίων

A/A	Είδος Κυμάτων	Περίοδος κύματος T (sec)	Ύψος κύματος H (m)	Γωνία πρόσπτωσης α (°)	Κατευθυντικότητα θ (°)
1	R	7	0.50	90	-
2	R			100	
3	R			120	
4	IR		0.50	90	10
5	IR			100	
6	IR			120	
7	IR		0.50	90	20
8	IR			100	
9	IR			120	
10	IR		0.50	90	30
11	IR			100	
12	IR			120	
13	R		1.2	90	-
14	R		3.0		-
15	IR		1.2		0
16	IR		1.2		10
17	IR		1.2		30
18	IR		1.2		0
19	IR		1.2		10
20	IR		1.2		30

## 5.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΧΩΡΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΤΟΥ ΎΨΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΗ

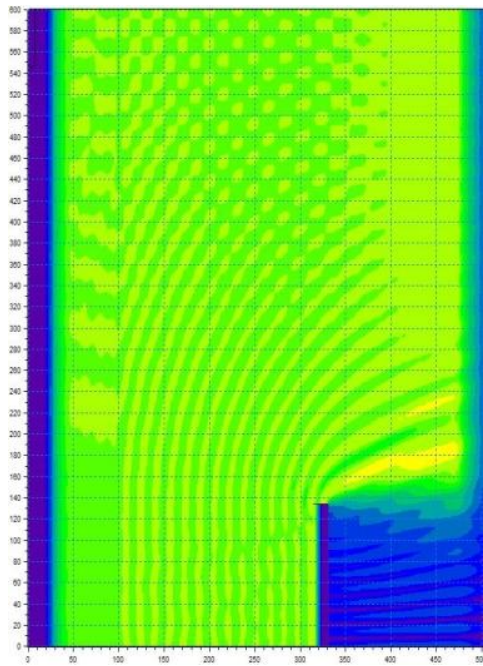
Στα Σχήματα 5.2.1.1 – 5.2.1.3 παρουσιάζονται η επιρροή που έχει η παρουσία του κυματοθραύστη για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης για κανονικό κυματισμό, για διαφορετικά κυματικά χαρακτηριστικά και συγκεκριμένα για  $H=0,5\mu.$  και  $T=7\text{sec}.$

Παρατηρείται εξαιτίας της μεθόδου εισαγωγής των κυματισμών από το δυτικό όριο του καννάβου για γωνία πρόσπτωσης  $\alpha=120^\circ$  (Σχήμα 5.2.1.3), στο κάτω όριο του καννάβου ( $D_x= 150-500$  και  $D_y= 0-200$ ) ότι δεν παράγονται κυματισμοί. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε στη συνέχεια η αύξηση του μήκους του κυματοθραύστη και του άξονα  $y$  του καννάβου κατά 100 χωρικά βήματα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2.1.4.

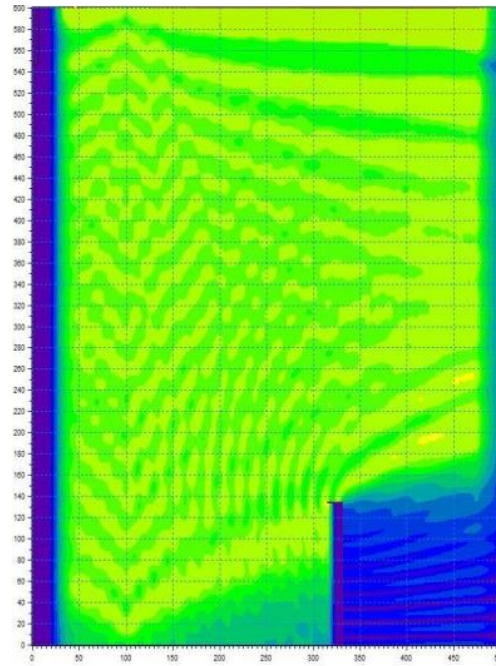
Θα πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι στις συγκρίσεις που παρουσιάζονται στη συνέχεια (§5.3) κατά την επαλληλία των διαγραμμάτων για γωνία πρόσπτωσης  $120^\circ$  έχει γίνει αποκοπή του καννάβου όπως φαίνεται με το κόκκινο περίγραμμα στο Σχήμα 5.2.1.4.

Είναι εμφανές ότι με την αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης από  $90^\circ$  έως  $120^\circ$  η ενίσχυση της κυματικής δράσης στην περιοχή ενδιαφέροντος (περιοχή Α) εξασθενεί σημαντικά.

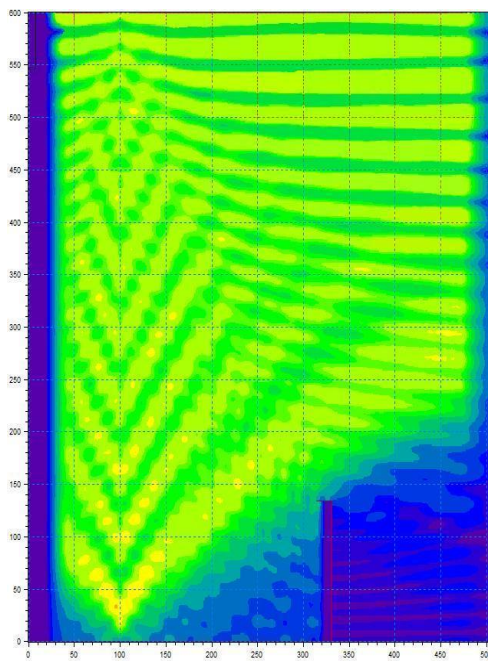
Στα Σχήματα 5.2.1.5 – 5.2.1.7 παρουσιάζεται η μεταβολή του ύψους κύματος στην περιοχή μελέτης συναρτήσει της κατευθυντικότητας ( $\theta$ ) των παραγόμενων κυματισμών (για  $H=0,5\mu., T=7\text{sec}, \theta=0$  έως  $\theta=30^\circ$ ) και στα Σχήματα 5.2.1.8 - 5.2.1.10. παρουσιάζεται η μεταβολή της χωρικής κατανομής των υψών κύματος με την αύξηση του ύψους κύματος του παραγόμενου κυματισμού. Όπως παρατηρείται δεν είναι δυνατή η εξαγωγή σαφούς συμπεράσματος από τα πρωτογενή αποτελέσματα (χωρική κατανομή του  $H_{bw}$ ) του αριθμητικού μοντέλου, και για το λόγο αυτό όπως προαναφέρθηκε (§5.1) γίνεται στη συνέχεια εισαγωγή του αδιάστατου λόγου  $H_{bw}/H.$



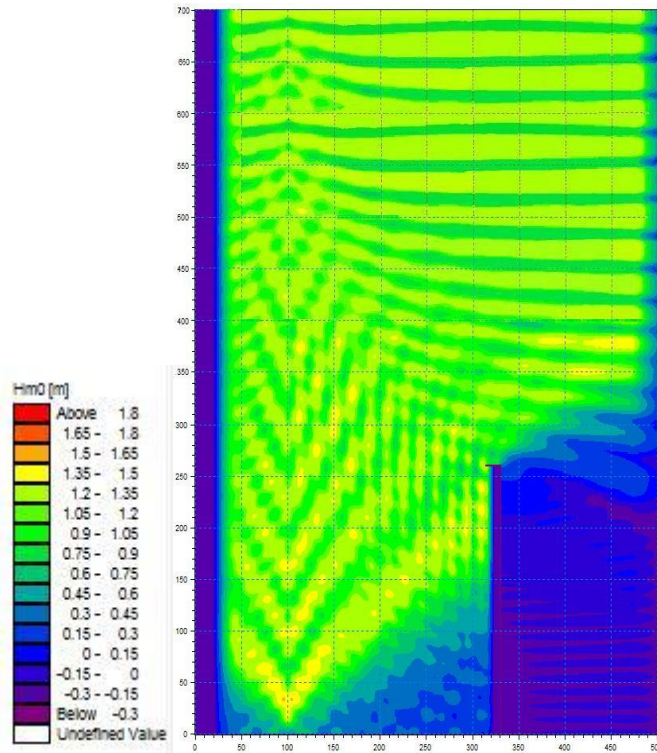
Σχήμα 5.2.1.1 –  $\alpha=90^\circ$



Σχήμα 5.2.1.2 –  $\alpha=100^\circ$

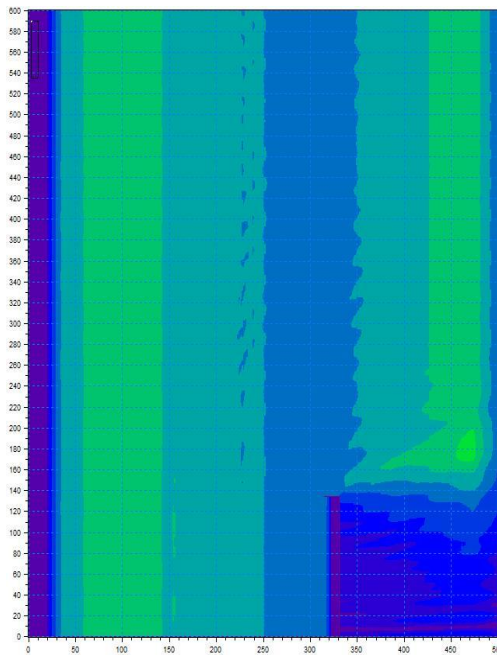


Σχήμα 5.2.1.3 –  $\alpha=120^\circ$

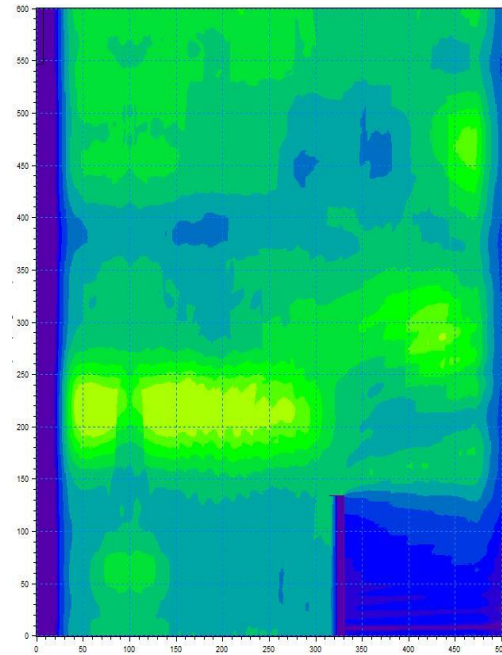


Σχήμα 5.2.1.4 –  $\alpha=120^\circ$  (μεγάλος κάρναβος)

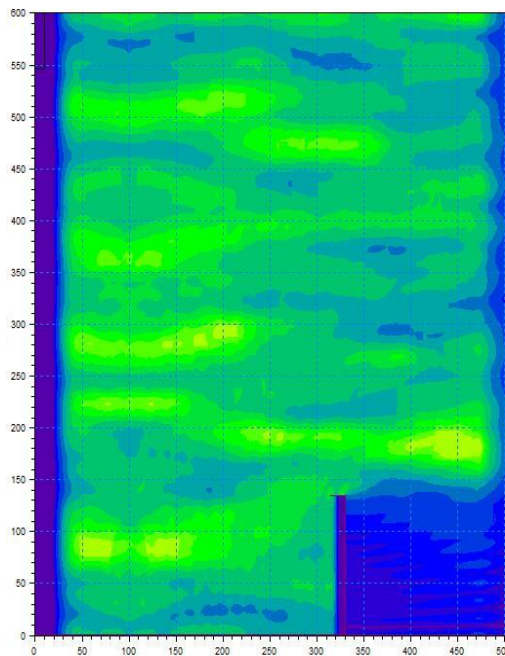




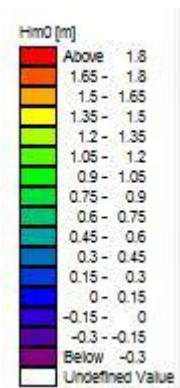
Σχήμα 5.2.1.5 – Κατευθυντικότητα  $\theta=0^\circ$

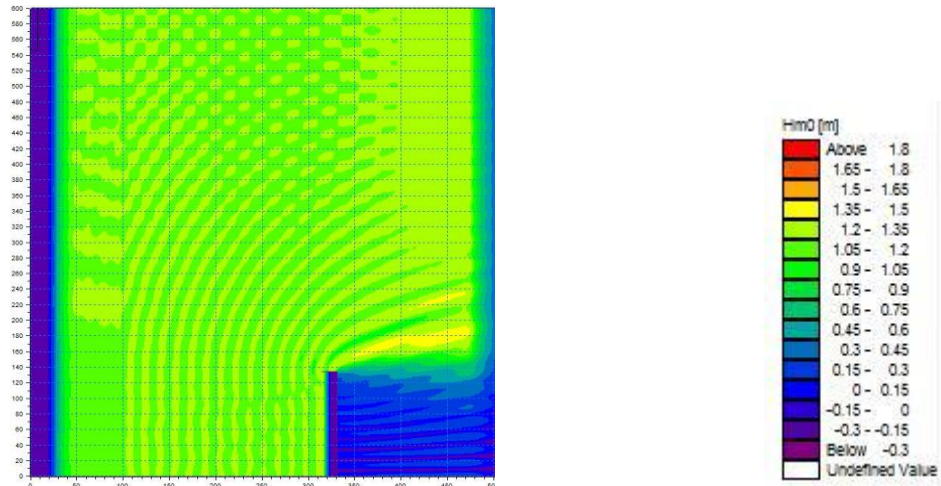


Σχήμα 5.2.1.6 – Κατευθυντικότητα  $\theta=10^\circ$

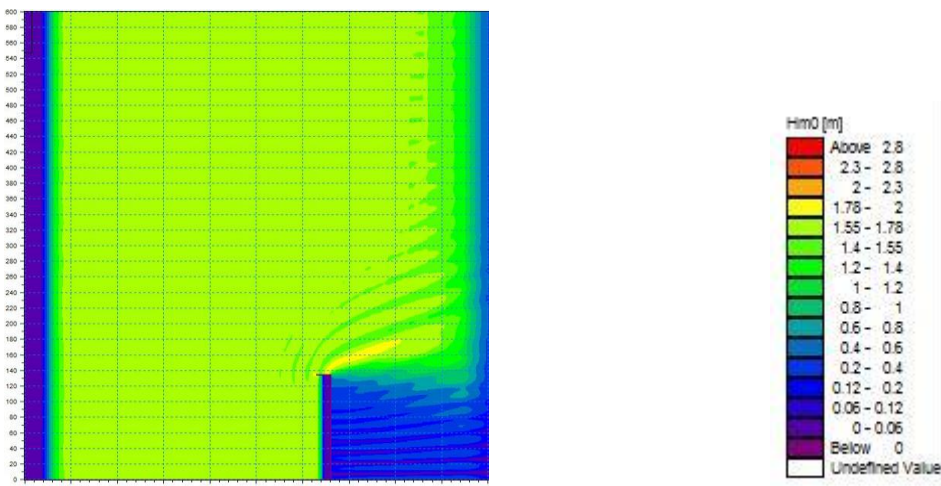


Σχήμα 5.2.1.7 – Κατευθυντικότητα  $\theta=30^\circ$

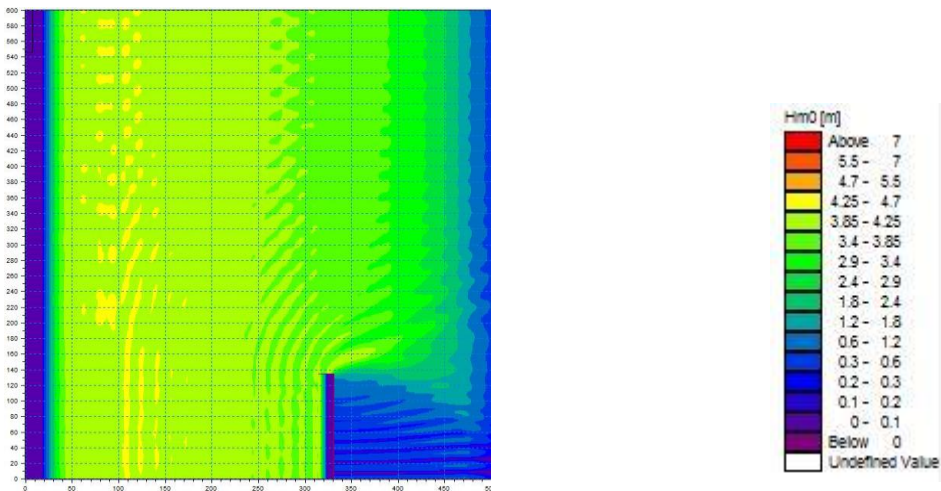




Σχήμα 5.2.1.8 – Ύψος κύματος  $H=0,5\mu$ .



