



ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	v
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	vi
ABSTRACT	vii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΤΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ	1
1.1 ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΙ	1
1.1.1 ΚΥΜΑΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΣΤΟ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ	1
1.1.1.1 ΑΝΕΜΟΓΕΝΕΙΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΙ – ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΙ ΑΝΕΜΟΥ ΚΑΙ ΑΠΟΘΑΛΑΣΣΕΣ	3
1.1.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ	5
1.1.3 ΚΙΝΗΣΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΝΕΡΟΥ	7
1.1.4 ΚΥΜΑΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΣΤΟ ΠΑΡΑΚΤΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ.....	9
1.1.4.1 ΑΝΑΡΡΙΧΗΣΗ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ.....	10
1.1.4.2 ΠΕΡΙΘΛΑΣΗ	11
1.1.4.3 ΡΗΧΩΣΗ	13
1.1.4.4 ΔΙΑΘΛΑΣΗ.....	14
1.1.4.5 ΘΡΑΥΣΗ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ.....	15
1.1.5 ΦΑΣΜΑ ΚΥΜΑΤΟΣ	17
1.1.6 ΒΑΘΥ, ΡΗΧΟ ΚΑΙ ΕΝΔΙΑΜΕΣΟ ΝΕΡΟ.....	22
1.1.7 ΩΚΕΑΝΙΑ ΡΕΥΜΑΤΑ	24
1.1.7.1 ΤΥΠΟΙ ΡΕΥΜΑΤΩΝ	24
1.1.8 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ.....	25
1.1.9 ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΩΝ	28
1.2 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΠΟΥ ΣΥΜΒΑΙΝΟΥΝ ΣΤΟ ΠΑΡΑΚΤΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ	29
1.2.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΚΤΟΓΡΑΜΜΗΣ	29
1.2.2 ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ ΝΕΡΟΥ.....	29
1.2.4 ΓΕΝΙΚΗ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΑΚΤΗΣ	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ	38
2.1 ΥΠΕΡΑΚΤΙΑ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ	38
2.1.1 ΓΕΝΙΚΑ	38
2.1.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΥΠΕΡΑΚΤΙΑΣ ΜΕ ΧΕΡΣΑΙΑ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	40
2.2 ΥΠΕΡΑΚΤΙΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ	42
2.2.1 ΓΕΝΙΚΑ	42



2.2.2 ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ ΥΠΕΡΑΚΤΙΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ.....	45
2.2.3 ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΣΕ ΕΝΑ ΥΠΕΡΑΚΤΙΟ ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ..	48
2.2.4 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	50
2.2.4.1 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΑΝΕΜΟΥ.....	51
2.2.4.2 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ.....	51
2.2.4.3 ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΠΥΘΜΕΝΑ	53
2.2.4.4 ΣΕΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΜΕ ΑΚΡΑΙΑ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ.....	53
2.2.4.5 ΣΤΑΘΜΗ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΑΣ	54
2.2.5 ΥΠΟΣΚΑΦΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΘΕΜΕΛΙΩΜΕΝΗΣ ΣΤΟΝ ΠΥΘΜΕΝΑ (SCOURING).....	54
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	56
3.1 ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ	56
3.2 ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ	58
3.2.1 ΓΕΝΙΚΑ	58
3.2.2 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ BOUSSINESQ	59
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΜΙΚΕ 21 BW	64
4.1 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΜΙΚΕ 21 BW.....	64
4.1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	64
4.1.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΜΙΚΕ 21 BW	66
4.1.3 ΣΤΟΙΒΑΔΕΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ	75
4.1.5 ΘΡΑΥΣΗ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ.....	76
4.1.6 ΓΡΑΜΜΗ ΓΕΝΕΣΗΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ	78
4.1.7 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ BOUSSINESQ B.....	79
Εικόνα 4.4: Ποσοστιαία σφάλματα της ταχύτητας φάσης c , ανάλογα με τον συντελεστή B . [15]	80
4.1.8 ΑΡΙΘΜΟΣ COURANT.....	80
4.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΣΧΗΜΑ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΜΙΚΕ 21 BW	81
4.3 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΧΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΜΙΚΕ 21 BW	82
4.4 ΣΤΗΣΙΜΟ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ (MODEL SETUP).....	84
4.4.1 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	84
4.4.2 ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ	87
4.4.3 ΤΙΜΗ ΒΑΘΥΜΕΤΡΙΑΣ ΠΟΥ ΛΑΜΒΑΝΕΤΑΙ ΩΣ ΞΗΡΑ (BATHYMETRY VALUE REPRESENTING LAND)	88
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΠΡΟΤΥΠΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΜΙΚΕ 21 BW.....	89



5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	89
5.2 ΓΡΑΜΜΙΚΑ ΜΕΤΑΒΑΛΟΜΕΝΗ ΒΑΘΥΜΕΤΡΙΑ	89
5.3 ΓΡΑΜΜΙΚΑ ΜΕΤΑΒΑΛΟΜΕΝΗ ΒΑΘΥΜΕΤΡΙΑ ΜΕ ΜΙΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ	90
5.4 ΓΡΑΜΜΙΚΑ ΜΕΤΑΒΑΛΟΜΕΝΗ ΒΑΘΥΜΕΤΡΙΑ ΜΕ ΔΥΟ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ	92
5.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	93
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΜΙΚΕ 21 BW	94
6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	94
6.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΩΝΤΑΣ ΤΗ ΒΑΘΥΜΕΤΡΙΑ	98
6.2.1 ΓΕΝΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ ΠΡΙΝ ΤΗ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΗΣ ΒΑΘΥΜΕΤΡΙΑΣ.....	98
6.2.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΩΝΤΑΣ ΤΗΝ ΤΕΛΙΚΗ ΒΑΘΥΜΕΤΡΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	100
6.2.3 ΔΗΜΙΟΥΡΓΩΝΤΑΣ ΤΟ ΣΤΡΩΜΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ (SPONGE LAYER)	103
6.2.4 ΔΗΜΙΟΥΡΓΩΝΤΑΣ ΤΟ ΣΤΡΩΜΑ ΠΟΡΩΔΟΥΣ (POROSITY LAYER).....	104
6.3 ΔΗΜΙΟΥΡΓΩΝΤΑΣ ΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΓΙΑ ΤΗ ΓΕΝΕΣΗ ΤΩΝ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ	106
6.4 ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΟΥ ΜΙΚΕ 21 BW	109
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΘΑΛΑΣΣΑΣ	112
7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	112
7.2 ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΘΑΛΑΣΣΑΣ - ΣΕΝΑΡΙΟ 1	112
7.2.1 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 1 ^η - ΠΕΡΙΟΧΗ ΧΩΡΙΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ.....	113
7.2.2 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 2 ^η - ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕ ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ ΜΕ 12 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ.....	114
7.2.2.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ 1 ^{ης} ΚΑΙ 2 ^{ης} ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΙΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΟΣΟΝ ΑΦΟΡΑ ΤΟ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟ ΥΨΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ.....	116
7.2.2.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ 1 ^{ης} ΚΑΙ 2 ^{ης} ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΙΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΟΣΟΝ ΑΦΟΡΑ ΤΗΝ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ	119
7.2.2.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ 1 ^{ης} ΚΑΙ 2 ^{ης} ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΕΝΔΙΑΜΕΣΑ ΑΠΟ ΤΙΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΟΣΟΝ ΑΦΟΡΑ ΤΗΝ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ.....	122
7.2.2.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ 1 ^{ης} ΚΑΙ 2 ^{ης} ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΣΕ ΣΗΜΕΙΑ ΜΕ ΑΠΟΤΟΜΗ ΚΛΙΣΗ ΠΥΘΟΜΕΝΑ ΟΣΟΝ ΑΦΟΡΑ ΤΗΝ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ.....	123
7.2.3 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 3 ^η - ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕ ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ ΜΕ 1 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ	125
7.2.3.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ 2 ^{ης} ΚΑΙ 3 ^{ης} ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ Νο5 ΟΣΟΝ ΑΦΟΡΑ ΤΟ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟ ΥΨΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ.....	126
7.2.3.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ 2 ^{ης} ΚΑΙ 3 ^{ης} ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΙΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΟΣΟΝ ΑΦΟΡΑ ΤΗΝ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ	129
7.3 ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΘΑΛΑΣΣΑΣ – ΣΕΝΑΡΙΟ 2	130
7.3.1 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 4 ^η - ΠΕΡΙΟΧΗ ΧΩΡΙΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ.....	130
7.3.2 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 5 ^η - ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕ ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ ΜΕ 12 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ.....	132



7.3.2.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ 4 ^{ης} ΚΑΙ 5 ^{ης} ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΙΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΟΣΟΝ ΑΦΟΡΑ ΤΟ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟ ΥΨΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ.....	133
7.3.2.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ 4 ^{ης} ΚΑΙ 5 ^{ης} ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΙΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΟΣΟΝ ΑΦΟΡΑ ΤΗΝ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ	136
7.3.2.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ 4 ^{ης} ΚΑΙ 5 ^{ης} ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΕΝΔΙΑΜΕΣΑ ΑΠΟ ΤΙΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΟΣΟΝ ΑΦΟΡΑ ΤΗΝ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ.....	140
7.3.2.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ 4 ^{ης} ΚΑΙ 5 ^{ης} ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΣΕ ΣΗΜΕΙΑ ΜΕ ΑΠΟΤΟΜΗ ΚΛΙΣΗ ΠΥΘΜΕΝΑ ΟΣΟΝ ΑΦΟΡΑ ΤΗΝ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ.....	141
7.3.3 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 6 ^η - ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕ ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ ΜΕ 1 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ	143
7.3.3.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ 5 ^{ης} ΚΑΙ 6 ^{ης} ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΙΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΟΣΟΝ ΑΦΟΡΑ ΤΟ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟ ΥΨΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ.....	144
7.3.3.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ 5 ^{ης} ΚΑΙ 6 ^{ης} ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΙΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΟΣΟΝ ΑΦΟΡΑ ΤΗΝ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ	147
7.4 ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΘΑΛΑΣΣΑΣ – ΣΕΝΑΡΙΟ 3	148
7.4.1 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 7 ^η - ΠΕΡΙΟΧΗ ΧΩΡΙΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ.....	149
7.4.2 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 8 ^η - ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕ ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ ΜΕ 12 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ.....	150
7.4.2.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ 7 ^{ης} ΚΑΙ 8 ^{ης} ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΟΣΟΝ ΑΦΟΡΑ ΤΟ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟ ΥΨΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗΝ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΠΟ ΤΟ ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ	151
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 – ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	154
8.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	154
8.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ	155
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	156



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θέλω να ευχαριστήσω από καρδιάς, τον καθηγητή μου κ. Τακβόρ Σουκισιάν για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το αντικείμενο που με ενδιαφέρει πολύ και την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση του καθ' όλη την διάρκεια της διπλωματικής εργασίας. Η μεταξύ μας επικοινωνία και συνεργασία σε συνεχές επίπεδο αποτέλεσε καθοριστικό παράγοντα για την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης τον καθηγητή κ. Σπυρίδωνα Μαυράκο, τον καθηγητή κ. Μιχάλη Σακελαρίου και τον κ. Ηλία Μουσούλη, από την εταιρεία DHI, για την παροχή της άδειας χρήσης του αριθμητικού κυματικού μοντέλου MIKE 21, αλλά και την ουσιαστική του βοήθεια.

Επιπροσθέτως θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και κυρίως την Ευτυχία για την υπομονή και την υποστήριξή της όλα αυτά τα χρόνια.



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Κύριο θέμα της διπλωματικής εργασίας είναι η εισαγωγική παρουσίαση της κυματικής θεωρίας Boussinesq και κατόπιν η εφαρμογή της θεωρίας αυτής μέσω του λογισμικού MIKE 21 BW της DHI για τη μελέτη των επιδράσεων τεχνικών έργων στη θαλάσσια κυκλοφορία και κυματική διάδοση κοντά σε μία παράκτια περιοχή. Πιο συγκεκριμένα μελετώνται τα κυματικά πεδία της περιοχής που βρίσκεται μεταξύ των νήσων Οθωνοί και Μαθράκι στις Διαπόντιους Νήσους, βόρεια της Κέρκυρας, πριν και μετά την εγκατάσταση αιολικού πάρκου αποτελούμενου από 12 ανεμογεννήτριες. Ερευνώνται και σχολιάζονται οι μεταβολές που προκάλεσε η φυσική παρουσία του έργου στην περιοχή πλησίον της περιοχής του έργου, όσο και στην γειτονική.

Οι θαλάσσιοι κυματισμοί διαδίδοντας μεγάλα ποσά ενέργειας και δευτερευόντως μάζας, από την ανοιχτή θάλασσα προς τις ακτές, αποτελούν ένα πολύ σημαντικό παράγοντα που επιδρά στη διαμόρφωση των ακτών, στην ισορροπία του οικοσυστήματος στην παράκτια ζώνη, στην ρύπανση των ακτών, στην αλληλεπίδραση με τις παράκτιες κατασκευές κλπ.

Περίπου τα 2/3 του παγκόσμιου πληθυσμού κατοικεί κοντά στις ακτές και για αυτό οι παράκτιες ζώνες είναι πολύ σημαντικό κομμάτι για την κάθε περιοχή. Η κυματική δραστηριότητα και η μετακίνηση άμμου στην παράκτια ζώνη είναι επίσης σημαντικά όσων αφορά δραστηριότητες μηχανικού όπως η διάβρωση και η πρόσχωση υλικού περιμετρικά από κατασκευές όπως λιμένες, κυματοθραύστες και πάρκα με ανεμογεννήτριες.

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας, πέραν της εισαγωγικής περιγραφής των τοπικών κυματικών φαινομένων που υπάρχουν σε μια παράκτια περιοχή και της θεωρίας/μοντέλων Boussinesq, γίνεται προσδιορισμός των δυναμικών συνθηκών στην περιοχή των Διαπόντιων Νήσων με τη βοήθεια του μοντέλου MIKE 21 BW. Σκοπός είναι η μελέτη μιας πραγματικής κατάστασης περιοχής. Προς αυτό, αξιοποιείται η βαθυμετρία και σειρά άλλων παραμέτρων, χαρακτηριστικών της περιοχής μελέτης, για να δημιουργηθεί το κατάλληλο περιβάλλον προσομοίωσης του module Boussinesq του MIKE 21 BW. Τα αποτελέσματα θα σχολιαστούν και απεικονιστούν ανάλογα και θα αξιοποιηθούν για τον προσδιορισμό του ενεργειακού πεδίου στην περιοχή, που είναι ο κύριος παράγοντας δράσης που εξετάζουμε.



ABSTRACT

Sea waves are a very important factor that affects coastal geomorphology and the balance of the coastal ecosystems. The wave activity and sediment transport in the coastal zone are two interrelated processes resulting, in a great extent through erosion and accretion, to the shaping of the coastal geomorphology.

The main topic of this thesis is the application of the Boussinesq wave theory, through the MIKE 21 BW software, in order to study the effects of artificial constructions in wave propagation near a coastal region. More specifically, the assessment of the wave propagation in the region located between Othoni and Mathraki in Diapontia Islands, north of Corfu, is made before and after the installation of a wind farm composed of 12 wind turbines.

All the necessary data for accomplishing this task have been provided by HCMR in the context of the EU funded COCONET project. Local bathymetry and the wave climate have been used in order to set-up appropriately the simulation environment of the MIKE 21 BW module. Different wave scenarios have been considered and the obtained results are analytically discussed with respect to the entire simulation area but also on the local wind turbine pile scale. For some cases, the patterns of the wave generated currents have been also assessed.

For the specific application, it seems that the presence of the wind farm installations in the area has minor effects on the wave propagation schemes in the near field and negligible effects in the far field. Accordingly, it is anticipated that the coastal geomorphology of the study area is also not affected.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΤΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

1.1 ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΙ

1.1.1 ΚΥΜΑΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΣΤΟ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Η ακριβής πρόβλεψη της μεταβολής των θαλάσσιων κυματισμών πάνω από μία ακανόνιστη βαθυμετρία είναι σημαντικό για τους μηχανικούς που σχεδιάζουν, τον σχεδιασμό γενικότερα, την κατασκευή και τη διατήρηση του παράκτιου περιβάλλοντος και των παράκτιων εγκαταστάσεων. Όταν ένας κυματισμός διαδίδεται από βαθιά στα ρηχά νερά αρκετοί μετασχηματισμοί λαμβάνουν χώρα, όπως ρήγωση, διάθλαση, ανάκλαση, περίθλαση, συντονισμός, διάχυση ενέργειας που προκαλείται λόγω της τριβής, αναταράξεις και θραύση κυματισμών.

Στην παράκτια μηχανική, τα μαθηματικά και τα φυσικά μοντέλα είναι δύο κύριες προσεγγίσεις για τη μελέτη των προβλημάτων των κυματισμών. Αριθμητικά μοντέλα χρησιμοποιούνται συχνά για μεγάλες περιοχές, ενώ φυσικά μοντέλα είναι κατάλληλα για την προσομοίωση πολύπλοκων μη γραμμικών διαδικασιών κοντά στην ακτή ή κοντά σε σταθερές ή πλωτές κατασκευές, περιορίζονται όμως από το μέγεθος της εγκατάστασης.

Στη φύση οι κυριότερες αιτίες γέννησης επιφανειακών ή εσωτερικών κυματισμών στη θάλασσα είναι οι εξής:

- η επίδραση του ανέμου στην επιφάνεια της θάλασσας που δημιουργεί τους ανεμογενείς κυματισμούς
- οι διαφοροποιήσεις της βαρομετρικής πίεσης (seiches)
- η έλξη της σελήνης που δημιουργεί την αστρονομική παλίρροια
- οι υποβρύχιες κατολισθήσεις και οι υποθαλάσσιοι σεισμοί (τσουνάμις)
- οι διαφοροποιήσεις πυκνότητας των θαλασσίων μαζών

Εκτός από τις γενεσιουργές δυνάμεις των κυμάτων υπάρχουν και οι δυνάμεις επαναφοράς δηλαδή οι δυνάμεις που επαναφέρουν ένα κύμα στην αρχική του θέση. Αυτές είναι:

- η βαρύτητα
- η δύναμη Coriolis (υπαισέρχεται στους κυματισμούς μεγάλης κλίμακας), η επιφανειακή τάση (υπαισέρχεται σε κυματισμούς πολύ μικρής κλίμακας με μήκος κύματος μερικά εκατοστά μόνο)
- η τριβή

Οι ανεμογενείς κυματισμοί ονομάζονται και κυματισμοί βαρύτητας αφού αυτή είναι



η δύναμη επαναφοράς τους. Οι ανεμογενείς είναι οι πιο κοινοί κυματισμοί στη φύση και είναι αυτοί οι οποίοι λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό των λιμενικών έργων. Στο θαλάσσιο περιβάλλον εξελίσσεται ταυτόχρονα ένα πλήθος κυματικών φαινομένων, αρκετά από τα οποία βρίσκονται σε ουσιώδη σύζευξη μεταξύ τους. Το γεγονός αυτό γίνεται καλύτερα κατανοητό αν λάβουμε υπ' όψη μας ότι:

1. Το θαλασσινό νερό είναι ένα ελαφρά συμπιεστό, ανομοιογενές και αγώγιμο υγρό, το οποίο εδράζεται πάνω σ' ένα πολυστρωματοποιημένο (multilayered) παραμορφώσιμο στερεό πυθμένα (sea bed), και περατούται σε μία ελεύθερη επιφάνεια (free surface), δια της οποίας δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία και την επίδραση του υπερκείμενου πεδίου του ανέμου, και

2. Η μάζα του θαλάσσιου νερού βρίσκεται πάνω σε μία ελαφρά μαγνητισμένη, περιστρεφόμενη, περίπου σφαιρική μάζα (Γη), η οποία αλληλεπιδρά μέσω δυνάμεων βαρύτητας με άλλα ουράνια σώματα (κυρίως με τη Σελήνη και τον Ήλιο).

Χρησιμοποιώντας φαινομενολογικά κριτήρια, οι κύριες κατηγορίες κυματικών φαινομένων στη θάλασσα είναι οι εξής (βλ. σχετικά Phillips 1977, LeBlond and Mysak 1978):

- Επιφανειακά κύματα (surface waves)
- Εσωτερικά κύματα (internal waves)
- Γυροσκοπικά κύματα (inertial or gyroscopic waves)
- Πλανητικά κύματα (planetary or Rossby waves)
- Παλίρροιες (tides)
- Ακουστικά κύματα, που διαδίδονται στο εσωτερικό της υδάτινης μάζας (hydroacoustic waves) και είναι συζευγμένα με ακουστικά και ελαστικά κύματα που διαδίδονται στα υποστρώματα του πυθμένα.

Εξετάζοντας αναλυτικότερα τους επιφανειακούς θαλάσσιους κυματισμούς, διακρίνουμε τις εξής κύριες κατηγορίες, ανάλογα με το αίτιο δημιουργίας τους:

- Ανεμογενείς κυματισμοί, δηλαδή κύματα ανέμου (wind waves), και αποθάλασσης (swell), οι οποίοι καταλαμβάνουν ένα μεγάλο τμήμα του φάσματος, που αντιστοιχεί σε περιόδους από $T=1s$ έως $T=30s$, περίπου.
- Κύματα παραγόμενα από κινήσεις επιπλεόντων ή βυθισμένων αντικειμένων (body generated waves), τα οποία αντιστοιχούν στις ίδιες περιόδους με τους ανεμογενείς κυματισμούς.
- Κυματώγη (surf beat) και κύματα ιδιοταλαντώσεων λιμανιών και υφαλοκρηπίδας (harbour resonance, seiche, shelf waves) που αντιστοιχούν σε περιόδους από $T=1min$ έως $T=40min$, περίπου.



- Σεισμογενείς κυματισμοί (σεισμικά κύματα, tsunamis), οι οποίοι καταλαμβάνουν μεγάλο τμήμα του φάσματος που αντιστοιχεί σε περιόδους από $T=5\text{min}$ έως $T=2\text{h}$, περίπου.
- Κύματα επιφανειακής τάσης (capillary waves), τα οποία καταλαμβάνουν το τμήμα του φάσματος που αντιστοιχεί σε περιόδους από $T=0.05\text{s}$ έως $T=1\text{s}$, περίπου.

Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι ανεμογενείς θαλάσσιοι κυματισμοί και ιδιαίτερα τα κύματα ανέμου, χαρακτηρίζονται από έντονη έλλειψη κανονικότητας, χωρικά και χρονικά. Δηλαδή, η μορφή της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας, το πεδίο ταχυτήτων και πιέσεων και τα λοιπά φυσικά μεγέθη που χαρακτηρίζουν το κυματικό πεδίο έχουν μη κανονικές μορφές.

Από τα παραπάνω διαπιστώνουμε ότι οι ανεμογενείς θαλάσσιοι κυματισμοί αποτελούν ένα από τα κυριότερα αίτια δυναμικής διέγερσης και φόρτισης των πλοίων και των θαλάσσιων κατασκευών εν γένει. Πέραν αυτού όμως, οι ανεμογενείς κυματισμοί, διαδίδοντας μεγάλα ποσά ενέργειας (και, δευτερευόντως, μάζας) από την ανοικτή θάλασσα (όπου δημιουργούνται) προς τις ακτές, αποτελούν ένα πολύ σημαντικό παράγοντα που επιδρά στην διαμόρφωση των ακτών, στην ισορροπία του οικοσυστήματος στην παράκτια ζώνη, στην ρύπανση των ακτών κλπ. Επομένως, η μελέτη των μηχανισμών διάδοσης των κυματισμών αυτών και η εξέταση της αλληλεπίδρασης τους με το παράκτιο περιβάλλον αποτελεί θέμα ζωτικής σημασίας από οικονομική και κοινωνική άποψη.

1.1.1.1 ΑΝΕΜΟΓΕΝΕΙΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΙ – ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΙ ΑΝΕΜΟΥ ΚΑΙ ΑΠΟΘΑΛΑΣΣΕΣ

Οι ανεμογενείς κυματισμοί που παρατηρούνται σε μια συγκεκριμένη περιοχή, διακρίνονται σε

- κυματισμούς ανέμου (wind waves) ή θάλασσες (seas), οι οποίοι αντιστοιχούν σε περιόδους από $T=0.5\text{s}$ έως $T=15\text{s}$ περίπου και σε
- αποθάλασσες ή φουσκοθαλασιές (swells), οι οποίοι αντιστοιχούν σε περιόδους από $T=15\text{s}$ έως $T=30\text{s}$, περίπου.

Οι κυματισμοί ανέμου διεγείρονται απ' ευθείας από το υπερκείμενο τυρβώδες πεδίο ροής του ανέμου, ενώ οι αποθάλασσες είναι το αποτέλεσμα της διάδοσης των πρώτων, που έχουν όμως παραχθεί από τη δράση του ανέμου σε άλλες περιοχές.

Στην περίπτωση των θαλασσών, οι κυματισμοί είναι έντονα “ανακατεμένοι” διαδίδονται προς διάφορες κατευθύνσεις (short-crested) (αν υπάρχει κύρια



κατεύθυνση αυτή γενικά μεταβάλλεται χρονικά και χωρικά), ο λόγος ύψους προς μήκος κύματος είναι σχετικά μεγάλος και συχνά συμβαίνει θραύση των κυματισμών και εμφάνιση αφρού. Ακόμη, η ροή στο νερό κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια, είναι ισχυρά στροβιλή λόγω της επίδρασης των διατμητικών τάσεων του τυρβώδους πεδίου του υπερκείμενου ανέμου.

Αντίθετα, στην περίπτωση των αποθαλασσών, οι κυματισμοί είναι περισσότερο ομαλοί και λείοι, έχουν σαφή κύρια κατεύθυνση διάδοσης και είναι περισσότερο επιμήκεις (μικρότερος λόγος ύψους προς μήκος κύματος). Ακόμη, εάν οι κυματισμοί δεν βρίσκονται κάτω από την επίδραση άλλου τοπικού πεδίου ανέμου ή άλλου αιτίου διέγερσης τύρβης, η ροή στο νερό μπορεί να θεωρηθεί μη τυρβώδης και αστρόβιλη, και συνήθως δεν συμβαίνει θραύση των κυματισμών.

Καθώς οι κυματισμοί ανέμου απομακρύνονται από την περιοχή δημιουργίας τους μεταπίπτουν σε αποθάλασσες και αρχίζει η φάση της απόσβεσής τους. Στη διαμόρφωση και απόσβεση των αποθαλασσών συμβάλλουν: το φαινόμενο διασποράς (dispersion), που οφείλεται στην επίδραση της ελεύθερης επιφάνειας, η γεωμετρική διασπορά της ενέργειας λόγω της δισδιάστατης διάδοσης, η βαθμιαία κατανάλωση της ενέργειας από τις συνεκτικές τάσεις (viscous dissipation), και ειδικά στις ρηχές θάλασσες, η απόσβεση λόγω της επίδρασης του πυθμένα.

Μια άλλη ιδιότητα των αποθαλασσών είναι ότι δεν επηρεάζονται σημαντικά από τους τοπικούς ανέμους των περιοχών από όπου περνούν (Snodgrass et al. 1966). Το γεγονός αυτό οφείλεται στη διαφορετική φασματική σύσταση των κυματισμών ανέμου και των αποθαλασσών.

Τα θαλάσσια κύματα που ενδιαφέρουν την ναυτική υδροδυναμική μεταδίδονται λόγω της δύναμης της βαρύτητας, για αυτό λέγονται και κύματα βαρύτητας. Τα κύματα βαρύτητας δημιουργούνται από την πνοή του ανέμου πάνω από την θάλασσα, και από την κίνηση των πλοίων επιφανείας, ή άλλων σωμάτων που κινούνται σε μικρό βάθος. Υπάρχουν και άλλες κατηγορίες θαλασσιών κυμάτων πολύ μεγαλύτερης κλίμακας, των οποίων η μετάδοση οφείλεται στην δράση της επιτάχυνσης Coriolis λόγω περιστροφής της γης, ή, κύματα ακόμα μεγαλύτερης κλίμακας, που οφείλονται στην έλξη άλλων ουρανίων σωμάτων.

Η δυναμική των επιφανειακών κυματισμών βαρύτητας στην περιοχή της παράκτιας ζώνης είναι πιο πλούσια σε φυσικά φαινόμενα, και ως εκ τούτου παρουσιάζει και το μεγαλύτερο ενδιαφέρον εξέτασης, Massel (1989). Στην περιοχή αυτή συναντώνται όλα τα χαρακτηριστικά κυματικά φαινόμενα, και συγκεκριμένα:

- ανάκλαση (reflection) και διάθλαση (refraction) των κυματισμών, καθώς και τροποποίηση του πλάτους των κυματισμών λόγω ρήχωσης (shoaling),



- αλληλεπίδραση με την τρισδιάστατη βαθυμετρία και φαινόμενα περίθλασης ή σκέδασης των κυματισμών (diffraction),
- διασπορά των κυματισμών (dispersion),
- τριβή πυθμένα και εξασθένηση της ροής της κυματικής ενέργειας (bottom friction and wave energy dissipation),
- μη γραμμικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ διαφορετικών κυματικών συνιστωσών, και μεταφορά ενέργειας από μια αρχική ζώνη συχνοτήτων του φάσματος των κυματισμών προς μικρότερες και μεγαλύτερες συχνότητες (non-linear interactions),
- δημιουργία (κυματογενών) ρευμάτων (wave induced currents) και μεταφορά μάζας,
- θραύση των κυματισμών κοντά στην ακτή (wave breaking).

Το μέγεθος των ανεμογενών κυμάτων εξαρτάται:

- 1) από την ένταση του αέρα (ταχύτητα ανέμου)
- 2) τη διάρκεια που φυσάει ο άνεμος
- 3) το ανάπτυγμα του πελάγους (fetch) δηλαδή το μέγεθος της ανοιχτής επιφάνειας πάνω στην οποία φυσάει ο αέρας.

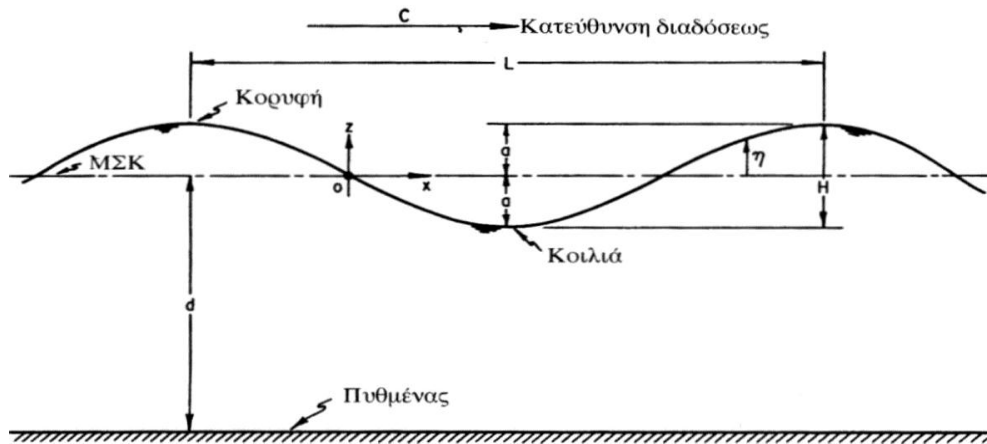
1.1.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ

Κάθε κύμα ανάλογα με τον τρόπο δημιουργίας του έχει και διαφορετική περίοδο (T). Για περιόδους μεγαλύτερες των 5min οι κυματισμοί ονομάζονται μεγάλης περιόδου. Οι κυματισμοί μικρότερων περιόδων - και ιδιαίτερα περιόδων $T < 30s$ ονομάζονται κυματισμοί μικρής περιόδου. Στους κυματισμούς μικρής περιόδου περιλαμβάνονται και οι ανεμογενείς κυματισμοί με περίοδο $T = 5-15s$.

Θαλασσινό κύμα είναι οποιαδήποτε διαταραχή στην επιφάνεια της θάλασσας. Αίτια δημιουργίας:

- Άνεμος (ανεμογενείς κυματισμοί, ακανόνιστοι κυματισμοί)
- Παλίρροια (παλιρροιογενείς κυματισμοί)
- Σεισμός (σεισμογενείς κυματισμοί-tsunamis)
- Κινήσεις επιπλεόντων σωμάτων
- Πτώση μετεωριτών

Το ρεύμα είναι ροή νερού, ενώ το κύμα είναι διάδοση μιας διαταραχής. Τα βασικά χαρακτηριστικά ενός κύματος όπως σχηματοποιούνται στην παρακάτω εικόνα 1.1, δίνονται στο πινάκα που ακολουθεί:



Εικόνα 1.1: Απλή περιοδική ημιτονοειδής μορφή κύματος (Κουτίτας 1994).

Πίνακας 1.1 Βασικά χαρακτηριστικά κύματος - Ορισμοί

Μήκος κύματος [m]	L	Η απόσταση μεταξύ δύο σωματιδίων, που βρίσκονται στην ίδια φάση ταλάντωσης (απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κοιλιών ή κορυφών κατά μήκος της κατεύθυνσης
Υψος κύματος [m]	H	Η απόσταση μεταξύ κοιλιάς και κορυφής του κύματος.
Καμπυλότητα κύματος	γ	Ο λόγος του ύψους κύματος προς το μήκος κύματος. ($=H/L$)
Περίοδος κύματος [s]	T	Ο χρόνος μιας πλήρους ταλάντωσης των σωματιδίων, δηλαδή η χρονική απόσταση ανάμεσα στην εμφάνιση δύο διαδοχικών κορυφών στην ίδια θέση.
Κυκλική συχνότητα [Hz]	f	($=1/T$). Η γωνιακή συχνότητα σ ή ω σχετίζεται από την περίοδο και την κυκλική συχνότητα $\sigma = 2\pi/T = 2\pi f$.
Ταχύτητα κύματος ή φασική ταχύτητα [m/s]	C	Η απόσταση που διανύει το μέτωπο του κύματος στη μονάδα του χρόνου. ($=L/T$)
Ενέργεια κύματος	E	$=(1/8)\rho g H^2 L$
Μέτωπο του κύματος		Είναι ένα επίπεδο κάθετο προς το επίπεδο ταλάντωσης και εφαπτόμενο στη διατομή του κύματος.
Διεύθυνση μετάδοσης ή ακτίνα κύματος		Είναι η κάθετη γραμμή προς το μέτωπο του κύματος.
u, v, w [m/s]		Οι συνιστώσες ταχύτητας των μορίων του νερού στο εσωτερικό του που είναι γενικά διαφορετικές του C.

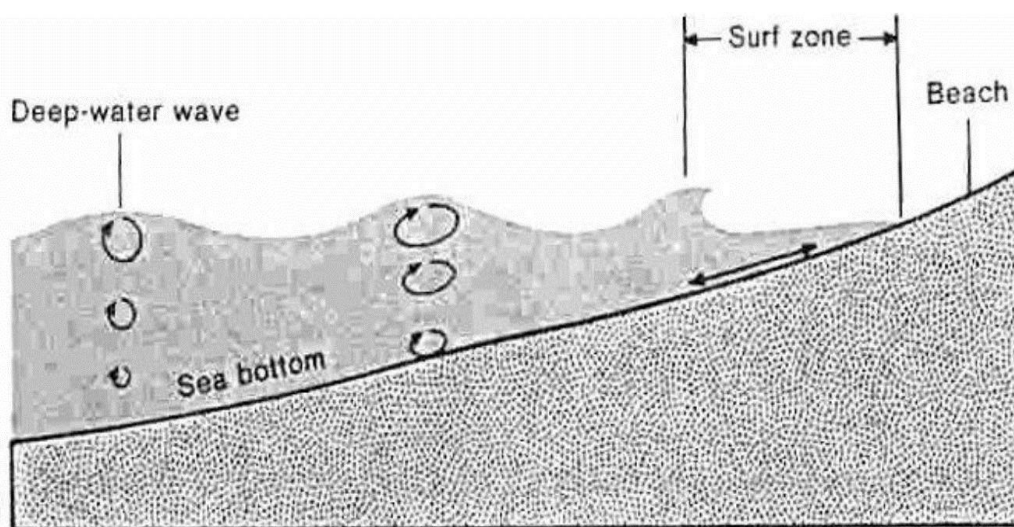


Ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας [m]	ζ	Η απόσταση της στάθμης της επιφάνειας από την μέση στάθμη κύματος (Μ.Σ.Κ). Η Μ.Σ.Κ μπορεί να συμπίπτει ή όχι με την στάθμη ηρεμούντος ύδατος (Σ.Η.Υ). Η παρουσία κυματισμών συνεπάγεται συνήθως μία διαφοροποίηση προς τα πάνω ή προς τα κάτω
Βάθος νερού [m]	d	Το βάθος νερού από την αρχική κατάσταση, δηλαδή η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας της θάλασσας σε ηρεμία πάνω από τον
Σχετικό βάθος νερού	d/L	Αποτελεί σημαντική παράμετρο που χαρακτηρίζει τη θαλάσσια περιοχή σε βαθιά νερά ($d/L > 0.5$), ενδιάμεσα νερά ($0.04 < d/L < 0.5$), και ρηχά νερά ($d/L < 0.04$).

Τα κύρια φαινόμενα δημιουργίας δύναμης από τους κυματισμούς είναι: η αντίσταση, η αδράνεια και η περίθλαση. Αντίστοιχα οι δυνάμεις που επενεργούν στην κατασκευή διακρίνονται σε δυνάμεις αντίστασης (drag), σε αδρανειακές δυνάμεις που είναι οι δυνάμεις ακτινοβολίας (radiation) και δυνάμεις Froude-Kryloff και σε δυνάμεις περίθλασης (diffraction).

1.1.3 ΚΙΝΗΣΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΝΕΡΟΥ

Η κίνηση των σωματιδίων του νερού εξαρτάται από το μήκος του κύματος, το ύψος του κύματος αλλά και το βάθος του νερού.

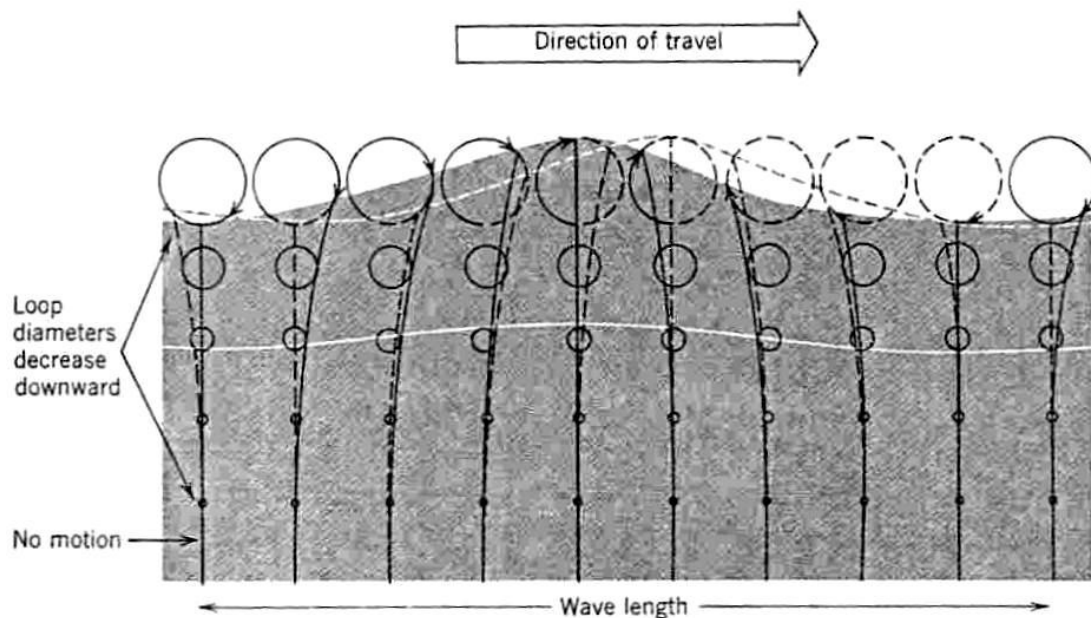


Εικόνα 1.2: Απεικονίζονται οι τροχιές των σωματιδίων του νερού που πλαταίνουν καθώς το κύμα πλησιάζει στην ακτή και αρχίζει να “αισθάνεται τον πυθμένα” (Montgomery, 2000).



Τα κύματα σε βάθος νερού μεγαλύτερα από το $1/2$ του μήκους του κύματος δεν επηρεάζονται από το βάθος του νερού. Τα σωματίδια στα κύματα αυτά κινούνται σε σχεδόν κυκλικές τροχιές, αλλά διατηρούν περίπου την ίδια θέση. Τα σωματίδια της επιφάνειας κινούνται σε τροχιές των οποίων η διάμετρος είναι περίπου ίση με το ύψος του κύματος, αλλά μειώνεται πολύ γρήγορα (εκθετικά) με το βάθος (Gilluly et al., 1975). Σε βάθη ίσα με το μισό του μήκους του κύματος ($L/2$) οι διάμετροι των τροχιών των σωματιδίων έχουν γίνει τόσο μικρές ώστε η κίνηση του νερού να είναι σχεδόν μηδενική (Flint & Skinner, 1977). Στην εικόνα 25 φαίνεται η κίνηση των μορίων του νερού για την περίπτωση ενός κύματος που διαδίδεται στην περιοχή των βαθιών νερών.

Όταν το κύμα διαδίδεται σε βάθη μικρότερα ή ίσα με το μισό του μήκους κύματος ($L/2$) τότε το κύμα αρχίζει να “αισθάνεται τον πυθμένα” και η κίνηση των μορίων του νερού γίνεται βαθμιαία ελλειπτική (Εικόνα 1.2). Η μορφή των κυματισμών αρχίζει να αλλάζει. Το μήκος του κύματος μικραίνει ενώ το ύψος του αυξάνει με αποτέλεσμα το κύμα να γίνεται πιο απότομο (steeper) (Flint & Skinner, 1977, εικόνα 1.3).



Εικόνα 1.3: Η κίνηση των μορίων του νερού κατά τη διάδοση ενός κύματος. Με τις διακεκομμένες γραμμές αναπαριστώνται η μορφή του κύματος και η κίνηση των σωματιδίων του νερού σε μετέπειτα χρονική στιγμή ίση με το $1/8$ της περιόδου του κύματος (Flint & Skinner, 1977).



Κυματισμοί μικρού πλάτους, που περιγράφονται με τη γραμμική θεωρία κυματισμού, δε μπορούν να περιγράψουν το φαινόμενο μεταφοράς μάζας, καθ' όσον οι τροχιές των μορίων του ρευστού είναι κλειστές.

Οι κυματισμοί μεταφέρουν ενέργεια. Ο ρυθμός μεταφοράς της ενέργειας ονομάζεται ροή ενέργειας. Στα πλαίσια της γραμμικής θεωρίας ισούται με το παραγόμενο έργο από το ρευστό, από τη μία στην άλλη πλευρά μιας κατακόρυφης τομής του ρευστού.

1.1.4 ΚΥΜΑΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΣΤΟ ΠΑΡΑΚΤΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Ο κυματικός χαρακτήρας των επιφανειακών κυματισμών βαρύτητας είναι πολύ σημαντικός πάνω και κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια του νερού (δικαιολογώντας έτσι και τον όρο 'επιφανειακός') και εξασθενεί με σχετικά γρήγορο ρυθμό καθώς το βάθος αυξάνεται. Έτσι, καθώς οι κυματισμοί βαρύτητας διαδίδονται από την περιοχή μεγάλου βάθους (όπου κυρίως αναπτύσσονται) προς τις (γειτονικές ή και πιο απομακρυσμένες) ακτές έρχονται σε σημαντική αλληλεπίδραση με τον θαλάσσιο πυθμένα. Επιπροσθέτως, καθώς το βάθος του νερού ελαττώνεται τα φαινόμενα μη γραμμικότητας και διασποράς που σχετίζονται με τους επιφανειακούς κυματισμούς βαρύτητας καθίστανται ολοένα και πιο σημαντικά. Τα ανωτέρω έχουν ως άμεσο αποτέλεσμα η βαθυμετρία της θαλάσσιας περιοχής κοντά στις ακτές και οι μεταβολές αυτής να αποτελούν (φυσικές) παραμέτρους πρώτιστης σημασίας σε σχέση με την διαμόρφωση του κυματικού πεδίου.

Στις περισσότερες γεωγραφικές περιοχές, η γεωμετρία του θαλάσσιου πυθμένα παρουσιάζει σχετική κανονικότητα. Η μέση κλίση του πυθμένα κοντά στην ακτή και στην γενικότερη περιοχή της υφαλοκρηπίδας κυμαίνεται από 2% έως 5%. Μετά την υφαλοκρηπίδα και προς την περιοχή των μεγάλων βαθών, η μέση κλίση του πυθμένα αυξάνεται σημαντικά (και έχει, γενικώς, τιμές μεγαλύτερες από 10% έως 15%).

Είναι γνωστό ότι στην περίπτωση των επιφανειακών κυματισμών βαρύτητας το κυματικό πεδίο παρουσιάζει πολύ γρήγορο ρυθμό εξασθένησης με το βάθος, με την βοήθεια της σχέσεως διασποράς στο βαθύ νερό ($\omega^2 = kg \tanh(kh)$) και ότι το μήκος κύματος των επιφανειακών κυματισμών βαρύτητας αυξάνεται ανάλογα με το τετράγωνο της περιόδου, ($\lambda \approx 1,56T^2$). Επίσης είναι γνωστό ότι το κυματικό πεδίο αποσβένεται σε βάθος νερού που αντιστοιχεί, πρακτικά, σε μισό μήκος κύματος. Με τον τρόπο αυτό, χρησιμοποιώντας μια τυπική τιμή για την μέση κλίση πυθμένα από 2 % έως 3 % μπορούμε να καθορίσουμε σε πρώτο βαθμό τα (μέσα) όρια έκτασης της παράκτιας ζώνης από την ακτή προς την ανοικτή θάλασσα (βαθύ νερό).



Η δυναμική των επιφανειακών κυματισμών βαρύτητας στην περιοχή της παράκτιας ζώνης είναι πιο πλούσια σε φυσικά φαινόμενα, και ως εκ τούτου παρουσιάζει και το μεγαλύτερο ενδιαφέρον εξέτασης, Massel (1989). Στην περιοχή αυτή συναντώνται όλα τα χαρακτηριστικά κυματικά φαινόμενα, και συγκεκριμένα:

- Ανάκλαση (reflection) και διάθλαση (refraction) των κυματισμών, καθώς και τροποποίηση του πλάτους των κυματισμών λόγω ρήχωσης (shoaling),
- Αλληλεπίδραση με την τρισδιάστατη βαθυμετρία και φαινόμενα περίθλασης ή σκέδασης των κυματισμών (diffraction),
- Διασπορά των κυματισμών (dispersion),

καθώς επίσης και σημαντικά μη γραμμικά φαινόμενα, όπως:

- Τριβή πυθμένα και εξασθένηση της ροής της κυματικής ενέργειας (bottom friction and wave energy dissipation),
- Μη γραμμικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ διαφορετικών κυματικών συνιστωσών, και μεταφορά ενέργειας από μια αρχική ζώνη συχνοτήτων του φάσματος των κυματισμών προς μικρότερες και μεγαλύτερες συχνότητες (non-linear interactions),
- Δημιουργία (κυματογενών) ρευμάτων (wave induced currents) και μεταφορά μάζας,
- Θραύση των κυματισμών κοντά στην ακτή (wave breaking).

1.1.4.1 ΑΝΑΡΡΙΧΗΣΗ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

Η αναρρίχηση της ελεύθερης επιφάνειας είναι το φαινόμενο κατά το οποίο ένα εισερχόμενο κύμα συναντά μια κεκλιμένη επιφάνεια και ένα τμήμα του αναρριχάται πάνω σε αυτή. Η ανύψωση αυτή φτάνει ως ένα μέγιστο ύψος πάνω από τη Σ.Η.Υ., το οποίο είναι και το ύψος αναρρίχησης (run up level). Όταν η στέψη της κεκλιμένης επιφάνειας βρεθεί κάτω από το επίπεδο ανύψωσης, το νερό θα μεταδοθεί πάνω από αυτή. Η μέση ποσότητα του νερού το οποίο περνά πάνω από τη στέψη ονομάζεται κυματική μετάδοση (transmission) και μπορεί να ερμηνευτεί σε κυβικά μέτρα ανά τρέχον μέτρο και ανά δευτερόλεπτο ($m^3/m \cdot s$). Συνεπώς και μπορεί να συγκριθεί με την ειδική παροχή ανά μονάδα πλάτους (q) στη ροή με ελεύθερη επιφάνεια σε ανοικτούς αγωγούς.

Οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες που εγκαθίστανται σε πολλά μέρη σε όλη την Ευρώπη, συχνά εκτίθενται σε ακραίες καιρικές συνθήκες, με αποτέλεσμα την αναρρίχηση και την θραύση των κυματισμών. Η αναρρίχηση του κύματος μπορεί να ξεπερνά αρκετά το μέγιστο ύψος του κύματος και έχει καταστροφικά αποτελέσματα



στις θαλάσσιες ανεμογεννήτριες και τον εξοπλισμό τους. Παράδειγμα τέτοιας αναρρίχησης φαίνεται πειραματικά στην εικόνα 1.4.



Εικόνα 1.4: Μπροστινή απεικόνιση αναρρίχησης κυματισμού που συναντά κύλινδρο κατά την διάδοσή του, κατά την εκτέλεση πειράματος [3].

Η αναρρίχηση του κύματος μπροστά από μία κυλινδρική, αλλά και γενικότερα μία οποιαδήποτε κατασκευή, παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στον σχεδιασμό. Είναι πάρα πολλά τα παραδείγματα ζημιών και καταστροφών με σημαντικό κόστος που έχουν συμβεί εξαιτίας κακής εκτίμησης της αναρρίχησης του κύματος, για αυτό και έχουν διεξαχθεί πολλές έρευνες πάνω σε αυτό το θέμα και για να υπολογιστεί αυτό το πρόσθετο ύψος αναρρίχησης. Για τον υπολογισμό αυτού του ύψους από τους μηχανικούς έχουν αναπτυχθεί αριθμητικά μοντέλα, καθώς και ημιεμπειρικές σχέσεις.

1.1.4.2 ΠΕΡΙΘΛΑΣΗ

Η περίθλαση (diffraction) είναι το φαινόμενο κατά το οποίο κυματισμοί, λόγω παρουσίας κάποιου σώματος ή εμποδίου, αλλάζουν και μαζί τους αλλάζει το πεδίο ροής. Εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds Re και τον αριθμό Froude Fr .



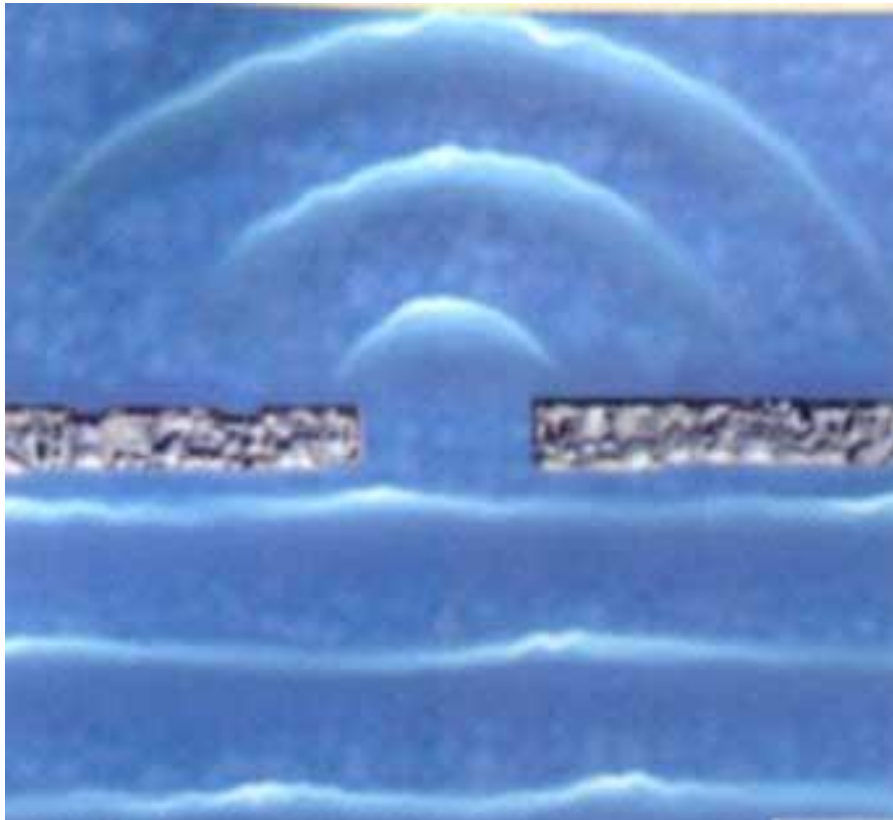
$Re = u D / \nu = \text{Αδρανειακές δυνάμεις} / \text{Δυνάμεις τριβής}$

$Fr = u / \sqrt{g * D} = \text{Αδρανειακές δυνάμεις} / \text{Δυνάμεις αντίστασης}$

Οι δυνάμεις αντίστασης οφείλονται στη συνεκτικότητα του πεδίου ροής και είναι ανάλογες με το τετράγωνο της ταχύτητας.

Αδρανειακές είναι οι δυνάμεις οι οποίες ασκούνται λόγω της πρόσθετης μάζας που έχει το σώμα λόγω της επιτάχυνσης της ροής από του κυματισμούς.

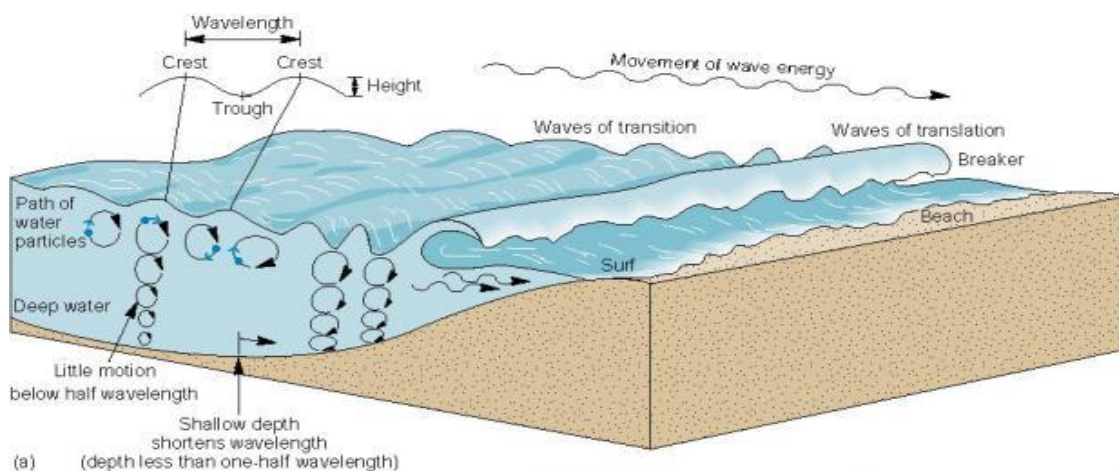
Όσο πιο μεγάλοι είναι αυτοί οι αριθμοί τόσο μεγαλύτερη η περίθλαση. Η σχετική τους σημασία εξαρτάται από τον τύπο και το μέγεθος της κατασκευής και τα χαρακτηριστικά του κυματισμού.



Εικόνα 1.5: Περίθλαση κυματισμών όταν συναντούν εμπόδιο.



1.1.4.3 ΡΗΧΩΣΗ



Εικόνα 1.6: Ρήχωση κυματισμού που έρχεται από βαθιά σε ρηχά νερά.

Ο όρος ρήχωση (shoaling) αναφέρεται στη γεωμετρική ιδιότητα του πυθμένα της περιοχής διάδοσης κατά την οποία το βάθος του μεταβάλλεται αργά και ομαλά, έτσι ώστε η κλίση του να είναι παντού μικρή. Η μελέτη των παράκτιων κυματικών και άλλων φαινομένων, διευκολύνεται σημαντικά αν η περιοχή διαθέτει ρήχωση. Για παράδειγμα οι περισσότερες εφαρμογές που σχετίζονται με την παράκτια μεταφορά ιζημάτων προϋποθέτουν περιοχές με αργά μεταβαλλόμενο βάθος. Για να χαρακτηριστεί μια περιοχή με την ιδιότητα της ρήχωσης, η κλίση του πυθμένα θα πρέπει να ικανοποιεί τις ακόλουθες συνθήκες:

- A) η κυματική ανάκλαση να είναι είτε αμελητέα είτε να μην υπάρχει καθόλου
- B) Τοπικά, σε οποιαδήποτε βάθος η κίνηση των κυματισμών να μην επηρεάζεται από την κλίση του πυθμένα.

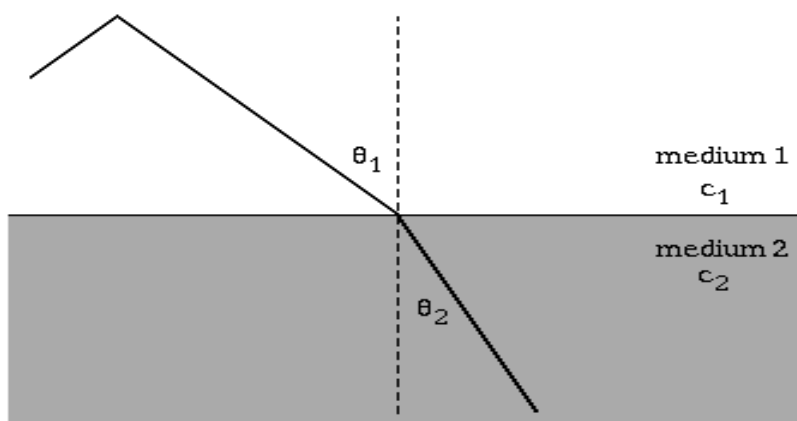


1.1.4.4 ΔΙΑΘΛΑΣΗ

Με τον όρο διάθλαση κυματισμών (refraction) εννοούμε κάθε μεταβολή κατεύθυνσης στη διεύθυνση διάδοσης του κυματισμού. Το πρόβλημα της κυματικής διάθλασης συνίσταται γενικά στον υπολογισμό των κυματικών χαρακτηριστικών και της εκτροπής της γωνίας διάδοσης του κυματισμού καθώς αυτός διαδίδεται από βαθύ νερό σε περιοχή που παρουσιάζει ρήχωση.



Εικόνα 1.7: Διάθλαση κυματισμού



Εικόνα 1.8: Σχηματική απεικόνιση της μεταβολής της γωνίας διάδοσης και της ταχύτητας του κύματος, όταν αλλάζει μέσο διάδοσης.



Με βάση το νόμο του Snell για βαθύ νερό και την εικόνα 1.8 έχουμε:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{L_1}{L_2} = \frac{c_1}{c_2}$$

Η παραπάνω σχέση συνδέει την κατεύθυνση του κύματος, με την ταχύτητα διάδοσης. Γίνεται φανερό ότι εφόσον γνωρίζουμε ότι η ταχύτητα μειώνεται καθώς το βάθος ελαττώνεται, θα πρέπει το $\sin \theta_1$ να αυξάνεται, δηλαδή θα πρέπει η γωνία θ_1 να πλησιάζει το $\pi/2$, ή ισοδύναμα, το κυματικό μέτωπο να τείνει να κινείται με πιο κάθετη κατεύθυνση προς την ακτογραμμή.

1.1.4.5 ΘΡΑΥΣΗ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ

Ένα από τα πιο σημαντικά φαινόμενα που επηρεάζουν άμεσα ή έμμεσα τα παράκτια έργα και το περιβάλλον γενικότερα είναι η θραύση των κυματισμών. Υπάρχουν τρεις τύποι θραύσης κυματισμών στη φύση (Karambas & Memos, 2009)

$$\xi_0 = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H_0/L_0}}$$

όπου $\tan \alpha$ είναι η κλίση του πυθμένα, H_0 και L_0 είναι το ύψος και το μήκος κύματος ανάλογα με την τιμή του ξ , όπως φαίνεται στις εικόνες που ακολουθούν.

Θραύση τύπου κυλίσεως (spilling) $\xi_0 < 0,5$



Εικόνα 1.9: Θραύση τύπου κυλίσεως (spilling)

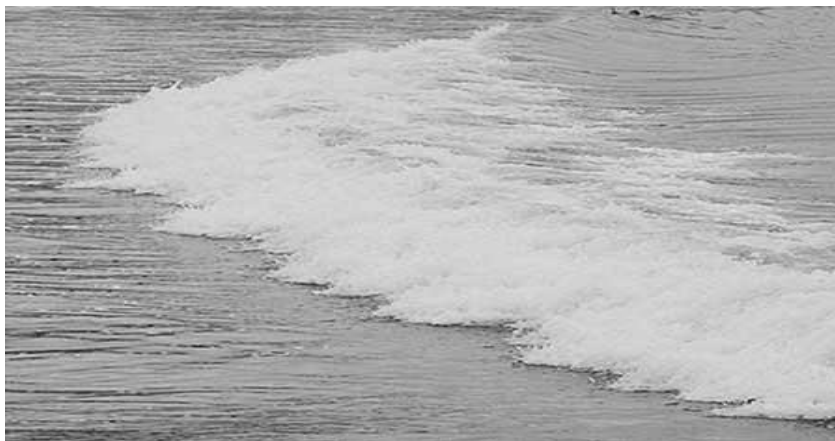


Θραύση τύπου καταδύσεως (plunging) $0,5 < \xi_0 < 3,3$



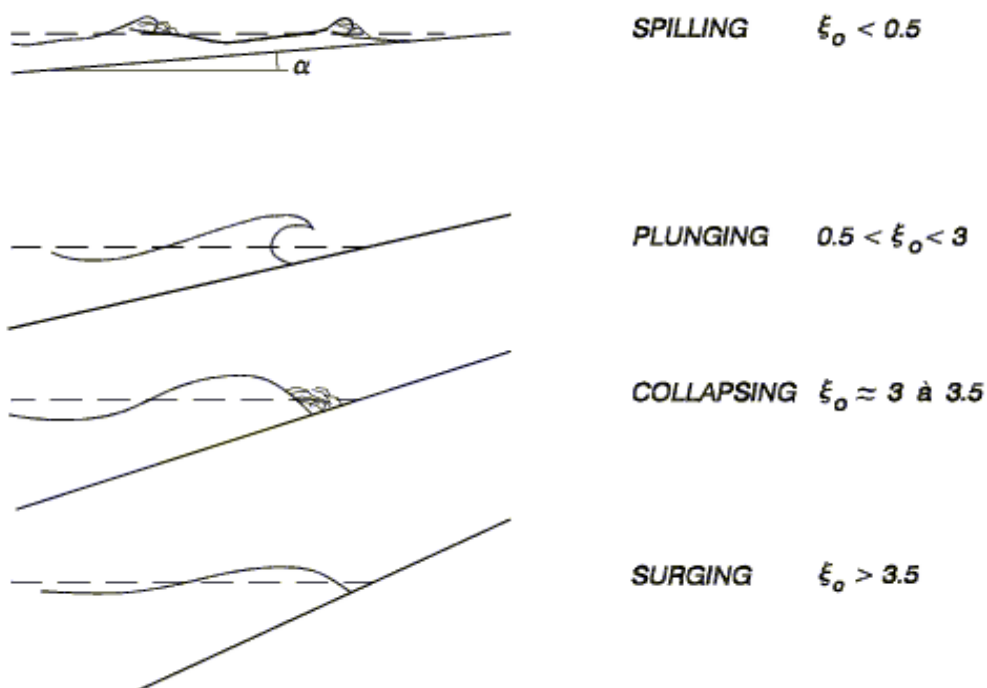
Εικόνα 1.10: Θραύση τύπου καταδύσεως (plunging)

Θραύση τύπου εφορμήσεως (surging ή collapsing) $\xi_0 > 3,3$



Εικόνα 1.11: Θραύση τύπου εφορμήσεως (surging ή collapsing)

Η ζώνη θραύσης surf είναι η θαλάσσια παράκτια περιοχή δίπλα στην ακτογραμμή, όπου λαμβάνει χώρα το μεγαλύτερο μέρος της μεταφοράς ιζήματος. Ορίζεται ως η περιοχή όπου συμβαίνει η θραύση των κυματισμών, η οποία είναι η κυρίαρχη υδροδυναμική διαδικασία.



Εικόνα 1.12: Τύποι θραύσης κυματισμών ανάλογα τον λόγο ξ_0 συνοπτικά.

1.1.5 ΦΑΣΜΑ ΚΥΜΑΤΟΣ

Το φάσμα που αποτελεί μια από τις ιδιότητες του κύματος, είναι ένας μετασχηματισμός FFT, ο οποίος μετασχηματίζει μια συνάρτηση από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο των συχνοτήτων και δείχνει πώς κατανέμεται η κυματική ενέργεια στις διάφορες κυματικές συνιστώσες. Αποτελεί μια πλήρη περιγραφή της κυματομορφής, γιατί οι συναρτήσεις που περιγράφονται από το φάσμα δίνουν τα ίδια αποτελέσματα που θα έδινε η στατιστική ανάλυση.

Οι ροπές του φάσματος δίνονται: $m_n = \int_0^\infty \omega^n S(\omega) d\omega$

Ένα από τα πιο σημαντικά παραμετρικά μεγέθη αποτελεί το εισερχόμενο ύψος κύματος (incident wave height) H_i . Στην περίπτωση σύνθετων κυματισμών εκφράζεται ως το σημαντικό ύψος κύματος H_s ή H_{m0} (significant wave height).

Το πιο σημαντικό κυματικό μέγεθος είναι το σημαντικό ύψος κύματος H_s (significant wave height), που είναι ο μέσος όρος του 1/3 των υψηλότερων υψών κύματος μιας καταγραφής. Επίσης μπορεί να υπολογιστεί από το φάσμα από τη σχέση:

$$H_s = 4 \sqrt{m_0} \quad , \text{ όπου } m_0 \text{ η μηδενική ροπή του φάσματος}$$



Η ενέργεια ανά μέτρο μήκους κύματος είναι ανάλογη του τετραγώνου του σημαντικού ύψους κύματος επί την περίοδο

$$E = \alpha H_s^2 T$$

Με τον όρο «περίοδος εισερχόμενου κύματος» (incident wave period) T_i συνήθως εννοούμε στην ανάλυσή μας την περίοδο του κύματος που αντιστοιχεί στην κορυφή του ενεργειακού φάσματος, T_p (peak spectral period), δηλαδή $T_p = T_i$.

Στην πράξη, η κυματική φασματική συνάρτηση μπορεί να δίνεται ως ένα μετρούμενο φάσμα της περιοχής του αιολικού πάρκου, ή μετρώντας, ή εκτιμώντας το σημαντικό ύψος κύματος και την περίοδο και την εφαρμόζοντας μια τυποποιημένη διαδικασία.

Τα H_s και $\omega_p = 2\pi / T_p$ χρησιμοποιούνται για να καθοριστεί ένα πρότυπο φάσμα κύματος, π.χ. το φάσμα JONSWAP, ως εξής:

$$S_{\zeta, \text{JONSWAP}}(\omega) = \frac{\alpha \cdot g^2}{\omega^5} \cdot \exp\left[-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^4\right] \cdot \gamma \cdot \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\omega - \omega_p}{\sigma \omega_p}\right)^2\right)$$

ω = η συχνότητα των κυμάτων

ω_p = φασματική συχνότητα της κορυφής

g = επιτάχυνση της βαρύτητας

α = γενικευμένη σταθερά Phillips

σ = φασματική παράμετρος πλάτους

($\sigma_a \approx 0,07$ για $\omega < \omega_p$, $\sigma_b \approx 0,09$ για $\omega > \omega_p$)

γ = παράμετρος κορύφωσης

(Φάσμα Pierson-Moskowitz για $\gamma = 1$)

Οι τιμές για το α και γ μπορεί να υπολογιστούν από τους ακόλουθους τύπους:

$$\alpha = \frac{5}{16} \frac{H_s^2 \omega_p^4}{g^2} \cdot C(\gamma)$$

με:

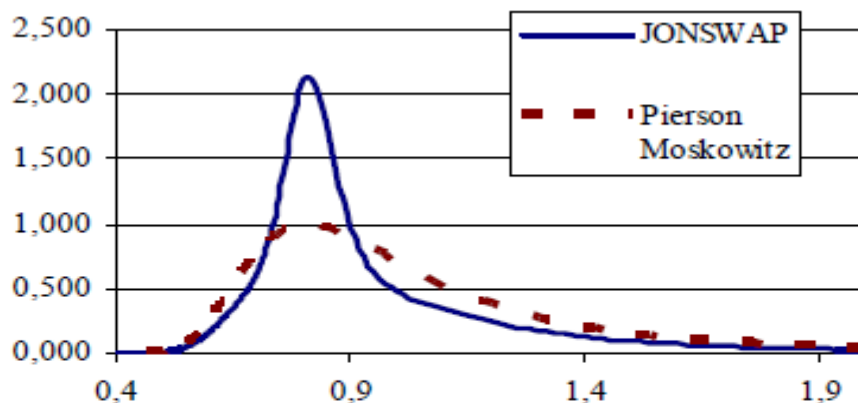
$$\begin{aligned} \gamma &= 5 && \text{for } T_p / \sqrt{H_s} \leq 3.6 \\ \gamma &= \exp(5,75 - 1,15 T_p / \sqrt{H_s}) && \text{for } 3,6 \leq T_p / \sqrt{H_s} \leq 5 \\ \gamma &= 1 && \text{for } T_p / \sqrt{H_s} \geq 5 \end{aligned}$$



Το $C(\gamma)$ είναι ένας παράγοντας για την εξομάλυνση, για να εγγυηθεί ότι το ίδιο σημαντικό ύψος κύματος που χρησιμοποιείται για το φάσμα JONSWAP και το παλαιότερο φάσμα Pierson-Moskowitz για πλήρως ανεπτυγμένη θάλασσα.

$$C(\gamma) = (1 - 0,287 \ln \gamma)$$

Θα πρέπει να σημειωθεί, ότι στην υπεράκτια βιομηχανία συχνά χρησιμοποιείται το φάσμα Pierson-Moskowitz για ανάλυση σε κόπωση και το φάσμα JONSWAP για ακραία φορτίσεις. Ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του έργου RECOFF έδειξε ότι για τις υπεράκτιες αιολικές ανεμογεννήτριες με μια δομή στήριξης τύπου monopile, τα δύο φάσματα παρουσιάζουν ελάχιστες διαφορές στην κόπωση και στις ακραίες φορτίσεις. Ως γενικό αποτέλεσμα προκύπτει ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί το φάσμα JONSWAP για την κόπωση και την ανάλυση ακραίων φορτίων των υπεράκτιων ανεμογεννητριών. [4]



Εικόνα 1.13: Φάσμα Pierson-Moskowitz και JONSWAP για $H_s = 3\text{m}$ και $T_p = 6\text{s}$. [4]

Για τον υπολογισμό των στατιστικών ιδιοτήτων της κατάστασης θάλασσας (sea state) χρησιμοποιούνται οι νιοστής τάξης ροπές του φάσματος του κύματος:

$$m_n = \int_0^{\infty} \omega^n * S_{\zeta}(\omega) d\omega$$



όπου:

$S_s(\omega)$ = το φάσμα (ενέργειας) του κύματος
 m_n = νιοστής τάξης ροπή του φάσματος
 $\omega = 2\pi / T$ κυκλική συχνότητα του κύματος με περίοδο T_n
 $H_s = 4\sqrt{m_0} \approx H_{1/3}$

όπου:

H_s = σημαντικό ύψος κύματος
 m_0 = διακύμανση του φάσματος του κύματος
 $H_{1/3}$ = μέσος όρος του 1/3 από τα υψηλότερα κύματα

Η μέση τιμή (χαρακτηριστικό) κύμα περιόδου T_1 ορίζεται ως ο μέσος χρόνος μεταξύ διαδοχικών κορυφών των κυμάτων σε μια καταγραφή σταθερών ανυψώσεων της επιφάνειας της θάλασσας.

$$T_1 = 2\pi \cdot m_0 / m_1$$

Η περίοδος μηδενικής διέλευσης (ανύψωση στάθμης νερού $\zeta = 0$) προς την ίδια κατεύθυνση (προς τα πάνω ή προς τα κάτω) δίνεται από:

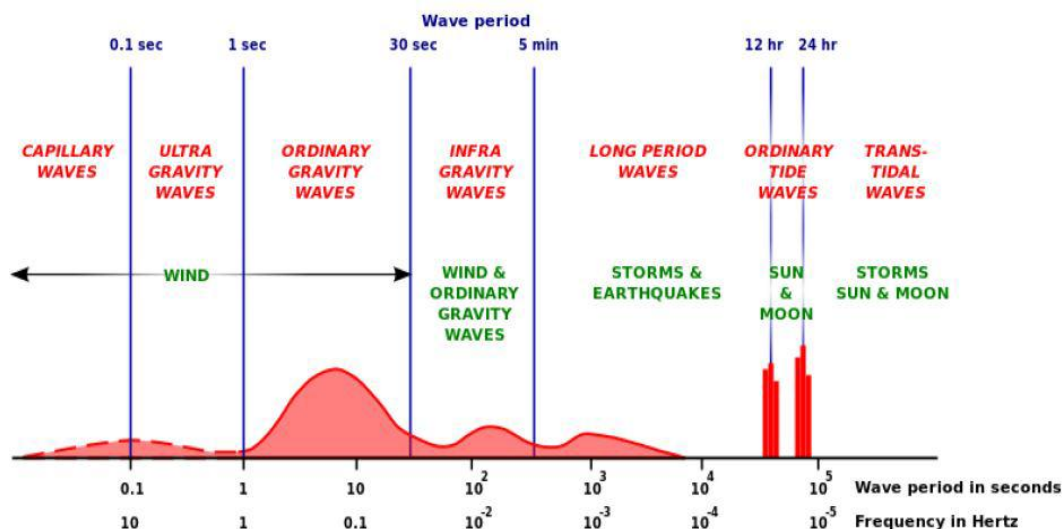
$$T_z = 2\pi\sqrt{m_0/m_2}$$

Για το φάσμα JONSWAP με συντελεστή κορυφής $\gamma = 3.3$ η σχέση για την περίοδο είναι:

$$T_p = 1,287 T_z = 1,199 T_1$$

Για το φάσμα Pierson-Moskowitz η σχέση της χαρακτηριστικής περιόδου είναι:

$$T_p = 1,408 T_z = 1,296 T_1$$



Εικόνα 1.14: Φάσμα διάφορων τύπων ωκεάνιων κυμάτων. [En.wikipedia.org]

Στην εικόνα 1.14, το φάσμα των διαφόρων τύπων των κυμάτων του ωκεανού απεικονίζεται σε σχέση με το κύμα περιόδου ή συχνότητας. Μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι οι περισσότεροι τύποι επιφανειακών κυμάτων εξαρτώνται από τον μηχανισμό γένεσής τους. Οι επιφανειακοί θαλάσσιοι κυματισμοί αφ' ενός μεν καταλαμβάνουν πολύ σημαντικό τμήμα του φάσματος θαλασσιών κυματισμών από σκοπιάς ενεργειακής πυκνότητας, αφ' ετέρου δε αντιστοιχούν σε περιόδους πολύ σχετικές με την πλειονότητα των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων στο θαλάσσιο και στο παράκτιο περιβάλλον. Αυτοί οι τύποι, όπως έχουμε δει είναι οι ακόλουθοι:

1. Ανεμογενείς κυματισμοί, δηλαδή κύματα ανέμου (wind waves), και αποθάλασσης, (swell), οι οποίοι καταλαμβάνουν ένα μεγάλο τμήμα του φάσματος, που αντιστοιχεί σε περιόδους από $T=1s$ έως $T=20s$ έως $25s$, περίπου.
2. Κύματα παραγόμενα από κινήσεις επιπλεόντων ή βυθισμένων αντικειμένων (body generated waves), τα οποία, γενικώς, αντιστοιχούν στις ίδιες περιόδους με τους ανεμογενείς κυματισμούς.
3. Κυματώγη (surf beat) και κύματα ιδιοταλαντώσεων λιμανιών και υφαλοκρηπίδας (harbour resonance, seiche, shelf waves) που αντιστοιχούν σε περιόδους από $T=1min$ έως $T=40min$, περίπου.
4. Σεισμογενείς κυματισμοί (σεισμικά κύματα, tsunamis), οι οποίοι καταλαμβάνουν μεγάλο τμήμα του φάσματος που αντιστοιχεί σε περιόδους από $T=5min$ έως $T=2h$, περίπου.
5. Κύματα επιφανειακής τάσης (capillary waves), τα οποία καταλαμβάνουν το τμήμα του φάσματος που αντιστοιχεί σε περιόδους από $T=0.05s$ έως $T=1s$, περίπου. Όπως



φαίνεται και στην εικόνα 1.14, η ενεργειακή πυκνότητα των κυμάτων επιφανειακής τάσης είναι πολύ μικρή συγκριτικά με την πυκνότητα ενέργειας που μεταφέρουν οι ανεμογενείς κυματισμοί.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι οι ανεμογενείς θαλάσσιοι κυματισμοί αποτελούν ένα από τα κυριότερα αίτια δυναμικής διέγερσης και φόρτισης των πλοίων και των θαλάσσιων κατασκευών εν γένει. Πέραν αυτού όμως, οι ανεμογενείς κυματισμοί, διαδίδοντας μεγάλα ποσά ενέργειάς (και, δευτερευόντως, μάζας) από την ανοικτή θάλασσα (όπου δημιουργούνται) προς τις ακτές, αποτελούν ένα πολύ σημαντικό παράγοντα που επιδρά στην διαμόρφωση των ακτών, στην ισορροπία του οικοσυστήματος στην παράκτια ζώνη, στην ρύπανση των ακτών κλπ. Επομένως, η μελέτη των μηχανισμών διάδοσης των κυματισμών αυτών και η εξέταση της αλληλεπίδρασης τους με το παράκτιο περιβάλλον αποτελεί θέμα ζωτικής σημασίας από οικονομική και κοινωνική άποψη. [23]

1.1.6 ΒΑΘΥ, ΡΗΧΟ ΚΑΙ ΕΝΔΙΑΜΕΣΟ ΝΕΡΟ

Τα βάθη χωρίζονται σε κατηγορίες βαθύ, ρηχό, και ενδιάμεσο ανάλογα με το μήκος κύματος και το βάθος που εξετάζεται. Για $k/d < \pi/10$ έχουμε ρηχό νερό, για $k/d > \pi$ έχουμε βαθύ νερό και για $\pi < k/d < \pi/10$ έχουμε ενδιάμεσο νερό. Από την εξίσωση διασποράς $\omega^2 = g k \tanh(kd)$ και τη βοήθεια του πίνακα 1.3 προκύπτουν οι εξισώσεις του πίνακα 1.4 για κάθε κατηγορία νερού.