Σχήμα 5.2.1.9 – Ύψος κύματος  $H=1,2\mu$ .



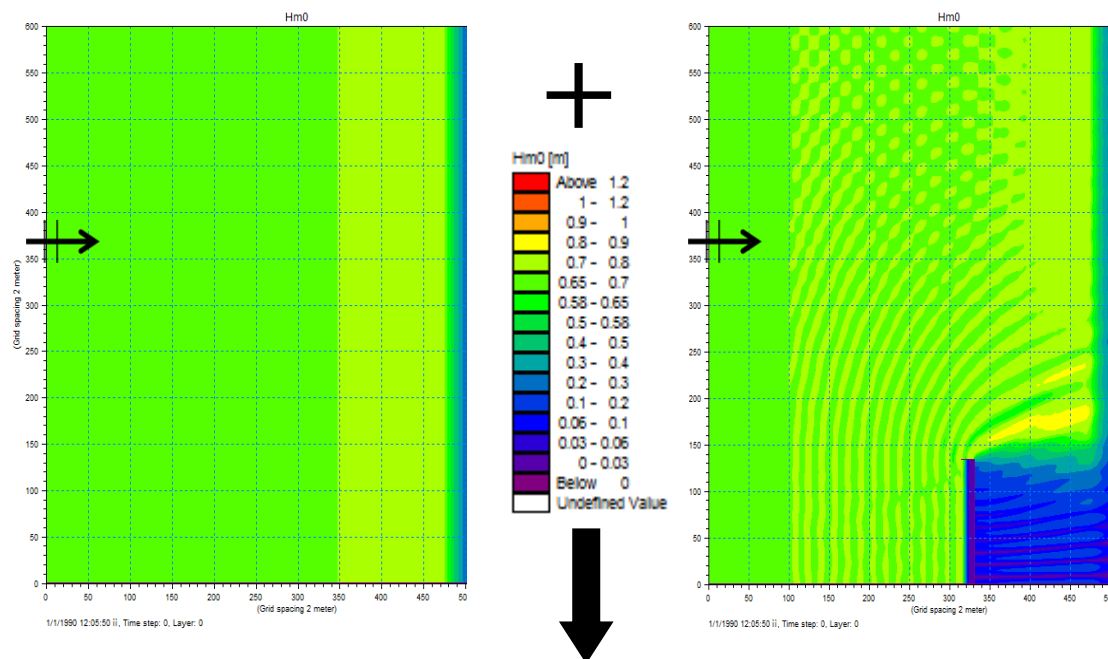
Σχήμα 5.2.1.10 – Ύψος κύματος  $H=3,0\mu$ .



## 5.3 ΕΠΙΡΡΟΗ ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΗ ΣΤΑ ΚΥΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΓΙΑ ΚΑΝΟΝΙΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ

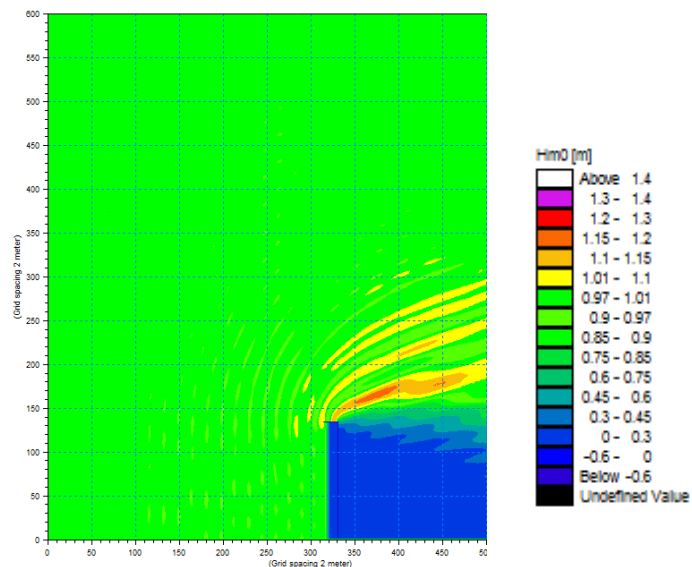
### 5.3.1 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΧΩΡΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΤΟΥ ΛΟΓΟΥ $H_{bw}/H$ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΩΝ ΚΥΜΑΤΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΠΡΟΣΠΤΩΣΗΣ ΤΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

#### 5.3.1.1 Ύψος κύματος $H=0,5m$ , γωνία πρόσπτωσης $\alpha=90^\circ$



Σχήμα 5.3.1.1 – Ύψος κύματος  $H$

Σχήμα 5.3.1.2 – Ύψος κύματος  $H_{bw}$



Σχήμα 5.3.1.3 – Λόγος υψών κύματος  $H_{bw}/H$  για  $H_0=0,5m$  και  $\alpha=90^\circ$

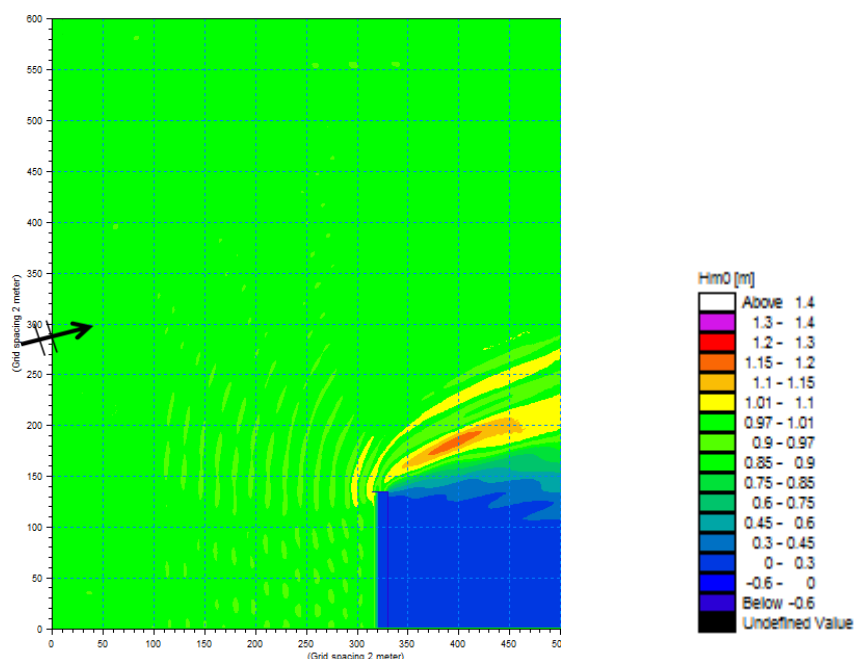
Στα Σχήματα 5.3.1.1 και 5.3.1.2 παρουσιάζονται σε ολόκληρο τον κάρναβο και για κάθε σημείο της βαθυμετρίας τα ύψη κύματος χωρίς την παρουσία και με την παρουσία του ημιάπειρου κυματοθραύστη αντίστοιχα. Η συνένωση δηλαδή και οπτικοποίηση της σύγκρισής των αποτελεσμάτων τους γίνεται με την παρουσίαση του Σχήματος 5.3.1.3.

Στο Σχήμα 5.3.1.3 που παρουσιάζει τον λόγο των υψών κύματος  $H_{bw}/H$  είναι εμφανής η επιρροή που έχει η παρουσία του κυματοθραύστη. Στα ανάντη του κυματοθραύστη (περιοχή Γ) παρουσιάζεται μία μικρή αύξηση των υψών κύματος ως αποτέλεσμα του φαινομένου της ανάκλασης πάνω στον κύριο όγκο του λιμενικού έργου. Η αύξηση αυτή είναι 0 – 10% απόλυτα δικαιολογημένη ακόμα και για έναν απορροφητικό κυματοθραύστη όπως αυτός που χρησιμοποιήθηκε στο αριθμητικό μοντέλο. Πρέπει να είναι σαφές ότι αντίστοιχη συμπεριφορά έχει και στην πραγματικότητα ένας απορροφητικός κυματοθραύστης, μιας και ο «απόλυτα απορροφητικός» κυματοθραύστης είναι ιδανική περίπτωση και δεν απαντάται στη φύση.

Στην περιοχή αμέσως κατάντη της κορυφής του κυματοθραύστη και εξωτερικά της λιμενολεκάνης (περιοχή Α) παρατηρείται η εντονότερη επιρροή της παρουσίας του τεχνικού έργου με αύξηση των κυματικών μεγεθών μέχρι και τοπικά 18%. ( $H_{bw}/H=1,18$ ). Η επιρροή αυτή αποσβένεται πιο κοντά στην ακτή όπου παραμένει σε επίπεδα κάτω του 10%, ενώ διατηρείται σε μία απόσταση σχετικά μικρή από την κορυφή του κυματοθραύστη στην διεύθυνση παράλληλα με την ακτογραμμή.

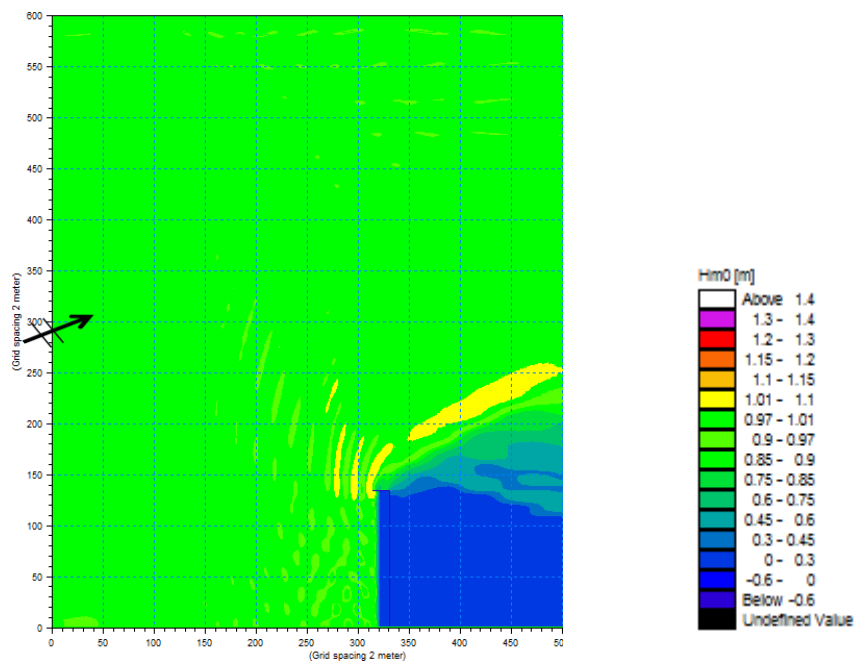
Σημειώνεται ότι ο εξαγόμενος συντελεστής  $H_{bw}/H$  εκφράζει τη σχέση του ύψους κύματος χωρίς την παρουσία κυματοθραύστη σε ένα συγκεκριμένο σημείο της περιοχής που μελετάται με το ύψος κύματος στο ίδιο σημείο με την παρουσία του τεχνικού έργου. Εάν  $H_{bw}/H > 1$  σημαίνει ότι το ύψος του κυματισμού με την παρουσία του κυματοθραύστη στο συγκεκριμένο σημείο αυξάνεται σε σύγκριση με την περίπτωση όπου απουσιάζει το έργο. Αντίθετα, όταν  $H_{bw}/H < 1$  το ύψος του κυματισμού παρουσιάζει μείωση.

### 5.3.1.2 Ύψος κύματος $H=0,5m$ , γωνία πρόσπτωσης $\alpha=100^\circ$



**Σχήμα 5.3.1.4** – Λόγος υψών κύματος  $H_{bw}/H$  για  $H_0=0,5m$  και  $\alpha=100^\circ$

Στην περιοχή Γ παρουσιάζεται μια μικρή αύξηση του ύψους κύματος λόγω της ανάκλασης. Στην περιοχή αμέσως κατάντη της κορυφής του κυματοθραύστη και εξωτερικά της λιμενολεκάνης (περιοχή Α) παρατηρείται η εντονότερη επιρροή της παρουσίας του τεχνικού έργου με αύξηση των κυματικών μεγεθών μέχρι και τοπικά 17%. ( $H_{bw}/H=1,17$ ). Η επιρροή αυτή αποσβένεται πιο κοντά στην ακτή όπου παραμένει σε επίπεδα κάτω του 10%, ενώ διατηρείται σε μία απόσταση σχετικά μικρή από την κορυφή του κυματοθραύστη, στην διεύθυνση παράλληλα με την ακτογραμμή. Σε μεγαλύτερη απόσταση παρατηρείται ότι η παρουσία του κυματοθραύστη δεν επηρεάζει καθόλου τα κυματικά χαρακτηριστικά καθώς αυτά πλησιάζουν προς την ακτή.