Πίνακας 1.3 Ασυμπτωτική συμπεριφορά υπερβολικών συναρτήσεων

	$kd \rightarrow \infty$	$kd \rightarrow 0$
$\cosh(kd)$	$e^{kd}/2$	1
$\sinh(kd)$	$e^{kd}/2$	kd
$\tanh(kd)$	1	kd



Πίνακας 1.4 Εξισώσεις για βαθύ, ενδιάμεσο και ρηχό νερό. Βασικά αποτελέσματα των κυματισμών μικρού πλάτους συναρτήσει του σχετικού βάθους της περιοχής διάδοσης.

	Βαθύ νερό	Νερό ενδιάμεσου βάθους	Ρηχό νερό
Δυναμικό ταχύτητας	→	$\Phi(x, z, t) = -\frac{Hg \cosh k(z+d)}{2\omega \cosh kd} \sin(kx - \omega t)$	←
Ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας της θάλασσας	→	$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t)$	←
Ταχύτητα φάσης	$C = \sqrt{gd}$	$C = \frac{g}{\omega} \tanh(kd)$	$C = \frac{g}{\omega}$
Μήκος κύματος	$L = T\sqrt{gd}$	$L = \frac{g}{2\pi} T^2 \tanh \frac{2\pi d}{L}$	$L = \frac{g}{2\pi} T^2$
Γωνιακή συχνότητα	$\omega^2 = gk^2 d$	$\omega^2 = gk \tanh kd$	$\omega^2 = gk$
Συνιστώσες ταχύτητας	$u = \frac{\pi H}{T} e^k \cos(kx - \omega t)$ $w = \frac{\pi H}{T} e^k \sin(kx - \omega t)$	$u(x, z, t) = \frac{H}{2} Ck \frac{\cosh k(z+d)}{\sinh kd} \cos(kx - \omega t)$ $w(x, z, t) = \frac{H}{2} Ck \frac{\sinh k(z+d)}{\sinh kd} \sin(kx - \omega t)$	$u = \frac{\pi H}{T} \left(\frac{1}{kd}\right) \cos(kx - \omega t)$ $w = \frac{\pi H}{T} \left(1 + \frac{z}{d}\right) \sin(kx - \omega t)$
Τροχιές μορίων	$x = -\frac{H}{2} e^k \sin(kx - \omega t)$ $y = \frac{H}{2} e^k \cos(kx - \omega t)$	$x = -\frac{H \cosh k(z_0 + d)}{2 \sinh kd} \sin(kx_0 - \omega t)$ $z = \frac{H \sinh k(z_0 + d)}{2 \sinh kd} \cos(kx_0 - \omega t)$	$x = \frac{-H}{2kd} \sin(kx - \omega t)$ $y = \frac{H}{2} \left(1 + \frac{z}{d}\right) \cos(kx - \omega t)$
Πίεση κάτω από την επιφάνεια	$\Delta P \approx \rho g \frac{H}{2} e^k \cos(kx - \omega t)$	$P = -\rho g z + \rho g \eta K_p(z)$	$\Delta P \approx \rho g \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t)$

Πηγή: [14]

Ο αριθμός Ursell ισούται με:

$$U_s = \frac{HL^2}{D^3}$$

Για ρηχό και βαθύ νερό είναι αντίστοιχα $U_s > 25$ και $U_s < 25$. [21]

Η γραμμική θεωρία κυματισμών μικρού πλάτους αναφέρεται σε κυματισμούς μικρού πλάτους, που διαδίδονται σε ρηχά νερά και των οποίων η κίνηση είναι πιο ομαλή και καθορισμένη σε σύγκριση με αυτών που διαδίδονται σε βαθιά νερά. Για το λόγο αυτόν τα κύματα σε ρηχά νερά περιγράφονται πιο εύκολα μέσω μιας υπέρθεσης πολλών ημιτονοειδών καμπυλών, οι οποίες κινούνται με την ίδια φάση.



Οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες ως επί το πλείστον βρίσκονται σε ρηχά ύδατα όπου η μη-γραμμική κινηματική του κύματος έχει ιδιαίτερη σημασία.

1.1.7 ΩΚΕΑΝΙΑ ΡΕΥΜΑΤΑ

Τα ωκεάνια ρεύματα είναι ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει το παράκτιο περιβάλλον και τη μορφολογία. Ένα ωκεάνιο ρεύμα είναι μία συνεχής, κατευθυνόμενη κίνηση του θαλασσινού νερού που παράγεται από τις δυνάμεις που ενεργούν επάνω σε μέση ροή της, όπως η ακόλουθη:

- Κυμάτων
- Ανέμου
- η επίδραση Coriolis
- θερμοκρασία
- διαφορές αλατότητας

Ρεύματα κινούνται κανονικά σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Καθώς τα ωκεάνια ρεύματα έχουν την ικανότητα να κινούνται για μεγάλες αποστάσεις, επηρεάζουν το παγκόσμιο κλίμα. Τα ωκεάνια ρεύματα βρίσκονται σε όλο τον κόσμο και ποικίλουν σε μέγεθος, σημασία και δύναμη. Μερικά από τα σημαντικά ρεύματα είναι της Καλιφόρνιας και το Humboldt στον Ειρηνικό Ωκεανό, το Ρεύμα του Κόλπου και του Λαμπραντόρ στον Ατλαντικό Ωκεανό, και το ρεύμα του Ινδικού Μουσώνα στον Ινδικό Ωκεανό. Υπάρχουν δεκαεπτά μεγάλα ρεύματα επιφανείας στους ωκεανούς του κόσμου. [3], [6], [21]

1.1.7.1 ΤΥΠΟΙ ΡΕΥΜΑΤΩΝ

Τα ωκεάνια ρεύματα διαφέρουν στον τύπο, ανεξάρτητα από το διαφορετικό μέγεθος και τη δύναμη τους. Υπάρχουν 2 διαφορετικοί τύποι ρευμάτων ανάλογα με το βάθος της ροής τους ως εξής:

- τα επιφανειακά ρεύματα (βάθος <400 m)
- βαθιά ρεύματα νερού (βάθος > 400 m)

Τα ρεύματα επιφανείας προκαλούνται από τον άνεμο, λόγω της τριβής που δημιουργείται πάνω από την επιφάνεια του νερού. Αυτή η επιφανειακή τριβή αναγκάζει το νερό να κινηθεί σε ένα σπειροειδές σχήμα δημιουργίας κυκλώνων. Οι κυκλώνες κινούνται δεξιόστροφα στο βόρειο ημισφαίριο και αριστερόστροφα στο νότιο. Η ταχύτητά τους ελαττώνεται καθώς το βάθος μειώνεται και οι μεγαλύτερες



ταχύτητες μπορεί να παρατηρηθούν στα ανώτερα 100m από το βάθος του ωκεανού. Πολλοί παράγοντες επηρεάζουν τα επιφανειακά ρεύματα, όπως οι δυνάμεις Coriolis. Σε περιοχές όπου το νερό είναι πιο ζεστό από τη γη ή όταν δύο διαφορετικά ρεύματα συγκλίνουν η βαρύτητα σπρώχνει το νερό προς τα κάτω και δημιουργεί ρεύματα επιφάνειας.

Το ρεύμα στα βαθιά νερά, επίσης γνωστό ως θερμοαλατική κυκλοφορία, αποτελεί την πλειοψηφία των παγκόσμιων ρευμάτων. Σχεδόν το 90% του συνόλου των ρευμάτων είναι βαθιά θαλάσσια ρεύματα. Όπως τα ρεύματα επιφάνειας, η βαρύτητα διαδραματίζει ένα σημαντικό ρόλο στη δημιουργία τους, αλλά σε αντίθεση με αυτά, δημιουργούνται εξαιτίας των διαφορών πυκνότητας του νερού. Ένας παράγοντας που επηρεάζει και τα δύο ρεύματα είναι η τοπογραφία του πυθμένα της θάλασσας. Το σχήμα της λεκάνης του ωκεανού είναι ένα φυσικό εμπόδιο για τις ροές των ρευμάτων και τις αιτίες ανάμειξης ανάμεσα σε νερό και ρεύμα. [19],[21]

Τα θαλάσσια ρεύματα μπορεί να δημιουργηθούν με διαφορετικούς τρόπους.

Κύριες κατηγορίες είναι:

- Ρεύματα κοντά στην επιφάνεια
- Παλιρροιακά ρεύματα
- Ρεύματα παραγόμενα από διαφορά βαρομετρικού
- Ρεύματα που προκαλούνται από απότομη αύξηση του ανέμου
- Ρεύματα παραγόμενα από κύματα (που παράγεται από την διατμητική δύναμη θραύσης των κυμάτων κατά μήκος της ακτής)

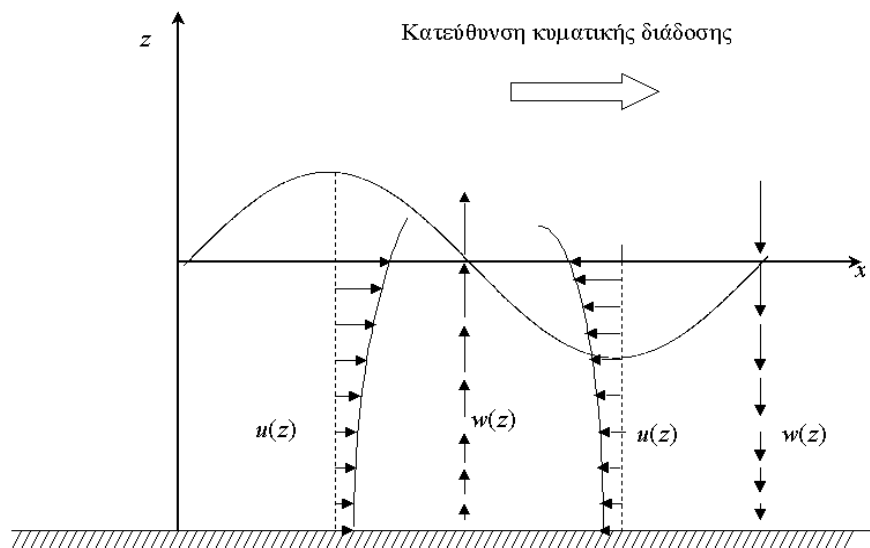
Παρά το γεγονός ότι τα θαλάσσια ρεύματα μπορεί να ποικίλλουν, γενικά θεωρούνται ως ένα οριζόντιο ομοιόμορφο πεδίο ροής με σταθερή ταχύτητα και κατεύθυνση, τα οποία μεταβάλλονται μόνο ως συνάρτηση του βάθους. Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε μέχρι σήμερα έχει δείξει ότι τα ρεύματα έχουν μικρή επίδραση στη φόρτιση των υπεράκτιων ανεμογεννητριών, οι οποίες εγκαθίσταται κυρίως σε ρηγά νερά. Η επιρροή τους είναι μάλλον έμμεση και σχετίζεται με την ενίσχυση του φαινομένου της υποσκαφής γύρω από τη βάση της ανεμογεννήτριας και τις παραλλαγές του πυθμένα της θάλασσας.

1.1.8 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ

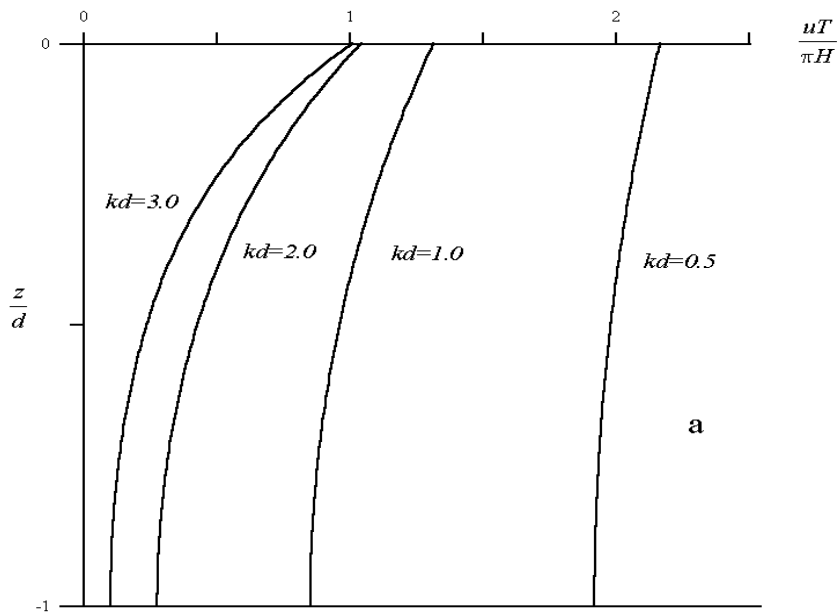
Ένα κύμα μπορεί να περιγραφεί από τις μεταβλητές d (χωρική) και t (χρονική) ή από τον συνδυασμό (φάση), ορίζοντας $\theta = kx - \omega t$, όπου $\omega = 2\pi/T$ είναι η γωνιακή συχνότητα και $k = 2\pi/L$ είναι ο κυματικός αριθμός. Το θ παίρνει τιμές από 0 έως 2π .



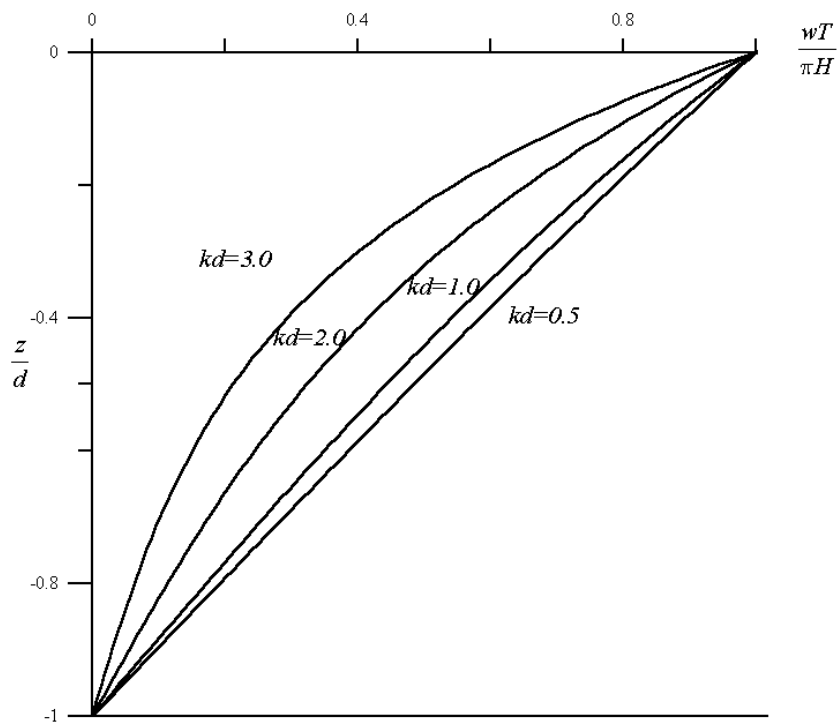
Ένα απλό περιοδικό κύμα με σταθερή μορφή που διαδίδεται πάνω από οριζόντιο πυθμένα μπορεί να χαρακτηριστεί πλήρως από το ύψος κύματος H , δηλαδή την κατακόρυφη απόσταση μεταξύ μιας κορυφής και της επόμενης κοιλάδας, το μήκος κύματος L δηλαδή την απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών ή κοιλάδων και το βάθος πυθμένα d δηλαδή την κατακόρυφη απόσταση του επιπέδου ηρεμίας της επιφάνειας της θάλασσας από το πυθμένα. Για τα γραμμικά ή μικρού πλάτους κύματα, η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ μιας κορυφής ή κοιλάδας του κύματος από το επίπεδο ηρεμίας ορίζεται ως το πλάτος a , του κύματος και εκφράζεται ως $a = H / 2$. Περίοδος κύματος T ορίζεται το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί ανάμεσα στη διέλευση δύο διαδοχικών κορυφών ή κοιλάδων από το ίδιο σημείο της ελεύθερης επιφάνειας. Επίσης ορίζεται η ταχύτητα κύματος ή ταχύτητα διάδοσης (propagation speed ή celerity) ή αλλιώς ταχύτητα φάσης (φασική ταχύτητα), $C = L / T = \omega / k$, η υπερβολικότητα του κύματος $\epsilon = H / L$, το σχετικό βάθος d / L , το σχετικό ύψος κύματος H / d και η κλίση του κυματισμού (steepness) $S = H / L$.



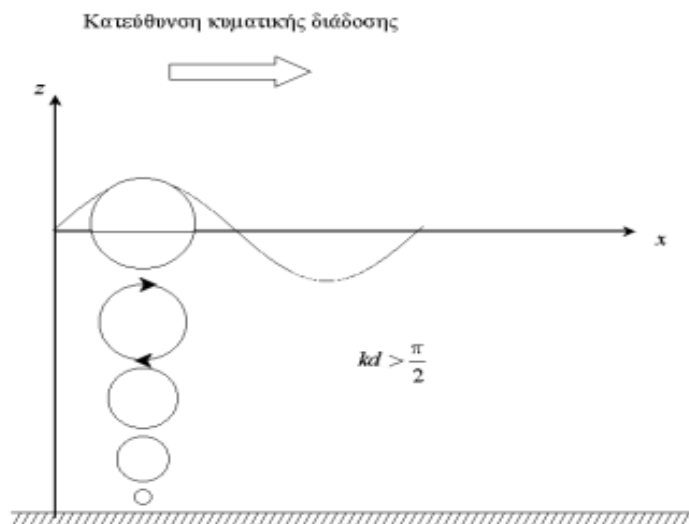
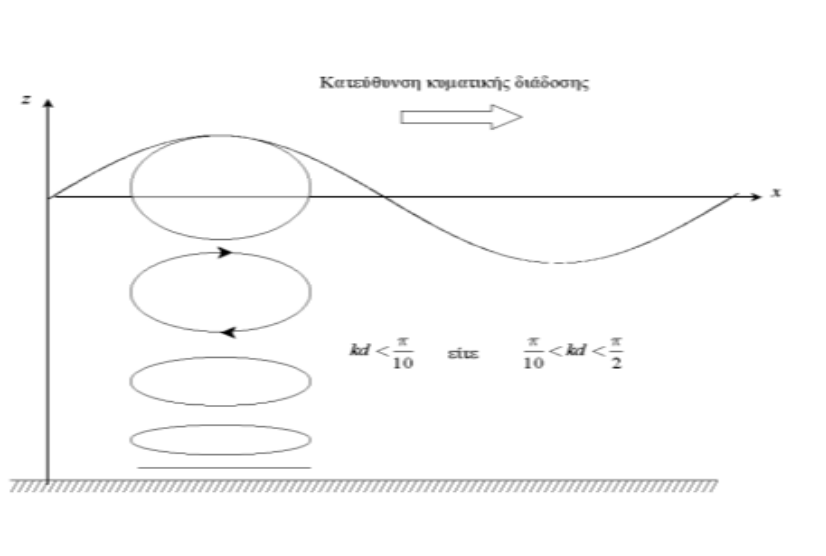
Εικόνα 1.15: Πεδίο ταχυτήτων για κυματισμούς μικρού πλάτους [Σουκισιάν]



Εικόνα 1.16α: Κατανομή της οριζόντιας συνιστώσας της ταχύτητας u κάτω από μια κυματική κορυφή για διάφορες τιμές του kd



Εικόνα 1.16β: Κατανομή της κατακόρυφης συνιστώσας της ταχύτητας w στα σημεία $\eta = 0$ για διάφορες τιμές του Kd



Εικόνα 1.17: Κατακόρυφες τροχιές των μορίων θαλασσινού νερού για κυματισμούς μικρού πλάτους

1.1.9 ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΩΝ

Στην πραγματικότητα, η ανύψωση της επιφάνειας του νερού της θάλασσας σε μία κατάσταση θάλασσας είναι τρισδιάστατη. Μία μονής κατεύθυνσης τυχαία θάλασσα είναι μια ειδική περίπτωση της κατάστασης θάλασσας, όπου όλες οι συχνότητες διαδίδονται προς την ίδια κατεύθυνση.



Τα κατευθυντικά χαρακτηριστικά συχνά θεωρείται να είναι ανεξάρτητα από τη συχνότητα, επιτρέποντας ένα διαχωρισμό μεταβλητών, έτσι ώστε το φάσμα των κατευθυντικών κυμάτων μπορεί να εκφραστεί ως το προϊόν ενός κύματος κατευθύνσεως το οποίο εξαπλώνεται, ανεξάρτητα από τη συχνότητα. Σε ρηχά νερά η επιφανειακή κατανομή της ανύψωσης θα αποκλίνει από μια κατανομή Gauss και η κατανομή των επιμέρους υψών κύματος θα αποκλίνει από την κατανομή Rayleigh.

Το ύψος των κυμάτων είναι μια συνάρτηση του βάθους του νερού και της κλίσης του πυθμένα της θάλασσας. Σε ρηχά νερά το εμπειρικό όριο του για τη θραύση του κύματος είναι περίπου 0,78 φορές του βάθους της περιοχής. Σε βαθιά νερά, το κύμα μπορεί να σπάσει με ένα θεωρητικό όριο της κλίσης 1/7 (0.14 φορές το μήκος κύματος λ).

1.2 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΠΟΥ ΣΥΜΒΑΙΝΟΥΝ ΣΤΟ ΠΑΡΑΚΤΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

1.2.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΚΤΟΓΡΑΜΜΗΣ

Οι κύριοι φυσικοί μηχανισμοί δημιουργίας μίας ακτής είναι:

- Οι φερτές ύλες από ποτάμια, κατακρημνίσματα, πλημμύρες κλπ.
- Οι νεκροί θαλάσσιοι οργανισμοί.
- Τα ίδια τα ιζήματα της περιοχής που διαβρώνονται από τα φυσικά φαινόμενα.
- Η κίνηση και μεταφορά των παράκτιων ιζημάτων.

Τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά της θάλασσας (όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, η αλατότητα κλπ) επηρεάζονται από την ξηρά και τη θάλασσα και έχουν ενδιάμεσες τιμές. Επίσης τα βιολογικά είδη που απαντώνται προέρχονται τόσο απ' το χερσαίο όσο και το θαλάσσιο περιβάλλον. Η ανθρώπινη παρέμβαση με την κατασκευή παράκτιων έργων διαμορφώνει καταλυτικά τη δυναμική ισορροπία του χώρου αυτού. Η Ελλάδα είναι μία χώρα με πολύ έντονη παρουσία του θαλάσσιου στοιχείου. Αυτό σε συνδυασμό με την ανάπτυξη της ναυσιπλοΐας, του εμπορίου, της βιομηχανίας, του τουρισμού αλλά και της αύξησης του πληθυσμού στις παραθαλάσσιες περιοχές οδηγεί σε μια αναπόφευκτη υπερφόρτωση της παράκτιας ζώνης από οχλούσες δραστηριότητες.

1.2.2 ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ ΝΕΡΟΥ

Ο χρόνος ανανέωσης είναι ο χρόνος που απαιτείται προκειμένου να απομακρυνθεί, ο συνολικός όγκος του υπάρχοντος ύδατος της λιμενολεκάνης και να αντικατασταθεί με καθαρό νερό του πελάγους, με ανταλλαγή μάζας νερού μέσω του ανοίγματος



προς την ανοικτή θάλασσα. Η ανανέωση των υδάτων στις λιμενολεκάνες επιτυγχάνεται μέσω της παράκτιας κυκλοφορίας λόγω φυσικών παραγόντων και μπορεί να ενισχυθεί με ειδικές τεχνικές μεθόδους.

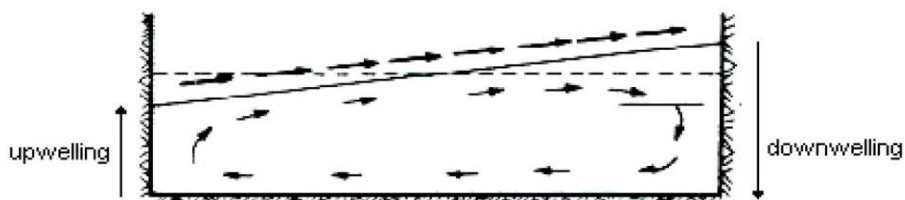
Κύριοι φυσικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ανανέωση των υδάτων είναι η παλίρροια, η ανεμογενής και κυματογενής κυκλοφορία (παλιρροιακά, ανεμογενή και κυματογενή ρεύματα). Στον ελληνικό χώρο, βασικοί παράγοντες που καθορίζουν την ανανέωση είναι η κυκλοφορία που δημιουργείται από τον άνεμο και από το κύμα.

- Παλιρροιακά ρεύματα

Η περιοδική διαφοροποίηση της επίδρασης της μάζας της Σελήνης στη διαμόρφωση του συντελεστή g στις θαλάσσιες μάζες συνεπάγεται κατακόρυφες περιοδικές μετακινήσεις μαζών νερού στους ωκεανούς. Οι μάζες αυτές για να συμπληρωθούν ή να εκτονωθούν οριζόντια συνεπάγονται οριζόντιες μεταφορές μαζών από παράκτιες λεκάνες, που γίνονται αισθητές σαν παλιρροιακά ρεύματα (tidal currents) (Κουτίτας, 1994). Σε πλατύς κόλπους και σε στενές εκβολές ποταμών τα παλιρροιακά ρεύματα ανανεώνουν τη μάζα του νερού μέσω της εναλλαγής νερού από την ανοικτή θάλασσα προς την παράκτια ζώνη και αντιστρόφως, οπότε ανανεώνουν και καθαρίζουν τον παράκτιο χώρο.

- Ανεμογενή ρεύματα

Τα ρεύματα αυτά δημιουργούνται από την επιφανειακή τάση που επάγει η ροή του ανέμου πάνω στην ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας. Κοντά στις ακτές, οι κινήσεις των ρευμάτων περιορίζονται λόγω της ύπαρξης του ορίου και οδηγούν στη συσσώρευση μαζών νερού και άρα στην δημιουργία κλίσης της επιφάνειας η οποία μπορεί να επεκταθεί σε μεγάλη απόσταση μακριά από την ακτή. Οι επιφανειακές κλίσεις με τη σειρά τους δημιουργούν μεταβολή στη πίεση κατά την οριζόντια διεύθυνση η οποία τελικά θα οδηγήσει στη δημιουργία ρευμάτων που θα προστεθούν στο αρχικό ανεμογενές ρεύμα. Τα ρεύματα κλίσης μπορεί να είναι αντίθετα στις ανεμογενείς κινήσεις και να οδηγήσουν έτσι σε αντιστροφές της επιφανειακής κυκλοφορίας σε βάθος (Κορρές, 2000).



Εικόνα 1.18: Διαμόρφωση του ανεμογενούς ρεύματος σε περιορισμένο πεδίο (Καραμπάς, 2004).



Γενικά οι άνεμοι που πνέουν κατά μήκος προς την ακτή προκαλούν συνήθως :

1. μεταφορά μαζών θαλασσινού νερού από την παράκτια ζώνη προς την ανοικτή θάλασσα και ανάδυση νερού από μεγάλο βάθος προς την επιφάνεια (upwelling) είτε
2. μεταφορά μαζών θαλασσινού νερού από την ανοικτή θάλασσα προς την παράκτια ζώνη και βύθιση επιφανειακού νερού στα βαθιά (downwelling), ανάλογα με την κατεύθυνση του ανέμου και το γήινο ημισφαίριο (Σουκισιάν 2002).

- Κυματογενή ρεύματα

Η θραύση και η διάθλαση των κυματισμών καθώς αυτοί προσεγγίζουν μια επικλινή ακτή αποτελούν τις κύριες αιτίες δημιουργίας του συστήματος της παράκτιας κυκλοφορίας. Η γωνία που σχηματίζει το κυματικό μέτωπο με την ακτή τη στιγμή της θραύσης καθώς και η παράκτια μορφολογία καθορίζουν το είδος και τα χαρακτηριστικά των αναπτυσσόμενων ρευμάτων. Η κίνηση του νερού υπό τη μορφή παράκτιων ρευμάτων οφείλεται στην πλεονάζουσα υδάτινη μάζα, η οποία για τη διατήρηση της ισορροπίας μετακινείται κατά μήκος προς την ακτή, μέχρις ότου το πλεονάζον νερό μετακινηθεί τελικά προς την ανοικτή θάλασσα και η όλη διαδικασία αρχίσει από την αρχή (Σουκισιάν, 2002).

Για το σχεδιασμό παράκτιων έργων είναι απαραίτητη η γνώση των κυματικών χαρακτηριστικών και του υδροδυναμικού πεδίου στην περιοχή μελέτης, έτσι ώστε να καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός των δυνάμεων που ασκούνται σε αυτά καθώς και για την εκτίμηση μιας σειράς φαινομένων όπως η υπερπήδηση, η στερεομεταφορά κ.α. Για την καλύτερη κατανόηση των διεργασιών που υπεισέρχονται και λήψη σχετικών μετρήσεων κατασκευάζονται φυσικά προσομοιώματα σε κατάλληλα εργαστήρια τα οποία αποτελούν ουσιαστικά μια αναπαράσταση του φυσικού φαινομένου υπό κλίμακα. Μια δεύτερη προσέγγιση είναι η αριθμητική προσομοίωση του φαινομένου η οποία βασίζεται στην επεξεργασία μαθηματικών μοντέλων. Η πρώτη μέθοδος είναι χρονοβόρα και έχει μεγάλο κόστος, ενώ η τελευταία υστερεί σε ακρίβεια.

Η παράκτια ζώνη είναι μια ευαίσθητη ζώνη στην οποία αναπτύσσονται έντονα δυναμικά φαινόμενα, με αποτέλεσμα να διαμορφώνονται εύθραυστες και ευμετάβλητες ισορροπίες όσον αφορά στο προφίλ και τη γενικότερη μορφολογία αυτής. Το μεγαλύτερο ποσοστό της κινητικής ενέργειας του κυματισμού διαχέεται μέσα από τη θραύση, την αναρρίχηση στην ακτή, την τριβή στον πυθμένα κ.α. Το σημαντικότερο αποτέλεσμα αυτών των διεργασιών είναι η διάβρωση της παράκτιας ζώνης και η στερεομεταφορά του υλικού (ίζημα).



1.2.3 ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΑΚΤΟΓΡΑΜΜΗΣ

Ο βέλτιστος σχεδιασμός (δηλαδή αποφυγή αστοχίας και λειτουργικότητα) των παράκτιων τεχνικών έργων προστασίας ακτών από διάβρωση, απαιτεί όχι μόνο την κατανόηση, αλλά και την ποσοτική ανάλυση-πρόβλεψη και την ακριβή περιγραφή των φυσικών διεργασιών του παράκτιου θαλάσσιου χώρου. Η μετάδοση των κυματισμών, η θραύση τους και η αναρρίχσή τους στις ακτές, η κυματογενής κυκλοφορία, η μεταφορά ιζημάτων και η εξέλιξη της μορφολογίας πυθμένα είναι ιδιαίτερα πολύπλοκα φυσικά φαινόμενα, που θα πρέπει όμως να περιγραφούν με ακρίβεια. Η προσομοίωση και η περιγραφή των πολύπλοκων φυσικών διεργασιών της θαλάσσιας παράκτιας ζώνης απαιτεί τη χρήση προηγμένων και πιστοποιημένων μαθηματικών μοντέλων. Τα μοντέλα αυτά βοηθούν σημαντικά στον ορθό σχεδιασμό έργων προστασίας και αναπλήρωσης ακτών που οδηγεί στην ευστοχία και καλή λειτουργία τους.

Στις ζώνες θραύσης που σχετίζονται με τη μεταφορά ιζήματος, έχουμε αναμόχλευση των ιζημάτων από τα κύματα. Αυτό το ιζήμα μπορεί στη συνέχεια να μεταφερθεί, μεταξύ άλλων, με παλιρροιακά ρεύματα και ρεύματα ανεμογενή. Επίσης η θραύση των κυμάτων στη ζώνη αυτή παράγει αντίθετα ρεύματα και είναι υπεύθυνη για το μεγαλύτερο μέρος της υπεράκτιας μεταφοράς ιζήματος που συμβαίνει κατά μήκος του παραλιακού προφίλ. Κάτω από ήπιες συνθήκες με χαμηλότερα κύματα μπορεί να γίνει κάποια ανάκαμψη της φυσικής παραλίας ως αποτέλεσμα των ιζημάτων που μεταφέρονται στην ξηρά κατεύθυνση. Είναι γνωστό ότι κοντά στον πυθμένα το ρεύμα που προκαλείται από το κύμα ροής, μεταφέρει το υλικό που αναδεύεται από τα κύματα στην ξηρά κατεύθυνση. [13]

Ένας εξιδανικευμένος ορισμός της ακτογραμμής είναι ότι συμπίπτει με τη φυσική διασύνδεση της γης και του νερού. Παρά τη φαινομενική απλότητά του, ο ορισμός αυτός είναι στην πράξη μια πρόκληση για την εφαρμογή. Στην πραγματικότητα, η θέση της ακτογραμμής αλλάζει συνεχώς μέσα στο χρόνο, λόγω της κίνησης των παραλιακών ιζημάτων στην παράκτια ζώνη και ιδιαίτερα λόγω της δυναμικής φύσης της στάθμης του νερού κατά το παράκτια όριο (π.χ. κύματα, παλίρροιες, υπόγεια ύδατα, κύματα από καταιγίδες, θραύση κυματισμών, αναρρίχηση κλπ). Η στιγμιαία ακτογραμμή είναι η θέση της διεπιφάνειας μεταξύ στεριάς και θάλασσας σε μια συγκεκριμένη στιγμή στο χρόνο. Μια ακτογραμμή μπορεί επίσης να εξεταστεί σε ένα ελαφρώς μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, όπως ένα παλιρροϊκό κύκλο, όπου η οριζόντια ή κατακόρυφη θέση της ακτογραμμής μπορεί να ποικίλει οπουδήποτε από εκατοστά μέχρι δεκάδες μέτρα (ή περισσότερο).

Η παράκτια ζώνη είναι μια περιοχή στην οποία συντελούνται πολλές οικονομικές δραστηριότητες. Ορισμένες δραστηριότητες έχουν μακρά παράδοση, αλλά πολλές



από αυτές τώρα έχουν εκτοπιστεί από καινούριες. Σήμερα, αυτές περιλαμβάνουν την αλιεία και τις ιχθυοκαλλιέργειες, τις λιμενικές δραστηριότητες, την εγκατάσταση εμπορικών και βιομηχανικών συγκροτημάτων, την παραγωγή ενέργειας, την εκμετάλλευση των ορυκτών πόρων, και ούτω καθεξής. Η αλιεία μπορεί να είναι βιοτεχνική ή βιομηχανική, ενώ οι ιχθυοκαλλιέργειες, είναι ένας ευρύς όρος που καλύπτει τις νέες υδατοκαλλιέργειες, όπως την εκτροφή ψαριών σε ιχθυοκαλλιέργειες και τη συγκομιδή φυκιών. Σχεδόν παντού, αναπτύσσονται βιομηχανικές δραστηριότητες, οι οποίες μερικές φορές συνδέονται με θαλάσσιες μεταφορές και παράγωγες δραστηριότητες, όπως της ναυπηγικής και των επισκευών, αλλά αγκαλιάζει ποικίλες απαιτήσεις όπως η ανάγκη σε βιομηχανία χάλυβα και σιδήρου, διυλιστήρια και πετροχημικές εγκαταστάσεις, βιομηχανίες γεωργικών προϊόντων διατροφής και ούτω καθεξής. Οι σταθμοί ηλεκτρικής ενέργειας στην ακτή είναι αρκετά συνήθεις στις περιοχές κοντά σε λιμάνια και εκβολές ποταμών, λόγω της αυξημένης ζήτησης για ενέργεια στις περιοχές αυτές. Η κατασκευή των πυρηνικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κοντά στην ακτή για την ψύξη του νερού, αντανακλά την ανάγκη για την αυξημένη ζήτηση σε ηλεκτρική ενέργεια κυρίως για βιομηχανικές ανάγκες και την παραγωγή, όπως και η παρουσία ηλεκτρικών εγκαταστάσεων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την εκμετάλλευση του ανέμου, των κυματισμών και της παλίρροιας. Ο τουρισμός είναι επίσης μια δραστηριότητα που ευδοκιμεί κατά μήκος των παραλιακών μετώπων. Η σταθερά αυξανόμενη ζήτηση για τουριστικές εγκαταστάσεις πυροδοτεί τη σημαντική ανάπτυξη των παράκτιων καταλυμάτων (διαμερίσματα και άλλα κτίρια, εγκαταστάσεις κατασκήνωσης, λιμάνια αναψυχής) καθώς επίσης και προβλήματα στην ποιότητα του περιβάλλοντος. Ο παράκτιος τουρισμός προσθέτει νέες διαστάσεις στην παράκτια ανάπτυξη. Η εκμετάλλευση των ορυκτών πόρων, η υπεράκτια και στον ανοιχτό ωκεανό, θα προκαλέσει την αιτία για την κατασκευή εγκαταστάσεων επεξεργασίας, διυλιστηρίων, αγωγών πετρελαίου και φυσικού αερίου και αντίστοιχων τερματικών σταθμών. Οι ορυκτοί πόροι που εξάγονται και προκαλούν μεταλλευτικές δραστηριότητες στην παράκτια ζώνη περιλαμβάνουν τον άνθρακα, το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο, το θείο, τον κασίτερο, την άμμο και το χαλίκι, το μαγνήσιο, το βρώμιο, το αλάτι και διάφορα βαρέα.