5.3.1.3 Ύψος κύματος  $H=0,5m$ , γωνία πρόσπτωσης  $\alpha=120^\circ$ 

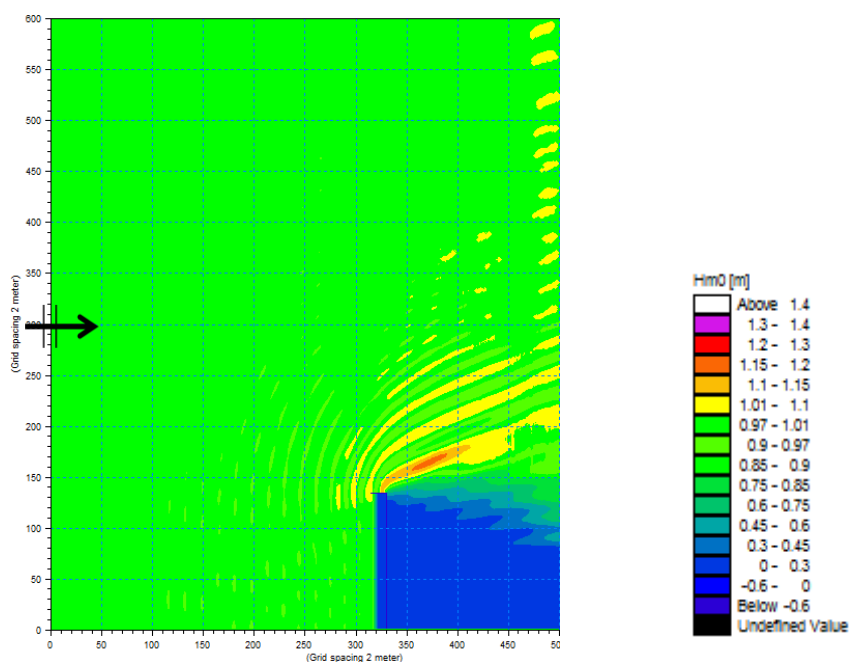
Σχήμα 5.3.1.5 – Λόγος υψών κύματος  $H_{bw}/H$  για  $H_0=0,5m$  και  $\alpha=120^\circ$

Στην περιοχή Γ παρουσιάζεται αύξηση του ύψους κύματος λόγω της ανάκλασης και ιδιαιτέρως της συμβολής των προσπιπτόντων κυματισμών με τους ανακλώμενους. Στην περιοχή Α παρατηρείται η επιρροή της παρουσίας του τεχνικού έργου με αύξηση των κυματικών μεγεθών που δεν ξεπερνά το 10% ( $H_{bw}/H=1,06$ ). Η επιρροή αυτή αποσβένεται πιο κοντά στην ακτή όπου παραμένει σε χαμηλά επίπεδα. Παράλληλα παρατηρείται ότι το φαινόμενο δεν εξαπλώνεται σε μεγάλο χώρο καθώς σε μικρή απόσταση από την κορυφή του τεχνικού έργου η επιρροή του εκμηδενίζεται.

Παρουσιάζεται λοιπόν η συσχέτιση του φαινομένου της αύξησης των κυματικών μεγεθών στην περιοχή ενδιαφέροντος λόγω της ύπαρξης κυματοθραύστη με την γωνία πρόσπτωσης των εισερχόμενων κυματισμών. Είναι σαφές ότι σε μεγαλύτερη γωνία πρόσπτωσης το φαινόμενο εξασθενεί σημαντικά, ενώ για μικρές αποκλίσεις από την κάθετη πρόσπτωση ( $90^\circ$ ) η κυματική κατάσταση διατηρείται σε πολύ κοντινά επίπεδα με αυτή των  $90^\circ$ .

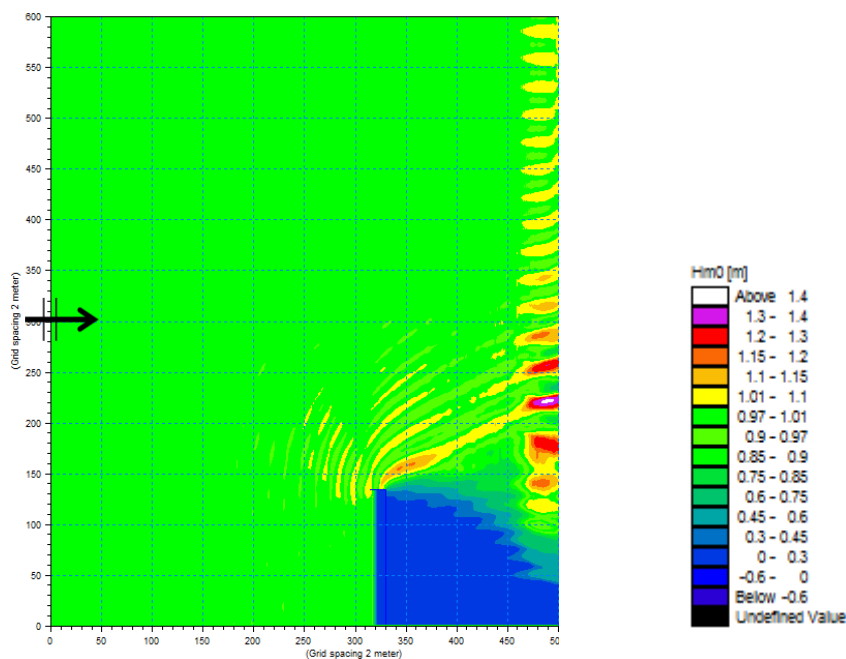
### 5.3.2 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΧΩΡΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΤΟΥ ΛΟΓΟΥ $H_{bw}/H$ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΥΨΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ

#### 5.3.2.1 Ύψος κύματος $H=1,2m$ , γωνία πρόσπτωσης $\alpha=90^\circ$



Σχήμα 5.3.2.1 – Λόγος υψών κύματος  $H_{bw}/H$  για  $H_o=1,2m$  και  $\alpha=90^\circ$

Στην περιοχή Γ παρουσιάζεται μια μικρή αύξηση του ύψους κύματος λόγω της ανάκλασης. Στην περιοχή αμέσως κατάντη της κορυφής του κυματοθραύστη και εξωτερικά της λιμενολεκάνης (περιοχή Α) παρατηρείται η εντονότερη επιρροή της παρουσίας του τεχνικού έργου με αύξηση των κυματικών μεγεθών μέχρι και τοπικά 16,5%. ( $H_{bw}/H=1,165$ ). Η επιρροή αυτή ελαττώνεται πιο κοντά στην ακτή όπου παραμένει σε επίπεδα κάτω του 10%, ενώ παράλληλα διατηρείται σε μία απόσταση αρκετά μεγάλη από την κορυφή του κυματοθραύστη στην διεύθυνση παράλληλα με την ακτογραμμή. Παρατηρείται δηλαδή ότι η παρουσία του κυματοθραύστη επηρεάζει ακόμα και σε μεγάλη απόσταση τα κυματικά χαρακτηριστικά καθώς αυτά πλησιάζουν προς την ακτή.

5.3.2.2 Ύψος κύματος  $H=3,0m$ , γωνία πρόσπτωσης  $\alpha=90^\circ$ 

Σχήμα 5.3.2.2 – Λόγος υψών κύματος  $H_{bw}/H$  για  $H_0=3,0m$  και  $\alpha=90^\circ$

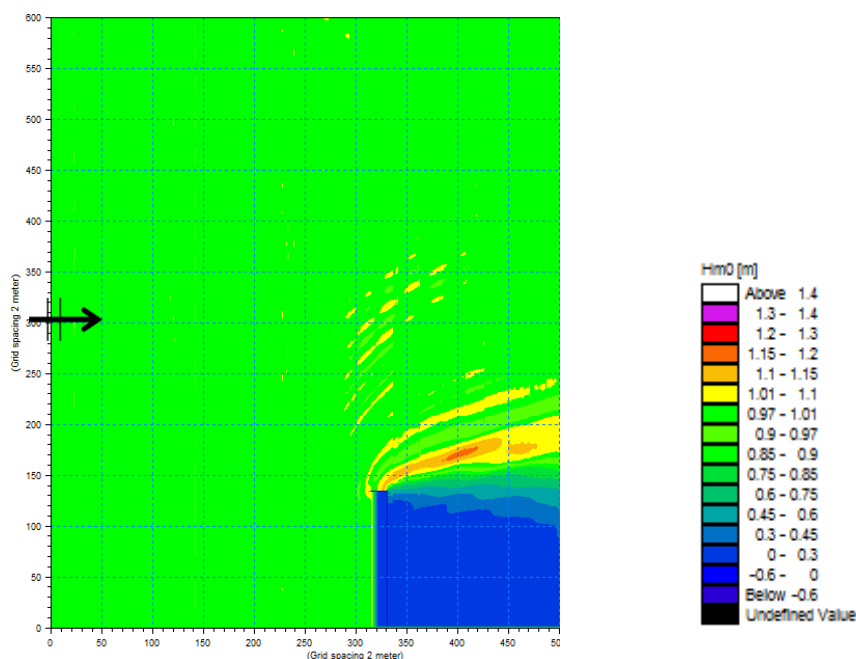
Στην περιοχή Γ παρουσιάζεται μια μικρή αύξηση του ύψους κύματος λόγω της ανάκλασης. Στην περιοχή Α παρατηρείται έντονη επιρροή της παρουσίας του τεχνικού έργου με αύξηση των κυματικών μεγεθών μέχρι και τοπικά 15%. ( $H_{bw}/H=1,15$ ). Η επιρροή αυτή όμως στην περιοχή πολύ κοντά στην ακτή γίνεται ακόμα μεγαλύτερη φτάνοντας σε ορισμένα σημεία αύξηση του ύψους κύματος πάνω από 40% ( $H_{bw}/H=1,42$ ), ενώ παράλληλα διατηρείται σε μία απόσταση αρκετά μεγάλη από την κορυφή του κυματοθραύστη στην διεύθυνση παράλληλα με την ακτογραμμή. Παρατηρείται δηλαδή, σε αντίθεση με τους γραμμικούς κυματισμούς που το φαινόμενο ήταν μικρότερο, τοπικό και δεν παρουσίαζε εξάπλωση, ότι η παρουσία του κυματοθραύστη επηρεάζει σημαντικά ακόμα και σε μεγάλη απόσταση τα κυματικά χαρακτηριστικά καθώς αυτά πλησιάζουν προς την ακτή. Στην συγκεκριμένη περίπτωση παρατηρείται και μία εξάπλωση του φαινομένου στα κατάντη του τεχνικού έργου (περιοχή Β), στην περιοχή της «σκιάς» δηλαδή του κυματοθραύστη. Για μεγαλύτερους εισερχόμενους κυματισμούς, δηλαδή, όπου γίνεται και πιο έντονη η μη γραμμικότητα προκαλείται διείδυση του φαινομένου (ενίσχυση κυματικής δράσης) στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης και ταυτόχρονα εξάπλωσή του μακριά από αυτήν.

## 5.4 ΕΠΙΡΡΟΗ ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΗ ΣΤΑ ΚΥΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΓΙΑ ΜΗ ΚΑΝΟΝΙΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ

Η θαλάσσια επιφάνεια αποτελείται από πολλούς κυματισμούς προερχόμενους από διαφορετικές διευθύνσεις. Έτσι τα φάσματα συχνοτήτων που περιγράφουν πραγματικούς κυματισμούς πρέπει να συμπεριλαμβάνουν και την κατευθυντικότητα. Η κατευθυντικότητα είναι μία κατανομή των συχνοτήτων έναντι των διευθύνσεων των συχνοτήτων και εκφράζεται εδώ με τη μέγιστη γωνία  $\theta$ . Στις παρακάτω εφαρμογές χρησιμοποιήθηκαν φασματικοί κυματισμοί τύπου JONSWAP με χαρακτηριστικά  $\gamma=3,3$  και μεταβαλλόμενα το ύψος κυματισμού και την περίοδο κορυφής.

### 5.4.1 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΧΩΡΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΤΟΥ ΛΟΓΟΥ $H_{bw}/H$ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΩΝ ΚΥΜΑΤΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΠΡΟΣΠΤΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

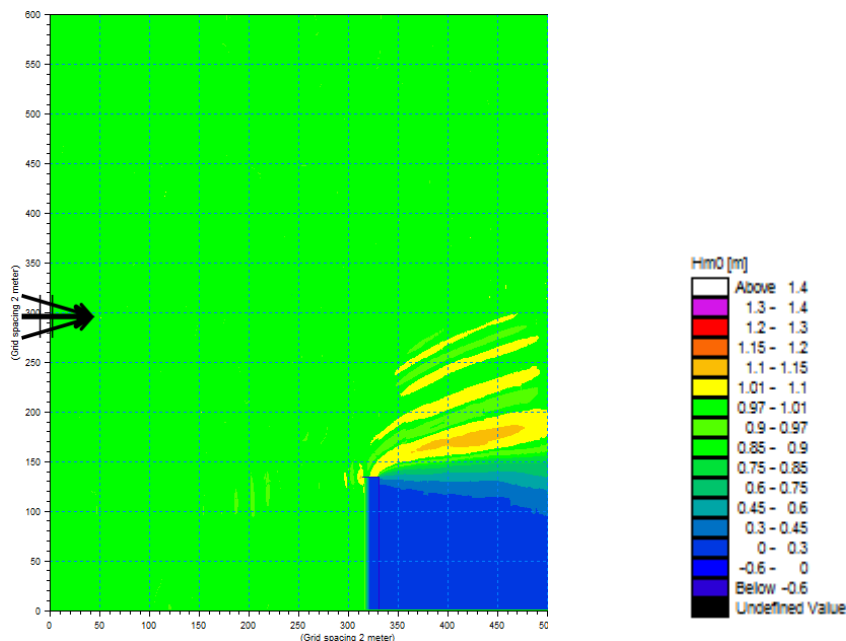
5.4.1.1 Ύψος κύματος  $H=0,5\text{m}$ , γωνία πρόσπτωσης  $\alpha=90^\circ$ , μέγιστη γωνία κατευθυντικότητας  $\theta=0^\circ$ .



Σχήμα 5.4.1.1 – Λόγος υψών κύματος  $H_{bw}/H$  για  $H_0=0,5\text{m}$ ,  $\alpha=90^\circ$  και  $\theta=0^\circ$

Στην περιοχή Α παρατηρείται η εντονότερη επιρροή της παρουσίας του τεχνικού έργου με αύξηση των κυματικών μεγεθών μέχρι και τοπικά 16,5%. ( $H_{bw}/H=1,165$ ). Η επιρροή αυτή αποσβένεται πιο κοντά στην ακτή όπου παραμένει σε επίπεδα κάτω του 10%, ενώ διατηρείται σε μία απόσταση σχετικά μικρή από την κορυφή του κυματοθραύστη, στην διεύθυνση παράλληλα με την ακτογραμμή. Σε μεγαλύτερη απόσταση παρατηρείται ότι η παρουσία του κυματοθραύστη επηρεάζει ελάχιστα έως καθόλου τα κυματικά χαρακτηριστικά καθώς αυτά πλησιάζουν προς την ακτή.

#### 5.4.1.2 Ύψος κύματος $H=0,5m$ , γωνία πρόσπτωσης $\alpha=90^\circ$ , μέγιστη γωνία κατευθυντικότητας $\theta=10^\circ$ .



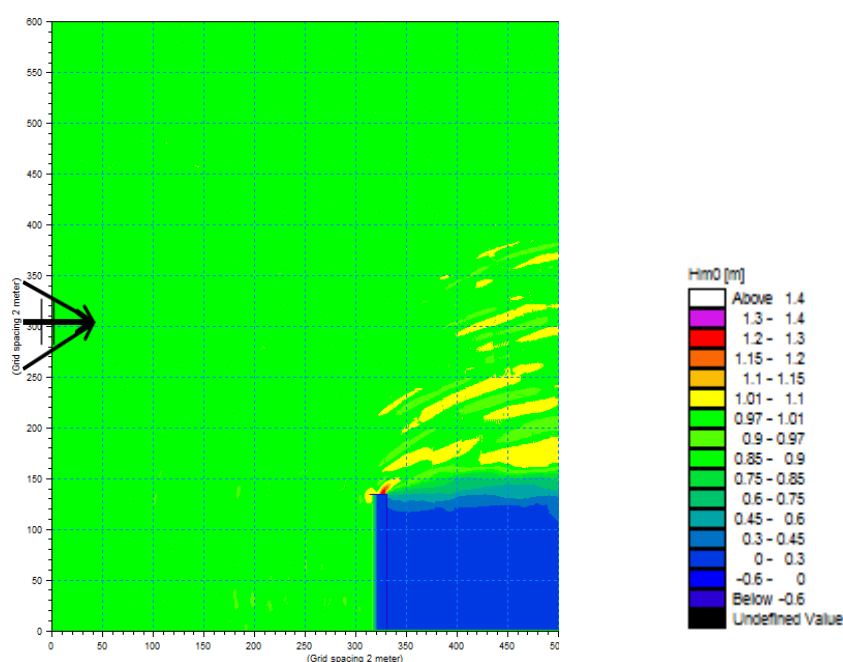
Σχήμα 5.4.1.2 – Λόγος υψών κύματος  $H_{bw}/H$  για  $H_0=0,5m$ ,  $\alpha=90^\circ$  και  $\theta=10^\circ$

Στην περιοχή Α παρατηρείται η εντονότερη επιρροή της παρουσίας του τεχνικού έργου με αύξηση των κυματικών μεγεθών μέχρι και τοπικά 14%. ( $H_{bw}/H=1,14$ ). Η επιρροή αυτή αποσβένεται πιο κοντά στην ακτή όπου παραμένει σε



επίπεδα κάτω του 15%, ενώ ακόμα διατηρείται σε μία απόσταση από την κορυφή του κυματοθραύστη, στην διεύθυνση παράλληλα με την ακτογραμμή. Σε μεγαλύτερη απόσταση παρατηρείται ότι η παρουσία του κυματοθραύστη επηρεάζει ελάχιστα έως καθόλου τα κυματικά χαρακτηριστικά καθώς αυτά πλησιάζουν προς την ακτή.

#### 5.4.1.3 Ύψος κύματος $H=0,5m$ , γωνία πρόσπτωσης $\alpha=90^\circ$ , μέγιστη γωνία κατευθυντικότητας $\theta=30^\circ$ .



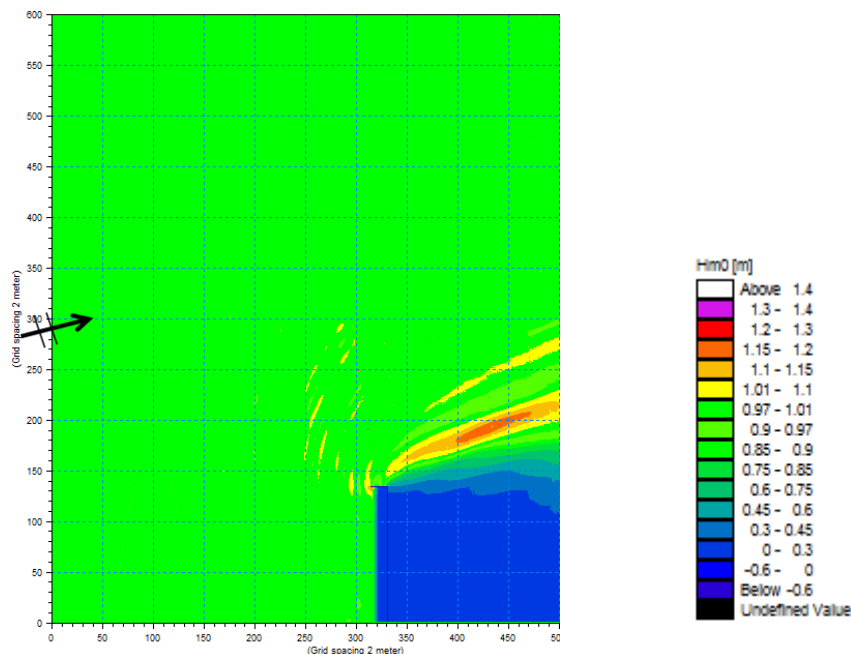
**Σχήμα 5.4.1.3** – Λόγος υψών κύματος  $H_{bw}/H$  για  $H_o=0,5m$ ,  $\alpha=90^\circ$  και  $\theta=30^\circ$

Στα ανάντη του κυματοθραύστη (περιοχή Γ) παρουσιάζεται σε ορισμένα σημεία μια μικρή αύξηση του ύψους κύματος λόγω της ανακλάσεων. Στην περιοχή αμέσως κατάντη της κορυφής του κυματοθραύστη και εξωτερικά της λιμενολεκάνης (περιοχή Α) παρατηρείται η εντονότερη επιρροή της παρουσίας του τεχνικού έργου με αύξηση των κυματικών μέχρι 10%. ( $H_{bw}/H=1,10$ ). Η επιρροή αυτή παρατηρείται ότι έχει τη μεγαλύτερή της τιμή στην κορυφή του κυματοθραύστη ( $H_{bw}/H=1,20$ ), ενώ σε μικρότερο βαθμό εξαπλώνεται σε μία απόσταση σχετικά μεγάλη από την κορυφή του, στην διεύθυνση παράλληλα με την ακτογραμμή. Στην απόσταση αυτή λοιπόν

παρατηρείται ότι η παρουσία του κυματοθραύστη επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό τα κυματικά χαρακτηριστικά καθώς αυτά πλησιάζουν προς την ακτή.

Στη συγκεκριμένη υποενότητα παρουσιάζεται η επιρροή της κατευθυντικότητας στο φαινόμενο της ενίσχυσης των κυματικών χαρακτηριστικών στην περιοχή ενδιαφέροντος λόγω της παρουσίας του κυματοθραύστη. Παρατηρείται με αύξηση της γωνίας  $\theta$  επέκταση της επιρροής, όμως αυτή είναι μικρότερη σε μέγεθος και λιγότερο συστηματική λόγω του τυχαίου της κατευθυντικότητας.

#### 5.4.1.4 Ύψος κύματος $H=0,5m$ , γωνία πρόσπτωσης $\alpha=100^\circ$ , μέγιστη γωνία κατευθυντικότητας $\theta=0^\circ$ .

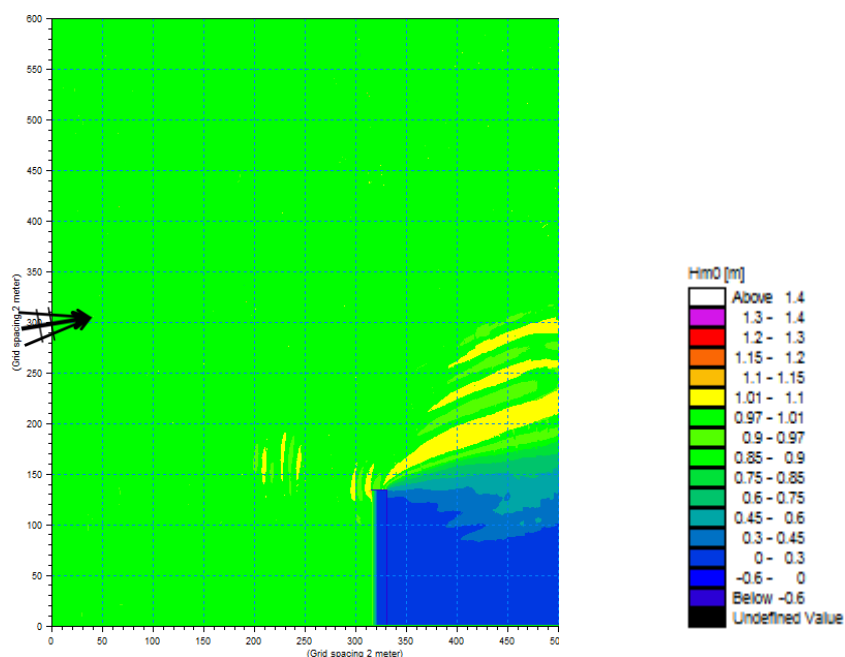


**Σχήμα 5.4.1.4** – Λόγος υψών κύματος  $H_{bw}/H$  για  $H_0=0,5m$ ,  $\alpha=100^\circ$  και  $\theta=0^\circ$

Στην περιοχή Α παρατηρείται η εντονότερη επιρροή της παρουσίας του τεχνικού έργου με αύξηση των κυματικών μεγεθών μέχρι και τοπικά 18%. ( $H_{bw}/H=1,18$ ). Η επιρροή αυτή αποσβένεται πιο κοντά στην ακτή όπου παραμένει σε επίπεδα κάτω του 15%, ενώ διατηρείται σε μία απόσταση σχετικά μικρή από την

κορυφή του κυματοθραύστη, στην διεύθυνση παράλληλα με την ακτογραμμή. Σε μεγαλύτερη απόσταση παρατηρείται ότι η παρουσία του κυματοθραύστη επηρεάζει ελάχιστα έως καθόλου τα κυματικά χαρακτηριστικά καθώς αυτά πλησιάζουν προς την ακτή. Παρατηρείται επίσης μία τάση μεταφοράς του φαινομένου προς το εσωτερικό της περιοχής Α λόγω της γωνίας πρόσπτωσης των κυματισμών.

#### 5.4.1.5 Ύψος κύματος $H=0,5m$ , γωνία πρόσπτωσης $\alpha=100^\circ$ , μέγιστη γωνία κατευθυντικότητας $\theta=10^\circ$ .

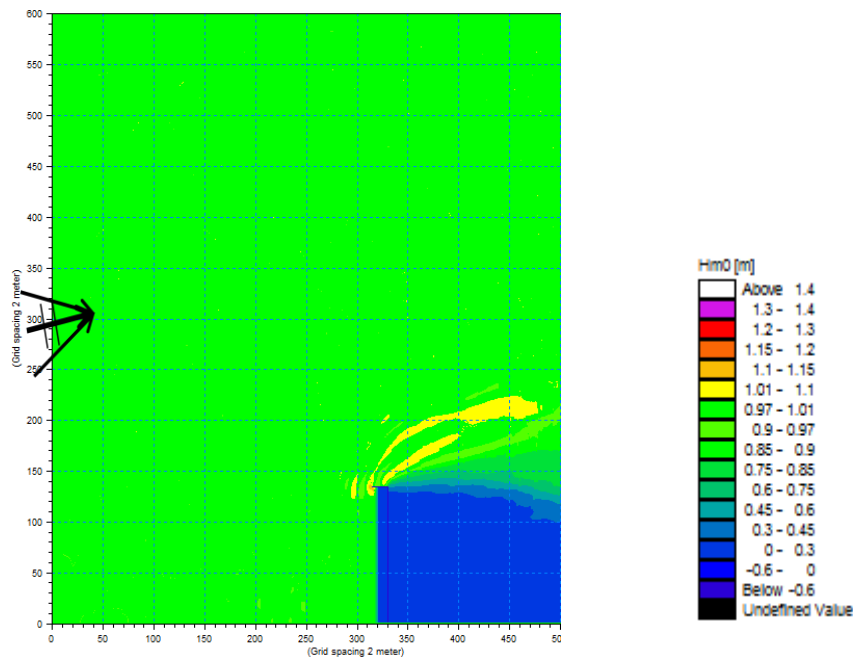


Σχήμα 5.4.1.5 – Λόγος υψών κύματος  $H_{bw}/H$  για  $H_0=0,5m$ ,  $\alpha=100^\circ$  και  $\theta=10^\circ$

Στα ανάντη του κυματοθραύστη (περιοχή Γ) παρουσιάζεται σε ορισμένα σημεία μια μικρή αύξηση του ύψους κύματος λόγω της ανακλάσεων. Στην περιοχή αμέσως κατάντη της κορυφής του κυματοθραύστη και εξωτερικά της λιμενολεκάνης (περιοχή Α) παρατηρείται η επιρροή της παρουσίας του τεχνικού έργου με αύξηση των κυματικών μεγεθών που δεν ξεπερνά το 10% ( $H_{bw}/H=1,08$ ). Η επιρροή αυτή αποσβένεται πιο κοντά στην ακτή όπου παραμένει σε χαμηλά επίπεδα. Παράλληλα

παρατηρείται ότι το φαινόμενο δεν εξαπλώνεται σε μεγάλο χώρο καθώς σε μικρή απόσταση από την κορυφή του τεχνικού έργου η επιρροή του εκμηδενίζεται.

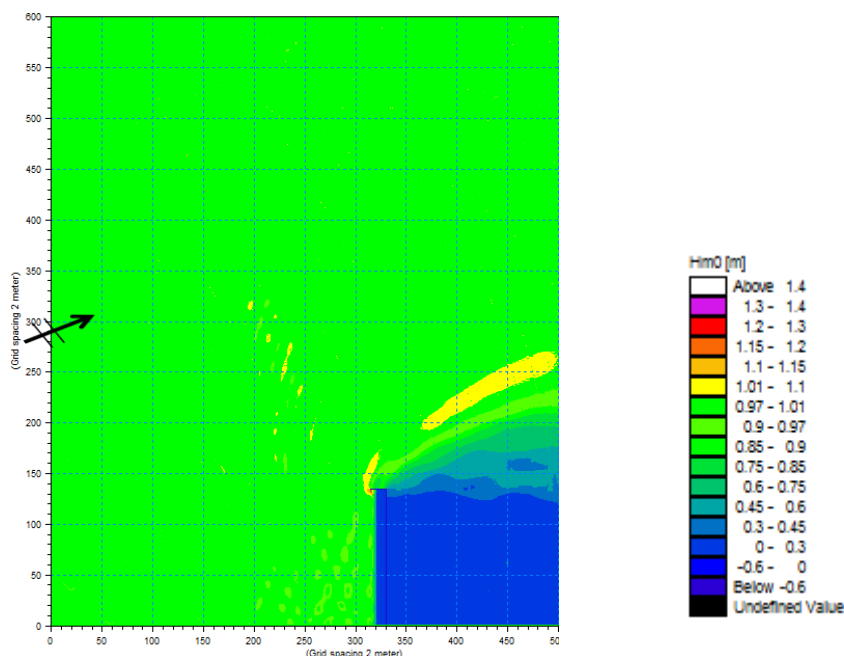
#### 5.4.1.6 Ύψος κύματος $H=0,5m$ , γωνία πρόσπτωσης $\alpha=100^\circ$ , μέγιστη γωνία κατευθυντικότητας $\theta=30^\circ$ .