Τα τελευταία χρόνια στα Πανεπιστήμια και τα Ερευνητικά Ινστιτούτα πραγματοποιήθηκε σημαντική πρόοδος στην έρευνα στο αντικείμενο της Ακτομηχανικής. Η έρευνα οδήγησε και στην ανάπτυξη προηγμένων υπολογιστικών εργαλείων, που βασίζονται στη μαθηματική προσομοίωση των παραπάνω φυσικών φαινομένων. Ωστόσο, στην πράξη, ο Μηχανικός - Μελετητής Έργων Ακτομηχανικής συνήθως περιορίζεται σε απλοποιημένες προσεγγίσεις των παραπάνω πολύπλοκων φυσικών διεργασιών. Το παραπάνω πρόβλημα γίνεται φανερό πιο έντονα στο σχεδιασμό των «ήπιων» (περιβαλλοντικά φιλικών) μεθόδων προστασίας ακτών (π.χ.



τεχνητής αναπλήρωσης, βυθισμένων κυματοθραυστών και προβόλων) όπου απαιτείται ακόμα πιο ακριβής περιγραφή των φαινομένων.

Οι παράκτιες περιοχές σήμερα αντιμετωπίζουν έναν αυξανόμενο αριθμό προκλήσεων. Σενάρια όπως, διάβρωση, υπερχειλίσσεις και παραβίαση της προστασίας από τη θάλασσα αναμένεται να γίνουν όλο και πιο συχνά στο μέλλον, καθώς οι ακραίες καιρικές συνθήκες αναμένεται να αυξηθούν τόσο σε αριθμό όσο και σε ένταση. Προσθέτοντας τις μακροπρόθεσμες τάσεις της ανόδου της στάθμης της θάλασσας, τον αυξανόμενο κίνδυνο πλημμυρών των περιοχών με χαμηλά υψόμετρα, η πίεση στην ακτή αυξάνεται σημαντικά και οι παράκτιες κοινωνίες αναγκάζονται να αναπτύξουν και να εφαρμόσουν ρεαλιστικές λύσεις για να μετριάσουν τις αρνητικές συνέπειες. Προκειμένου να εκτιμηθεί δεόντως η ενδεχόμενη επίδραση των διαφόρων μέτρων μετριασμού των παραπάνω φαινομένων και να επιλεγούν στρατηγικές επίλυσης αυτών, ο ρόλος των ψηφιακών μοντέλων των παράκτιων διεργασιών αναμένεται να γίνει ολοένα και πιο σημαντικός. Τα σύγχρονα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση των παράκτιων διαδικασιών σήμερα ενσωματώνουν πολλά χρήσιμα στοιχεία των φυσικών διεργασιών της ζώνης της ακτής, π.χ. φασματικό κύμα και σημαντικό ύψος κύματος, μοντέλα για την ανάλυση ακραίων γεγονότων και περιστατικών, και των παράκτιων μοντέλων ροής σε συνδυασμό με την μεταφορά ιζημάτων και την μορφολογία, μπορούν να αυξήσουν την κατανόηση του προβλήματος της διάβρωσης σε μια σειρά σημαντικών υποθέσεων.

Η θραύση των κυματισμών παίζει σημαντικό ρόλο σε όλα σχεδόν τα προβλήματα της παράκτιας μηχανικής. Η κίνηση των κυμάτων αλλάζει λόγω της παρουσίας των παράκτιων δομών, η οποία ενισχύει τον διαχωρισμό της ροής και τον στροβιλισμό της ροής. Η αλληλεπίδραση των κυμάτων με την ακτή παράγει ένα μεγάλο αριθμό από επιδράσεις που επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τις ανθρώπινες δραστηριότητες κοντά στη θάλασσα. Τα κύρια προβλήματα προκαλούνται από τη διάβρωση των παραλιών και τις πλημμύρες ή την άνοδο της στάθμης πίσω από την ακτογραμμή.

1.2.4 ΓΕΝΙΚΗ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΑΚΤΗΣ

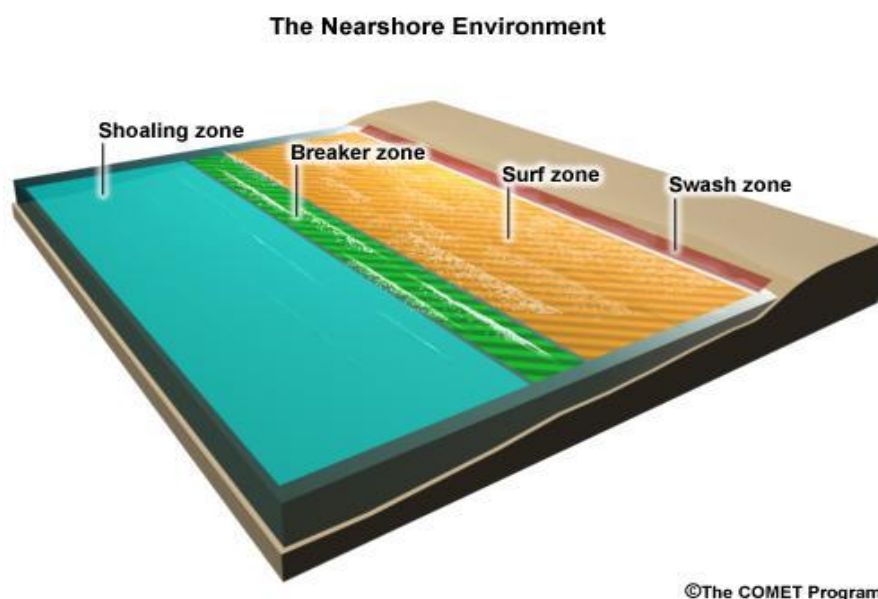
Παραλίες σε όλο τον κόσμο παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις σε ιζήματα όσον αφορά τη σύνθεση τους και τα μεγέθη των κόκκων. Οι ακτές αποτελούνται από:

- Χαλαζία
- Βαριά μεταλλικά στοιχεία (μαύρη άμμος)
- Ηφαιστειακό υλικό (υψηλή συγκέντρωση σε βασάλτη)
- Κόκκους ανθρακικού ασβεστίου



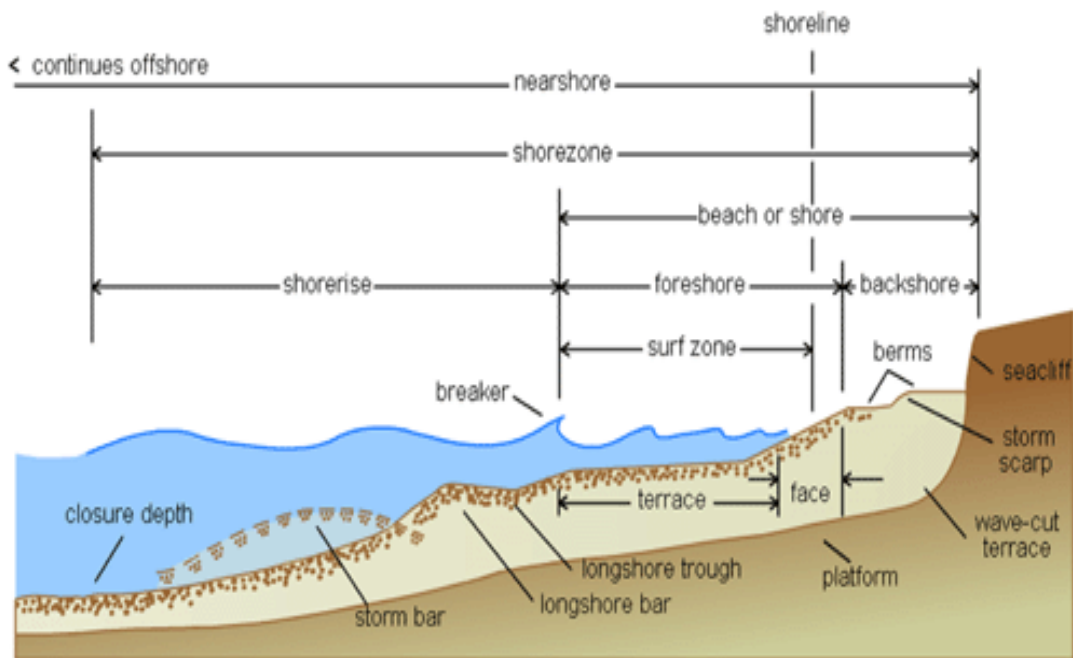
Η διάμετρος του κόκκου διαφέρει από περιοχή σε περιοχή και κυμαίνεται από μερικά έως πολλά χιλιοστά. Η ανθρωπογενής δραστηριότητα επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό την καθίζηση και την τελική παράκτια μορφολογία. Κατασκευές όπως λιμενοβραχίονες ή τεχνητοί κυματοθραύστες και μικρές αποβάθρες έχουν σημαντική επίδραση στο παράκτιο περιβάλλον. Το υποθαλάσσιο τμήμα του παράκτιου περιβάλλοντος είναι το πιο σημαντικό μέρος, επειδή όλες οι σημαντικές διαδικασίες των κυμάτων και η μεταφορά ιζήματος λαμβάνουν χώρα σε αυτό, τα οποία έχουν την τελική ευθύνη για την τελική μορφολογία της παραλίας. [1], [13], [21]

Η ορολογία που χρησιμοποιείται για να περιγράψει την δράση των κυμάτων και ρευμάτων στην περιοχή που απεικονίζεται στις εικόνες 1.19 και 1.20. Η ακτογραμμή ακολουθείται από τη ζώνη θραύσης των κυματισμών (surf zone) και στη συνέχεια από την περιοχή με πιο απότομη κλίση του πυθμένα παράκτια ζώνη (nearshore zone). Η περιοχή που εκτείνεται πέρα από αυτή τη ζώνη έως την άκρη της υφαλοκρηπίδας είναι η υπεράκτια ζώνη. [1], [13]

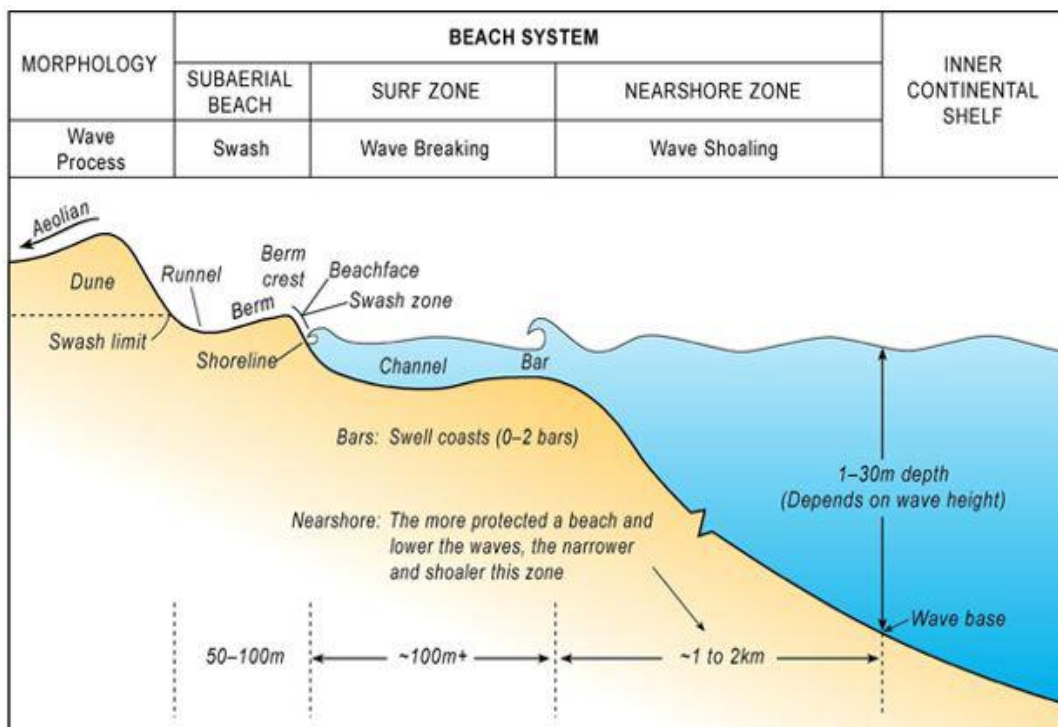


Εικόνα 1.19: Διαμέριση της παράκτιας ζώνης [Πηγή: www.apollo.lsc.vsc.edu]

Ο όρος παράκτια περιοχή αναφέρεται στο χώρο ο οποίος περιορίζεται από την πλευρά του ωκεανού από τον ηπειρωτικό φλοιό, και από την πλευρά της στεριάς από το άνω άκρο επίδρασης του κυματισμού στην ακτή.



Εικόνα 1.20: Περαιτέρω διαμέριση της παράκτιας ζώνης [Πηγή: www.coastalchange.ucsd.edu]



Εικόνα 1.21: Παράκτιο σύστημα. [6], [21]

Η παράκτια ζώνη nearshore υποδιαιρείται σε τρεις διαφορετικές ζώνες. Η ζώνη σπασίματος των κυματισμών (breaker zone) είναι το τμήμα της περιοχής αυτής στην οποία τα κύματα που φτάνουν από την υπεράκτια ζώνη (offshore) γίνονται ασταθή



και ενδέχεται να σπάσουν. Είναι η ζώνη που ξεκινάει το σπάσιμο. Η ζώνη απόπλυσης (swash zone) είναι η πιο εσωτερική ζώνη της παράκτιας ζώνης. Μεταξύ της ζώνης απόπλυσης και της ζώνης αρχικού σπασίματος είναι η ζώνη θραύσης (surf zone). [1], [13]

Η ζώνη θραύσης (surf zone) είναι το πιο δυναμικό κομμάτι της παραλίας. Τα κύματα σπάνε όταν το βάθος του νερού είναι περίπου 1,5 φορές το ύψος των κυμάτων. Τα ρεύματα ζώνη θραύσης (surf zone) μπορούν να μεταφέρουν ιζήματα στην ξηρά, στην παράκτια και υπεράκτια ζώνη και να βοηθήσουν στη δημιουργία των αμμωδών πυθμένων που καταλαμβάνουν τη ζώνη θραύσης. Η παρουσία και το πλάτος της ζώνης θραύσης είναι κυρίως συνάρτηση της κλίσης της παραλίας και δευτερευόντως εξαρτάται από τις παλίρροιες. Παραλίες ήπιας κλίσης, χαρακτηρίζονται από ευρεία ζώνη θραύσης, ενώ από την άλλη πλευρά, κροκάλες και απότομα επικλινείς παραλίες με χαλίκια σπάνια διαθέτουν μια ζώνη θραύσης. Επικλινείς παραλίες συνήθως στερούνται μιας ζώνης θραύσης σε παλίρροια, αλλά αναπτύσσουν μια τέτοια ζώνη κατά την άμπωτη. [1], [13], [21]



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ

2.1 ΥΠΕΡΑΚΤΙΑ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ

2.1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η αναμενόμενη αύξηση του αριθμού και της έντασης των καταιγίδων, λόγω της κλιματικής αλλαγής, επιφορτίζει την ήδη επιβαρυσμένη σημερινή κατάσταση των παράκτιων περιοχών όσον αφορά την διάβρωση, τις πλημμύρες, μαζί με την ανάγκη να διαφυλαχθούν τα παράκτια οικοσυστήματα με τρόπο αποδεκτό για τις κοινωνίες. Ένα θαλάσσιο αιολικό πάρκο μπορεί να θεωρηθεί μια πράσινη εναλλακτική λύση για την προστασία των ακτών, υπό την έννοια ότι παρέχει όχι μόνο κάποιο βαθμό προστασίας των ακτών, αλλά και αποτελεί μια ανανεώσιμη, πράσινη (χωρίς άνθρακα) μορφή ενέργειας. Η διάβρωση, ειδικά στο πρόσωπο της παραλίας, μπορεί να μειωθεί, πράγμα που προσδίδει αξιοπιστία στην υπόθεση ότι ένα τέτοιο αιολικό πάρκο μπορεί να χρησιμεύσει ως παράκτια μέτρο άμυνας. Η συνέργεια αυτή ενισχύει τη βιωσιμότητα των θαλάσσιων αιολικών πάρκων. Οι θαλάσσιες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, και ιδίως η κυματική ενέργεια, καλείται να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην επίτευξη των στόχων της ενεργειακής πολιτικής της Ευρωπαϊκής Ένωσης για το 2020.

Τα υπεράκτια αιολικά πάρκα επιτρέπουν την εκμετάλλευση της αυξημένης διαθεσιμότητας του ανέμου στην θάλασσα σε σχέση με αυτήν της ξηράς, καθώς και μικρότερη οπτική ενόχληση από την παρουσία των ανεμογεννητριών. Σε σύγκριση με την χερσαία αιολική ενέργεια, η υπεράκτια αιολική ενέργεια είναι περισσότερο δαπανηρή για την εγκατάσταση και τη συντήρηση της, αλλά έχει ένα βασικό πλεονέκτημα: ισχυρότερο και πιο σταθερό άνεμο.

Ένα πρόβλημα που θα προκύψει από την σημαντική ανάπτυξη των υπεράκτιων αιολικών πάρκων είναι η γεινίαση ή και η συστέγασή τους κατά μια έννοια, με άλλες ανθρώπινες δραστηριότητες, όπως οι υδατοκαλλιέργειες, ο τουρισμός, οι μεταφορές κ.α., κάτι που δημιουργεί κάποιες αντικειμενικές δυσκολίες όταν συνυπάρχουν πολλοί τομείς μεταξύ τους. Όμως μπορεί να υπάρξουν και συνέργειες, από τις οποίες να προκύψουν περισσότερα οφέλη για τις τοπικές κοινωνίες, αλλά και για την οικονομία γενικότερα.

Για τους σκοπούς της ανάπτυξης ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου είναι σημαντικοί οι εξής παράγοντες: (α) το δυναμικό της περιοχής εγκατάστασης που αφορά κυρίως τις ιδιότητες του ανέμου, όπως ταχύτητα και διεύθυνση, (β) το βάθος της θάλασσας και η μορφολογία του πυθμένα, (γ) οι υπάρχουσες διαδρομές



ναυσιπλοΐας και θαλασσιών μεταφορών και (δ) η απόσταση από την περιοχή του παράκτιου ηλεκτρικού δικτύου τροφοδοσίας.

Στο χώρο ανάπτυξης του αιολικού πάρκου, τα χαρακτηριστικά των κυματισμών μπορεί να τροποποιηθούν από την ύπαρξη των ανεμογεννητριών, κάτι που είναι ένα σημαντικό έργο κατά τη μελέτη του παγκόσμιου περιβαλλοντικού αντίκτυπου των υπεράκτιων αιολικών πάρκων. Τα κύματα που πλησιάζουν τις ακτές, μπορεί να μετασχηματιστούν λόγω διάθλασης και περίθλασης εξαιτίας των αλλαγών στο βάθος και την κλίση του πυθμένα, αλλά και με την παρουσία των ρευμάτων. Επιπλέον, η απώλεια ενέργειας των κυμάτων μπορεί να συμβεί λόγω της τριβής και της ενέργειας που καταστρέφεται από το κύμα θραύσης. Η παρουσία ενός εμποδίου κατά την διεύθυνση διάδοσης ενός κυματισμού, όπως είναι μία ανεμογεννήτρια θεμελιωμένη σε έναν μοναδικό κυλινδρικό πάσσαλο, θα οδηγήσει στη δημιουργία ενός κύματος περίθλασης γύρω από το εμπόδιο, ενός κύματος αντανάκλασης από το εμπόδιο και αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα η ενέργεια να χαθεί λόγω της αντίστασης και της αδράνειας.

Το μέγεθος των επιδράσεων αυτών εξαρτάται από τις κλίμακες μήκους του κύματος και του εμποδίου. Για ένα κυλινδρικό πάσσαλο, η κλίμακα μήκους είναι η διάμετρος D και οι σχετικές παράμετροι για το κύμα είναι το μήκος κύματος L και το πλάτος του κύματος A . Για μικρές D / L και μια μεγάλη A / D , ο διαχωρισμός της ροής και οι στροβιλισμοί είναι σημαντικοί, όμως η περίθλαση του κύματος είναι αμελητέα, ενώ για μεγάλα D / L και μικρό A / D η περίθλαση του κύματος γίνεται σημαντική και ο διαχωρισμός της ροής είναι αμελητέος (Mei, 1992). Το πρόβλημα της αλληλεπίδρασης κύματος με έναν κάθετο κύλινδρο έχει αποτελέσει αντικείμενο έντονης μελέτης για κάποιο χρονικό διάστημα με έμφαση στις υπεράκτιες μηχανολογικές εφαρμογές, κυρίως για τον υπολογισμό των φορτίων κυμάτων που ενεργούν πάνω στον κύλινδρο.

Μια γενική έρευνα σχετικά με τις επιπτώσεις των υπεράκτιων αιολικών πάρκων παρήχθη επίσης για λογαριασμό της ETSU (Μονάδα Ενέργειας Υποστήριξης Τεχνολογίας Cooper και Beiboer, 2002), ως μέρος του νέου προγράμματος ανανεώσιμων πηγών ενέργειας από την εφαρμογή του μοντέλου MIKE21 BW (Boussinesq εξισώσεις) για την αξιολόγηση των επιπτώσεων ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου στις παράκτιες διαδικασίες σε σχέση με ένα αντιπροσωπευτικό σύνολο των συνθηκών που αφορούν την παλίρροια, τα κύματα και τη μεταφορά ιζήματος. Από την έρευνα αυτή προέκυψε το συμπέρασμα ότι το θαλάσσιο αιολικό πάρκο προκαλεί αλλαγές στο ρεύμα, το κύμα, και στις συνθήκες κίνησης και απόθεσης ιζήματος, όχι όμως τόσο σημαντικές στο ευρύτερο πεδίο, με μικρές μόνο επιρροές στο εγγύς-πεδίο.



Επίσης οι Alarí και Raudsepp εφαρμόζοντας ένα μοντέλο SWAN σε ένα υπεράκτιο αιολικό πάρκο που απαρτίζονταν από ανεμογεννήτριες εγκατεστημένες σε έναν πάσσαλο (monopiles), έδειξαν ότι η μείωση του σημαντικού ύψους κύματος στη Βαλτική Θάλασσα (μια ημίκλειστη θάλασσα), που οφείλεται σε ένα αιολικό πάρκο είναι πολύ μικρή και ισχυρίστηκαν ότι αυτό οφείλεται στον πολύ μικρό λόγο μεταξύ της διαμέτρου του πασσάλου και του κυρίαρχου μήκους κύματος. [2]

2.1.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΥΠΕΡΑΚΤΙΑΣ ΜΕ ΧΕΡΣΑΙΑ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Η υπερβολική χρήση των ορυκτών καυσίμων έχει προκαλέσει την αλλαγή του κλίματος, η οποία έχει καταστεί σαφής κατά τις τελευταίες δεκαετίες και απειλεί την ανθρώπινη ασφάλεια και ανάπτυξη. Σήμερα, η σοβαρή ενεργειακή κρίση και η ρύπανση του περιβάλλοντος έχουν αναγκάσει τους ανθρώπους και τις κυβερνήσεις σε όλο τον κόσμο να ψάξουν για βιώσιμες εναλλακτικές πηγές ενέργειας. Ως αποτέλεσμα, η αιολική ενέργεια ως ένα είδος άφθονο, καθαρό και ανανεώσιμο έχει λάβει ιδιαίτερη προσοχή σε όλο τον κόσμο και η ανάπτυξή της αυξάνεται με πρωτοφανή ρυθμό τα τελευταία χρόνια. Η ανάπτυξη χερσαίων αιολικών πάρκων συνήθως περιορίζεται από τη διαθεσιμότητα γης. Προβλήματα όπως ο θόρυβος των ανεμογεννητριών και οι οπτικές επιπτώσεις στο φυσικό περιβάλλον είναι οι κύριοι λόγοι για τους οποίους οι άνθρωποι έχουν αρνηθεί να αποδεχθούν την κατασκευή των χερσαίων ανεμογεννητριών κοντά σε κατοικημένες περιοχές. Αντίθετα, η υπεράκτια αιολική ενέργεια που προέρχεται από ανεμογεννήτριες έχει μια σειρά από πλεονεκτήματα: υπάρχει πολύ περισσότερος διαθέσιμος χώρος και λιγότερα παράπονα για το θόρυβο και την οπτική ενόχληση. Εκτός αυτού, ο άνεμος πάνω από το νερό είναι γενικά πιο ισχυρός και πολύ πιο ομαλός από ότι ο άνεμος πάνω από την ξηρά. Οι παράκτιες περιοχές είναι συνήθως οι πιο αναπτυγμένες οικονομικά, με υψηλή ζήτηση σε ηλεκτρική ενέργεια. Προς το παρόν, το μεγαλύτερο εμπόδιο για την ανάπτυξη της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα είναι το υψηλό κόστος των υπεράκτιων εγκαταστάσεων που τη συνοδεύουν. Παρ' όλα αυτά, σημαντική μείωση του κόστους στο τομέα της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας θα μπορούσε να επιτευχθεί με τη χρήση προηγμένων μελλοντικών τεχνολογιών για τη βελτιστοποίηση σε κάθε στάδιο όπως είναι η ανάπτυξη, η κατασκευή, η εγκατάσταση και η λειτουργία ενός θαλάσσιου αιολικού πάρκου.

Η αιολική ενέργεια είναι μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας (ΑΠΕ) και ως τέτοια έχει τα εξής χαρακτηριστικά. Πρώτον δεν απαιτείται καμία ενεργή παρέμβαση, όπως εξόρυξη ή καύση για την εκμετάλλευσή τους και δεύτερον είναι καθαρή πηγή ενέργειας, πολύ φιλική προς το περιβάλλον, που δεν αποδεσμεύει



υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά παράγωγα. Κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών, το ενδιαφέρον των ΑΠΕ έχει έντονα αναβιώσει το ζήτημα της ενεργειακής ασφάλειας, η οποία έκανε τις βιομηχανικά αναπτυσσόμενες χώρες που εξαρτώνται από το πετρέλαιο, κυρίως και κατά δεύτερο λόγο, το φαινόμενο του θερμοκηπίου, να στραφούν σε άλλες μορφές ενέργειας χωρίς εξάρτηση από υδρογονάνθρακες. Η αιολική ενέργεια είναι μια πρακτικά ανεξάντλητη πηγή ενέργειας.

Η αξιοποίηση του υψηλού δυναμικού σε χώρες όπως η Ελλάδα, σε συνδυασμό με την ταχεία ανάπτυξη των τεχνολογιών που αφορούν πιο αποδοτικές ανεμογεννήτριες, είναι υψίστης σημασίας για την αειφόρο ανάπτυξη, την εξοικονόμηση ενέργειας και την προστασία του περιβάλλοντος. Τα τελευταία χρόνια, το κόστος κατασκευής ανεμογεννητριών έχει σημαντικά μειωθεί και θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι η αιολική ενέργεια διανύει την περίοδο της ωριμότητας, καθώς είναι τώρα ανταγωνιστική με τις συμβατικές μορφές ενέργειας. Στην Ελλάδα θαλάσσιες περιοχές στις οποίες θα μπορούσαν να εγκατασταθούν υπεράκτια αιολικά πάρκα είναι το Βόρειο Ιόνιο, οι Κυκλάδες, το Αιγαίο, η Νότια Κρήτη, και τα Νοτιοανατολικά Δωδεκάνησα. Ωστόσο, η σωστή θέση του αιολικού πάρκου στη θάλασσα απαιτεί τη συναρμολόγηση των ανεμογεννητριών σε μακρινή απόσταση από την ακτογραμμή σε ρηχά βάθη της θάλασσας και με κριτήριο την οικονομικότητα (κόστος κατασκευής συντηρητικό), η αποφυγή των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η πιο βασική προϋπόθεση για την αποτελεσματικότητα και την οικονομική βιωσιμότητα ενός αιολικού πάρκου είναι ένα υψηλά εκμεταλλεύσιμο αιολικό δυναμικό.

Η υπεράκτια αιολική ενέργεια ανταγωνίζεται τόσο με τη χερσαία αιολική ενέργεια, όσο και με τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα ηλεκτρικής ενέργειας. Χερσαία αιολική ενέργεια και καύσιμο φυσικό αέριο ισχύος είναι οι δύο ταχύτερα αναπτυσσόμενοι τομείς της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Με δεδομένες τις αβεβαιότητες που συνδέονται με την παγκόσμια κλιματική αλλαγή είναι δύσκολο να συγκρίνουμε το κοινωνικό κόστος και τα οφέλη της αιολικής ενέργειας σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα ενέργειας.

Η χερσαία αιολική ενέργεια, σε ορισμένες περιπτώσεις, έχει σταματήσει από τις τοπικές αντιρρήσεις λόγω των συγκρούσεων μεταξύ των εναλλακτικών χρήσεων γης. Ένα δυνητικό όφελος της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας είναι ότι μπορεί να μειωθεί αυτή η σύγκρουση. Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να τοποθετηθούν αρκετά μακριά από την ακτή έτσι ώστε να ακούγονται ελάχιστα και ενδεχομένως να είναι αόρατες, να μην ενοχλούν οπτικά. Οι θαλάσσιοι άνεμοι είναι γενικά πιο ισχυροί και πιο σταθεροί από αυτούς της ξηράς. Ως αποτέλεσμα, οι ανεμογεννήτριες αναμένεται να λειτουργούν στη μέγιστη ικανότητα τους για ένα μεγαλύτερο ποσοστό του χρόνου, και η σταθερότητα της ταχύτητας του ανέμου μειώνει τη



φθορά επί του στροβίλου και παρέχει μια πιο σταθερή πηγή ισχύος στο ηλεκτρικό δίκτυο μειώνοντας την ανάγκη για άλλες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμεύουν ως συμπλήρωμα ηλεκτρικής ενέργειας. Οι θαλάσσιοι γερανοί που αναπτύχθηκαν για την υπεράκτια μεταφορά πετρελαίου και φυσικού αερίου είναι σε θέση να χειρίζονται μεγαλύτερο εξοπλισμό από ό, τι στην ξηρά, επιτρέποντας έτσι μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες να ανεγερθούν αποτελεσματικά στη θάλασσα. Η μεταφορά των απαιτούμενων τεράστιων κομματιών του εξοπλισμού γίνεται επίσης σημαντικά ευκολότερα στη θάλασσα, κάτι που δεν ισχύει στην ξηρά όπου εξαιτίας των πολλών περιορισμών περιορίζονται αναγκαστικά και τα μεγέθη των γεννητριών με αποτέλεσμα την μικρότερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το γεγονός ότι στη θάλασσα έχουμε μείωση των διάφορων περιορισμών, επιτρέπει την κατασκευή ανεμογεννητριών πολύ μεγαλύτερων σε σχέση με την ξηρά, χωρίς να απασχολεί τον σχεδιασμό ο θόρυβος που προκαλείται από τον ρότορα και τους στροβίλους, κάτι που αυξάνει την ισχύ μιας μεμονωμένης ανεμογεννήτριας.

Η Ευρώπη έχει κάνει τεράστια έρευνα όσον αφορά τα υπεράκτια αιολικά πάρκα, με αποτέλεσμα το μεγαλύτερο μέρος της ανάπτυξης και εγκατάστασης τέτοιων πάρκων να συμβαίνει σε αυτή, κυρίως στη Βαλτική και τη Βόρεια Θάλασσα.

2.2 ΥΠΕΡΑΚΤΙΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

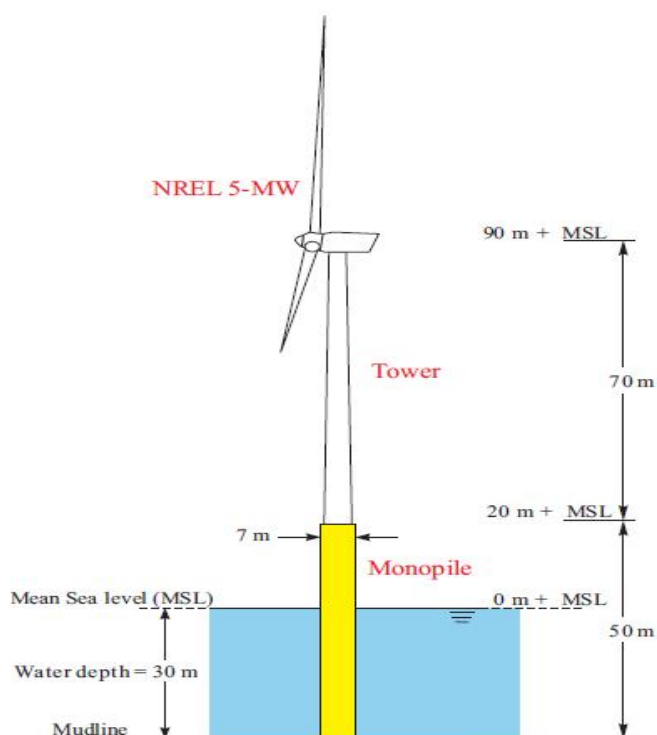
2.2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Τις τελευταίες δεκαετίες, η υπεράκτια αιολική ενέργεια έχει ταχεία παγκόσμια ανάπτυξη. Σε σύγκριση με την χερσαία αιολική ενέργεια, η υπεράκτια αιολική ενέργεια υπερτερεί, κυρίως λόγω του μεγαλύτερου δυναμικού σε άνεμο, αλλά και στο ότι οι εγκαταστάσεις που απαιτούνται για την αξιοποίησή της βρίσκονται πολύ κοντά στους ανθρώπινους πληθυσμούς. Επιπλέον, το μεγαλύτερο κόστος των υπεράκτιων αιολικών πάρκων σημαίνει ότι η ανάλυση της πιθανότητας αποτυχίας κάτω από ακραία φορτία είναι ακόμη πιο σημαντική για αυτές από ότι για τις χερσαίες ανεμογεννήτριες. Για την εγκατάσταση ανεμογεννητριών σε θαλάσσιους τόπους, χρησιμοποιούνται διάφορες υπεράκτιες δομές.

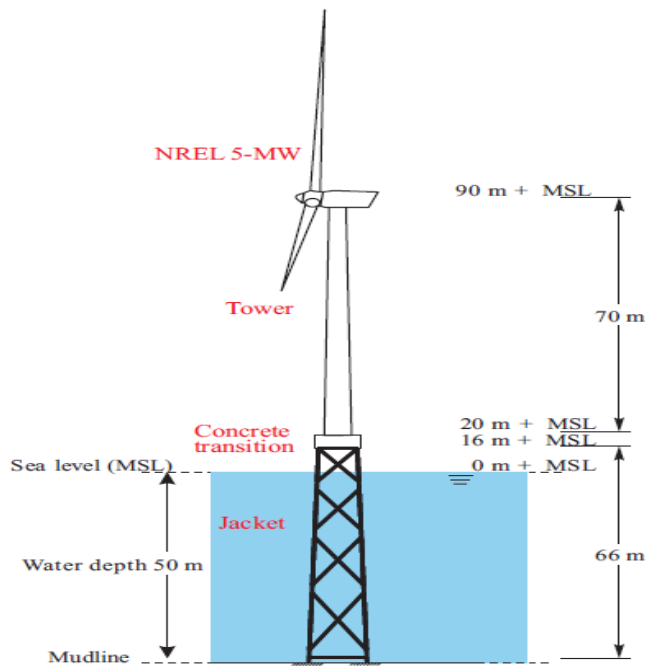
Η αυξανόμενη ανάγκη σε ενεργειακά αποθέματα έχει ως αποτέλεσμα την ταχεία ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Τα υπεράκτια αιολικά πάρκα είναι ένα σημαντικό είδος των ανανεώσιμων πηγών παραγωγής ενέργειας, που έχει εγκατασταθεί σε παράκτια ύδατα και περιλαμβάνει εκατοντάδες ανεμογεννήτριες οι οποίες εγκαθίστανται στον πυθμένα της θάλασσας και θεμελιώνονται κυρίως σε έναν πάσσαλο (monopiles). Η εγκατάσταση με έναν πάσσαλο, σωλήνα (monopile), είναι η πιο κοινή λύση για υπεράκτια αιολικά πάρκα σε ρηχά νερά με βάθος μέχρι



25-30 μέτρα. Σε μεγαλύτερα βάθη, 30-80 μέτρα χρησιμοποιούνται εγκαταστάσεις τύπου jacket, οι οποίες έχουν δώσει νέα ώθηση στην ανάπτυξη των θαλασσίων αιολικών πάρκων. Η παρουσία αυτών των δομών στις παράκτιες περιοχές θα επηρεάσει τις παράκτιες διεργασίες, όπως η μεταφορά ιζημάτων και το καθεστώς εναπόθεσης, τις συνθήκες της παλίρροιας και γενικά τις συνθήκες διάδοσης των κυματισμών και της θαλάσσιας κυκλοφορίας. Αυτές οι πιθανές επιπτώσεις του αιολικού πάρκου μπορεί να συμβούν σε τοπικό επίπεδο, στην περιοχή ανάπτυξης, και εξ αποστάσεως στο ευρύτερο πεδίο ή την ίδια την ακτογραμμή. Τα υπεράκτια αιολικά πάρκα μπορούν να επηρεάσουν το θαλάσσιο περιβάλλον με διάφορους τρόπους. Ανεμογεννήτριες θεμελιωμένες σε έναν πάσσαλο μπορούν να προκαλέσουν μετακίνηση του ιζήματος, απώλεια του υποστρώματος, αλλαγές στα ρεύματα του νερού και περιβαλλοντικές επιπτώσεις στα υπάρχοντα οικοσυστήματα.



Εικόνα 2.1: Τυπική απεικόνιση και διαστάσεις εγκατάστασης ανεμογεννήτριας με έναν πάσσαλο (τύπου monopile) [1].



Εικόνα 2.2: Τυπική απεικόνιση και διαστάσεις εγκατάστασης ανεμογεννήτριας με τύπου Jacket [1].

Table 1.6 NREL 5MW Offshore Wind Turbine Properties (Jonkman, Butterfield, Musial, & Scott, 2009)

Property	Value
Rotor, Hub Diameter	126 m, 3 m
Hub Height	90 m
Tower Base Diameter & Wall Thickness	6 m, 0.027 m
Tower Top Diameter & Wall Thickness	3.87 m, 0.019 m
Young's and Shear Modulus of Steel	210 GPa, 80.8 GPa
Cut-In, Rated, Cut-Out Wind Speed	3 m/s, 11.4 m/s, 25 m/s
Cut-In, Rated Rotor Speed	6.9 rpm, 12.1 rpm
Rated Tip Speed	80 m/s
Overhang, Shaft Tilt, Precone	5 m, 5°, 2.5°
Rotor Mass	110,000 kg
Nacelle Mass	240,000 kg
Tower Mass	347,460 kg

Εικόνα 2.3: Τυπικές διαστάσεις ανεμογεννήτριας.



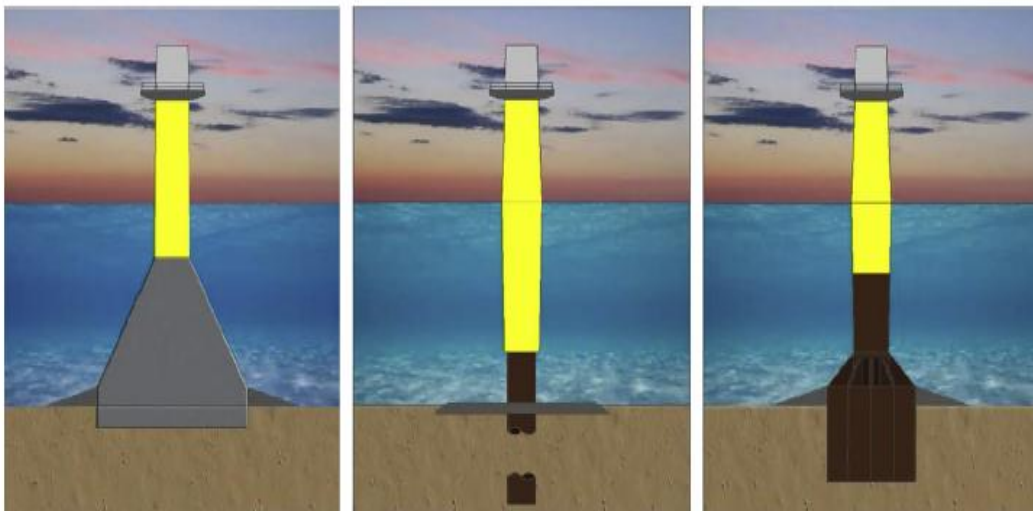
2.2.2 ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ ΥΠΕΡΑΚΤΙΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Οι κύριες κατηγορίες στήριξης και θεμελίωσης των υπεράκτιων ανεμογεννητριών είναι οι εξής: α) Κατασκευές Βαρύτητας (GBS), που είναι κατασκευές σκυροδέματος αρκετά μεγάλου βάρους, οι οποίες κατασκευάζονται στην ξηρά σε ειδικά διαμορφωμένους χώρους όπως ναυπηγεία και εργοτάξια, στη συνέχεια μεταφέρονται και αφήνονται στο σημείο που πρέπει και φορτίζονται με άμμο, βράχους, σιδηροπλισμό. Αποτελούν μια ιδανική λύση για ρηγά νερά με βάθος από 5m έως 20m. Ο κύριος περιορισμός τους είναι το υψηλό κόστος που αυξάνει απότομα για μεγαλύτερα βάθη. β) Μονοπάσσαλοι (monopiles), οι οποίοι αποτελούν τις πιο απλές τεχνικές λύσεις για ρηγά νερά και το οφείλουν αυτό στο χαμηλό τους κόστος. Αποτελούνται από ένα μεταλλικό σωλήνα ο οποίος οδηγείται μέσα στον πυθμένα και συνδέεται στη συνέχεια με την ανεμογεννήτρια με ένα μεταβατικό κομμάτι. Ο κύριος περιορισμός τους είναι η αύξηση του κόστους του χάλυβα για βάθη νερού μεγαλύτερα από 30m, και οι αβεβαιότητες που προκύπτουν εξαιτίας του φαινομένου της υποσκαφής του πυθμένα γύρω από τον σωλήνα (scouring). Τα βάθη που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι από 10m έως 30m. γ) Κατασκευές για ενδιάμεσα βάθη, όπως πλαισιωτές κατασκευές (jacket, tripods) οι οποίες χρησιμοποιούνται σε μεγαλύτερα βάθη από 30m έως 80m και έχουν αντίστοιχα μεγαλύτερο κόστος όσο αυξάνει το βάθος. δ) πλωτές κατασκευές (floating deep water), οι οποίες έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια με διάφορες μορφές και χρησιμοποιούνται σε μεγάλα βάθη μέχρι τα 200m.

Η μεγάλη μάζα και αδράνεια της θεμελίωσης βαρύτητας έχει βρεθεί ελκυστική για τις σκληρές συνθήκες της Βόρειας Θάλασσας, δεδομένου ότι η εγκατάσταση δεν απαιτεί εξειδικευμένα σκάφη. Ωστόσο, περιορίζονται σε βάθη μικρότερα από 20 μέτρα και απαιτούν εκτεταμένη προετοιμασία του χώρου. Ο σχεδιασμός της θεμελίωσης με μονοπάσσαλο (monopile) είναι απλός, παρέχοντας μια άμεση διαδρομή του φορτίου από τον πύργο στο έδαφος. Είναι γενικά αποδεκτό ότι μπορεί να φτάσει σε βάθη μέχρι τα 30 ή 40m.



Εικόνα 2.4: Σχηματική περιγραφή των σύγχρονων κατηγοριών ανεμογεννητριών. [5]

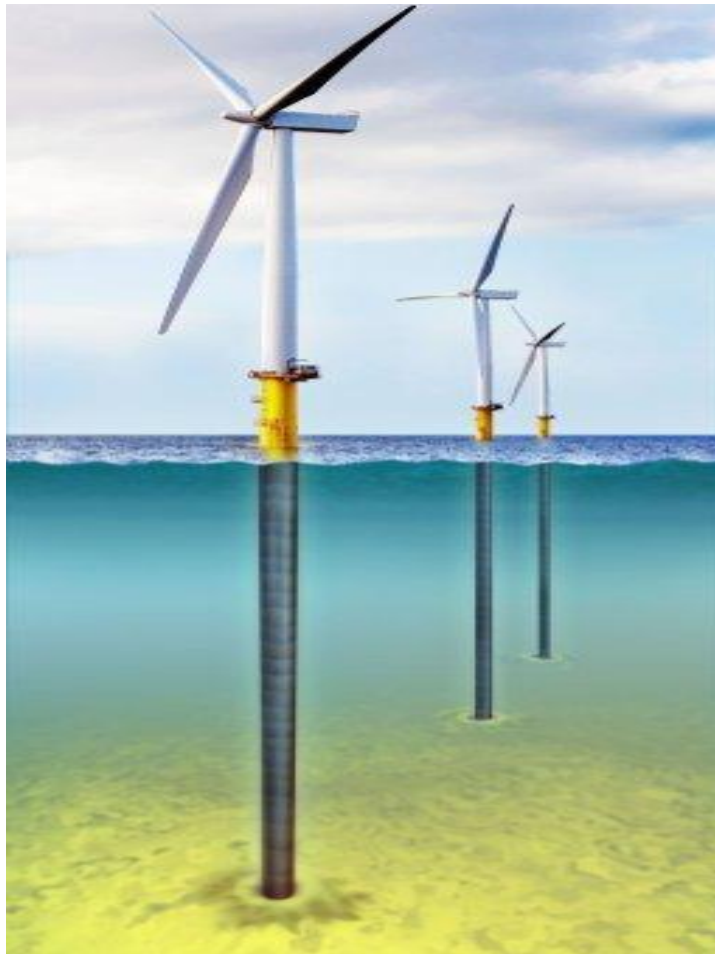


Εικόνα 2.5: Κατασκευές θεμελίωσης σε ρηχά νερά: από αριστερά προς δεξιά. Βαρύτητας, Μονοπάσσαλος, Απορρόφησης. [5]

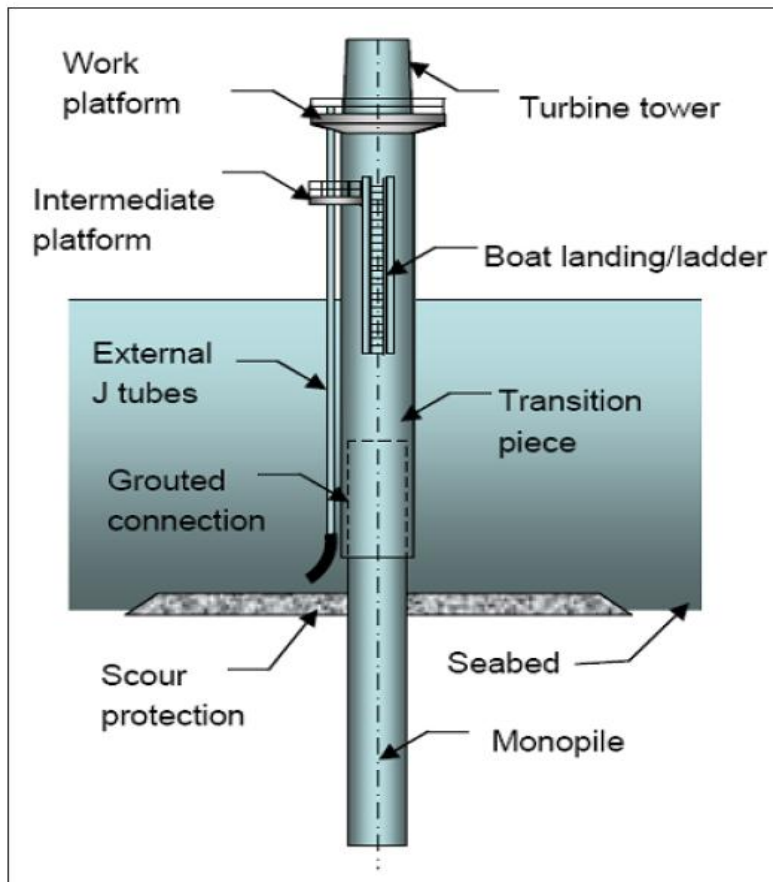
Μέχρι σήμερα, η θεμελίωση με ένα χαλύβδινο πάσσαλο (monopile) είναι η πιο συνήθης. Οι πάσσαλοι αυτοί συνήθως κατασκευάζονται από συγκολλημένο χάλυβα σε σωληνοειδή τμήματα, τα οποία οδηγούνται κάθετα στο βυθό και έχουν σκοπό να υποστηρίξουν το βάρος του πύργου και του στροβίλου. Για να γίνει η δομική σύνδεση μεταξύ του πασσάλου και του πύργου, εγκαθίσταται ένα κομμάτι μετάβασης (transition piece) πάνω ή μέσα στον πάσσαλο. Το κομμάτι αυτό υποστηρίζει επίσης εξωτερικές βοηθητικές μεταλλικές κατασκευές όπως οι J-



σωλήνες, κατασκευές για τις εκφορτώσεις σκαφών, την ενδιάμεση πλατφόρμα και την πλατφόρμα εργασίας. Τυπικά, το μεταβατικό τεμάχιο, που έχει μια μεγαλύτερη διάμετρο από τον πάσσαλο, έχει τοποθετηθεί πάνω αυτόν εξωτερικά και στερεώνεται σε αυτόν με κάποιο ένεμα για την παροχή προστασίας από τους κυματισμούς. Εναλλακτικά, ο πύργος μπορεί να βιδωθεί απευθείας σε μία φλάντζα στην κορυφή του πασσάλου.



Εικόνα 2.6: Τυπική απεικόνιση ανεμογεννητριών θεμελιωμένες σε μονοπασσάλους (monopiles). [19]



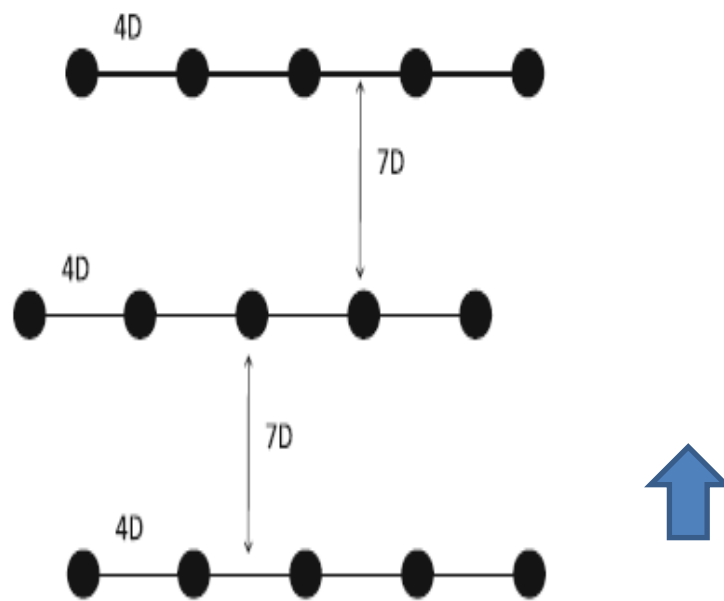
Εικόνα 2.7: Ενδεικτικός χαλύβδινος πάσσαλος για τη θεμελίωση ανεμογεννήτριας (monopile) με προστασία έναντι υποσκαφής (scour protection) και έναντι της κίνησης του νερού (grouted protection). [9]

2.2.3 ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΣΕ ΕΝΑ ΥΠΕΡΑΚΤΙΟ ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ

Η απόσταση μεταξύ γειτονικών ανεμογεννητριών βασίζεται συνήθως σε ένα πολλαπλάσιο της διαμέτρου D του ρότορα, με μία τυπική απόσταση από $5D$ έως $9D$ (CADDET 2000) ανάλογα και με τη διεύθυνση πρόσπτωσης του ανέμου. Η απαίτηση αυτή διαβεβαιώνει ότι το φορτίο κόπωσης που δημιουργείται λόγω της τύρβης του ανέμου από τις άλλες ανεμογεννήτριες ελαχιστοποιείται. Ωστόσο πρέπει να τονιστεί ότι μεγαλύτερες αποστάσεις θα είχαν επιβάρυνση στο μήκος των καλωδίων και γενικότερα αύξηση του κόστους κατασκευής.



Για την απόσταση μεταξύ των ανεμογεννητριών μέσα σε αιολικά πάρκα υπάρχουν αρκετές έρευνες. Σε μία από αυτές [7] η απόσταση μεταξύ τους χωρίζεται κατά διαστήματα συνήθως κάπου μεταξύ 5 και 9 φορές τη διάμετρο του ρότορα της γεννήτριας κατά την επικρατούσα κατεύθυνση του ανέμου, και μεταξύ 3 και 5 φορές τη διάμετρο του ρότορα κάθετα προς την επικρατούσα κατεύθυνση του ανέμου.

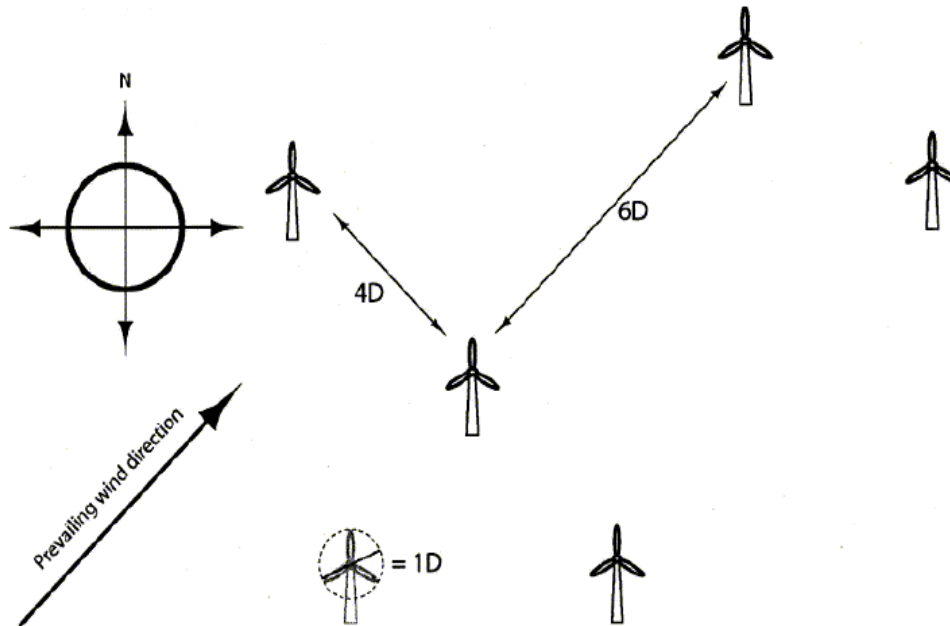


Εικόνα 2.8: Απόσταση μεταξύ των ανεμογεννητριών ενός αιολικού πάρκου, παράλληλα και κάθετα προς την επικρατούσα κατεύθυνση του ανέμου, όπου D η διάμετρος του ρότορα της ανεμογεννήτριας. [7]

Σε άλλο παράδειγμα οι ανεμογεννήτριες τοποθετούνται έτσι ώστε οι αποστάσεις μεταξύ τους είναι μεταξύ 3-10 διαμέτρους (περίπου 180 έως 600 μέτρα για ένα αιολικό πάρκο, χρησιμοποιώντας διαμέτρους 60m, τουρμπίνες αιολικής ενέργειας 1.3MW). Ανάλογα με τις ιδιαίτερες συνθήκες της περιοχής, η απόσταση αυτή αποτελεί ένα συμβιβασμό μεταξύ του συμπαγούς, η οποία ελαχιστοποιεί το κόστος κεφαλαίου, και την ανάγκη για επαρκή διαχωρισμό για να μειώσει την απώλεια ενέργειας από τον άνεμο λόγω του φαινομένου σκίασης από τα ανάντη μηχανήματα. Συχνά η απαιτούμενη απόσταση εξαρτάται από την κατεύθυνση του ανέμου που επικρατεί στην περιοχή. Η απόσταση 4-6 διαμέτρους κρίνεται ικανοποιητική.



Figure 3
Example turbine spacing in a wind farm with a South Westerly prevailing wind direction



Εικόνα 2.9: Απόσταση μεταξύ των ανεμογεννητριών ενός αιολικού πάρκου, παράλληλα και κάθετα προς την επικρατούσα κατεύθυνση του ανέμου, όπου D η διάμετρος του ρότορα της ανεμογεννήτριας.

2.2.4 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Οι κύριες περιβαλλοντικές συνθήκες για τις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες οι οποίες προκαλούν τα φορτία στις εγκαταστάσεις ανεμογεννητριών ανοικτής θάλασσας είναι κυρίως:

- Άνεμοι
- Κύματα
- Ρεύματα
- Ο θαλάσσιος πάγος
- Ο σεισμός

Άλλα φαινόμενα τα οποία μπορεί να είναι σημαντικά είναι, οι παλίρροιες, οι σεισμοί, το έδαφος, η θερμοκρασία, η ρύπανση και πιθανώς η σύγκρουση με πλοίο. Οι εξωτερικές συνθήκες υποδιαιρούνται σε κανονικές και ακραίες. Ακραίες εξωτερικές συνθήκες είναι γεγονότα με πιθανότητα υπέρβασης μία φορά σε 50 χρόνια. Σε πολλές περιπτώσεις, είναι δύσκολο να συνειδητοποιήσουμε τις



μετρήσεις όλων των σχετικών περιβαλλοντικών παραμέτρων κατά την ίδια στιγμή και να συσχετιστούν μεταξύ τους.

2.2.4.1 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΑΝΕΜΟΥ

Οι συνθήκες ανέμου είναι η κύρια εξωτερική απειλή για τη δομική ακεραιότητα των ανεμογεννητριών της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας (ρότορας και άτρακτος), αν και οι θαλάσσιες συνθήκες μπορούν επίσης να έχουν επίδραση ανάλογα με το δυναμικό και τις ιδιότητες της δομής στήριξης. Θα πρέπει να παρατηρήσουμε ότι οι ταχύτητες ανέμου στη θάλασσα είναι πολύ υψηλότερες από αυτές στην ξηρά. Αντίθετα η ένταση της τύρβης στη θάλασσα είναι χαμηλότερη από ότι στην ξηρά.

Οι βασικές παράμετροι που πρέπει να καθοριστούν για μία δεδομένη υπεράκτια περιοχή είναι:

- Η πυκνότητα του αέρα
- Η μέγιστη ταχύτητα του ανέμου με περίοδο επαναφοράς τα 50 έτη και το 1 έτος.
- Η μέση ταχύτητα του ανέμου (ετήσιος μέσος όρος) .
- Η κατανομή της ταχύτητα του ανέμου.
- Η κατανομή της διεύθυνσης του ανέμου.
- Η ένταση της τύρβης.
- Το προφίλ του ανέμου.

Είναι προτιμότερο να αναλύσουμε τις παραμέτρους της ταχύτητας του ανέμου, όπως είναι η ταχύτητα του ανέμου και η κατεύθυνσή του.

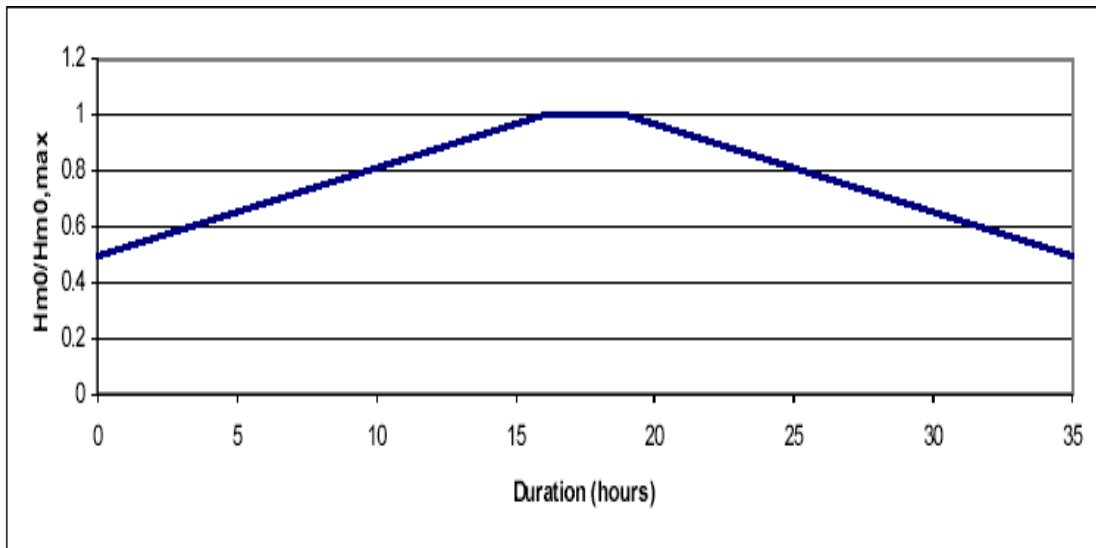
2.2.4.2 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ

Ο σχεδιασμός ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου και ειδικά της δομικής του στήριξης πρέπει να λαμβάνει υπόψη του τις περιβαλλοντικές συνθήκες, συμπεριλαμβανομένων των θαλάσσιων συνθηκών, οι οποίες είναι αντιπροσωπευτικές της συγκεκριμένης θέσης στην οποία η υπεράκτια αιολική γεννήτρια θα εγκατασταθεί. Η φυσική κατάσταση της θάλασσας είναι μια στοχαστική διαδικασία και μπορεί να περιγραφεί μόνο με τη χρήση στοχαστικών θεωριών. Μια πραγματική κατάσταση θάλασσας είναι μια σειρά από τυπικά 300-1000 μεμονωμένα κύματα.

Η κατάσταση της θάλασσας υποτίθεται ότι είναι μια Gaussian διαδικασία και μπορεί να περιγραφεί από την υπέρθεση ενός άπειρου αριθμού αρμονικών



κυμάτων με ένα διαφορετικό ύψος, περίοδο, διεύθυνση και τυχαία φάση. Η βασική ποσότητα που χαρακτηρίζει τη σοβαρότητα της κατάστασης της θάλασσας είναι το σημαντικό ύψος κύματος.



Εικόνα 2.10: Υποθετική μεταβολή του σημαντικού ύψους κύματος κατά τη διάρκεια μιας καταιγίδας. [9]

Στην περίπτωση των ανεμογενών κυμάτων, ο άνεμος πνέει πάνω από τη θάλασσα και δημιουργεί κύματα με μια ταχύτητα φάσης μικρότερη ή ίση (πλήρως ανεπτυγμένη στη θάλασσα) από την ταχύτητα του ανέμου. Οι αποθάλασσες (swell) είναι κύματα τα οποία παράγονται σε μια διαφορετική περιοχή, ταξιδεύουν περαιτέρω έχοντας μια διαφορετική φάση. Η κατάσταση θάλασσας μπορεί να περιγραφεί στο πεδίο συχνοτήτων από μία φασματική συνάρτηση πυκνότητας, με βάση το φασματικό ύψος κύματος (συνήθως χρησιμοποιείται το σημαντικό ύψος κύματος) και η περίοδος αιχμής, ενώ η εξάπλωση κατεύθυνσης γύρω από τη μέση κατεύθυνση από μια συχνότητα εξάπλωσης

Οι κύριες παράμετροι για να περιγραφεί μια κατάσταση θάλασσας είναι οι εξής:

- Σημαντικό ύψος κύματος, H_s
- Μέγιστη φασματική περίοδος αιχμής, T_p
- Η φασματική σύνθεση της κατάστασης θάλασσας
- Η μέση κατεύθυνση του κύματος

Για την περιγραφή ενός ντετερμινιστικού (ακραίου) ύψους κυματισμού είναι απαραίτητη και η περίοδος. Για όλες τις περιπτώσεις, είναι απαραίτητες



πληροφορίες για το βάθος του νερού και της τοπογραφίας του βυθού της θάλασσας όπως η κλίση και η μορφολογία.

Θα πρέπει να υπενθυμίσουμε ότι συνήθως η θάλασσα περιγράφεται ανά 3 ώρες ή μία ώρα χρονικά διαστήματα, με την εκτέλεση των μετρήσεων περίπου 20 λεπτά και υποθέτοντας στασιμότητα κατά το χρονικό διάστημα της περιόδου. Παράμετροι που απαιτούνται για τον καθορισμό του φάσματος ενός κύματος είναι το σημαντικό ύψος κύματος και η συχνότητα ή η περίοδός του.

2.2.4.3 ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΠΥΘΜΕΝΑ

Σταδιακές ή παροδικές αλλαγές του πυθμένα της θάλασσας πρέπει να ληφθεί υπόψη. Οι κυριότερες αλλαγές είναι:

- η σταθερότητα του θαλάσσιου βυθού: Λόγω της μορφολογίας και της διαμόρφωσής του εδάφους, η πιθανότητα αστοχίας των θαλάσσιων πρανών, καθώς και φαινόμενα διάβρωσης πρέπει να ληφθούν υπόψη.
- Το φαινόμενο της υποσκαφής (scour) είναι η αλλαγή της μορφολογίας του θαλάσσιου βυθού από τα ρεύματα και τα κύματα. Τέτοια διάβρωση μπορεί να οφείλεται σε μια φυσική γεωλογική διεργασία ή μπορεί να προκληθεί από δομικά στοιχεία τα οποία διακόπτουν το καθεστώς φυσικής ροής του νερού λόγω των ρευμάτων και των κυμάτων.

2.2.4.4 ΣΕΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΜΕ ΑΚΡΑΙΑ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ

Σε γενικές γραμμές υποτίθεται ότι η υπεράκτια ανεμογεννήτρια πρέπει να αντέξει τυχαία επίδραση, δηλαδή το ακραίο σενάριο της σύγκρουσης με εμπορικά ή άλλου είδους πλοία που δεν είναι σε θέση για ελιγμούς. Το πιο σημαντικό όμως μέγεθος, ειδικά σε περιοχές με έντονη σεισμική δραστηριότητα όπως η Ελλάδα, είναι άμεσα η αντοχή σε σεισμικά φορτία και δευτερευόντως η αντιμετώπιση των συνεπειών ενός σεισμικού συμβάντος, όπως υποθαλάσσιες κατολισθήσεις, πτώση αντικειμένων, τσουνάμι κα. [4]

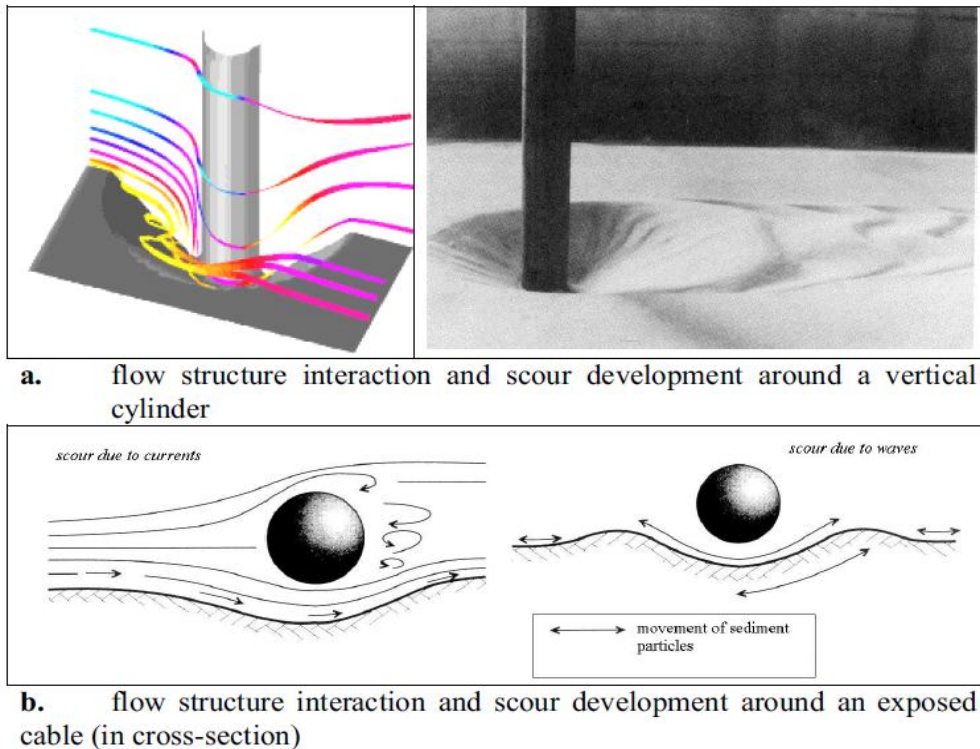


2.2.4.5 ΣΤΑΘΜΗ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΑΣ

Η ανύψωση της στάθμης της θάλασσας παίζει σημαντικό ρόλο στο υπολογισμό του φορτίου κόπωσης των ανεμογεννητριών και ιδιαίτερα σε ακραία φαινόμενα. Η μέση στάθμη του νερού και η διακύμανσή του επηρεάζεται κυρίως από τις παλίρροιες και από κύματα θύελλας. Ως στάθμη χρησιμοποιείται η μέση στάθμη της θάλασσας (MSL), προσθέτοντας σε αυτή την στάθμη του νερού λόγω αστρονομικής παλίρροιας και την εποχική διακύμανση.

2.2.5 ΥΠΟΣΚΑΦΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΘΕΜΕΛΙΩΜΕΝΗΣ ΣΤΟΝ ΠΥΘΜΕΝΑ (SCOURING)

Η μεταβολή των ρευμάτων γύρω από τις κατασκευές που θεμελιώνονται στον πυθμένα των θαλασσών, έχει ως αποτέλεσμα τη διάβρωση του βυθού κυρίως γύρω από αυτές. Λόγω αυτής της διαδικασίας το χώμα που υποστηρίζει το θεμέλιο υποσκάπτεται. Το μέγεθος της υποσκαφής είναι συνήθως ανεξάρτητο από το μέγεθος της κατασκευής. [11]



Εικόνα 2.11: Σχηματική εικόνα του φαινομένου της υποσκαφής γύρω από κατασκευές. [12]



Κατασκευές που είναι τοποθετημένες στο θαλάσσιο περιβάλλον έχουν την τάση να αλλάζουν το τοπικές παράκτιες διεργασίες. Μία τοπική αλλαγή στη ροή ή και στο καθεστώς των κυματισμών που δημιουργείται από ένα εμπόδιο, μπορεί να οδηγήσει στην αύξηση της έντασης της τύρβης της ροής. Η εγκατάσταση σε μια περιοχή με έντονη κίνηση ιζήματος μπορεί να την επηρεάσει διακόπτοντας ή ενισχύοντας την κίνηση αυτή. Η εικόνα δείχνει σχηματικά το φαινόμενο της υποσκαφής γύρω από ένα κατακόρυφο κύλινδρο.

Ο σχεδιασμός πρέπει να είναι τέτοιος ώστε να λάβει μέτρα έναντι του φαινομένου της υποσκαφής και να ελαχιστοποιήσει την πιθανότητα αστοχίας εξαιτίας αυτού. Η ανάπτυξη της υποσκαφής στον πυθμένα επηρεάζεται από:

- Τη γεωμετρία της κατασκευής: διαστάσεις, σχήμα και απόσταση πασσάλων μεταξύ τους
- Τα χαρακτηριστικά του ιζήματος: σχήμα, μέγεθος κόκκου και πυκνότητα ιζήματος
- Τις παράκτιες διεργασίες: ροή παλίρροιας, ρεύματα, καθεστώς κυματισμών και βάθος νερού

Πολλές έρευνες έχουν διεξαχθεί σε πειραματικό επίπεδο μελετώντας το βάθος της υποσκαφής γύρω από τη βάση ενός κυλίνδρου και σε σχέση με τη διάμετρο του D οδηγώντας σε εμπειρικές σχέσεις. Από αυτές φαίνεται ότι η επίδραση αυτού του φαινομένου φτάνει σε απόσταση $6D$ με $10D$, ενώ σε μεγαλύτερες αποστάσεις η επιρροή του γίνεται απίθανη. [12]



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

3.1 ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ

Ο κύριος περιορισμός της γραμμικής θεωρίας εγείρεται από τη θεμελιώδη υπόθεση στην οποία βασίζεται η όλη ανάπτυξη της γραμμικής θεώρησης, ότι δηλαδή το πλάτος του κυματισμού a θεωρείται μικρό σε σχέση με το μήκος κύματος L και το βάθος του πυθμένα d . Τέτοιες περιπτώσεις εμφανίζονται πολύ συχνά στην φύση (π.χ. κυματισμοί μεγάλου ύψους σε σχέση με το μήκος τους, ή κυματισμοί που διαδίδονται πάνω από ρηχές περιοχές, ή θραύονται κ.λπ.).

Οι θεμελιώδεις υποθέσεις που γίνονται για τη μελέτη των θαλάσσιων επιφανειακών κυματισμών είναι:

- 1) Το θαλασσινό νερό θεωρείται τέλειο και συνεχές ρευστό.
- 2) Το θαλασσινό νερό θεωρείται ασυμπίεστο ρευστό.
- 3) Η ροή του θαλασσινού νερού θεωρείται αστρόβιλη.
- 4) Ο πυθμένας της θάλασσας είναι αδιαπέρατος και το βάθος του d είναι σταθερό (δηλαδή η μελέτη του κυματικού προβλήματος γίνεται πάνω από έναν οριζόντιο πυθμένα, που εκτείνεται σε χώρο δίχως όρια).
- 5) Η κυματική περίοδος T παραμένει σταθερή.
- 6) Η διάδοση των κυματισμών γίνεται σε δύο διαστάσεις. Αυτό σημαίνει ότι το ύψος κύματος H παραμένει σταθερό και το μέτωπο του κυματισμού είναι κάθετο στην κατεύθυνση διάδοσής του (κυματισμοί μεγάλου μετώπου σε σχέση με το μήκος τους).
- 7) Το ύψος κύματος H είναι μικρό σε σχέση με το μήκος κύματος L ($H/L \ll 1$) και το βάθος πυθμένα d ($H/d \ll 1$).

Για τη μαθηματική περιγραφή των κινηματικών συνοριακών συνθηκών απαιτούνται καταρχήν οι εξισώσεις που περιγράφουν την ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας και την επιφάνεια του πυθμένα που, στην περίπτωση αυτή, απαρτίζουν τα δύο όρια (σύνορα) του ρευστομηχανικού προβλήματος. Η κινηματική συνθήκη ελεύθερης επιφάνειας αποτελεί την πρώτη συνθήκη και σημαίνει ότι για έναν παρατηρητή κινούμενο μαζί με την επιφάνεια, η επιφάνεια δεν αλλάζει. Η δεύτερη κινηματική συνθήκη είναι αυτή του πυθμένα που ορίζει ότι ο πυθμένας είναι αδιαπέρατος. Εκτός από τη μελέτη της κινηματικής κατάστασης στα σύνορα του πεδίου ροής (πυθμένας και ελεύθερη επιφάνεια), μας ενδιαφέρει ιδιαίτερα και η διερεύνηση της δυναμικής κατάστασης στα σύνορα αυτά, δηλαδή η τοπική συμπεριφορά των δυνάμεων και πιέσεων. Έτσι, ενώ οι αμετάβλητες ως προς t επιφάνειες (πυθμένας) μπορούν να αντέξουν τις μεταβολές πίεσης, δεν συμβαίνει το ίδιο και για τις



ελεύθερες επιφάνειες (διεπιφάνεια αέρα-νερού), καθόσον αυτές δεν χαρακτηρίζονται από την ίδια συνεκτικότητα, με αποτέλεσμα κάθε μεταβολή της πίεσης να προκαλεί αντίδραση της ελεύθερης επιφάνειας έτσι ώστε να διατηρηθεί ομοιόμορφη πίεση πάνω στην επιφάνεια και μάλιστα ίση με την ατμοσφαιρική. Αυτό αποτελεί την δυναμική συνθήκη της ελεύθερης επιφάνειας.