**Σχήμα 5.4.1.6** – Λόγος υψών κύματος  $H_{bw}/H$  για  $H_0=0,5m$ ,  $\alpha=100^\circ$  και  $\theta=30^\circ$

Στην περιοχή Γ παρουσιάζεται σε ορισμένα μόνο σημεία μια μικρή αύξηση του ύψους κύματος λόγω της ανακλάσεων. Στην περιοχή Α παρατηρείται περιορισμένη επιρροή της παρουσίας του τεχνικού έργου με αύξηση των κυματικών μεγεθών που δεν ξεπερνά το 10% ( $H_{bw}/H=1,06$ ). Η επιρροή αυτή αποσβένεται πιο κοντά στην ακτή. Παράλληλα παρατηρείται ότι το φαινόμενο δεν εξαπλώνεται καθώς σε μικρή απόσταση από την κορυφή του τεχνικού έργου η επιρροή του εκμηδενίζεται.

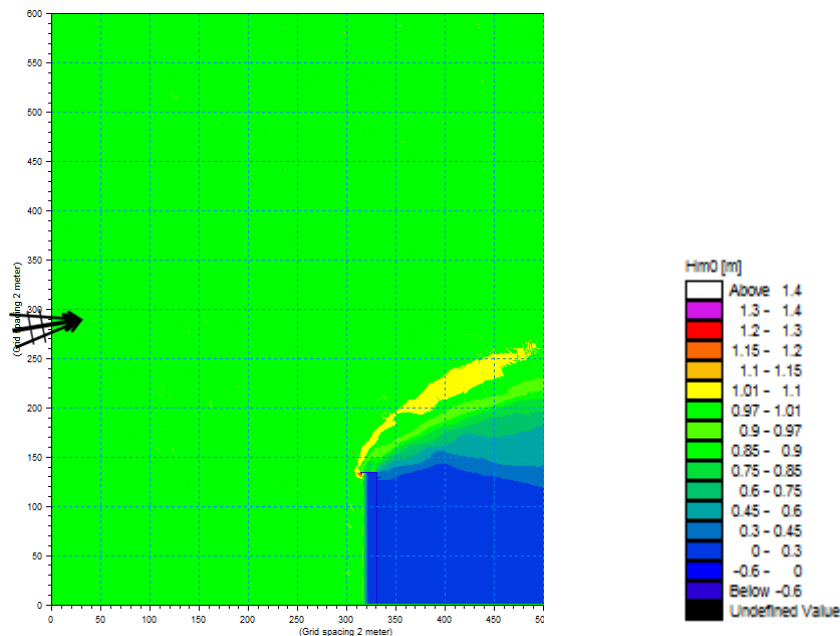
**5.4.1.7 Ύψος κύματος  $H=0,5m$ , γωνία πρόσπτωσης  $\alpha=120^\circ$ , μέγιστη γωνία κατευθυντικότητας  $\theta=0^\circ$ .**



**Σχήμα 5.4.1.7** – Λόγος υψών κύματος  $H_{bw}/H$  για  $H_o=0,5m$ ,  $\alpha=120^\circ$  και  $\theta=0^\circ$

Στην περιοχή Γ παρουσιάζεται αύξηση του ύψους κύματος λόγω της ανάκλασης και ιδιαίτερος της συμβολής των προσπιπτόντων κυματισμών με τους ανακλώμενους. Στην περιοχή Α παρατηρείται η επιρροή της παρουσίας του τεχνικού έργου με αύξηση των κυματικών μεγεθών που δεν ξεπερνά το 10% ( $H_{bw}/H=1,06$ ). Η επιρροή αυτή αποσβένεται πιο κοντά στην ακτή όπου παραμένει σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Παράλληλα παρατηρείται ότι το φαινόμενο δεν εξαπλώνεται σε μεγάλο χώρο καθώς σε μικρή απόσταση από την κορυφή του τεχνικού έργου η επιρροή του εκμηδενίζεται. Παρατηρείται επίσης μία έντονη τάση μεταφοράς του συνόλου του φαινομένου προς το εσωτερικό της περιοχής Α λόγω της γωνίας πρόσπτωσης των κυματισμών.

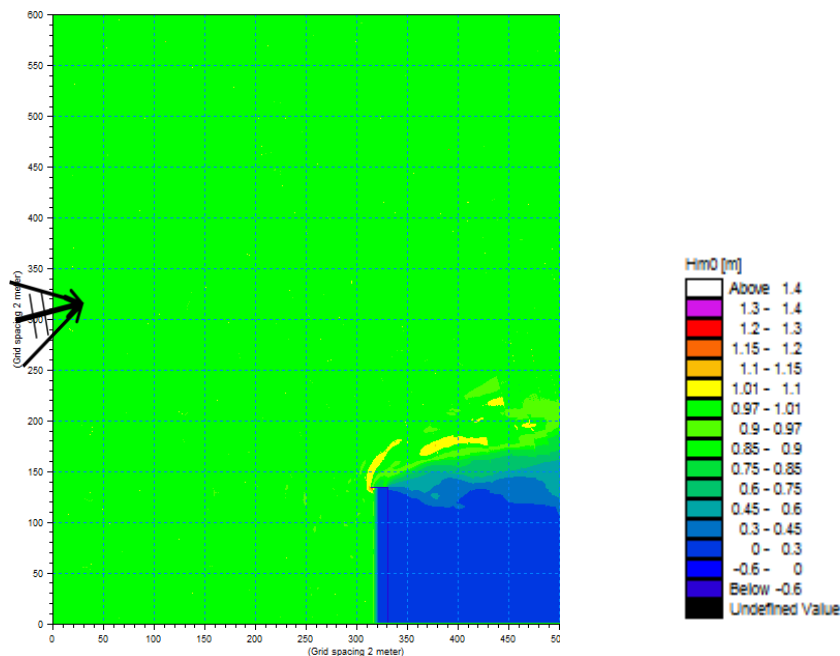
### 5.4.1.8 Ύψος κύματος $H=0,5m$ , γωνία πρόσπτωσης $\alpha=120^\circ$ , μέγιστη γωνία κατευθυντικότητας $\theta=10^\circ$ .



**Σχήμα 5.4.1.8** – Λόγος υψών κύματος  $H_{bw}/H$  για  $H_o=0,5m$ ,  $\alpha=120^\circ$  και  $\theta=10^\circ$

Στην περιοχή Γ παρουσιάζεται αύξηση του ύψους κύματος λόγω της ανάκλασης και ιδιαιτέρως της συμβολής των προσπιπτόντων κυματισμών με τους ανακλώμενους. Στην περιοχή Α παρατηρείται η επιρροή της παρουσίας του τεχνικού έργου με αύξηση των κυματικών μεγεθών που δεν ξεπερνά το 5% ( $H_{bw}/H=1,05$ ). Η επιρροή αυτή αποσβένεται πιο κοντά στην ακτή όπου παραμένει σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Παράλληλα παρατηρείται ότι το φαινόμενο δεν εξαπλώνεται σε μεγάλο χώρο καθώς σε μικρή απόσταση από την κορυφή του τεχνικού έργου η επιρροή του εκμηδενίζεται. Παρατηρείται επίσης μία έντονη τάση μεταφοράς του συνόλου του φαινομένου προς το εσωτερικό της περιοχής Α λόγω της γωνίας πρόσπτωσης των κυματισμών.

**5.4.1.9 Ύψος κύματος  $H=0,5m$ , γωνία πρόσπτωσης  $\alpha=120^\circ$ , μέγιστη γωνία κατευθυντικότητας  $\theta=30^\circ$ .**

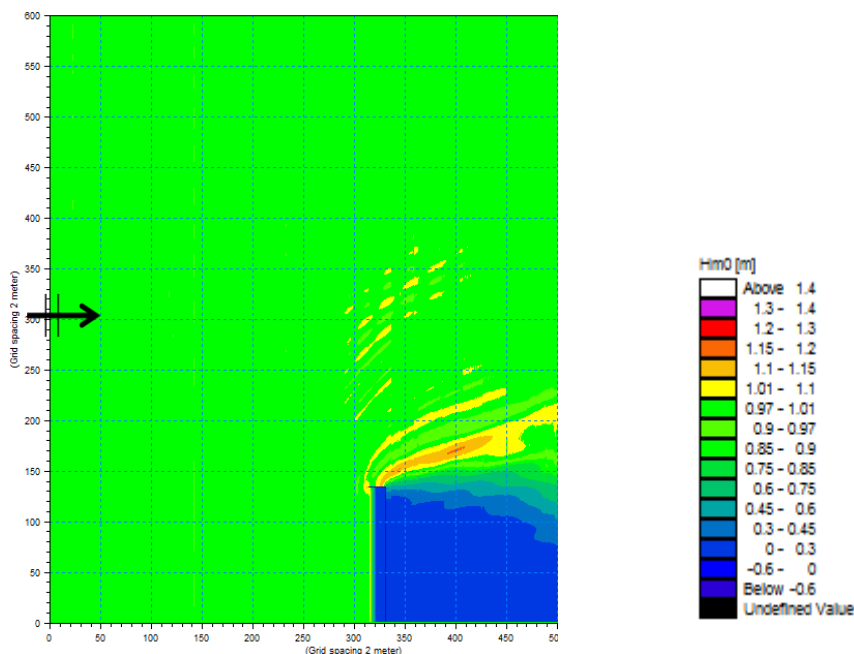


**Σχήμα 5.4.1.9** – Λόγος υψών κύματος  $H_{bw}/H$  για  $H_o=0,5m$ ,  $\alpha=120^\circ$  και  $\theta=30^\circ$

Στην περιοχή Γ παρουσιάζεται μικρή αύξηση του ύψους κύματος λόγω της ανάκλασης και ιδιαίτερος της συμβολής των προσπιπτόντων κυματισμών με τους ανακλώμενους. Στην περιοχή αμέσως κατάντη της κορυφής του κυματοθραύστη και εξωτερικά της λιμενολεκάνης (περιοχή Α) παρατηρείται πολύ μικρή επιρροή της παρουσίας του τεχνικού έργου με αύξηση των κυματικών μεγεθών που δεν ξεπερνά το 5% ( $H_{bw}/H=1,05$ ). Η επιρροή αυτή αποσβένεται τελείως πιο κοντά στην ακτή. Παράλληλα παρατηρείται ότι το φαινόμενο δεν εξαπλώνεται σε μεγάλο χώρο καθώς σε μικρή απόσταση από την κορυφή του τεχνικού έργου η επιρροή του εκμηδενίζεται.

## 5.4.2 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΧΩΡΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΤΟΥ ΛΟΓΟΥ $H_{bw}/H$ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΥΨΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

5.4.2.1 Ύψος κύματος  $H=1,2\text{m}$ , γωνία πρόσπτωσης  $\alpha=90^\circ$ , μέγιστη γωνία κατευθυντικότητας  $\theta=0^\circ$ .

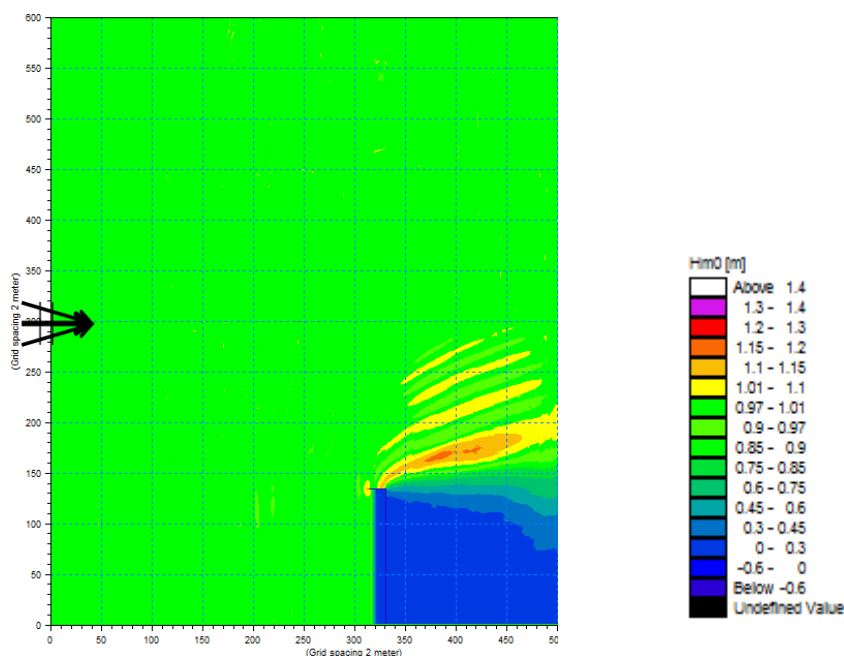


Σχήμα 5.4.2.1 – Λόγος υψών κύματος  $H_{bw}/H$  για  $H_0=1,2\text{m}$ ,  $\alpha=90^\circ$  και  $\theta=0^\circ$

Στην περιοχή Α παρατηρείται η εντονότερη επιρροή της παρουσίας του τεχνικού έργου με αύξηση των κυματικών μεγεθών μέχρι και τοπικά 15%. ( $H_{bw}/H=1,15$ ). Η επιρροή αυτή αποσβένεται πιο κοντά στην ακτή όπου παραμένει σε επίπεδα κάτω του 10%, ενώ διατηρείται σε μία απόσταση σχετικά μικρή από την κορυφή του κυματοθραύστη, στην διεύθυνση παράλληλα με την ακτογραμμή. Σε μεγαλύτερη απόσταση παρατηρείται ότι η παρουσία του κυματοθραύστη επηρεάζει ελάχιστα έως καθόλου τα κυματικά χαρακτηριστικά καθώς αυτά πλησιάζουν προς την ακτή.