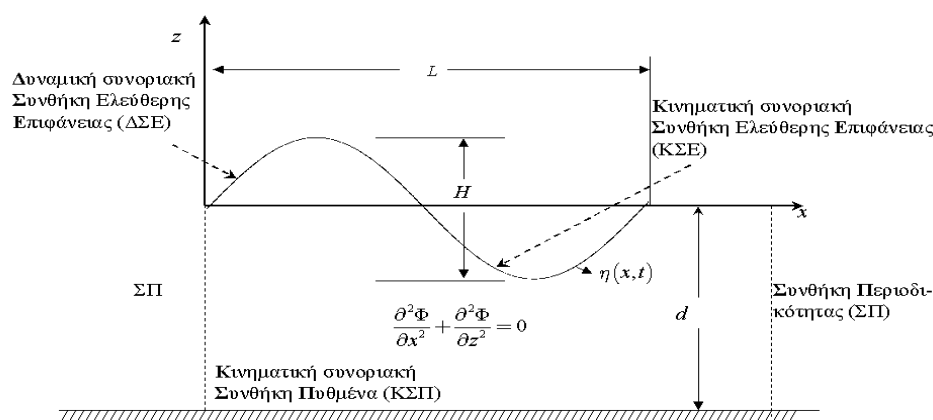
Η τέταρτη και τελευταία οριακή συνθήκη είναι η περιοδικότητα στον χρόνο και το χώρο. Θεωρώντας σε σταθερό βάθος d ένα κυματισμό με σταθερό μήκος L και περίοδο T , τότε και η ταχύτητα του κύματος παραμένει σταθερή σύμφωνα με την εξίσωση $C = L T$. Αυτό σημαίνει ότι τα σημεία του πεδίου ροής τα οποία απέχουν απόσταση L μεταξύ τους συμπεριφέρονται ρευστομηχανικά με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, δηλαδή:

$$\Phi(x, t) = \Phi(x + L, t)$$

Επίσης, σημαίνει ότι η ρευστομηχανική κατάσταση σε ένα σημείο του πεδίου ροής μια χρονική στιγμή t είναι ακριβώς η ίδια με αυτή μετά την παρέλευση χρόνου T , δηλαδή:

$$\Phi(x, t) = \Phi(x, t + T)$$

Πρέπει να παρατηρήσουμε ότι η συζευγμένη οριακή συνθήκη ελεύθερης επιφάνειας είναι μη γραμμική διότι περιλαμβάνει την κινηματική συνθήκη ελεύθερης επιφάνειας και τη δυναμική συνθήκη ελεύθερης επιφάνειας. Η επιφάνεια που πρέπει να ικανοποιηθούν είναι άγνωστες και πρέπει να προκύψει από την επίλυση του προβλήματος, το οποίο δεν επιδέχεται κλειστή λύση, είναι μη γραμμικό. Η επίλυση θα γίνει με προσεγγιστικές μεθόδους για την γραμμικοποίηση των συνθηκών στην ελεύθερη επιφάνεια.



Εικόνα 3.1: Διατύπωση του προβλήματος συνοριακών τιμών για επιφανειακούς κυματισμούς μικρού πλάτους



Η διατύπωση των συνοριακών συνθηκών ανάγει το ρευστομηχανικό πρόβλημα σε ένα πρόβλημα συνοριακών τιμών (boundary value problem). Η δομή ενός τέτοιου προβλήματος περιλαμβάνει γενικά δύο βήματα:

- τον καθορισμό του προς μελέτη πεδίου ροής και
- την διατύπωση της βασικής διαφορικής εξίσωσης (ή των βασικών διαφορικών εξισώσεων) η οποία πρέπει α) να ικανοποιείται από το ρευστό μέσα στο πεδίο ροής και β) να ικανοποιεί τις συνοριακές συνθήκες.

3.2 ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ

3.2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Για τη συμπερίληψη των μη-γραμμικών όρων της δυναμικής και κινηματικής συνθήκης επιφανείας και για την περιγραφή των κυματισμών στα ρηχά νερά όπου το πλάτος του κύματος είναι συγκρίσιμο σε σχέση με το βάθος του νερού έχουν αναπτυχθεί διάφορες θεωρίες. Οι πιο σημαντικές είναι οι θεωρίες Stokes ανώτερης τάξης (κυρίως δεύτερης, τρίτης και πέμπτης τάξης), η θεωρία κυματισμών ελλειπτικού συνημιτόνου (cnoidal waves), η θεωρία μοναχικού κύματος (solitary wave) και η πιο πρόσφατη θεωρία της ροϊκής συνάρτησης (stream function). Οι μη-γραμμικές θεωρίες περιγράφουν καλύτερα από τη γραμμική θεωρία το μη συμμετρικό προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας κατά την οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση.

Οι θεωρίες Stokes ανώτερης τάξης αναπτύχθηκαν και εφαρμόζονταν κυρίως σε σχέση με τις κατασκευές στην ανοιχτή θάλασσα. Η γραμμική θεωρία συμπίπτει με τη θεωρία Stokes πρώτης τάξης. Η θεωρία κυματισμών ελλειπτικού συνημιτόνου εφαρμόζεται για την περιγραφή της διάδοσης κυματισμών πεπερασμένου πλάτους στα ρηχά νερά και η θεωρία μοναχικού κύματος για την περιγραφή της διάδοσης σεισμογενών κυματισμών (μοναχικών παλμών που προκαλούνται από μετατοπίσεις ορίων ακτής ή πυθμένα) και τη θραύση των κυματισμών στις ακτές.

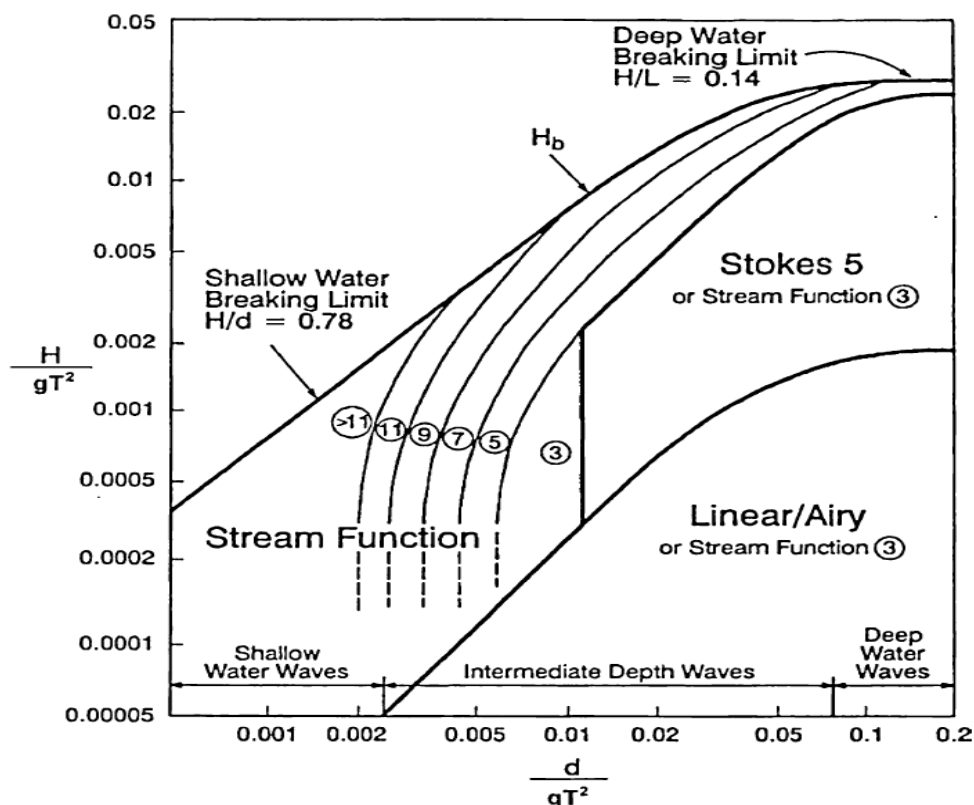
Μαθηματικά ομοιώματα που χρησιμοποιούνται γενικά είναι:

- Ολοκληρωμένα ως προς την περίοδο του κύματος (phase averaged models), SWAN, WAM, NWW III.
- Μη ολοκληρωμένα ως προς την περίοδο του κύματος (phase resolving models), Boussinesq, Elliptical mild slope (EMS) equation models.

Πάρα πολλές θεωρίες έχουν αναπτυχθεί για να προβλέψουν την κινηματική των δύο διαστάσεων των κυμάτων. Οι διάφορες θεωρίες παρέχουν κατά προσέγγιση



λύσεις για τις ίδιες διαφορικές εξισώσεις με κατάλληλες οριακές συνθήκες. Οι θεωρίες διαφέρουν στη λειτουργική διαμόρφωσή τους και το βαθμό στον οποίο αυτές ικανοποιούν τις μη γραμμικές κινηματικές και δυναμικές συνοριακές συνθήκες στην επιφάνεια του κύματος. Η Εικόνα 1.18 παρέχει οδηγίες σχετικά με την επιλογή των κατάλληλων θεωριών κυμάτων.



Εικόνα 1.18: Εφαρμοσιμότητα των κυματικών μοντέλων ανάλογα του βάθους της θάλασσας και του μήκους κύματος . [20]

3.2.2 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ BOUSSINESQ

Η προσομοίωση της διάδοσης των κυματισμών και η ακριβής περιγραφή των μετασχηματισμών που υφίστανται στις παράκτιες περιοχές είναι απαραίτητη σε σχέση με τον σχεδιασμό των θαλάσσιων κατασκευών καθώς και με την πρόβλεψη της εξέλιξης του προφίλ της ακτογραμμής και του πυθμένα. Τα τελευταία χρόνια έχει παρουσιαστεί ένας μεγάλος αριθμός ομοιωμάτων διάδοσης κυματισμών που βασίζονται στην επίλυση των διαφορικών εξισώσεων τύπου Boussinesq. Οι εξισώσεις Boussinesq προκύπτουν από την ολοκλήρωση των εξισώσεων Euler



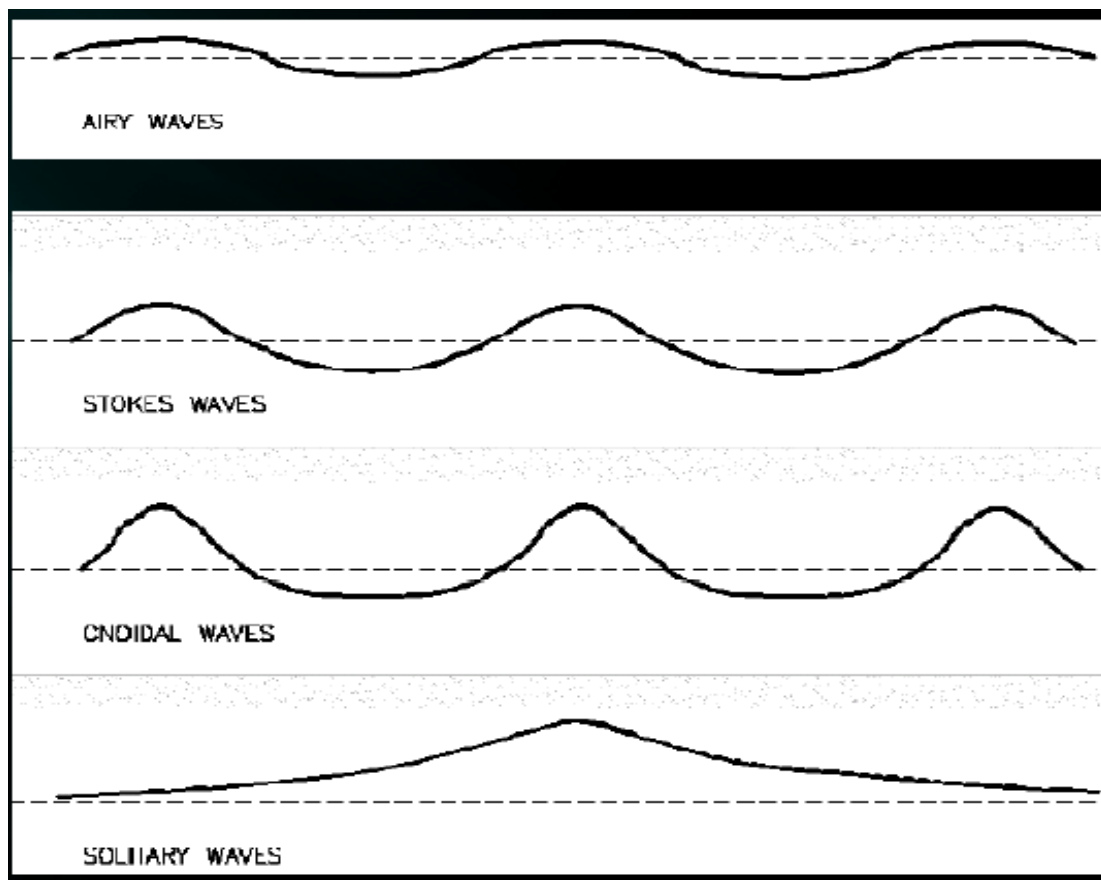
(ορμής) στο βάθος ροής με την παραδοχή σχετικά μακρών κυματισμών. Οι εξαρτημένες μεταβλητές που υπεισέρχονται στις εξισώσεις αυτές είναι η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας και η οριζόντια ταχύτητα του ρευστού, υπό μορφή μερικών παραγώγων διαφόρων τάξεων. Με τη χρήση των παραπάνω ομοιωμάτων είναι δυνατή η προσομοίωση της διάδοσης μη γραμμικών κυματισμών διασποράς στα ρηχά νερά και η περιγραφή των κυματικών φαινομένων της παράκτιας ζώνης όπως της ρήχωσης, της διάθλασης, της ανάκλασης, της περίθλασης, καθώς επίσης της θραύσης και της αναρρίχησης στην ακτή.

Η ανάλυση των κυματισμών διασποράς χαρακτηρίζεται από δύο σημαντικές παραμέτρους κλίμακας. Η πρώτη είναι η παράμετρος ϵ που εκφράζει τη διασπορά εύρους (amplitude dispersion) και κατ' επέκταση τη μη γραμμικότητα (non-linearity) και ορίζεται σαν ο λόγος του ύψους κύματος προς το βάθος $\epsilon = H / d$, ενώ η δεύτερη είναι το τετράγωνο του λόγου του βάθους προς ένα χαρακτηριστικό οριζόντιο μήκος (λαμβάνεται συνήθως ίσο με το μήκος κύματος) $\sigma^2 = (d / L)^2$ και εκφράζει τη διασπορά συχνοτήτων (frequency dispersion) (Karambas 1999). Λόγω της μαθηματικής τους διατύπωσης οι πρωταρχικές μορφές των εξισώσεων Boussinesq αναφέρονται σε κυματισμούς ελαφρά μη γραμμικούς (weakly nonlinear) και με ελαφρά διασπορά συχνοτήτων (weak dispersion).

Πρέπει να τονιστεί ότι η μορφή των εξισώσεων Boussinesq δεν είναι συγκεκριμένη, αντιθέτως στη σχετική βιβλιογραφία απαντώνται διαφορετικές εκδοχές των εξισώσεων, οι οποίες συνιστούν το αποτέλεσμα μιας μακρόχρονης εξελικτικής διαδικασίας.

Η συνέπεια της εφαρμογής των ομοιωμάτων Boussinesq στη ζώνη θραύσης είναι προβληματική. Στην περιοχή αυτή η μη γραμμικότητα γίνεται σημαντική ($\epsilon \rightarrow O(1)$) ενώ οι όροι διασποράς τείνουν να απαλειφθούν ($\sigma^2 \rightarrow 0$). Συνεπώς σε αυτό το όριο το ομοίωμα Boussinesq προσεγγίζει τις συνήθεις μη γραμμικές εξισώσεις των κυματισμών στα ρηχά νερά. Οι εξισώσεις αυτές περιγράφουν την αναρρίχηση και τη θραύση οποιασδήποτε αρχικής μορφής κύματος και για το λόγο αυτό δεν επιτρέπουν τη μοντελοποίηση σε αρκετά σημαντική απόσταση μη θραυόμενων κυματισμών. Με τις εξισώσεις των ρηχών νερών είναι δυνατόν να προσομοιωθεί με επιτυχία η σκέδαση των κυμάτων στη ζώνη θραύσης και η αναρρίχηση τους στην ακτή.

Ο περιορισμός του βάθους έχει πρακτικά αρθεί για τις εξισώσεις Boussinesq όμως προκύπτουν πρακτικά προβλήματα για την εφαρμογή τους, όπως η σταθερότητα και η ακρίβεια των αριθμητικών σχημάτων επίλυσης. Τα προβλήματα αυτά οφείλονται στο σημαντικό αριθμό όρων παραγώγων ανώτερης τάξης και της ιδιαίτερης πολυπλοκότητας των μερικών διαφορικών εξισώσεων που προκύπτουν.



Εικόνα 3.2: Αναλυτικές μέθοδοι από πάνω προς τα κάτω: Γραμμική θεωρία (Airy/Stokes I), Θεωρίες Stokes ανώτερης τάξης (2^{ης}, 4^{ης}, 5^{ης}), Ελλειπτικού συνημιτόνου (cnoidal) και μοναχικό κύμα (solitary).

Στο ερώτημα “ποια θεώρηση πρέπει να χρησιμοποιείται κάθε φορά”, η απάντηση δεν είναι μονοδιάστατη. Ένα κριτήριο επιλογής θα μπορούσε να βασίζεται π.χ., στο ποιά θεώρηση ικανοποιεί με το βέλτιστο τρόπο τις συνοριακές συνθήκες ελεύθερης επιφάνειας για το συνδυασμό των H , T , d που ενδιαφέρει στο συγκεκριμένο πρόβλημα. Ένα άλλο ισχυρό κριτήριο είναι ο βαθμός συμφωνίας των αποτελεσμάτων μιας θεώρησης με πειραματικά αποτελέσματα.

Το φυσικό σύστημα μπορεί να χαρακτηριστεί από το μέσο βάθος d , το τυπικό μήκος κύματος λ και το τυπικό πλάτος κύματος α . Η παρουσία της μη-γραμμικότητας και της διασποράς μέσα στο σύστημα, μπορούν να παραμετροποιηθούν μέσω των λόγων ϵ και ω , αντίστοιχα, ως εξής:

$$\epsilon = \alpha / d, \omega = d / \lambda.$$



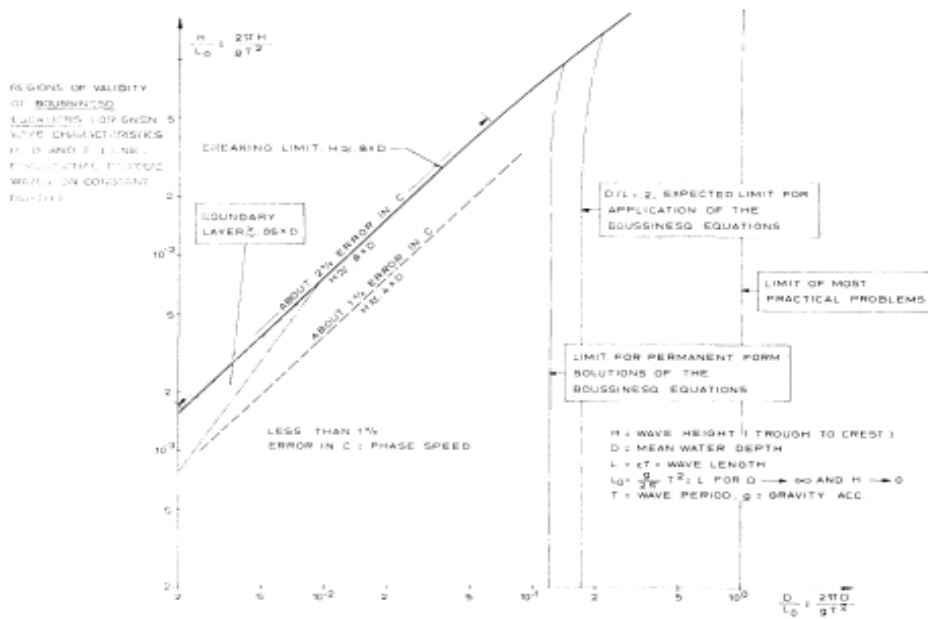
Η ορολογία του «μικρού» κύματος είναι κοινή πρακτική των μηχανικών. Στην κλασική υδροδυναμική, αυτό που εδώ ονομάζεται κύματα "ρηχών νερών" θεωρούνται ως τα κύματα των οποίων το μήκος είναι ακόμη μεγάλο σε σύγκριση με το βάθος του νερού στο οποίο διαδίδονται και που συνήθως εντάσσονται στο πλαίσιο των "μακρών κυμάτων". Οι διάφορες θεωρίες που κατασκευάστηκαν για να περιγράψουν τη συμπεριφορά αυτών των κυμάτων χαρακτηρίζονται γενικά από έναν αριθμό Ursell:

$$U_* = \frac{\zeta_* L_*^2}{h_*^3}$$

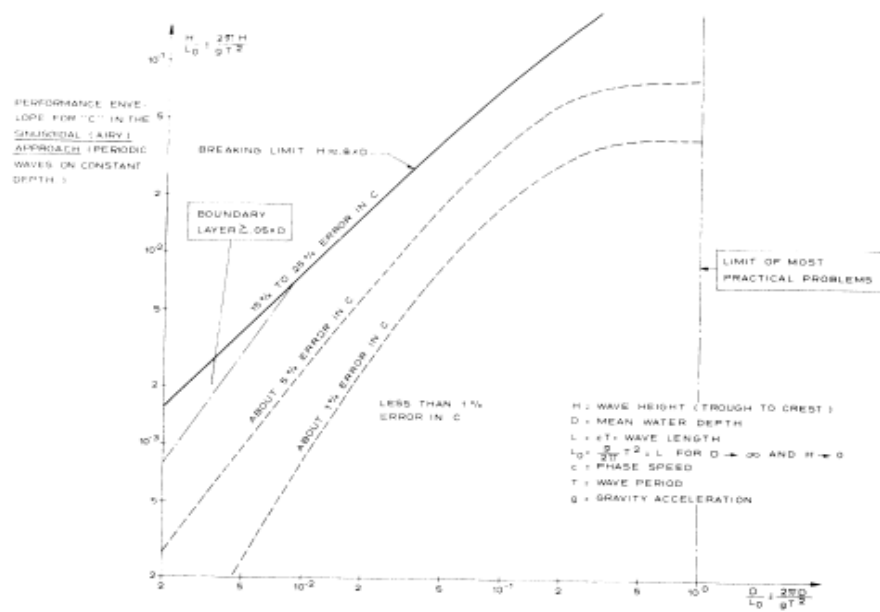
όπου ζ_* είναι ένα μέτρο του πλάτους του κύματος, το L_* είναι ένα χαρακτηριστικό οριζόντιο μήκος του προφίλ επιφάνειας και h_* είναι ένα μέτρο του βάθους του νερού [Ursell, 1953]. Η παλαιότερη σχετική θεωρία, του AIRY [1845], κάνει την υπόθεση ότι η κατανομή της πίεσης στον κατακόρυφο άξονα είναι υδροστατική. Τα προκύπτοντα κύματα είναι μη-διασποράς, ενώ τα κύματα πεπερασμένου πλάτους δεν μπορεί να μεταδοθούν χωρίς αλλαγή σχήματος. Η θεωρία, του AIRY αντιστοιχεί σε $U_* \gg 0(1)$. Η περίπτωση των $U_* \ll 0(1)$ καλύπτεται από την γραμμικοποιημένη θεωρία ρηχών νερών των Jeffreys και Jeffreys [1946], η οποία προϋποθέτει επίσης μια υδροστατική κατανομή της πίεσης.

Μεταξύ των θεωριών του AIRY και των Jeffreys και Jeffreys υπάρχει η θεωρία του BOUSSINESQ [1872, 1877]. Σε αυτήν την θεωρία η καμπυλότητα των γραμμών ροής στο κατακόρυφο επίπεδο περιγράφεται μέσω μίας κατακόρυφης ταχύτητας, το μέγεθος της οποίας αυξάνει γραμμικά από το μηδέν στον πυθμένα σε ένα μέγιστο στην ελεύθερη επιφάνεια. Σε αυτή τη θεωρία, κατά συνέπεια, η κατανομή της πίεσης δεν είναι πλέον υδροστατική, αλλά η κατακόρυφη συνιστώσα της κίνησης μπορεί να ενσωματωθεί από τις εξισώσεις της κίνησης για να μειωθεί η τρισδιάστατη περιγραφή σε ένα δισδιάστατο χώρο. Η αρχική θεωρία πραγματοποιήθηκε για την αστρόβιλη κίνηση ενός ασυμπιέστου, ομοιογενούς, ιδεατού ρευστού πάνω από ένα οριζόντιο πυθμένα, ενώ λήφθηκαν υπόψη μόνο λύσεις για κατευθυνόμενη διάδοση κυμάτων. Ο Ursell [1953] έδειξε ότι η θεωρία BOUSSINESQ περιελάμβανε τη θεωρία του AIRY και των Jeffreys και Jeffreys ως ειδικές περιπτώσεις. Η θεωρία BOUSSINESQ μπορεί πράγματι να θεωρηθεί ως η πιο ομοιόμορφα έγκυρη βάση για τα θαλάσσια κύματα με πεπερασμένο πλάτος, όσο το h_*/L_* παραμένει μικρό και δεν συμβαίνει θραύση. [14]

Στα πλαίσια της θεωρίας κυματισμών Boussinesq απαιτείται $\epsilon \ll 1$ $\omega \ll 1$ και $Ur = O(1)$.



Εικόνα 3.3: Εύρος εφαρμογής των εξισώσεων Boussinesq. [14]



Εικόνα 3.4: Εύρος εφαρμογής της προσέγγισης με ημιτονοειδή κύματα. [14]



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΜΙΚΕ 21 BW

4.1 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΜΙΚΕ 21 BW

4.1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το φασματικό κυματικό μοντέλο SWAN δεν είναι επαρκές για να υπολογίσει με ακρίβεια τις τοπικές συνθήκες του κύματος σε ολόκληρη την περιοχή ενδιαφέροντος. Ως εκ τούτου, χρησιμοποιήθηκε ένα μη-γραμμικό κυματικό μοντέλο Boussinesq (δηλαδή το Mike 21 BW). Το κυματικό μοντέλο που διαθέτει το λογισμικό MIKE21 BW, χρησιμοποιήθηκε για την μοντελοποίηση της κυματικής διαταραχής μέσα και γύρω από τα λιμάνια, αλλά η χρήση του στην παράκτια ζώνη υπήρξε πιο περιορισμένη, εν μέρει λόγω των ορίων της υπολογιστικής ικανότητας και μνήμης των υπολογιστών στο παρελθόν. Ο παράγοντας αυτός έχει αλλάξει και το μοντέλο δοκιμάζεται τώρα για διάφορες εφαρμογές στην παράκτια ζώνη. Για την παραγωγή κυμάτων, το μοντέλο περιλαμβάνει μία εσωτερική γραμμή γένεσης κυμάτων που τροφοδοτείται από μια χρονολογική σειρά που παράγεται από ένα εξειδικευμένο εργαλείο για την παραγωγή τυχαίων κυμάτων (δείτε το εγχειρίδιο αναφοράς MIKE21). Ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό του μοντέλου είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα δισδιάστατο χώρο και μπορεί, κατ' αρχήν, να είναι σε θέση να καλύψει τις περίπλοκες και ανώμαλες βαθυμετρίες. [8]

Ένα από τα σημαντικά χαρακτηριστικά που κάνουν το μοντέλο ικανό να προσομοιώσει το συνθήκες στη ζώνη θραύσης είναι η συμπερίληψη του κύματος θραύσης. Στο MIKE21 BW το κύμα θραύσης αντιμετωπίζεται με τη χρήση της έννοιας του κυλίνδρου που αναπτύχθηκε από τους Deigaard (1989) και Schäffer et al. (1993). Ένας κυλινδρικός όγκος των επιμέρους κυμάτων προσδιορίζεται σε κάθε χρονικό βήμα, ως ο όγκος του νερού πάνω από μια γραμμή με μια δεδομένη κλίση. Η κλίση αυτή ορίζεται από ένα ξεχωριστό μοντέλο που ενσωματώνει την έναρξη της θραύσης και την σταδιακή φθορά και τον τερματισμό της γραμμής του κυλίνδρου διαχωρισμού. Η ταχύτητα του όγκου του κυλίνδρου τίθεται ίση με την τοπική ταχύτητα διάδοσης του κύματος η οποία προκύπτει από μία σειρά πρόσθετων όρων στις εξισώσεις ορμής. Για περισσότερες λεπτομέρειες δείτε Madsen et al. (1997). Η γωνία έναρξης και η γωνία λήξης της θραύσης είναι παράμετροι που προκύπτουν από βαθμονόμηση. [8]

Το MIKE 21 BW χρησιμοποιείται κυρίως για μοντελοποίηση της κυματικής διαταραχής εντός των λιμανιών, λαμβάνοντας υπόψη τα φαινόμενα της ρήχωσης, διάθλασης, περίθλασης και μερικής ανάκλασης των κυματισμών. Το μοντέλο Boussinesq υπολογίζει την εξέλιξη του πλήρως μη-γραμμικού κύματος σε ένα δισδιάστατο ψευδομοντέλο (μοντέλο 2-D).



Οι εξισώσεις Boussinesq είναι μια ελκυστική εναλλακτική για τις εξισώσεις NSW, καθώς ενσωματώνουν συχνότητες διασποράς και μπορεί να εφαρμοστούν σε ένα πολύ ευρύτερο φάσμα κύματος και ένα μεγαλύτερο μέρος της παράκτιας περιοχής (βλ Freilich και Guza, 1984, Elgar et al. 1990, και άλλοι). Σε αντίθεση με τις εξισώσεις NSW, οι εξισώσεις Boussinesq δεν οδηγούν αυτόματα στο σπάσιμο του κύματος σε ρηγά νερά, επειδή η συχνότητα διασποράς τείνει να εξισορροπήσει το πλάτος διασποράς και να σταθεροποιήσει τα προφίλ κύματος. Για το λόγο αυτό, η επέκταση των εξισώσεων αυτών να περιλαμβάνουν τη ζώνη θραύσης απαιτεί την εισαγωγή των κριτηρίων θραύσης του κύματος και των μηχανισμών διάχυσης.

Το αριθμητικό μοντέλο βασίζεται σε εξισώσεις δύο διαστάσεων τύπου Boussinesq χρησιμοποιώντας μια ροή-κατασκευάσμα με βελτιωμένα γραμμικά χαρακτηριστικά διασποράς. Το μοντέλο έχει επεκταθεί για να περιλάβει τη δυνατότητα θραύση κανονικών και μη κανονικών κυμάτων σε δύο οριζόντιες διαστάσεις και να λάβουν υπόψη μία κινούμενη ακτογραμμή που επιτρέπει τη μελέτη της ζώνης θραύσης (surf) και της ζώνης απόπλυσης (swash). Η ενσωμάτωση του κύματος θραύσης στο δισδιάστατο μοντέλο Boussinesq βασίζεται στην έννοια των κυλίνδρων επιφάνειας.

Η διαδικασία θραύσης μπορεί να χωριστεί σε πέντε μέρη:

- α) Η επίδραση του κυλίνδρου για την κίνηση των κυμάτων
- β) Η θέση του σημείου θραύσης
- γ) Ο γεωμετρικός προσδιορισμός του κυλίνδρου
- δ) Ο καθορισμός της ταχύτητας του κυλίνδρου
- ε) Η κινούμενη ακτογραμμή, η οποία αντιμετωπίζεται αριθμητικά με την αντικατάσταση της στερεάς παραλίας, με μία διαπερατή παραλία η οποία χαρακτηρίζεται από ένα εξαιρετικά μικρό πορώδες.

Το υπολογιστικό τμήμα επεκτείνεται τεχνητά με την αντικατάσταση της στερεάς παραλίας με μία διαπερατή παραλία η οποία χαρακτηρίζεται από πολύ μικρό πορώδες. Κοντά στην κινούμενη ακτή η επιφάνεια του νερού αλληλεπιδρά με το βυθό της θάλασσας και συνεχίζει μέσα στην πορώδη παραλία. Πρώτον, οι όροι Boussinesq απενεργοποιούνται στην ακτογραμμή, όπου η σχετική σημασία τους είναι εξαιρετικά μικρή έτσι κι αλλιώς. Ως εκ τούτου, σε αυτήν την περιοχή οι εξισώσεις απλοποιούνται στις μη γραμμικές εξισώσεις για ρηγά νερά. Δεύτερον, εισάγεται ένα φίλτρο κοντά στην ακτογραμμή για να αφαιρέσει τις αστάθειες των βραχέων κυμάτων κατά τη διάρκεια ανόδου και καθόδου του νερού και να διαχύσει την ενέργεια των κυμάτων στην περιοχή όπου η επιφάνεια του κυλίνδρου δεν μπορεί να επιλυθεί.

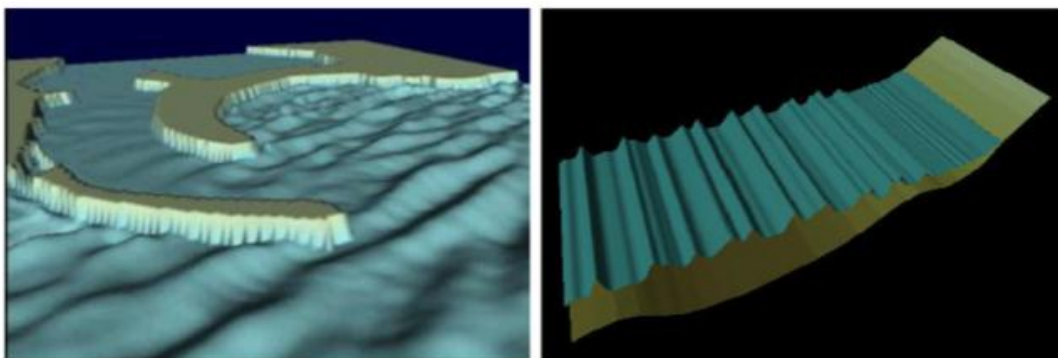
Οι εξισώσεις Boussinesq περιλαμβάνουν τη μη γραμμικότητα, καθώς και τη συχνότητας διασποράς. Βασικά, η συχνότητα διασποράς εισάγεται στις εξισώσεις ροής λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση που έχουν οι κατακόρυφες επιταχύνσεις (ή



η καμπυλότητα των γραμμών ροής) πάνω στην κατανομή της πίεσης. Ο απλούστερος τρόπος για να συμπεριληφθεί αυτή η επίδραση στις κατακόρυφα ολοκληρωμένες εξισώσεις ορμής είναι να οριστεί μια οριζόντια κατανομή της ταχύτητας που είναι ομοιόμορφη σε όλο το βάθος. Αυτό οδηγεί σε μια κατακόρυφη κατανομή της ταχύτητας η οποία αυξάνει γραμμικά από το μηδέν στον πυθμένα σε ένα μέγιστο στην ελεύθερη επιφάνεια. Ωστόσο, υπάρχουν και άλλες μέθοδοι διαθέσιμες για να προκύψουν οι εξισώσεις Boussinesq (Peregrine, 1967 1974, Svendsen 1974, McCowan 1985). Πρώτα από όλα, οι εξαρτημένες μεταβλητές μπορούν να επιλεγούν με διαφορετικούς τρόπους, και τυπικά οι μεταβλητές της ταχύτητας είναι η ταχύτητα της επιφάνειας, του πυθμένα, η μέση ταχύτητα σε σχέση με το βάθος και η ταχύτητα ολοκληρωμένη στο βάθος. Δεύτερον, δεδομένου ότι οι μη γραμμικοί όροι και οι όροι διασποράς είναι ανώτερης τάξης, μπορεί να ελεγχθούν μέσω της εξίσωσης μεγάλου μήκους κύματος.

4.1.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ MIKE 21 BW

Το αριθμητικό μοντέλο MIKE 21 BW, το οποίο αποτελεί ένα εμπορικό πακέτο που προσφέρεται από τη δανέζικη εταιρεία DHI με σημαντικές εφαρμογές στο σχεδιασμό τεχνικών έργων και επεμβάσεων στην παράκτια ζώνη, διακρίνεται σε δύο υπορουτίνες, οι οποίες χρησιμοποιούνται ανάλογα με το πεδίο μελέτης, το μονοδιάστατο μοντέλο MIKE 21 BW 1-DH και το δισδιάστατο μοντέλο MIKE 21 BW 2-DH. Η εφαρμογή τους στηρίζεται στην αριθμητική επίλυση των μετασχηματισμών της περιοχής του χρόνου των εξισώσεων Boussinesq. Οι εξισώσεις Boussinesq περιλαμβάνουν μη γραμμικά χαρακτηριστικά κυματισμών καθώς και διασπορά συχνοτήτων. Η διασπορά συχνοτήτων εισάγεται στις εξισώσεις ποσότητας κίνησης λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση των κατακόρυφων επιταχύνσεων στην κατανομή των πιέσεων.



Εικόνα 4.1: Αριθμητικό μοντέλο MIKE 21 BW 2-DH (αριστερά) και 1-DH (δεξιά). [10]



Οι δύο υπορουτίνες επιλύουν τις εξισώσεις Boussinesq χρησιμοποιώντας ένα σχήμα ροής με βελτιωμένα χαρακτηριστικά γραμμικής διασποράς. Η αναβαθμισμένη μορφή εξισώσεων Boussinesq (Madsen et al, 1991 και Madsen & Sorensen, 1992) επιτρέπουν στο μοντέλο να προσομοιώσει την κατευθυντική διάδοση μιας κυματοσειράς από τα βαθιά στα ρηχά νερά. Για την κλασσική μορφή εξισώσεων Boussinesq (Peregrine, 1967) ο μέγιστος λόγος βάθους d προς μήκος κύματος L_0 στα βαθιά έχει την τιμή $d / L_0 \approx 0,22$ (ή $kh \approx 1.4$, όπου kh είναι ο σχετικός κυματαριθμός). Ο λόγος αυτός για την περίπτωση των βελτιωμένων εξισώσεων Boussinesq παίρνει τιμή $d / L_0 \approx 0,50$ (ή $kh \approx 3,1$). Οι εξισώσεις του μοντέλου έχουν επεκταθεί ώστε να λαμβάνουν υπόψη τη θραύση του κυματισμού και τη μετατόπιση της ακτογραμμής, όπως περιγράφονται στους Madsen et al. (1997a,b) και Sorensen et al. (1998,2004). Επίσης, αναπαράγει το συνδυασμό των περισσότερων κυματικών φαινομένων της θαλάσσιας υδραυλικής και της Ακτομηχανικής όπως:

- Ρήγωση (Shoaling)
- Διάθλαση (Refraction)
- Περίθλαση (Diffraction)
- Θραύση κυματισμού (Wave breaking)
- Τριβή πυθμένα (Bottom friction)
- Μετακίνηση της ακτογραμμής (Moving shoreline)
- Μερική ανάκλαση (Partial reflection)
- Μερική μετάδοση (Partial transmission)
- Μη γραμμική αλληλεπίδραση κυματισμών (Non-linear wave interaction)
- Διασπορά συχνοτήτων (Frequency spreading)
- Κατευθυντική διασπορά (Directional spreading)

Επιπρόσθετα πρέπει να σημειωθεί ότι η διασπορά συχνοτήτων και κατευθύνσεων γίνεται με γραμμική υπέρθεση (linear superposition). Προβλήματα όπως η ομαδοποίηση κυματισμών (wave grouping), η δημιουργία δεσμευμένων χαμηλών και υψηλών συχνοτήτων (generation of bound sub-harmonics and super-harmonics) και οι αλληλεπιδράσεις τριάδων συντονισμού (near-resonant triad interactions) μπορούν να περιγραφούν επίσης από το μοντέλο, όπως επίσης και η γένεση και απελευθέρωση ταλαντώσεων μικρών συχνοτήτων (low frequency oscillations) λόγω μετασχηματισμού του αρχικού κύματος.