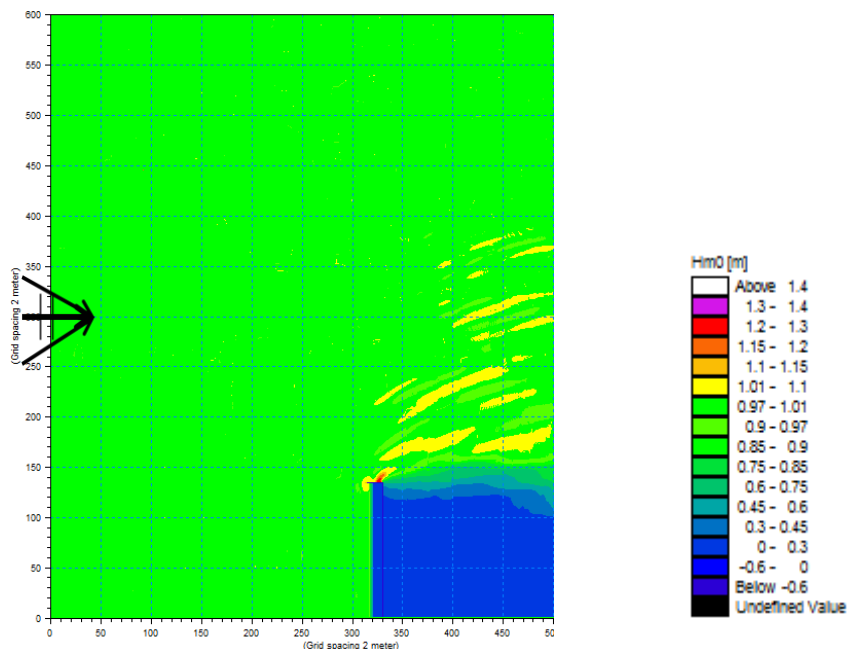
### 5.4.2.2 Ύψος κύματος $H=1,2\text{m}$ , γωνία πρόσπτωσης $\alpha=90^\circ$ , μέγιστη γωνία κατευθυντικότητας $\theta=10^\circ$ .



**Σχήμα 5.4.2.2** – Λόγος υψών κύματος  $H_{bw}/H$  για  $H_o=1,2\text{m}$ ,  $\alpha=90^\circ$  και  $\theta=10^\circ$

Στην περιοχή Α παρατηρείται η εντονότερη επιρροή της παρουσίας του τεχνικού έργου με αύξηση των κυματικών μεγεθών μέχρι και τοπικά 16%. ( $H_{bw}/H=1,16$ ). Η επιρροή αυτή αποσβένεται πιο κοντά στην ακτή όπου παραμένει σε επίπεδα κάτω του 10%, ενώ ακόμα διατηρείται σε μία απόσταση σχετικά μικρή από την κορυφή του κυματοθραύστη, στην διεύθυνση παράλληλα με την ακτογραμμή. Σε μεγαλύτερη απόσταση παρατηρείται ότι η παρουσία του κυματοθραύστη επηρεάζει ελάχιστα έως καθόλου τα κυματικά χαρακτηριστικά καθώς αυτά πλησιάζουν προς την ακτή.

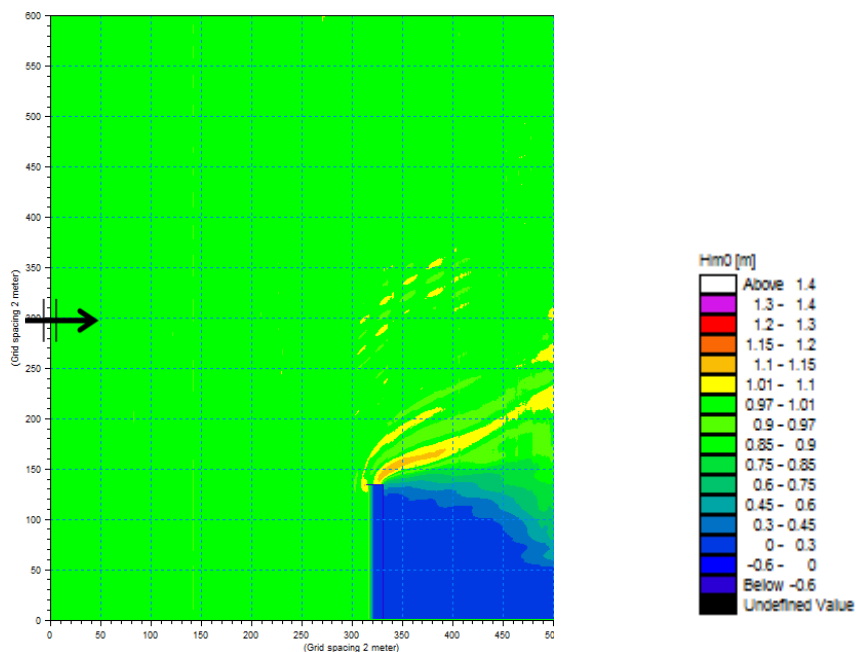
### 5.4.2.3 Ύψος κύματος $H=1,2\text{m}$ , γωνία πρόσπτωσης $\alpha=90^\circ$ , μέγιστη γωνία κατευθυντικότητας $\theta=30^\circ$ .



Σχήμα 5.4.2.3 – Λόγος υψών κύματος  $H_{bw}/H$  για  $H_o=1,2\text{m}$ ,  $\alpha=90^\circ$  και  $\theta=30^\circ$

Στα ανάντη του κυματοθραύστη (περιοχή Γ) παρουσιάζεται σε ορισμένα σημεία μια μικρή αύξηση του ύψους κύματος λόγω της ανακλάσεων. Στην περιοχή αμέσως κατάντη της κορυφής του κυματοθραύστη και εξωτερικά της λιμενολεκάνης (περιοχή Α) παρατηρείται η εντονότερη επιρροή της παρουσίας του τεχνικού έργου με αύξηση των κυματικών μέχρι 10%. ( $H_{bw}/H=1,10$ ). Η επιρροή αυτή παρατηρείται ότι έχει τη μεγαλύτερή της τιμή στην κορυφή του κυματοθραύστη ( $H_{bw}/H=1,20$ ), ενώ σε μικρότερο βαθμό εξαπλώνεται σε μία απόσταση σχετικά μεγάλη από την κορυφή του, στην διεύθυνση παράλληλα με την ακτογραμμή. Στην απόσταση αυτή λοιπόν παρατηρείται ότι η παρουσία του κυματοθραύστη επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό τα κυματικά χαρακτηριστικά καθώς αυτά πλησιάζουν προς την ακτή.

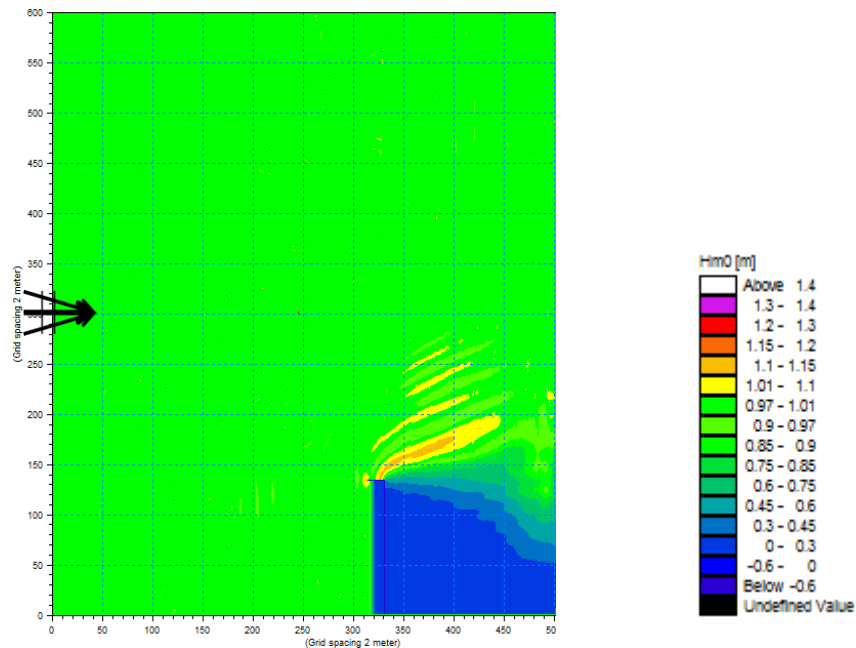
#### 5.4.2.4 Ύψος κύματος $H=3\text{m}$ , γωνία πρόσπτωσης $\alpha=90^\circ$ , μέγιστη γωνία κατευθυντικότητας $\theta=0^\circ$ .



Σχήμα 5.4.2.4 – Λόγος υψών κύματος  $H_{bw}/H$  για  $H_o=3\text{m}$ ,  $\alpha=90^\circ$  και  $\theta=0^\circ$

Στην περιοχή Α παρατηρείται η εντονότερη επιρροή της παρουσίας του τεχνικού έργου με αύξηση των κυματικών μεγεθών μέχρι και τοπικά 15%. ( $H_{bw}/H=1,15$ ). Η επιρροή αυτή αποσβένεται πιο κοντά στην ακτή όπου παραμένει σε επίπεδα κάτω του 10%, ενώ διατηρείται σε μία απόσταση σχετικά μικρή από την κορυφή του κυματοθραύστη, στην διεύθυνση παράλληλα με την ακτογραμμή. Σε μεγαλύτερη απόσταση παρατηρείται ότι η παρουσία του κυματοθραύστη επηρεάζει ελάχιστα έως καθόλου τα κυματικά χαρακτηριστικά καθώς αυτά πλησιάζουν προς την ακτή.

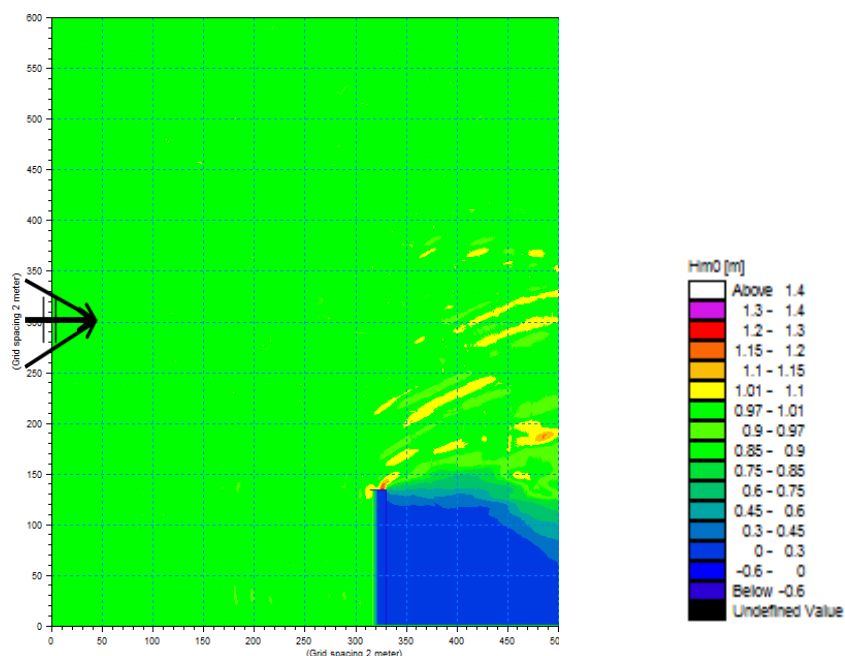
### 5.4.2.5 Ύψος κύματος $H=3\text{m}$ , γωνία πρόσπτωσης $\alpha=90^\circ$ , μέγιστη γωνία κατευθυντικότητας $\theta=10^\circ$ .



Σχήμα 5.4.2.5 – Λόγος υψών κύματος  $H_{bw}/H$  για  $H_o=3\text{m}$ ,  $\alpha=90^\circ$  και  $\theta=10^\circ$

Στην περιοχή Α παρατηρείται η εντονότερη επιρροή της παρουσίας του τεχνικού έργου με αύξηση των κυματικών μεγεθών μέχρι και τοπικά 15%. ( $H_{bw}/H=1,15$ ). Η επιρροή αυτή αποσβένεται πιο κοντά στην ακτή, ενώ διατηρείται σε μία απόσταση σχετικά μικρή από την κορυφή του κυματοθραύστη, στην διεύθυνση παράλληλα με την ακτογραμμή. Σε μεγαλύτερη απόσταση παρατηρείται ότι η παρουσία του κυματοθραύστη επηρεάζει ελάχιστα έως καθόλου τα κυματικά χαρακτηριστικά καθώς αυτά πλησιάζουν προς την ακτή.

**5.4.2.6 Ύψος κύματος  $H=3m$ , γωνία πρόσπτωσης  $\alpha=90^\circ$ , μέγιστη γωνία κατευθυντικότητας  $\theta=30^\circ$ .**



**Σχήμα 5.4.2.6** – Λόγος υψών κύματος  $H_{bw}/H$  για  $H_o=3m$ ,  $\alpha=90^\circ$  και  $\theta=30^\circ$

Στην περιοχή Γ παρουσιάζεται σε ορισμένα σημεία μια μικρή αύξηση του ύψους κύματος λόγω τα ανακλάσεων. Στην περιοχή Α παρατηρείται η εντονότερη επιρροή τα παρουσίας του τεχνικού έργου με αύξηση των κυματικών μέχρι 10%. ( $H_{bw}/H=1,10$ ). Η επιρροή αυτή παρατηρείται ότι έχει τη μεγαλύτερή τα τιμή στην κορυφή του κυματοθραύστη ( $H_{bw}/H=1,20$ ), ενώ σε μικρότερο βαθμό εξαπλώνεται σε μία απόσταση σχετικά μεγάλη από την κορυφή του, στην διεύθυνση παράλληλα με την ακτογραμμή. Στην απόσταση αυτή λοιπόν παρατηρείται ότι η παρουσία του κυματοθραύστη επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό τα κυματικά χαρακτηριστικά καθώς αυτά πλησιάζουν τα την ακτή.

## 5.5 ΜΕΓΕΘΗ ΤΟΥ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΠΡΟΣΠΙΠΤΩΝΤΟΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ

Για μια καλύτερη επισκόπηση των κυματικών μεγεθών υπολογίστηκε η κλίση ( $H/L$ ) και ο λόγος μη γραμμικότητας ( $H/d$ ) του κυματισμού σε συγκεκριμένα κελιά του καννάβου. Το πρώτο σημείο A με συντεταγμένες [100,300] βρίσκεται στο μέσο τα γραμμής παραγωγής κυματισμών του μοντέλου σε βάθος  $d_A=13,2\text{m}$ , ενώ το δεύτερο σημείο B με συντεταγμένες [313,136] βρίσκεται στην κορυφή του ακρομολίου σε βάθος  $d_B=8,2\text{m}$ . Τα συγκεκριμένα σημεία επιλέχθηκαν ως αντιπροσωπευτικότερα του παραγόμενου κυματισμού (σημείο A) και του προσπίπτοντος κυματισμού (σημείο B).

Στους παρακάτω πίνακες καταγράφονται αναλυτικά για κάθε σενάριο, τα κυματικά μεγέθη που υπολογίστηκαν για τα σημεία A και B. Υπενθυμίζεται ότι όλα τα κύματα που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας της παρούσας εργασίας έχουν περίοδο  $T=7\text{sec}$ .

**Πίνακας 5.5.1 – Κλίση ( $H/L$ ) και λόγος ( $H/d$ ) στα σημεία A και B**

Κυματικά χαρακτηριστικά			breakwater	A		B	
$H_0$ (m)	$a_0$	$\theta$		H/d	H/L	H/d	H/L
0,5	90°	-	no bw	0,053	0,011	0,085	0,013
			bw	0,053	0,011	0,095	0,014

Με  $\max H_{bw}/H = 1,18$

Κυματικά χαρακτηριστικά			breakwater	A		B	
$H_0$ (m)	$a_0$	$\theta$		H/d	H/L	H/d	H/L
0,5	100°	-	no bw	0,053	0,011	0,087	0,013
			bw	0,053	0,011	0,096	0,014

Με  $\max H_{bw}/H = 1,17$

Κυματικά χαρακτηριστικά			breakwater	A		B	
$H_0$ (m)	$a_0$	$\theta$		H/d	H/L	H/d	H/L
0,5	120°	-	no bw	0,055	0,011	0,089	0,012
			bw	0,056	0,011	0,099	0,013

Με  $\max H_{bw}/H = 1,06$

Μη κανονικοί – γραμμικοί κυματισμοί

**Πίνακας 5.5.2 – Κλίση (H/L) και λόγος (H/d) στα σημεία A και B**

Κυματικά χαρακτηριστικά			breakwater	A		B	
H <sub>0</sub> (m)	a <sub>0</sub>	θ		H/d	H/L	H/d	H/L
0,5	90°	0	no bw	0,031	0,006	0,029	0,004
			bw	0,031	0,006	0,032	0,005

Με max H<sub>bw</sub>/H = 1,165

Κυματικά χαρακτηριστικά			breakwater	A		B	
H <sub>0</sub> (m)	a <sub>0</sub>	θ		H/d	H/L	H/d	H/L
0,5	90°	10°	no bw	0,033	0,007	0,053	0,008
			bw	0,031	0,006	0,058	0,009

Με max H<sub>bw</sub>/H = 1,14

Κυματικά χαρακτηριστικά			breakwater	A		B	
H <sub>0</sub> (m)	a <sub>0</sub>	θ		H/d	H/L	H/d	H/L
0,5	90°	30°	no bw	0,038	0,008	0,06	0,009
			bw	0,038	0,008	0,065	0,01

Με max H<sub>bw</sub>/H = 1,10

Κυματικά χαρακτηριστικά			breakwater	A		B	
H <sub>0</sub> (m)	a <sub>0</sub>	θ		H/d	H/L	H/d	H/L
0,5	100°	0	no bw	0,029	0,006	0,029	0,004
			bw	0,03	0,006	0,032	0,005

Με max H<sub>bw</sub>/H = 1,18

Κυματικά χαρακτηριστικά			breakwater	A		B	
H <sub>0</sub> (m)	a <sub>0</sub>	θ		H/d	H/L	H/d	H/L
0,5	100°	10°	no bw	0,035	0,007	0,049	0,007
			bw	0,036	0,007	0,05	0,007

Με max H<sub>bw</sub>/H = 1,08

Κυματικά χαρακτηριστικά			breakwater	A		B	
H <sub>0</sub> (m)	a <sub>0</sub>	θ		H/d	H/L	H/d	H/L
0,5	100°	30°	no bw	0,053	0,011	0,046	0,007
			bw	0,053	0,011	0,05	0,007

Με max H<sub>bw</sub>/H = 1,06

Κυματικά χαρακτηριστικά			breakwater	A		B	
$H_0$ (m)	$a_0$	$\theta$		H/d	H/L	H/d	H/L
0,5	120°	0	no bw	0,025	0,005	0,03	0,004
			bw	0,025	0,005	0,034	0,005

Με max  $H_{bw}/H = 1,06$ 

Κυματικά χαρακτηριστικά			breakwater	A		B	
$H_0$ (m)	$a_0$	$\theta$		H/d	H/L	H/d	H/L
0,5	120°	10°	no bw	0,056	0,011	0,041	0,005
			bw	0,056	0,011	0,049	0,006

Με max  $H_{bw}/H = 1,05$ 

Κυματικά χαρακτηριστικά			breakwater	A		B	
$H_0$ (m)	$a_0$	$\theta$		H/d	H/L	H/d	H/L
0,5	120°	30°	no bw	0,042	0,008	0,027	0,004
			bw	0,042	0,008	0,029	0,004

Με max  $H_{bw}/H = 1,05$ Κανονικοί – Μη γραμμικοί κυματισμοί**Πίνακας 5.5.3** – Κλίση (H/L) και λόγος (H/d) στα σημεία A και B

Κυματικά χαρακτηριστικά			breakwater	A		B	
$H_0$ (m)	$a_0$	$\theta$		H/d	H/L	H/d	H/L
1,2	90°	-	no bw	0,126	0,025	0,198	0,029
			bw	0,127	0,026	0,22	0,032

Με max  $H_{bw}/H = 1,165$ 

Κυματικά χαρακτηριστικά			breakwater	A		B	
$H_0$ (m)	$a_0$	$\theta$		H/d	H/L	H/d	H/L
3	90°	-	no bw	0,316	0,064	0,46	0,068
			bw	0,317	0,064	0,51	0,075

Με max  $H_{bw}/H = 1,42$



Μη Κανονικοί – Μη γραμμικοί κυματισμοί

Πίνακας 5.5.4 – Κλίση (H/L) και λόγος (H/d) στα σημεία A και B

Κυματικά χαρακτηριστικά			breakwater	A		B	
H <sub>0</sub> (m)	a <sub>0</sub>	θ		H/d	H/L	H/d	H/L
1,2	90°	0	no bw	0,075	0,015	0,069	0,01
			bw	0,076	0,015	0,075	0,011

Με max H<sub>bw</sub>/H = 1,15

Κυματικά χαρακτηριστικά			breakwater	A		B	
H <sub>0</sub> (m)	a <sub>0</sub>	θ		H/d	H/L	H/d	H/L
1,2	90°	10°	no bw	0,078	0,016	0,124	0,018
			bw	0,078	0,016	0,136	0,02

Με max H<sub>bw</sub>/H = 1,16

Κυματικά χαρακτηριστικά			breakwater	A		B	
H <sub>0</sub> (m)	a <sub>0</sub>	θ		H/d	H/L	H/d	H/L
1,2	90°	30°	no bw	0,092	0,019	0,139	0,021
			bw	0,092	0,019	0,15	0,022

Με max H<sub>bw</sub>/H = 1,10

Κυματικά χαρακτηριστικά			breakwater	A		B	
H <sub>0</sub> (m)	a <sub>0</sub>	θ		H/d	H/L	H/d	H/L
3	90°	0	no bw	0,189	0,038	0,166	0,024
			bw	0,19	0,038	0,178	0,026

Με max H<sub>bw</sub>/H = 1,15

Κυματικά χαρακτηριστικά			breakwater	A		B	
H <sub>0</sub> (m)	a <sub>0</sub>	θ		H/d	H/L	H/d	H/L
3	90°	10°	no bw	0,195	0,039	0,293	0,043
			bw	0,194	0,039	0,317	0,047

Με max H<sub>bw</sub>/H = 1,15

Κυματικά χαρακτηριστικά			breakwater	A		B	
H <sub>0</sub> (m)	a <sub>0</sub>	θ		H/d	H/L	H/d	H/L
3	90°	30°	no bw	0,232	0,047	0,322	0,047
			bw	0,232	0,047	0,345	0,051

Με max H<sub>bw</sub>/H = 1,10

Στους κανονικούς γραμμικούς κυματισμούς παρατηρείται με τη μεταβολή της γωνίας πρόσπτωσης  $\alpha$  ( $90^\circ$ ,  $100^\circ$ ,  $120^\circ$ ) ότι τόσο ο λόγος μη γραμμικότητας ( $H/d$ ) όσο και η κλίση των κυματισμών ( $H/L$ ) μεταβάλλονται ελάχιστα. Για το σημείο B κυμαίνεται στα διαστήματα 0,095-0,099 και 0,013-0,014 αντίστοιχα.

Στους μη κανονικούς, γραμμικούς κυματισμούς για την ίδια γωνία πρόσπτωσης παρατηρείται μια αύξηση και του λόγου ( $H/d$ ) και της κλίσης ( $H/L$ ) με αύξηση της κατευθυντικότητας  $\theta$  ( $0$ ,  $10^\circ$ ,  $30^\circ$ ). Η αύξηση αυτή κυμαίνεται στα διαστήματα 0,032-0,065 και 0,005-0,01 αντίστοιχα για  $\alpha=90^\circ$ , 0,032-0,05 και 0,005-0,007 αντίστοιχα για  $\alpha=100^\circ$  και 0,029-0,049 και 0,004-0,006 αντίστοιχα για  $\alpha=120^\circ$ . Για σταθερή κατευθυντικότητα παρατηρείται με την μεταβολή της γωνίας πρόσπτωσης ( $90^\circ$ ,  $100^\circ$ ,  $120^\circ$ ) μια ελάχιστη μεταβολή των κυματικών χαρακτηριστικών ( $H/d$ ) και ( $H/L$ ). Για  $\theta=0$  οι τιμές των παραπάνω χαρακτηριστικών είναι μεταξύ 0,032-0,034 και σταθερή και ίση με 0,005 αντίστοιχα. Για  $\theta=10^\circ$  κυμαίνονται στα διαστήματα 0,049-0,058 και 0,006-0,009 αντίστοιχα. Για γωνία κατευθυντικότητας  $\theta=30^\circ$  η διακύμανση είναι λίγο μεγαλύτερη για τον λόγο ( $H/d$ ) και την κλίση ( $H/L$ ) και κυμαίνεται μεταξύ 0,029-0,065 και 0,004-0,01 αντίστοιχα

Στους κανονικούς μη γραμμικούς κυματισμούς με την αύξηση του ύψους του εισερχόμενου κυματισμού παρατηρείται έντονη αύξηση του λόγου ( $H/d$ ) και της κλίσης ( $H/L$ ) στο σημείο B, όπως βέβαια αναμενόταν και με τιμές μεταξύ 0,22-0,51 και 0,032-0,075 αντίστοιχα.

Στους μη κανονικούς, μη γραμμικούς κυματισμούς για την ίδια γωνία πρόσπτωσης με αύξηση της διάχυσης της ενέργειας των κυματισμών που εκφράζεται με την αύξηση της κατευθυντικότητας αυξάνονται και τα δύο κυματικά μεγέθη ( $H/d$  και  $H/L$ ). Τέλος, για την ίδια περίπτωση, αλλά με μεγαλύτερο ύψος κυματισμού οι αντίστοιχες τιμές των κυματικών μεγεθών είναι 2 έως 2,5 φορές μεγαλύτερες.

Στην πλειοψηφία των κυματισμών, παρατηρείται στο σημείο B που έγινε ο έλεγχος ότι ο λόγος ( $H/d$ ) είναι αρκετά μικρότερος από τις τιμές θραύσης ( $H/d = 0,6-0,8$ ). Μοναδική περίπτωση όπου στο συγκεκριμένο σημείο η τιμή του σχετικού βάθους πλησιάζει το κριτήριο θραύσης είναι αυτή με κυματικά χαρακτηριστικά  $T=7\text{sec}$ ,  $H=3,0\mu$ . και  $\alpha=90^\circ$ , όπου  $H/d = 0,51$ . Συνεπώς στο συγκεκριμένο σενάριο που εξετάστηκε το πλάτος της ζώνης θραύσης αυξάνεται και πλησιάζει τον

κυματοθραύστη, γεγονός που πιθανόν επηρεάζει και τα αποτελέσματα που σχολιάστηκαν παραπάνω.

Αναλυτικότερα όλες οι παραπάνω μεταβολές της κλίσης του κυματισμού (H/L) και του λόγου (H/d) συσχετιζόμενες με τα χαρακτηριστικά του παραγόμενου κυματισμού παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.5.5.

**Πίνακας 5.5.5 – Μεταβολή max Hbw/H στην περιοχή A σε σχέση με την μεταβολή των κυματικών χαρακτηριστικών**

Κυματισμοί	H	γωνία πρόσπτωσης $\alpha$	γωνία καταθυστικότητας $\theta$	H/d	H/L	max Hbw/H
κανονικοί - γραμμικοί	0,5μ.	90° - 100° - 120°	-	0,095-0,099	0,013-0,014	1,18-1,06
μη κανονικοί - γραμμικοί	0,5μ.	90°	0 - 10° - 30°	0,032-0,065	0,005-0,01	1,165-1,10
		100°	0 - 10° - 30°	0,032-0,05	0,005-0,007	1,18-1,06
		120°	0 - 10° - 30°	0,029-0,049	0,004-0,006	1,06-1,05
		90° - 100° - 120°	0	0,032-0,034	0,005	1,18-1,05
		90° - 100° - 120°	10°	0,049-0,058	0,006-0,009	1,14-1,05
		90° - 100° - 120°	30°	0,029-0,065	0,004-0,01	1,10-1,05
κανονικοί - μη γραμμικοί	1,2 - 3,0 μ.	90°	-	0,22-0,51	0,032-0,075	1,165-1,42
μη κανονικοί - μη γραμμικοί	1,2μ.	90°	0 - 10° - 30°	0,075-0,15	0,011-0,022	1,16-1,10
	3,0μ.	90°	0 - 10° - 30°	0,178-0,345	0,026-0,051	1,15-1,10

Με αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης, λοιπόν, ( $\alpha = 90^\circ$ - $120^\circ$ ) παρατηρείται για τους κανονικούς, μη γραμμικούς κυματισμούς μείωση του μέγιστου λόγου Hbw/H στην περιοχή A, μια διακύμανση μεταξύ 1,18-1,06. Αντίστοιχη συμπεριφορά έχουν και οι μη κανονικοί γραμμικοί κυματισμοί, όπου με σταθερή γωνία καταθυστικότητας  $\theta$  κάθε φορά, και μεταβάλλοντας με τον ίδιο τρόπο όπως και προηγούμενα τη γωνία πρόσπτωσης  $\alpha$ , ο λόγος Hbw/H κυμαίνεται μεταξύ 1,18-1,05, 1,14-1,05 και 1,10-1,05 για την κάθε περίπτωση.