Η θραύση των κυμάτων τύπου κυλίσεως (spilling) βασίζεται στην υπόθεση του «επιφανειακού κυλίνδρου» (surface roller concept). Σύμφωνα με αυτή, ο επιφανειακός κύλινδρος αποτελείται από έναν όγκο νερού ο οποίος μεταφέρεται με το κύμα, έχοντας ταχύτητα ίση με την ταχύτητά του κύματος (Madsen et al., 1997). Η επίδρασή της στην κυματική δράση προσδιορίζεται με την εισαγωγή νέων όρων, ενώ ο υπολογισμός των επιφανειακών κυλίνδρων επιτυγχάνεται μέσα από



γεωμετρική προσέγγιση. Η προσομοίωση της μετακίνησης της ακτογραμμής επιτυγχάνεται από την ακόλουθη θεώρηση: το πεδίο υπολογισμού (κάναβος) επεκτείνεται τεχνητά στην ξηρά μέσω της προσθήκης πολύ μικρού πορώδους στην ακτογραμμή (porosity) με αποτέλεσμα η θαλάσσια επιφάνεια να εισχωρεί στο συγκεκριμένο τμήμα. Το αριθμητικό μοντέλο MIKE 21 BW 1-DH επιλύει τις βελτιωμένες εξισώσεις Boussinesq μέσω μιας κλασσικής μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων Galerkin με πεπλεγμένη παρεμβολή των μεταβλητών σε εναλλασσόμενο ή μη εναλλασσόμενο κάναβο.

Η δυναμική στη ζώνη θραύσης (surf zone) και η μεταβολή στη ζώνη απόπλυσης (swash zone) περιγράφονται από το συγκεκριμένο μοντέλο, όπως άλλωστε και τα περισσότερα συνδυαστικά φαινόμενα που περιγράφονται από το 2-DH μοντέλο. Η εμφάνιση υψηλότερης τάξης χωρικών μεταβλητών αντιμετωπίζεται με την εισαγωγή μιας επιπρόσθετης μεταβλητής και μιας επιπρόσθετης αλγεβρικής εξίσωσης. Οι μεταβολές της δυναμικής ζώνης θραύσης και της ζώνης διαβροχής προσομοιώνονται για οποιοδήποτε προφίλ ακτής μέσω αυτού του μοντέλου. Το μονοδιάστατο μοντέλο είναι ικανό να προσομοιώσει ικανοποιητικά όλα τα συνδυαστικά φαινόμενα της δισδιάστατης έκδοσης. Οι τελικές εξισώσεις χωρικών συντεταγμένων περιέχουν διαφορικά μόνο δεύτερης τάξης (Sørensen et al., 2004). [10]

Οι βασικές εξισώσεις οι οποίες επιλύονται στην 2-DH έκδοση εκφράζονται σε δύο διαστάσεις με τους όρους της ελεύθερης επιφάνειας (ξ) και τις ολοκληρωμένες στο βάθος συνιστώσες της ταχύτητας (P) και (Q). Αναλυτικά [10]:

Εξίσωση συνέχειας:

$$n \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0$$

Εξίσωση ποσότητας κίνησης κατά x:

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

$$+ n^2 P \left[\alpha + \beta \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{h} \right] + \frac{gP \sqrt{P^2 + Q^2}}{h^2 C^2} + n \Psi_1 = 0$$



Εξίσωση ποσότητας κίνησης κατά γ:

$$\begin{aligned} n \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\frac{Q^2}{h} \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left(\frac{PQ}{h} \right)}{\partial x} + \frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial x} + F_y n^2 gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \\ + n^2 P \left[\alpha + \beta \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{h} \right] + \frac{gQ \sqrt{P^2 + Q^2}}{h^2 C^2} + n \Psi_2 = 0 \end{aligned}$$

Όπου Ψ_1, Ψ_2 είναι οι όροι διασποράς των εξισώσεων και ορίζονται ως εξής:

$$\begin{aligned} \Psi_1 \equiv - \left(B + \frac{1}{3} \right) d^2 (P_{xxt} + Q_{xyt}) - nBgd^3 (\zeta_{xxx} + \zeta_{xyy}) - \\ - dd_x \left(\frac{1}{3} P_{xt} + \frac{1}{6} Q_{yt} + nBgd(2\zeta_{xx} + \zeta_{yy}) \right) - dd_y \left(\frac{1}{6} Q_{xt} + nBgd\zeta_{xy} \right) \end{aligned}$$

και

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

Οι δείκτες x,y και t δηλώνουν μερικά διαφορικά αναφορικά με το χώρο και το χρόνο αντίστοιχα. Αναλυτικά:

P : πυκνότητα ροής στη διεύθυνση x ($m^3/m/s$)

Q : πυκνότητα ροής στη διεύθυνση y ($m^3/m/s$)

B : συντελεστής διασποράς Boussinesq

t : ο χρόνος (s)

d : το βάθος της μέσης στάθμης της θάλασσας ΜΣΘ (m)

x, y : οι καρτεσιανές συντεταγμένες (m)

g : η επιτάχυνση βαρύτητας (m/s^2)

n : το πορώδες

C : ο συντελεστής τριβής Chezy ($m^{0,5}/s$)



α : ο συντελεστής αντίστασης για στρωτή ροή σε πορώδες μέσο

β : ο συντελεστής αντίστασης για τυρβώδη ροή σε πορώδες μέσο

F_x : όρος οριζόντιας τάσης στη διεύθυνση x

F_y : όρος οριζόντιας τάσης στη διεύθυνση y

Οι όροι οριζόντιας τάσης προσδιορίζονται από μια σχέση κλίσης της τάσης (gradient stress):

Η τιμή $B = 1/15$ δίνει την πλησιέστερη προσέγγιση στη σχέση γραμμικής διασποράς.

Οι κλασικές εξισώσεις Boussinesq ισχύουν στα ρηχά νερά. Το γεγονός αυτό θέτει σοβαρούς περιορισμούς σε πρακτικές εφαρμογές και για το λόγο αυτό έγιναν σοβαρές προσπάθειες ώστε να βελτιωθούν τα χαρακτηριστικά διασποράς στα βαθιά νερά.

$$F_x = - \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(v_t \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_t \left(\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial Q}{\partial x} \right) \right) \right]$$

$$F_y = - \left[\frac{\partial}{\partial y} \left(v_t \frac{\partial Q}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_t \left(\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial y} \right) \right) \right]$$

όπου v_t είναι η τυρβώδης συνεκτικότητα.

Οι όροι R_{xx} , R_{yy} και R_{xy} συμβολίζουν την επιπρόσθετη ορμή, η οποία προέρχεται από την ανομοιόμορφη κατανομή ταχυτήτων λόγω της παρουσίας του επιφανειακού κυλίνδρου και ορίζονται ως εξής:

$$R_{xx} = \frac{\delta}{1 - \delta/d} \left(c_x - \frac{P}{d} \right)^2$$

$$R_{xy} = \frac{\delta}{1 - \delta/d} \left(c_x - \frac{P}{d} \right) \left(c_y - \frac{Q}{d} \right)$$

$$R_{yy} = \frac{\delta}{1 - \delta/d} \left(c_y - \frac{Q}{d} \right)^2$$

όπου $\delta = \delta(t,x,y)$ είναι το πάχος του επιφανειακού κυλίνδρου και c_x και c_y είναι οι συνιστώσες της ταχύτητας φάσης του. Στο επόμενο σχήμα απεικονίζεται η κάθετη



διανομή της οριζόντιας συνιστώσας της ταχύτητας κατά τη θραύση όπως προτάθηκε από τους Madsen et al. (1997). Η αρχή της θραύσης επιτυγχάνεται όταν η κλίση της ελεύθερης επιφάνειας υπερβεί μια αρχική κρίσιμη τιμή, $\tan\phi_B$ όπως πρότεινε ο Deigaard (1989). Οι Schaffer et al. (1993), ύστερα από πολλές δοκιμές θραύσεων κυλίσεως σε ακτές με επίπεδη κλίση πυθμένα, κατέληξαν ότι προκύπτουν αποδεκτά αποτελέσματα χρησιμοποιώντας την τιμή $\phi_B=20^\circ$. Οι Madsen et al. (1997) απέδειξαν ότι αυτή η τιμή είναι κατάλληλη για θραύσεις αυτού του τύπου αλλά όχι και για θραύσεις εκτίναξης (plunging). Βασιζόμενοι στις μετρήσεις τους σημείωσαν ότι ο τύπος θραύσης εκτίναξης απαιτεί μία ελαφρά αύξηση στις γωνίες θραύσης ενώ η θραύση πάνω από ύφαλο τραπέζιο απαιτεί μείωση. Η επιλογή της παραμέτρου ϕ_B , είναι προφανώς στενά συνδεδεμένη με την τελικά ακρίβεια των υπολογισμών της ελεύθερης επιφάνειας πριν ξεκινήσει η θραύση και όπως σημειώνουν οι Madsen et al. (1997) αυτό είναι ένα από τα αδύναμα σημεία στα συμβατικά μοντέλα Boussinesq: καθώς αυτά δίνουν πολύ καλά χαρακτηριστικά γραμμικής ρήχωσης για $kd=3$, η μεταφορά της ενέργειας στα super-harmonics γενικά υποεκτιμάται.

Ο χωρικός και χρονικός προσδιορισμός των κυλίνδρων βασίζεται σε μια γεωμετρική προσέγγιση που περιγράφηκε λεπτομερώς από τους Shaffer et al. (1993). Κατά τη μετάδοση από το αρχικό σημείο θραύσης σε μια κατάσταση 'bore' (τύπος παλιρροϊκού κύματος), η κρίσιμη γωνία ϕ , αλλάζει βαθμιαία από ϕ_B σε ϕ_o ($\phi_o < \phi_B$). Η στιγμιαία τιμή της ϕ εξαρτάται από την περίοδο του κυλίνδρου και ακολουθεί μια εκθετική χρονική μεταβολή:

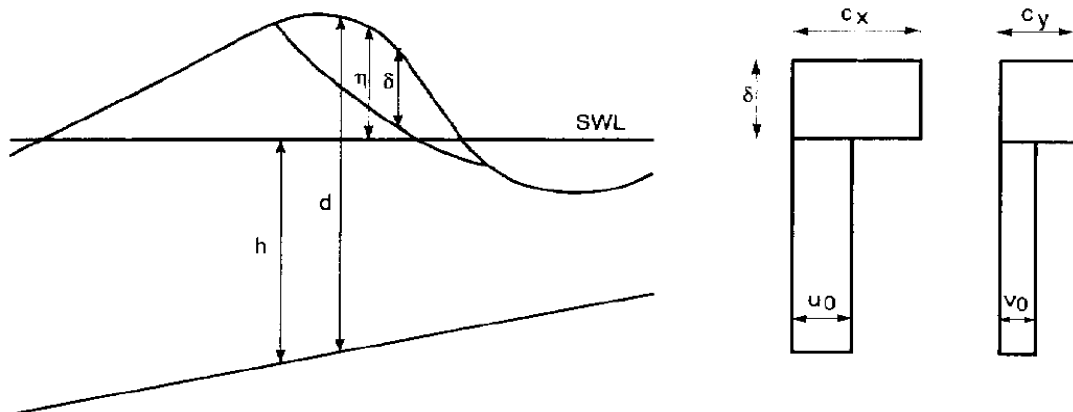
$$\tan\phi(t) = \tan\phi_o + (\tan\phi_B - \tan\phi_o) \exp\left[-\ln 2 \frac{t-t_B}{t_{1/2}}\right]$$

Όπου το $t_{1/2}$ ρυθμίζει τη χρονική κλίμακα για την ανάπτυξη του κυλίνδρου και t_B είναι ο χρόνος έναρξης της θραύσης. Τοπικά, ο κύλινδρος ορίζεται σαν το νερό πάνω από την επαπτόμενη της κλίσης $\tan\phi$ και η θραύση τελειώνει όταν η μέγιστη από την τοπική κλίση γίνει μικρότερη της $\tan\phi$. Μετά τον προσδιορισμό του κυλίνδρου σε κάθε χρονικό βήμα, το πάχος (roller thickness) δ του, πολλαπλασιάζεται με ένα συντελεστή σχήματος f_δ πριν τον υπολογισμό του στις βασικές εξισώσεις.

Ένα μειονέκτημα αυτού του προσδιορισμού των επιφανειακών κυλίνδρων είναι ότι επιπλέον με το $\tan\phi_B$ στηρίζεται σε τρεις παραμέτρους ϕ_o , f_δ , και $t_{1/2}$. Οι Madsen et al. (1997) δοκιμάζοντας διαφορετικές τιμές για την κάθε παράμετρο κατέληξαν στα επόμενα:



- Η τιμή του ϕ_0 δεν είναι κρίσιμη για εφαρμογές όπου η θραύση συνεχίζεται προς την ακτή. Βασιζόμενος στην αναλογία με το υδραυλικό άλμα ο Deiggard (1989) εκτίμησε τη $\phi_0=10\text{deg}$. την οποία και υιοθέτησαν, αν και σε ορισμένες περιπτώσεις (π.χ θραύση πάνω από το οριζόντιο μέρος ύφαλου τραπεζίου) η τιμή μειώνεται στις 7-8deg. με ανάλογη μείωση της ϕ_B .
- Η παράμετρος $t_{1/2}$ καθορίζει το χρονικό διάστημα μεταφοράς μεταξύ των δύο γωνιών θραύσης και λαμβάνεται ίση με $T/5$, όπου T η χαρακτηριστική περίοδος του εισερχόμενου συρμού κυματισμών.
- Το πάχος του 'surface roller' δ , πολλαπλασιάζεται με 1,5 για θραύσεις τύπου κύλισης (spilling) ενώ για εκτινάξεως (plunging) οι Ozsanne et al. (2000) προτείνουν μια τιμή κοντά στο 2.0.
- Η ταχύτητα κυματισμού c , η οποία θεωρείται ταυτόσημη με την ταχύτητα κυλίνδρου, είναι μια ουσιαστική παράμετρος της μεθόδου «επιφανειακού κυλίνδρου».



Εικόνα 4.2: Κάθετο προφίλ οριζόντιας ταχύτητας θραυόμενου κυματισμού. [10]

Οι συνιστώσες της ταχύτητας φάσης αποτελούν βασικές παραμέτρους υπολογισμού του επιφανειακού κυλίνδρου που χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη θραύση στο μοντέλο MIKE 21 BW και δίνονται από τη σχέση (Sorensen et al., 2004):

$$(c_x, c_y) = (c \cos\theta, c \sin\theta) \quad (1)$$

όπου $c = f_v \sqrt{gh}$ είναι η ταχύτητα φάσης (2).



Επιλέγοντας συντελεστή ταχύτητας κυλίνδρου $fv=1.0$ στην εξίσωση (2), το μοντέλο περιγράφει την απλή γραμμική κυματική θεωρία στα ρηχά νερά, γεγονός που αποτελεί καλή προσέγγιση για την περιοχή εκτός της ζώνης θραύσης στην οποία προτιμάται η τιμή $fv=1.3$ (Madsen et al., 1997).

Πρέπει τέλος να σημειωθεί ότι η θραύση των κυμάτων τύπου κυλίσεως (spilling) σύμφωνα με τη θεωρία του επιφανειακού κυλίνδρου επιτυγχάνεται όταν η κλίση της ελεύθερης επιφάνειας ϕ υπερβεί μια κρίσιμη τιμή ϕ_B , η οποία ύστερα από πολλές πειραματικές μετρήσεις εκτιμήθηκε $\phi_B=20^\circ$, για επίπεδη κλίση πυθμένα (Schäffer et al, 1993). Οι Madsen et al (1997) κατέληξαν ότι για μικρή αύξηση της κρίσιμης τιμής περιγράφονται ικανοποιητικά και οι θραύσεις κυμάτων τύπου εκτινάξεως (plunging).

Η μέθοδος αυτή κατάφερε να δώσει καλές τιμές για την ταχύτητα τόσο για τους απλούς όσο και για τους σύνθετους κυματισμούς. Όμως ένα γενικό πρόβλημα με κάθε αμφίδρομο προσδιορισμό της ταχύτητας είναι ότι μπορεί να οδηγήσει σε αστάθειες και θορύβους κάνοντας απαραίτητη τη χρήση φίλτρων. Για την κατεύθυνση θ του κυλίνδρου υπάρχουν δύο διαφορετικοί τύποι στο MIKE 21 BW:

- Τύπος ταχύτητας κυλίνδρου 1: Η κατεύθυνση του κυλίνδρου καθορίζεται ανά πάσα στιγμή από το στιγμιαίο κυματικό πεδίο, διαδικασία που μπορεί στην έναρξή της να προκαλέσει προβλήματα σταθερότητας.
- Τύπος ταχύτητας κυλίνδρου 3: Η κατεύθυνση του κυλίνδρου ορίζεται προς μία καθορισμένη διεύθυνση.

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα κατά την επίλυση των εξισώσεων Boussinesq με τεχνικές πεπερασμένων διαφορών είναι τα χωρικά διαφορικά υψηλότερης τάξης. Στην περίπτωση του 1-DH μοντέλου το συγκεκριμένο πρόβλημα αντιμετωπίζεται με την εισαγωγή μιας νέας μεταβλητής και μιας νέας αλγεβρικής εξίσωσης. Οι βασικές εξισώσεις είναι:

Εξίσωση συνέχειας:

$$n \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} = 0$$



Εξίσωση ποσότητας κίνησης κατά x:

$$\begin{aligned} n \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^2}{h} \right) + \frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + n^2 gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} - n \left(B + \frac{1}{3} \right) d^2 \frac{\partial^3 P}{\partial x \partial x \partial x} - \\ - \frac{1}{3} d \frac{\partial d}{\partial x} \frac{\partial^2 P}{\partial x \partial t} - n^2 B g d^2 \frac{\partial w}{\partial x} + n^2 P \left(\alpha + \beta \frac{|P|}{h} \right) + \frac{gP|P|}{h^2 C^2} = 0 \end{aligned}$$

$$w = \frac{\partial}{\partial x} \left(d \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right)$$

Οι Madsen & Svendsen (1983) και οι Svendsen & Madsen (1984), διαδοχικά, ανέπτυξαν ένα θεωρητικό μοντέλο για την περιγραφή του μετώπου ενός τυρβώδους κατακόρυφου μετώπου που κινείται πάνω σε οριζόντιο ή κεκλιμένο πυθμένα. Σε αυτή την προσέγγιση, μια πλήρως τυρβώδης διατμητική ροή θεωρήθηκε στο ανώτερο στρώμα της στήλης του νερού, ενώ μια πρακτικά αστρόβιλη ροή θεωρήθηκε στο κατώτερο στρώμα. Εκτός από μια εξίσωση ορμής ολοκληρωμένη μόνο στην τυρβώδη περιοχή και οι ολοκληρωμένες στο βάθος εξισώσεις συνέχειας, ορμής και ενέργειας επιλύονταν ταυτόχρονα. Χωρίς την τύρβη το σύστημα των εξισώσεων μετασχηματίζεται στις μη γραμμικές εξισώσεις των κυματισμών στα ρηχά νερά. Ένα σημαντικό συμπέρασμα που βγήκε απ' αυτές τις μελέτες είναι το γεγονός ότι το απλοποιημένο φαινόμενο της θραύσης μπορεί να συμπεριληφθεί στις εξισώσεις ορμής με την υπόθεση της αναδιανομής της οριζόντιας ταχύτητας πάνω στην κατακόρυφη ταχύτητα. Αυτό οδηγεί σε πρόσθετους όρους συναγωγής στις ολοκληρωμένες στο βάθος εξισώσεις ορμής.

Οι ιδέες που περιγράφηκαν προηγουμένως ακολουθήθηκαν από τους Schäffer et al. (1993), που συμπεριέλαβαν το φαινόμενο της υπερχειλίζουσας θραύσης κύματος σε ένα σετ εξισώσεων τύπου Boussinesq όμοιες με αυτές του Peregrine. Οι υπολογισμοί έγιναν σε μία οριζόντια διάσταση χρησιμοποιώντας τη θεώρηση του επιφανειακού κυλίνδρου (εικόνα 4.2). Βασιζόμενοι στην υπόθεση μιας ομοιόμορφης κατακόρυφης κατανομής της οριζόντιας ταχύτητας σε ένα μη θραυόμενο κύμα, ένας πρόσθετος συναγωγικός όρος ορμής που οφείλεται στη θραύση συμπεριλήφθηκε στην ολοκληρωμένη στο βάθος εξίσωση ορμής θεωρώντας το ανομοιόμορφο προφίλ ταχύτητας που πρότεινε ο Svendsen (1984).

Σε συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα του Stive (1980) η ταχύτητα του επιφανειακού κυλίνδρου μοντελοποιήθηκε ως 1.3 φορές η ταχύτητα του γραμμικού



κύματος στα ρηγά νερά. Η θραύση του κύματος ξεκινούσε όταν η μέγιστη κλίση του μετώπου του κύματος ξεπερνούσε μία αποδιδόμενη αρχική τιμή. Παρόμοια, η θραύση τερματιζόταν, όταν η μέγιστη κλίση έπαιρνε μία μικρότερη τελική τιμή. Η χρονική εξέλιξη του πάχους του επιφανειακού κυλίνδρου προσδιοριζόταν γεωμετρικά περιγράφοντας μία διαφοροποίηση στο χρόνο της κλίσης της διεπιφάνειας ανάμεσα στον κύλινδρο και την υποκείμενη οργανωμένη κίνηση του κύματος. Εκτός από τις παραμέτρους που περιγράφουν την έναρξη και τη λήξη της θραύσης, το ομοίωμα ενσωματώνει μια χρονική κλίμακα για την ανάπτυξη του επιφανειακού κυλίνδρου όπως επίσης και μια παράμετρο σχήματος που αναφέρεται στον αρχικό τρόπο διαχωρισμού του κυλίνδρου από την υποκείμενη ροή. Σε σύγκριση με πειραματικά δεδομένα καταδείχθηκε ότι το ομοίωμα προβλέπει ικανοποιητικά τη διαφοροποίηση της μέσης στάθμης ύδατος και του ύψους κύματος πριν, κατά τη διάρκεια και μετά την έναρξη της θραύσης. Ιδιαίτερα δόθηκε έμφαση στο ότι το ομοίωμα αποδείχθηκε ικανό να εκτιμήσει την αρχή της εσωτερικής περιοχής, δηλαδή του σημείου όπου η μέση στάθμη ύδατος αρχίζει να αυξάνει. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι το ομοίωμα αναπαράγει το φαινόμενο της ραγδαίας μετατροπής της δυναμικής ενέργειας σε κινητική στην εξωτερική μεταβατική περιοχή. Οι Schäffer et al. (1992) επέκτειναν το ομοίωμα της ζώνης θραύσης ώστε να περιλαμβάνει τη δεύτερη οριζόντια διάσταση και παρουσίασαν ένα προκαταρκτικό παράδειγμα.

4.1.3 ΣΤΟΙΒΑΔΕΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ

Στο MIKE21 BW οι συνθήκες στο όριο προσομοιώνονται με τη μέθοδο των στρώσεων απορρόφησης ενέργειας (στοιβάδες απορρόφησης) ή sponge/absorbing layers, δηλαδή με το να ανατίθενται σε έναν αριθμό κελιών του ορίου τέτοιες συνθήκες ακτινοβολίας οι οποίες μειώνουν σταδιακά όλη την ενέργεια του κυματικού πεδίου που διαδίδεται προς τις έξω περιοχές από το χώρο προσομοίωσης, ενώ ταυτόχρονα εξασφαλίζουν μηδενική ανάκλαση.

Η επόμενη σχέση δίνει την τιμή του συντελεστή απομείωσης (sponge layer coefficient):

$$C_{sponge} = a^{(r^{i-1})}, i = 1, N_{sponge}$$

Όπου a , r είναι σταθερές προς προσδιορισμό και N_{sponge} ο αριθμός των γραμμών απορρόφησης. Παραπλεύρως του απορροφητικού πεδίου 'sponge layer' τοποθετείται μια γραμμή γένεσης των κυμάτων σύνθετων ή και μονοχρωματικών



(wave generation line) σε εκείνο το όριο το οποίο θεωρούμε ότι εισάγεται το κυματικό πεδίο σε οποιαδήποτε κατεύθυνση ως προς το χώρο προσομοίωσης.

4.1.4 ΑΠΩΛΕΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΛΟΓΩ ΤΡΙΒΗΣ ΤΟΥ ΠΥΘΜΕΝΑ

Το φαινόμενο της τριβής του ρευστού στο πυθμενικό στερεό όριο (bottom dissipation) μπορεί να προκαλέσει μερική απώλεια της κυματικής ενέργειας αθροιστικά. Αυτό σημαίνει ότι η ποσότητα της καταστρεφόμενης ενέργειας αυξάνει με την απόσταση, το ύψος κύματος, την περίοδο και το μειούμενο βάθος. Για το μοντέλο MIKE21 BW το φαινόμενο της τριβής του ρευστού στο πυθμενικό στερεό όριο μπορεί να προκαλέσει μερική απώλεια της κυματικής ενέργειας, μόνο για περιπτώσεις όπου εξετάζονται μακρά κύματα σε λιμενικές εγκαταστάσεις ή πολύ ρηχές παράκτιες ζώνες. Η τριβή στον πυθμένα μπορεί να μορφοποιηθεί χρησιμοποιώντας το νόμο πυθμενικής τριβής του Chézy.

4.1.5 ΘΡΑΥΣΗ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ

Το φαινόμενο της θραύσης των κυμάτων (wave breaking) είναι η διαδικασία κατά την οποία ένα κύμα χάνει ενέργεια λόγω του ότι είτε έχει γίνει πολύ απότομη η κλίση του (δηλ. έχει φτάσει ή ξεπεράσει μία οριακή τιμή κλίσης S) είτε έχει γίνει πολύ μεγάλο το ύψος του ώστε να μπορεί να συγκρατηθεί το βάρος του και καταρρέει (δηλ. έχει φτάσει ή ξεπεράσει μία οριακή τιμή H/h). Η απώλεια ενέργειας λόγω θραύσης των κυματισμών είναι η κυρίαρχη παράμετρος για τη ρύθμιση των μαθηματικών προσομοιωμάτων κυματικής διάδοσης στα ρηχά.

Μία διαφορετική προσέγγιση έχει γίνει για την εισαγωγή της θραύσης στο BW module, η οποία ονομάζεται 'surface roller concept'. Σε αυτήν την κατεύθυνση η θραύση αρχίζει να συμβαίνει αν η κλίση της θαλάσσιας επιφάνειας υπερβεί μία συγκεκριμένη τιμή από την οποία προκύπτει και η γεωμετρία του επιφανειακού κυλίνδρου 'surface roller'. Ο επιφανειακός κύλινδρος θεωρείται ως μία παθητική μάζα νερού απομονωμένη από την υπόλοιπη υδάτινη στήλη, η οποία κινείται με την ίδια ταχύτητα φάσης με το κύμα επί αυτού όμως. Η επιρροή του επιφανειακού κυλίνδρου (surface roller) λαμβάνεται υπόψη μέσω ενός επιπρόσθετου μεταφορικού όρου ορμής που προέρχεται από την ανομοιόμορφη κατακόρυφη κατανομή της οριζόντιας ταχύτητας (Schaeffer et al., 1993; Madsen et al., 1997), όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.2.



Διάφοροι όροι που καθορίζουν το σχήμα, τη μορφή, την ταχύτητα φάσης και την περίοδο μπαίνουν στην ανάλυση ανάλογα με τον τύπο του θραυόμενου κυματισμού.

Αν στην προσομοίωση συμπεριλαμβάνονται και θραύση και μεταβολή της θέσης της ακτογραμμής (moving shoreline), τότε ένα ρητό αριθμητικό φίλτρο χαμηλών συχνοτήτων (explicit numerical lowpass filter) πρέπει να καθοριστεί. Αυτό εισάγεται στην προσομοίωση έτσι ώστε να αποφευχθούν υψηλών συχνοτήτων αστάθειες κατά τη διάρκεια της ανάκλισης και της κατάκλισης (uprush and downrush) και να καταστραφεί η κατάλληλη κυματική ενέργεια σε όποιο σημείο δεν μπορεί να επιλυθεί ο επιφανειακός κύλινδρος (surface roller).

Οι όροι καθορισμού του 'surface roller' είναι οι παρακάτω:

- Δείκτης μορφής 'surface roller'

Το πάχος του 'surface roller' καθορίζεται ως η ποσότητα του νερού που βρίσκεται πάνω από την εφαιπόμενη της κλίσης πολλαπλασιαζόμενη επί ενός δείκτη μορφής (τιμή προεπιλογής 1.5, spilling breakers). Για θραυόμενους κυματισμούς εφορμήσεως (plunging breakers) οι Ozsanne et al. (2000) προτείνουν μία τιμή περίπου 2.0.

- Τύπος φασικής ταχύτητας 'surface roller'

Η φασική ταχύτητα του 'surface roller' θεωρείται ανάλογη της γραμμικής φασικής ταχύτητας στα ρηχά.

- Δείκτης φασικής ταχύτητας 'surface roller'

Τιμή προεπιλογής: 1.3

- Αρχική γωνία/κλίση θραύσης

Τιμή προεπιλογής: 20°

- Τελική γωνία/κλίση θραύσης

Τιμή προεπιλογής: 10°

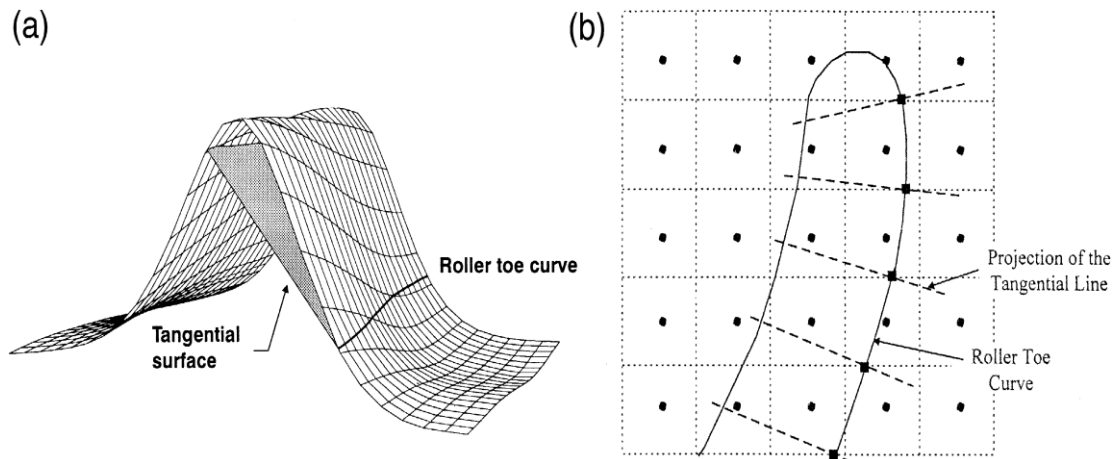
- Half-time cut-off roller

Αυτός ο χρόνος καθορίζει τη μεταφορά από τον έναν θραυόμενο κυματισμό στον άλλο. Θεωρείται ίσος με $T_p/5$

- Διεύθυνση κύματος



Η ταχύτητα υπολογίζεται ως ο χρονικός μέσος όρος της μέσης κατά βάθος ταχύτητας κάτω από τον κύλινδρο, u_0 .



Εικόνα 4.3: Σχηματική περιγραφή του τρόπου θραύσης του κυματισμού σε μοντέλο δύο διαστάσεων μέσω της θαλάσσιας επιφάνειας, όπως θεωρείται στο λογισμικό MIKE 21 BW. [17]

4.1.6 ΓΡΑΜΜΗ ΓΕΝΕΣΗΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ

Το μοντέλο BW λύνει τις ενισχυμένες εξισώσεις Boussinesq και υπολογίζει την ελεύθερη ανύψωση της επιφάνειας με βάση την πυκνότητα ροής. Ωστόσο, είναι ένα κατά μέσο όρο βάθους μοντέλο και έτσι δεν μοντελοποιεί βαθιά κύματα του νερού με ακρίβεια.

Τρεις τύποι συνοριακών συνθηκών μπορεί να προσδιοριστούν: Ένα κλειστό σύνορο (ένα τελείως ανακλώμενο τοίχος), ένα ανοιχτό σύνορο και ένα τελείως απορροφητικό σύνορο.

Τα κύματα μπορούν να προσδιορίζονται είτε με τα ανοιχτά όρια (open boundaries) ή να παράγονται εσωτερικά από το μοντέλο. Στο ανοιχτό όριο, η ενέργεια του προσπίπτοντος κύματος δίνεται ως χρονοσειρά της ανύψωσης της επιφάνειας (επίπεδο σύνορο) ή ως πυκνότητα ροής κάθετα προς το όριο (όριο ροής). Για τις ενισχυμένες εξισώσεις Boussinesq είναι απαραίτητες πρόσθετες πληροφορίες σχετικά με τα παράγωγα της επιφάνειας ανύψωσης. Με την εσωτερική παραγωγή είναι δυνατό να παραχθούν πλήρως κατευθυντικά κύματα ή κύματα με μια γωνία



ως προς την γραμμή γένεσης. Η γραμμή γένεσης τοποθετείται μπροστά από μία στοιβάδα απορρόφησης, η οποία απορροφά όλα τα εξερχόμενα κύματα. Η εργαλειοθήκη του MIKE 21 BW είναι ικανή να παράγει κύματα τύπου Cnoidal, τύπου Stokes ή τύπου Boussinesq.

4.1.7 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ BOUSSINESQ B

Ο κύριος περιορισμός των εξισώσεων Boussinesq είναι το βάθος νερού. Για να κλείσουν οι εξισώσεις, είναι απαραίτητη μία σχέση ανάμεσα στη μέση κατά βάθος ταχύτητα και στην ταχύτητα της επιφάνειας. Καθώς ο αριθμός κύματος αυξάνει, οι διάφορες εκφράσεις της ταχύτητας γίνονται όλο και περισσότερο ανακριβείς σε σχέση με τη θεωρία του Stokes.

Ωστόσο, προκειμένου να περιοριστεί το σφάλμα ας πούμε στο 5% το πρακτικό ανώτερο όριο για h/L_0 (βάθος στα βαθιά νερά προς μήκος κύματος) μειώνεται στο 0,22 το οποίο αντιστοιχεί στον περιορισμό του βάθους νερού που προσδιορίζεται αριθμητικά από τον McCowan (1981), ενώ για τιμές ανώτερες του 0,48 δε μπορεί να βρεθούν λύσεις για τη σχέση διασποράς. Τέλος, η μορφή που προτείνεται από Witting για τον συντελεστή B ($B = 1/15$), χρησιμοποιώντας την τεχνική του Pade', φαίνεται να είναι ανώτερη από τις άλλες μορφές και καλύπτει τον παραπάνω περιορισμό για το σφάλμα.

Οι νέες ενισχυμένες εξισώσεις Boussinesq πληρούν τις ακόλουθες προϋποθέσεις:
(α) Οι εξισώσεις πρέπει να εκφράζονται σε δύο οριζόντιες διαστάσεις σε σχέση με την επιφάνεια ανύψωσης και τις συνιστώσες της κατά βάθος ολοκληρωμένης ταχύτητας.

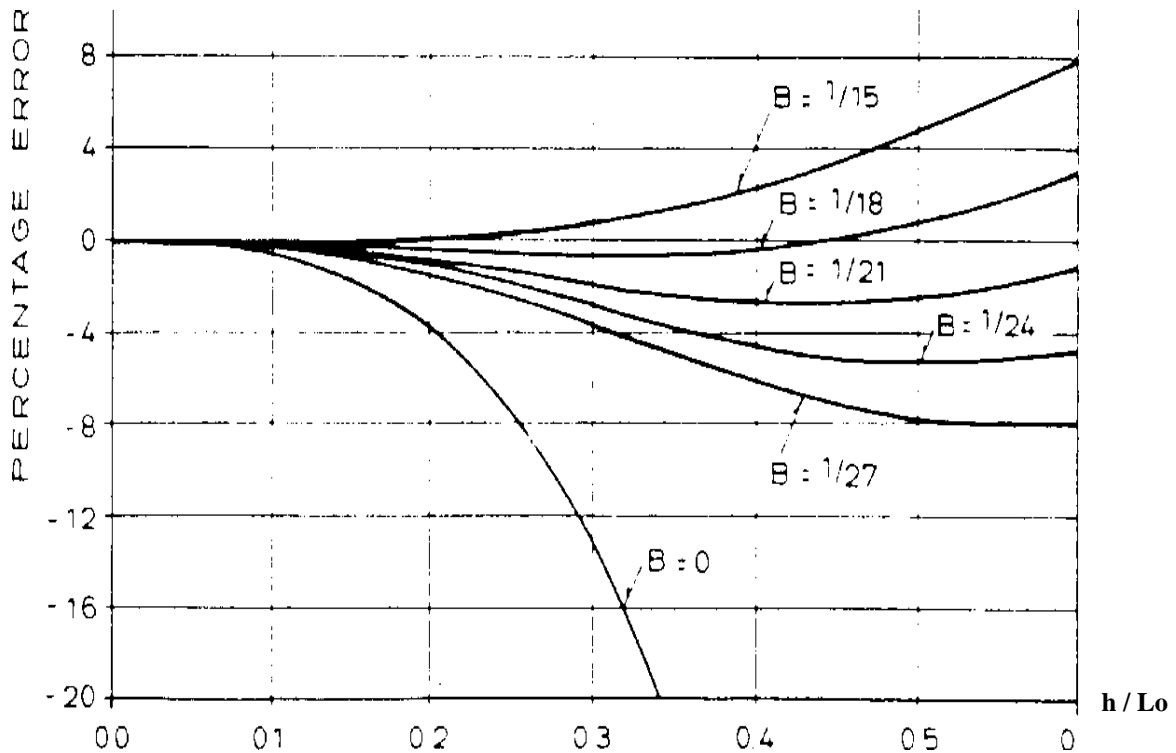
(β) Τα γραμμικά χαρακτηριστικά διασποράς βελτιώνονται μέσω του συντελεστή B, όπου ο συντελεστής B μπορεί να επιλεγεί ρητά για να βελτιωθεί η ακρίβεια σε βαθύτερα νερό.