Όσο γίνεται πιο έντονη η μη γραμμικότητα του κυματισμού (H = 1,2 – 3,0μ.) είναι σαφές ότι Hbw/H αυξάνεται και παίρνει τιμές μεταξύ 1,165 – 1,42, ενώ

παρατηρείται και διείσδυση του φαινομένου (ενίσχυση κυματικής δράσης) στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης και ταυτόχρονα εξάπλωσή του μακριά από αυτήν.

Με την αύξηση της γωνίας κατευθυντικότητας  $\theta$ , παρατηρείται μικρότερη ενίσχυση της κυματικής δράσης στην περιοχή μελέτης A, με τις τιμές του λόγου  $H_{bw}/H$  να κυμαίνονται για κάθε κυματικό σενάριο, όπως περιγράφονται στον Πίνακα 5.4.5, μεταξύ 1,165-1,10, 1,18-1,06, 1,06-1,05, 1,16-1,10 και 1,15-1,10 αντίστοιχα.

Για την επιρροή της μη κανονικότητας του κυματισμού στην ενίσχυση της κυματικής δράσης στην περιοχή A, από την παρούσα μελέτη και τα αποτελέσματά της δεν ήταν δυνατό να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα.

# *ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6*

*Συμπεράσματα*

## 6.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην επίδραση της περίθλασης και της διάθλασης κατάντη του κυματοθραύστη εκτός της σκιάς του. Αριθμητικές προσομοιώσεις έγιναν σε μία σειρά από κυματικά σενάρια για δυο περιπτώσεις βαθυμετρίας με απουσία και παρουσία κυματοθραύστη. Έπειτα απεικονίστηκε ο λόγος  $H_{bw}/H$  σε όλο τον κάναβο, ενώ για μια καλύτερη επισκόπηση των κυματικών μεγεθών υπολογίστηκε η κλίση ( $H/L$ ) και το σχετικό βάθος ( $H/d$ ) του κυματισμού σε συγκεκριμένα κελιά.

## 6.2 ΕΠΙΡΡΟΗ ΓΩΝΙΑΣ ΠΡΟΣΠΤΩΣΗΣ $\alpha$

Στις περιπτώσεις των κανονικών αλλά και των μη κανονικών κυματισμών μελετήθηκαν 3 γωνίες πρόσπτωσης  $90^\circ$ ,  $100^\circ$  και  $120^\circ$ . Παρατηρήθηκε για τις  $90^\circ$  η μεγαλύτερη αύξηση στα κυματικά χαρακτηριστικά, δηλαδή είναι πιο έντονη η ενίσχυση της κυματικής δράσης στην περιοχή ενδιαφέροντος. Στις  $100^\circ$  η κυματική κατάσταση διατηρείται σε πολύ κοντινά επίπεδα με αυτή των  $90^\circ$ , ενώ στις  $120^\circ$  η ενίσχυση των κυματικών μεγεθών εξασθενεί σημαντικά.

## 6.3 ΕΠΙΡΡΟΗ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΤΗΤΑΣ

Για μεγαλύτερους εισερχόμενους κυματισμούς, όπου γίνεται και πιο έντονη η μη γραμμικότητα προκαλείται διείσδυση του φαινομένου (ενίσχυση κυματικής δράσης) στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης και ταυτόχρονα εξάπλωσή του μακριά από αυτήν. Με την αύξηση της καμπυλότητας παρατηρείται μία αύξηση του προβλήματος στην περιοχή ενδιαφέροντος.

## 6.4 ΕΠΙΡΡΟΗ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ $\theta$

Η μέγιστη γωνία κατευθυντικότητας που χρησιμοποιήθηκε στην επεξεργασία κυμάνθηκε από 0 έως 30°. Η γωνία των 30° δεν ανταποκρίνεται πλήρως βέβαια στην πραγματικότητα λόγω της ύπαρξης του φαινομένου της διάθλασης κοντά στην ακτή, παρόλα αυτά επιλέχθηκε ως μία ακραία τιμή για να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την επιρροή της γωνίας  $\theta$ .

Με αύξηση της κατευθυντικότητας, λοιπόν, που εκφράζει τη διάχυση της ενέργειας των κυματισμών παρατηρείται μικρότερη ενίσχυση της κυματικής δράσης στην περιοχή μελέτης. Αυτό είναι αποτέλεσμα των μικρότερων wave wave interactions που παρουσιάζονται στην περιοχή αυτή.

## 6.5 ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Στην περίπτωση που οι εισερχόμενοι κυματισμοί είναι μη κανονικοί παρατηρείται μείωση στην έκταση που λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της ενίσχυσης της κυματικής δράσης.

Στους μη κανονικούς κυματισμούς συγκεκριμένα, η κατευθυντικότητα έχει τη μεγαλύτερη επιρροή από τις μεταβλητές που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία. Για τους ίδιους κυματισμούς με αύξηση της μη γραμμικότητας παρατηρείται εξάπλωση του φαινομένου αλλά ταυτόχρονη μείωση της έντασής του λόγω της παρουσίας θραύσης. Στην ίδια περίπτωση κυματισμών, με αύξηση της κατευθυντικότητας παρουσιάζονται σημαντικές επιρροές, το φαινόμενο εξαπλώνεται, όμως μετά τη ζώνη θραύσης εκμηδενίζεται μιας και έχει προηγηθεί η διάχυση της κυματικής ενέργειας.

## 6.6 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΕΤΑΙΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Για το μέλλον θα ήταν καλό η επεξεργασία αυτή να γίνει και για κυματοθραύστη με διαφορετική κάτοψη (π.χ. με καμπύλο τμήμα στο ακρομόλιο) για να μελετηθεί η επιρροή στην κυματική δράση. Πολύ σημαντικό επίσης θα ήταν να συσχετισθεί το φαινόμενο της ενίσχυσης της κυματικής δράσης με την διάβρωση που έχει παρατηρηθεί σε αντίστοιχες περιπτώσεις στην πραγματικότητα. Αυτό θα μπορούσε να γίνει με τη χρήση μίας άλλης υπορουτίνας του αριθμητικού μοντέλου MIKE 21 ST η οποία έχοντας ως δεδομένο το υδροδυναμικό πεδίο και τις τάσεις ακτινοβολίας υπολογίζει την στερεομεταφορά (φορτίο πυθμένα - φορτίο σε αιώρηση) και τον ρυθμό μεταβολής του πυθμένα.



**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- Abbott, M.B., Damsgaard, A. and Rodenhuis, G.S. (1973).* "System 21, Jupiter, A Design System for Two Dimensional Nearly Horizontal Flows", Journal of Hydraulic Research
- Abramowitz, M., Stegun, I.A., (1964).* "Handbook of Mathematical Functions", US National Bureau of Standards Applied Mathematics Series No. 55, Washington, Ch. 5.
- Booij, N., Ris, R.C., Holthuijsen, L.H., (1999).* "A third generation wave model for coastal regions, PART I, Model description and validation", J. Geophys. Res., 104, C4, 7649-7666.
- Borgman, L. E., (1965).* Directional Spectral Model for Design Use for Surface Waves. In: Hydraulic Engineering Laboratory, University of California, Berkeley, HEL 1-12, p.56.
- Bouws, E., Gunther, H., Rorethal, W., Vincent, C. L. (1984).* Similarity of the Wind Wave Spectrum in Finite Depth Water, Part I-Spectral Form. In: Jour. Geophys. Res., Vol 89, No. C1, pp 975-986.
- Bouws, E., Gunther, H., Vincent, C. L., (1985).* Similarity of the wind wave spectrum in finite-depth water, Part I-Spectral form. J. Geophys. Res., Vol 85, No. C3, pp 1524-1530.
- Bretschneider, C. L., (1959).* Wave Variability and Wave Spectra for Wind-Generated Gravity Waves. In: U.S. Army Corps of Engrs., Beach Erosion Board, Tech. Memo. No. 118.
- CEM, Coastal Engineering Manual, 2008, In: <http://chl.erd.c.usace.army.mil/cem> Last access: June 2010.*
- Courant, R.; Friedrichs, K.; Lewy, H. (1928).* "Über die partiellen Differenzgleichungen der mathematischen Physik"
- DHI Water & Environment (2005).* MIKE 21 Wave Modelling.
- Enet, F., Nahonl, A., van Vledder, G., Hurdle, D., (2006).* "Evaluation of Diffraction Behind a Semi-Infinite Breakwater in the SWAN Wave Model", 9<sup>th</sup> Int. Workshop Wave Hind casting and Forecasting, Victoria, B.C., CANADA September 2006.

- Filianoti, P. (2000)*. “Diffraction of random wind-generated waves by a detached breakwater or breakwater gap.” *Ocean Engineering.*, 27, 1249–1263.
- Goda, Y., (1974)*. Estimation of wave Statistics from Spectra Information. In: Proc. Intl. Symp. on Ocean Wave Meas. and Anal., ASCE, Vol 1, pp 320-337.
- Goda, Y., (1985a)*. Numerical Examination of Several Statistical Parameters of Sea Waves. In: Rept. Port and Harbor Res. Inst., Vol 24, No. 4, pp 65-102.
- Goda, Y., (1985b)*. “Random Seas and Design of Maritime Structures”. In: Univ. of Tokyo Press, Tokyo, Japan.
- Hasselmann et al. (1973)*. Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay During the Joing North Sea Wave Project (JONSWAP). In: Deutsche Hydrograph. Zeit., Ergänzungsheft Reihe A (80), No. 12.
- Holthuijsen, L.H., Herman, A., Booij, N., (2003)*. “Phase-decoupled refraction-defraction for spectral wave models”, *Coastal Engineering* 49, 291-305.
- ISSC (1964)*. In: Proceedings of the Second International Ship Structures Congress, Delft, The Netherlands.
- ITTC (1966)*. Recommendations of the 11th International Towing Tank Conference. In: Proc. 11th ITTC, Tokyo, Japan.
- Liu, P.C., (1971)*. Normalized and Equilibrium Spectra of Wind-Wave in Lake Michigan. In: Jour. Phys. Ocean., Vol 1 No. 4, pp 249-257.
- Longuet-Higgins, M.S., (1952)*. On the Statistical Distribution of the Wave Heights of Sea Waves. In: Jour. Marine Res., Vol 11, pp 245-266.
- Longuet-Higgins, M.S., (1962)*. The Distribution of Intervals Between Zeros of Random Function. In: Phil. Trans. Roy. Soc. London, Series A, Vol 254, pp 557-599.
- Madsen, P.A., Murray, R. and Sorensen, O.R., (1991)*. A New Form of the Boussinesq Equations with Improved Linear Dispersion Characteristics (Part 1). *Coastal Eng.*, 15,371-388.
- Madsen, P.A., Sorensen, O., (1992)*. “A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics, Part 2. A slowly-varying topography”, *Coastal Engineering* 18, 183-204.
- Madsen, P.A., Sorensen, O., and Schaffer, H.A., (1997b)*. Surf zone dynamics simulated by a Boussinesq type model. Part II: Surf beat and swash zone oscillations for wave groups and irregular waves. *Coastal Eng.*, 32, 289-320.

- Mitsuyasu, H., (1972).* The One-Dimensional Wave Spectra at Limited Fetch. In: Proc. 13th Coastal Engr. Conf., Vol 1, pp 289-306.
- Mitsuyasu, H., et al. (1975).* Observations of the Directional spectrum of Ocean Waves Using a Cloverleaf Buoy. In: Jour. Phys. Ocean., Vol 5, pp 750-760.
- McCormick, M.E., Kraemer, D.R.B., (2002).* “Polynomial approximations for Fresnel integrals in diffraction analysis”, Coastal Engineering 44, 261-266.
- Μουτζούρης, Κ.Ι., (2007).* «Θαλάσσια Υδραυλική», Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
- Μουτζούρης, Κ.Ι., (2010).* «Προστασία Ακτογραμμής στα αμέσως κατάντη λιμένων από την αυξημένη κυματική δράση λόγω προσήνεμων μολών», 5<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Λιμενικών Έργων 2010, Αθήνα.
- Munk, W.H. and M.A.H. Taylor (1947).* “Refraction of Ocean Waves: A Process Linking Underwater Topography to Beach Erosion”.
- Nagai, K., (1972).* Diffraction of the irregular sea due to breakwaters. In: Coastal engineering In Japn 15, 59-67.
- Newland., D.E., (1984).* An introduction to random vibrations and spectral analysis. In: Second edition. Longman Scientific and Technical.
- Ochi, M.K., Hubble, E.N., (1976).* Six Parameter Wave Spectra. In: Proc. 15th Coastal Engr. Conf., Vol 1, pp 301-328.
- Penny, W.G., Price, A.T., (1952).* “The diffraction theory of sea waves and the shelter afforded by breakwaters, Part I” in “Some gravity wave problems in the motion of perfect liquids” by J.C. Martin, W.J. Moyce, W.G. Penny, A.T. Price and C.K. Thornmill, Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A 244-253.
- Peregrine, D.H., (1967).* “Long waves on a beach”, Journal of Fluid Mechanics 27, 817-827.
- Phillips, O.M., (1958).* On the Generation of Waves by Turbulent Wind. In: Jour. Fluid Mech., Vol 2, pp 417-445.
- Pierson, W.J., Tuttle, J.J., Wooley, J.A., (1952).* The theory of the refraction of a short crested Gaussian sea surface with application to the northern New Jersey coast. In: Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Coastal Engineering, ASCE, 86-108.
- Pierson, W.J., Moskowitz, L., (1964).* A Proposed Spectral Form for Fully-Developed Wind Sea Based on the Similarity Law of S. A. Kitaigorodskii. In: Journal of Geophysical Research, Vol 69, pp 5181-5203.

- Scott, J.R., (1965).* A Sea Spectrum for Model Tests and Long-Term Ship Prediction.  
In: Jour. Ship Res., Vol 9, pp 145-152.
- Sommerfeld, A., (1896).* “Mathematische theorie der diffraction”, Math. Annalen. 47,  
317-374.
- Sorensen, O.R. and Sorensen. L.S. (2001).* Boussinesq type modeling using  
unstructured finite element technique. In Proc. 27<sup>th</sup> Coastal Eng. Conf. 190-  
202.
- Sverdrup, H.U., Munk, W.H., (1947).* Wind, Sea and Swell: Theory of Relations for  
Forecasting. In: U.S. Navy Hydro. Office, Publication No. 601.
- Tromans P.S., Anaturk AR, Hagemeyer P.A., (1991).* “New model for the kinematics  
of large ocean waves”. In: Proc. First Intern. Confer. Offshore and Polar  
Engineering; Vol 3. 1991, p. 1-64.
- Witting, J.M., (1984).* “A unified model for the evolution of nonlinear water waves”,  
J.Comput. Phys. 56, 203-236.
- Wiegel, R.L., (1962).* “Diffraction of Waves by a semi-infinite Breakwater”, J.  
Hydraulics Div., ASCE, Vol. 88, No HY1, 27-44.