Στην παρούσα εργασία έχουμε αποφασίσει να θεωρήσουμε ότι $B = 1/15$ για τους εξής λόγους [16]:

(α) Η προσεγγιστική τεχνική του Pade' δίνει μια καλή φυσική / μαθηματική εξήγηση αυτής της επιλογής.

(β) Με αυτή την τιμή η απόκλιση σε σχέση με τη θεωρία Stokes αυξάνεται συνεχώς με την τιμή του h / L_0 .

(γ) Με αυτή την τιμή λαμβάνουμε μια εξαιρετική συμφωνία στον συντελεστή ρήγωσης και την ταχύτητα φάσης για τιμές του h / L_0 μέχρι 0.5.



Εικόνα 4.4: Ποσοστιαία σφάλματα της ταχύτητας φάσης c , ανάλογα με τον συντελεστή B . [15]

4.1.8 ΑΡΙΘΜΟΣ COURANT

Ο αριθμός Courant είναι μια έκφραση που περιγράφει τον αριθμό των σημείων του πλέγματος στα οποία η κυματική πληροφορία θα ταξιδέψει σε ένα χρονικό βήμα. Ορίζεται ως εξής:

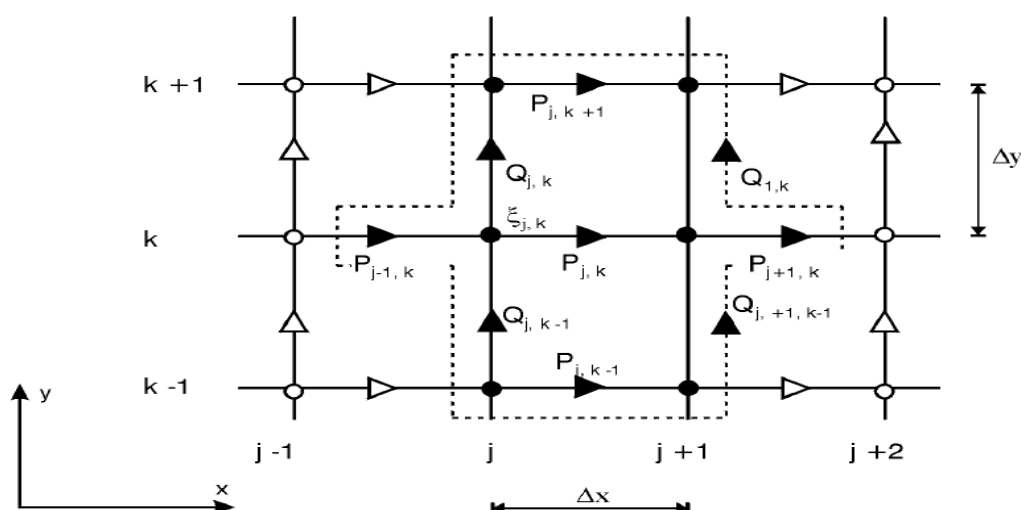
$$Cr = c \frac{\Delta t}{\Delta x}$$

όπου c είναι η ταχύτητα διάδοσης του κύματος, Δt είναι το χρονικό βήμα και Δx είναι η απόσταση του πλέγματος. Ο αριθμός Courant θα πρέπει πάντα να είναι ίσος ή μικρότερος από 1 σε 2D εφαρμογές και λιγότερος από περίπου 0,5 σε 1D εφαρμογές. Για τον αριθμό Cr μια αποδέκτη ακρίβεια επιτυγχάνεται για τιμή $Cr \approx 1$, όπως προκύπτει μετά από δοκιμές [14].



4.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΣΧΗΜΑ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΜΙΚΕ 21 BW

Η επίλυση του αριθμητικού μοντέλου ΜΙΚΕ 21 BW 2-DH βασίζεται στο σχήμα SYSTEM 21 και επεκτάθηκε για την προσομοίωση βραχέων κυμάτων από τους Abbott et al (1978), ενώ από τότε βρίσκεται σε συνεχή εξέλιξη (Madsen et al., 1991, Madsen & Sorensen, 1992). Οι διαφορικές εξισώσεις διακριτοποιούνται χωρικά σε έναν ορθογωνικό κানাβο σταθερού βήματος όπως φαίνεται στην εικόνα 4.5. Τα βαθμωτά μεγέθη όπως η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας ορίζονται στους κόμβους του κανάβου, ενώ οι συνιστώσες της ροής ορίζονται στο μέσο γειτονικών κόμβων.



Εικόνα 4.5: Ορθογωνικός κানাβος σταθερού βήματος ΜΙΚΕ 21 BW 2-DH [10]

Η ολοκλήρωση στο χρόνο γίνεται μέσω ενός πεπλεγμένου κεντρικού σχήματος. Ο αλγόριθμος είναι εναλλασσόμενης διεύθυνσης (Alternative Direction Implicit - ADI) με μια τεχνική «βήματος λόγων» (fractional step) και «πλευρικής τροφοδότησης» (side feeding). Τα τρισδιάγραμμα συστήματα εξισώσεων που προκύπτουν επιλύονται από το γνωστό αλγόριθμο Double Sweep. Η επίλυση των εξισώσεων της 1-DH έκδοσης μέσω πεπερασμένων στοιχείων, μπορεί να αποδώσει σοβαρά σφάλματα, ειδικά στην περίπτωση που εφαρμόζονται ίσης τάξης συναρτήσεις παρεμβολής για τον υπολογισμό της παροχής και της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας. Για την εξαγωγή σταθερών λύσεων χωρίς αστάθειες εφαρμόζεται ένα μεικτό σχήμα παρεμβολής το οποίο περιλαμβάνει στοιχεία με τετραγωνικές παροχές, γραμμική ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας καθώς και επιπρόσθετους όρους. Η ολοκλήρωση στο χρόνο γίνεται είτε μέσω ενός ρητού σχήματος Taylor-Galerkin τριών βημάτων, είτε μέσω ενός σχήματος πρόβλεψης και διόρθωσης τέταρτης τάξης



Adams-Bashforth-Moulton. Ένα σετ τριών γραμμικών εξισώσεων πρέπει να επιλυθεί, για το οποίο στην περίπτωση μικρών προβλημάτων χρησιμοποιείται κατανομή Gauss. Για μεγαλύτερα προβλήματα εφαρμόζονται πιο χρονοβόρες μέθοδοι όπως η επαναληπτική μέθοδος Krylov. Η 2-DH έκδοση έχει ελεγχθεί ως προς την αποτελεσματικότητά της συγκρινόμενη με πειραματικά δεδομένα από τους Madsen et al (1991) και τους Madsen & Sorensen (1992). Αντίστοιχα και η 1-DH έκδοση έχει συγκριθεί με πειραματικά δεδομένα από τους Madsen et al (1997).

4.3 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΧΡΗΣΗΣ ΤΟΥ MIKE 21 BW

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται πολύ συνοπτικά παράδειγμα από εργασία δημοσιευμένη, που έχει χρησιμοποιηθεί το λογισμικό MIKE 21 BW και παρουσιάζονται ουσιαστικά ο τρόπος στησίματος του μοντέλου και κάποια φαινόμενα, τα οποία θα απασχολήσουν στα επόμενα κεφάλαια και την παρούσα εργασία. Ο σκοπός είναι να έχουμε ένα πρόσθετο τεκμήριο για τον τρόπο εργασίας και τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από την δική μας εργασία.

Το μοντέλο διάδοσης κυμάτων του πορθμού Κλαϊπέντα στη Λιθουανία [6] αναπτύχθηκε με χρήση του λογισμικού MIKE 21 BW (Boussinesq Wave Module). Αυτή η ενότητα 2D (δύο διαστάσεων στο χώρο) βασίζεται στην αριθμητική επίλυση της νέας μορφής των εξισώσεων Boussinesq δύο διαστάσεων. Οι εξισώσεις αυτές αναφέρονται ως ενισχυμένες εξισώσεις τύπου Boussinesq (Madsen et al. 1991) και επιτρέπουν την προσομοίωση της διάδοσης των κυμάτων που ταξιδεύουν από τα βαθιά στα ρηχά νερά. Οι εξισώσεις επιλύονται με την τεχνική των πεπερασμένων διαφορών με μεταβλητές που ορίζονται σε ένα ορθογώνιο πλέγμα.

Με το MIKE 21 BW είναι δυνατόν να προσομοιωθούν και να μελετηθούν τα εξής φαινόμενα καθώς το κύμα διαδίδεται στο νερό: η ρήχωση, η διάθλαση, η περίθλαση του κύματος και η τριβή. Το πρόγραμμα αυτό περιλαμβάνει επίσης το πορώδες (porosity) για την προσομοίωση της μερικής ανάκλασης από κυματοθραύστες. Τα στρώματα απορρόφησης της ενέργειας (sponge layers) εφαρμόζονται κατά την πλήρη απορρόφηση της κυματικής ενέργειας όπου αυτό απαιτείται. Μια εσωτερική γραμμή γένεσης κυματισμών (wave generation line) χρησιμοποιείται για το σχηματισμό του ορίου της ανοικτής θάλασσας.

Τα κύρια καθήκοντα της δημιουργίας και της εφαρμογής του κυματικού μοντέλου διάδοσης είναι οι εξής [6]:

1. Η εισαγωγή των αρχικών δεδομένων.
2. Η ρύθμιση του μοντέλου.



3. Η βαθμονόμηση και επιβεβαίωση του μοντέλου.
4. Η προσομοίωση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων του μοντέλου.

Τα αρχικά δεδομένα περιλαμβάνουν την εισαγωγή της βαθυμετρίας της περιοχής μελέτης, τα όρια των δεδομένων (παρατηρήσεις, στατιστικές κύματος), πληροφορίες σχετικά με τους τύπους των κατασκευών για την επιλογή των συντελεστών ανάκλασης, βαθμονόμησης και επιβεβαίωσης των δεδομένων (μετρούμενος άνεμος και παράμετροι κύματος σε επιλεγμένες θέσεις). Ρύθμιση του μοντέλου σημαίνει ότι όλα τα δεδομένα που συλλέγονται, επιλύονται σε ένα χωρικό πλέγμα του μοντέλου. Η σύσταση της βαθυμετρίας περιλαμβάνει την επιλογή της διαμορφωμένης περιοχής, την απόσταση του δικτύου, την τοποθεσία και το είδος των συνόρων.

Ο συνολικός χρόνος προσομοίωσης θα πρέπει να επιτρέψει τα κύματα για να φθάσουν στην πλήρη έκταση του μοντέλου. Από αυτή τη στιγμή η προσομοίωση θα πρέπει να συνεχιστεί τουλάχιστον 20 λεπτά για τον υπολογισμό των στατιστικών παραμέτρων του κύματος. Το χρονικό βήμα θα πρέπει να είναι αρκετά μικρό για να επιλύσει το συντομότερο την περίοδο του κύματος. Σημαντικό ρόλο παίζει επίσης και η απόσταση του πλέγματος που θα χρησιμοποιηθεί για την επίλυση του μοντέλου, ώστε να υπολογιστεί το μήκος κύματος.

Σε ένα ανοικτό όριο τα κύματα ορίζονται ως χρονοσειρές των αυξήσεων των επιφανειακών κυμάτων ή πυκνότητες ροής κάθετα στο όριο. Η επίδραση του πορώδους μιας ακτής συμπεριλαμβάνονται στο μοντέλο. Μερική ανάκλαση, απορρόφηση και μετάδοση της κυματικής ενέργειας σε πορώδεις δομές περιγράφονται από στρώματα πορώδους (Madsen 1983). Στοιβάδες απορρόφησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν μαζί με τις συνοριακές συνθήκες, οι οποίες απορροφούν την ενέργεια των κυμάτων έξω από την περιοχή του μοντέλου. Τα αποτελέσματα του μοντέλου διάδοσης κυμάτων περιλαμβάνουν τον υπολογισμό της στάθμης του νερού, του σημαντικού ύψους κύματος και τον συντελεστή διαταραχής του κύματος (αναλογία του ύψους κύματος σε σχέση με το εισερχόμενο σημαντικό ύψος κύματος) σε κάθε σημείο του πλέγματος.

Οι επιπτώσεις ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου, με 130 ανεμογεννήτριες θεμελιωμένες σε μόνο ένα πάσσαλο (monopile), στην κυκλοφορία και τα επιφανειακά κύματα, έχουν μελετηθεί επίσης στην εργασία «Offshore wind farm impacts on surface waves and circulation in Eastern Lake Ontario», των Matthew P. McCombs, Ryan P. Mulligan, Leon Boegman και έχουν εξαχθεί χρήσιμα συμπεράσματα τα οποία προκύπτουν και στην παρούσα εργασία.



Στο μακρινό πεδίο (1 χιλιόμετρο ή περισσότερα εκτός του αιολικού πάρκου) συμπεριλαμβανόμενων και των παράκτιων περιοχών αναμένονται μικρές αλλαγές στο σημαντικό ύψος κύματος, μικρότερες του 2%, ενώ αναμένονται αλλαγές στο σημαντικό ύψος κύματος όχι μεγαλύτερες από 3% στο εγγύς πεδίο, δηλαδή μέσα στο αιολικό πάρκο και σε απόσταση όχι μεγαλύτερη από 1 χιλιόμετρο από αυτό. Η πλειοψηφία των επιπτώσεων στην κυκλοφορία αναμένεται να συμβεί στο εγγύς πεδίο, με μικρές αλλαγές στην τρέχουσα ταχύτητα. Όσο η βαθυμετρία και η μορφολογία του πυθμένα είναι περίπλοκη, τόσο πιο ευαίσθητη σε αλλαγές είναι η κυκλοφορία σε αυτές τις περιοχές κάτι που ισχύει και σε αυτή την εργασία. Εν κατακλείδι, υπάρχει κάποια μικρή επίπτωση ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου στα κύματα και τα ρεύματα στο εγγύς πεδίο, λόγω των πασσάλων πάνω στους οποίους στηρίζονται οι ανεμογεννήτριες, αλλά πολύ μικρή αλλαγή μπορεί να αναμένεται στο μακρινό πεδίο.

Μια ελάχιστη επίδραση στα επιφανειακά κύματα ήταν αναμενόμενη λόγω της μικρής αναλογίας μεταξύ της διαμέτρου της κατασκευής (7 m) και του μήκους κύματος (40 m έως 90 m). Τυπικά, η περίθλαση και η αντανάκλασή τους, είναι σημαντικές διαδικασίες όταν $D / L > 0,2$ (Isaacson, 1979), όπου D είναι η διάμετρος του πασσάλου που στηρίζει την ανεμογεννήτρια και το L είναι το μήκος κύματος. Οι συνθήκες του κύματος σε αυτή την περίπτωση αντιστοιχούν σε $0,08 \leq D / L \leq 0,17$, υποδεικνύοντας ότι η αντανάκλαση και διάθλαση είναι αμελητέες διαδικασίες. Σκέδαση της κυματικής ενέργειας και αλληλεπίδραση των πασσάλων μεταξύ τους υπολογίζεται να είναι μικρές, ως αποτέλεσμα της μεγάλης απόστασης (1 km) μεταξύ των πασσάλων (Alari και Raudsepp, 2012).

4.4 ΣΤΗΣΙΜΟ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ (MODEL SETUP)

4.4.1 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Η επιλογή της απόστασης του πλέγματος και του χρονικού βήματος εξαρτώνται από τις συνθήκες του κύματος για τα οποία οι προσομοιώσεις πρέπει να εκτελεστούν και το βάθος του νερού στην περιοχή ενδιαφέροντος.

- Ο λόγος του μέγιστου βάθους του νερού προς το μήκος κύματος των βαθέων υδάτων των κυμάτων με τη μικρότερη περίοδο δεν πρέπει να γίνει μεγαλύτερο από 0,22, αν εξαιρεθούν οι όροι για την διόρθωση του βαθέως νερού, και 0.5, εφόσον οι εν λόγω όροι περιλαμβάνονται με τις ενισχυμένες εξισώσεις Boussinesq.
- Οι αποστάσεις του πλέγματος περιορίζεται από την ανάλυση του μικρότερου μήκους κύματος ή της επιφάνειας του κυλίνδρου αν περιλαμβάνεται η θραύση των κυμάτων.



- Το χρονικό βήμα περιορίζεται από την ανάλυση της μικρότερης περιόδου του κύματος.
- Ο αριθμός Courant πρέπει να διατηρείται ίσος ή μικρότερος από τη μονάδα (0,5 για την περίπτωση του 1DH) για να αποφευχθούν προβλήματα αστάθειας.

Στην πράξη, η επιλογή της απόστασης του πλέγματος και του χρονικού βήματος είναι συχνά ένας συμβιβασμός μεταξύ χαμηλού υπολογιστικού κόστους του υπολογιστή και υψηλής ακρίβειας.

Το εργαλείο MIKE 21 BW Model Setup Planner είναι εξαιρετικό βοήθημα για το στήσιμο του μοντέλου. Μία εκτίμηση της απαιτούμενης μνήμης CPU και RAM μπορεί να γίνει εύκολα μέσω αυτού του εργαλείου.

Κατά το στήσιμο της βαθυμετρίας θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η βαθυμετρία καθορίζει ποιες κυματικές συνθήκες μπορούν να διαμορφωθούν. Τα μέγιστα βάθη νερού περιορίζουν την ελάχιστη περίοδο κύματος που μπορεί να διαμορφωθεί και το ελάχιστο βάθος του νερού μπορεί να περιορίσει το κύμα αν η θραύση των κυμάτων δεν περιλαμβάνεται. Ένα εύρος τιμών για τις αποστάσεις του πλέγματος που χρησιμοποιείται πρακτικά είναι:

$\Delta x = 2-10\text{m}$ για το 2DH module χωρίς θραύση κύματος.

$\Delta x = 1-2\text{m}$ για το 2DH module περιλαμβάνοντας θραύση κύματος και μετακίνηση της ακτογραμμής.

$\Delta x = 0,1-10\text{m}$ για το 1DH module περιλαμβάνοντας θραύση κύματος και μετακίνηση της ακτογραμμής.

Γενικά συνιστάται η απορροφητική στοιβάδα ή στρώμα απορρόφησης (sponge layer) να αποτελείται από τουλάχιστον 20 σημεία στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές. Άριστη απορρόφηση συμβαίνει για ένα στρώμα απορρόφησης όταν έχει ένα πάχος από 1-2 φορές το μήκος κύματος του πιο ενεργητικού κύματος (που αντιστοιχεί στην φασματική περίοδο κορυφής του κύματος). [18]

Ένα φίλτρο χαμηλής διόδου (lowpass filter) περιλαμβάνεται για να αφαιρέσει τα κύματα υψηλής συχνότητας που παράγονται κατά τη διάρκεια της ανόδου και καθόδου του κύματος στην ακτή και να διαλύσει την κυματική ενέργεια σε περιοχές όπου η επιφάνεια του κυλίνδρου δε μπορεί να επιλυθεί σωστά. το φίλτρο χρησιμοποιείται σε βάθη νερού μικρότερα από περίπου 0.5 m.

Στη συνέχεια, είναι σημαντικό ότι το μοντέλο επεκτείνεται αρκετά μακριά από την περιοχή του ενδιαφέροντος και να εξασφαλιστεί ότι τα αποτελέσματα δεν θα επηρεαστούν από τη μικρή απόσταση από τα όρια του μοντέλου. Κατά κανόνα, η ελάχιστη απόσταση μεταξύ του άκρου μιας κατασκευής και ενός παρακείμενου



κλειστού συνόρου θα πρέπει κατά προτίμηση να είναι πέντε ή έξι φορές το χαρακτηριστικό μήκος κύματος. [18]

Για τις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές της 2DH 7-10 σημεία πλέγματος ανά μήκος κύματος είναι αρκετά. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητο να εκτιμηθεί το μικρότερο μήκος κύματος στην περιοχή του μοντέλου. Αυτό θα βρεθεί για τη μικρότερη περίοδο κύματος στα πιο ρηχά της περιοχής του μοντέλου βαθυμετρίας.

Καθώς ένα κύμα κινείται προς την ακτή αυξάνει σε ύψος μέχρι να γίνει ασταθής και τελικά θραύεται. Μόλις σπάσει το κύμα, η περίσσεια κυματική ενέργεια διαχέεται μέσω της τύρβης. Η έναρξη της φυσικής αστάθειας συμβαίνει όταν η ταχύτητα των σωματιδίων του νερού στην κορυφή του κύματος αρχίζει να υπερβαίνει την ταχύτητα της διάδοσης των κυμάτων. Συγκριτικά, οι εξισώσεις Boussinesq στο MIKE 21 BW χρησιμοποιούν την κατά βάθος ολοκληρωμένη ταχύτητα ως την κύρια μεταβλητή ταχύτητα. Αυτή δεν μπορεί να υπερβαίνει την ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων. Κατά συνέπεια, τα κύματα στο MIKE 21 BW θα συνεχίσουν να μειώνονται και να παίρνουν πιο απότομη κλίση μέχρι να μην μπορούν πλέον να αντιμετωπισθούν από το υπολογιστικό πλέγμα. Τελικά αυτό οδηγεί σε αριθμητική αστάθεια. Ανάλογα με το μέγεθος του πλέγματος, η έναρξη της αριθμητικής αστάθειας μπορεί να προκύψει πολύ πέρα από το σημείο στο οποίο ένα πραγματικό κύμα θα σπάσει.

Για τις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές, όπου το κύμα θραύσης δεν θα περιλαμβάνεται πρέπει να εξασφαλιστεί ότι ο λόγος μεταξύ του σημαντικού ύψους κύματος και του βάθους του νερού είναι μικρότερος από 0,3-0,4.

Για τυπικές εφαρμογές μικρών κυμάτων ο χρόνος προσομοίωσης είναι 20-30 λεπτά.

Η επιλογή του χρονικού βήματος εξαρτάται από την επιλεγείσα ενότητα (module) και τη μορφή των εξισώσεων Boussinesq. Οι συστάσεις που περιλαμβάνονται παρακάτω σχετίζονται κυρίως με την ενότητα 2DH. Ο κύριος περιορισμός για την ενότητα 1DH είναι ότι ο αριθμός Courant πρέπει να είναι μικρότερος από περίπου 0,5.

α) Εξαιρώντας τους όρους βαθέν υδάτων:

Η κύρια απαίτηση είναι ότι το χρονικό βήμα (time step) θα πρέπει να είναι αρκετά μικρό για την επίλυση των επιμέρους μικρότερων περιόδων του κύματος. Για τις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές 8-10 χρονικά βήματα ανά περίοδο κύματος θα είναι εντάξει, τα οποία εφαρμόζονται στην ελάχιστη περίοδο κύματος που πρόκειται να εξεταστεί. Περαιτέρω, απαιτείται επίσης ότι το χρονικό βήμα (σε συνδυασμό με την απόσταση του πλέγματος) επιλέγεται έτσι ώστε ο αριθμός Courant είναι μικρότερος ή ίσος προς 1.



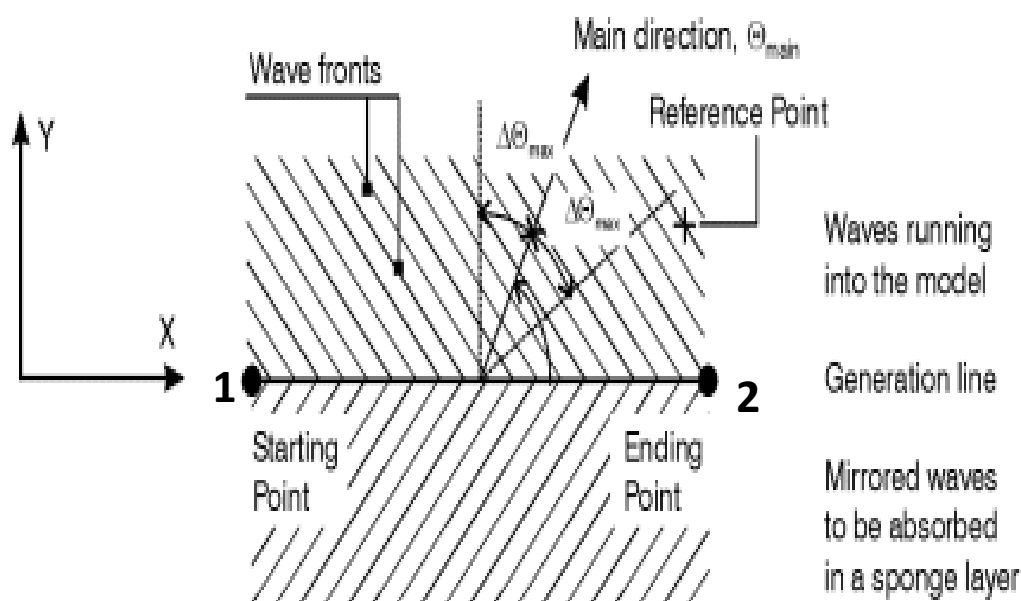
β) Συμπεριλαμβάνοντας τους όρους βαθέων υδάτων:

Για να αποφευχθεί η αριθμητική αστάθεια, η ελάχιστη περίοδος του κύματος θα πρέπει να επιλύεται με 25-35 χρονικά βήματα. Και πάλι θα πρέπει να ελέγχεται αν το κριτήριο Courant πληρούται.

γ) Περιλαμβάνονται η θραύση κυματισμών και η μετακίνηση της ακτογραμμής:

Σε πρακτικές εφαρμογές που αφορούν το κύμα που θραύεται και την κινούμενη ακτογραμμή η απόσταση του πλέγματος είναι τυπικά 1-2m και το χρονικό βήμα είναι τυπικά 0.05-0.1s ανάλογα με τη χρονική κλίμακα των κυμάτων. Οι χαμηλότερες τιμές απαιτούνται όταν συμπεριλαμβάνεται μία κινούμενη ακτογραμμή. [18]

4.4.2 ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ



Εικόνα 4.6: Ορισμός της κύριας διεύθυνσης των κυμάτων θ_{main} και της μέγιστης απόκλισης από την κύρια διεύθυνση $\Delta\theta_{max}$. [18]

Η κύρια κατεύθυνση των κυμάτων είναι κάθετη προς τη γραμμή παραγωγής τους. Η γραμμή παραγωγής τους ξεκινάει από το σημείο (1) στα αριστερά και τελειώνει στο σημείο (2) στα δεξιά, όπως φαίνεται στην εικόνα 86. Η γωνία αναφοράς έχει θετική



φορά αριστερόστροφη, αντίθετη από τη φορά των δεικτών του ρολογιού, με κατεύθυνση 0 αυτή που ξεκινάει από το σημείο (1) στο σημείο (2).

Κοντά στην ακτή ακόμα, συνιστάται να χρησιμοποιηθεί ένας συντελεστής φίλτρου μεταξύ 0 και 1, π.χ. 0,25 ή 0,5. Εκτός της ζώνης αυτής, ο συντελεστής του φίλτρου θα πρέπει να είναι μηδέν (χωρίς φιλτράρισμα).

4.4.3 ΤΙΜΗ ΒΑΘΥΜΕΤΡΙΑΣ ΠΟΥ ΛΑΜΒΑΝΕΤΑΙ ΩΣ ΞΗΡΑ (BATHYMETRY VALUE REPRESENTING LAND)

Η τιμή αυτή είναι η ελάχιστη τιμή που έχει χρησιμοποιηθεί για τα σημεία της ξηράς, όταν θα προετοιμαστεί η βαθυμετρία. Στον υπολογισμό των σημείων του πλέγματος από το μοντέλο, τιμές υψηλότερες από την τιμή αυτή πάντα θα θεωρούνται ως ξηρά.



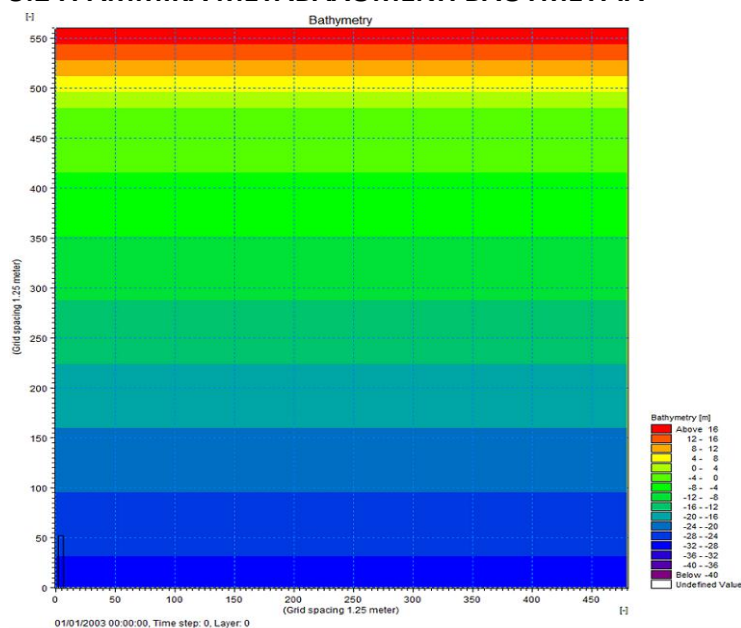
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΠΡΟΤΥΠΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΜΙΚΕ 21 BW

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

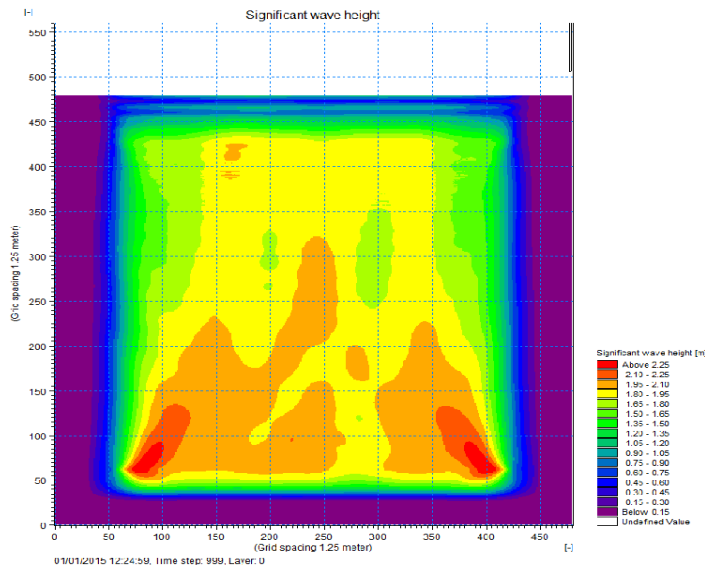
Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται μια πρότυπη βαθυμετρία, ώστε τα συμπεράσματα που θα εξαχθούν να χρησιμοποιηθούν σαν ένα πρόσθετο τεκμήριο των αποτελεσμάτων της πραγματικής βαθυμετρίας. Η πρότυπη αυτή βαθυμετρία είναι μια γραμμικά μεταβαλλόμενη βαθυμετρία με σχετικά μικρή κλίση 5%. Ξεκινώντας από τα 30m και καταλήγει στην ακτή. Στη συνέχεια δημιουργούμε την ίδια βαθυμετρία, με τις ίδιες παραμέτρους του προγράμματος ΜΙΚΕ 21 BW, τοποθετώντας μια ανεμογεννήτρια στο κέντρο περίπου του χώρου του μοντέλου και συγκρίνουμε τις δύο περιπτώσεις. Κάθε σημείο του πλέγματος έχει απόσταση 1,25m και το μοντέλο αποτελείται συνολικά από 480x560 σημεία καλύπτοντας δηλαδή μια περιοχή 600x700m. Σε όλες τις περιπτώσεις η κατάσταση θάλασσας είναι η ίδια περιλαμβάνοντας θραύση κυματισμών και ένα φίλτρο για την αποφυγή αστοχιών του προγράμματος και θορύβου:

- Σημαντικό ύψος κύματος, $H_{m0} = 2,00m$
- Φασματική περίοδος αιχμής, $T_p = 6,50s$
- Μέση κατεύθυνση κυμάτων, $MWD = 90,00^\circ$
- Φάσμα συχνότητας JONSWAP
- Κατευθυντική διανομή κυματισμών (directional wave distribution)

5.2 ΓΡΑΜΜΙΚΑ ΜΕΤΑΒΑΛΟΜΕΝΗ ΒΑΘΥΜΕΤΡΙΑ



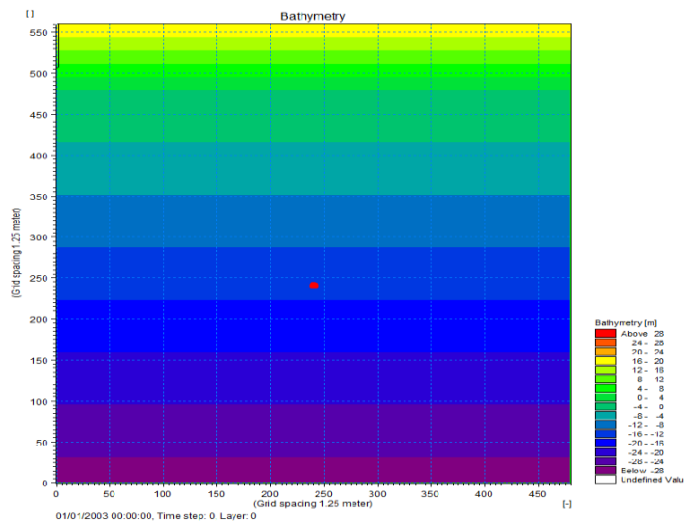
Εικόνα 5.1: Πρότυπη βαθυμετρία γραμμικά μεταβαλλόμενη με κλίση 5% και κατεύθυνση ανέμου νότια.



Εικόνα 5.2: Σημαντικό ύψος κύματος για περίπτωση χωρίς ανεμογεννήτρια.

Ο χρόνος προσομοίωσης είναι 25 λεπτά και στην εικόνα 5.2 φαίνεται το σημαντικό ύψος κύματος μετά το πέρας αυτού του χρόνου. Οι πιο αυξημένες τιμές του σημαντικού ύψους κύματος είναι λίγο πριν την ακτή σε απόσταση 200m με 400m. Η απόσταση του πλέγματος επιλέχτηκε αρκετά μικρή $\Delta x = 1,25m$, ώστε να επιτευχθεί η ακρίβεια των σχημάτων των ανεμογεννητριών. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να επιλεγεί χρονικό βήμα $\Delta t = 0,06s$, επίσης μικρό, ώστε ο αριθμός Courant να παραμείνει κάτω από τη μονάδα και συγκεκριμένα $Cr = 0,823$.

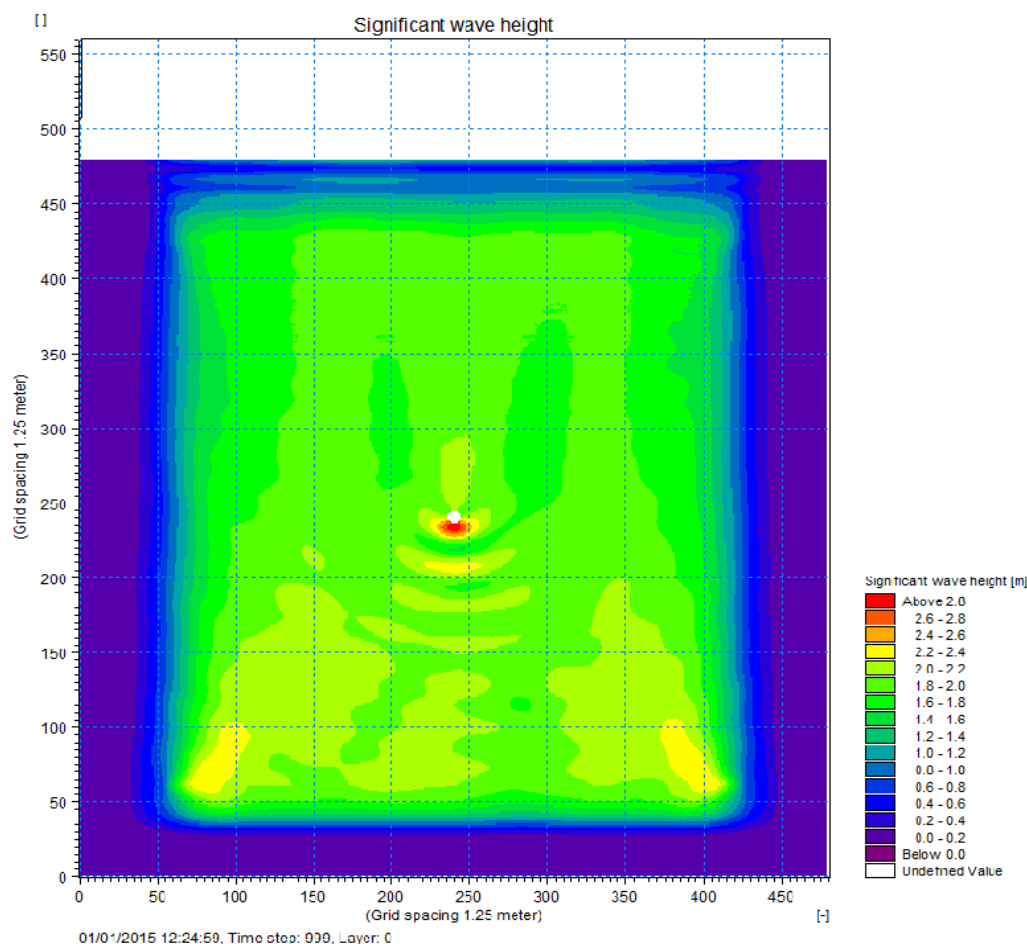
5.3 ΓΡΑΜΜΙΚΑ ΜΕΤΑΒΑΛΟΜΕΝΗ ΒΑΘΥΜΕΤΡΙΑ ΜΕ ΜΙΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ



Εικόνα 5.3: Πρότυπη βαθυμετρία γραμμικά μεταβαλλόμενη με κλίση 5%, με μία γεννήτρια και κατεύθυνση ανέμου νότια.



Η δεύτερη περίπτωση αφορά ακριβώς την ίδια περιοχή μελέτης και την εγκατάσταση μίας ανεμογεννήτριας στο κέντρο της θάλασσας (σημείο 240,240 σε συντεταγμένες πλέγματος). Οι συνθήκες της θάλασσας και όλες οι παράμετροι έχουν κρατηθεί ίδιοι με την προηγούμενη περίπτωση, ώστε να μπορούν να συγκριθούν αποτελεσματικά τα συμπεράσματα μεταξύ των διαφορετικών περιπτώσεων.

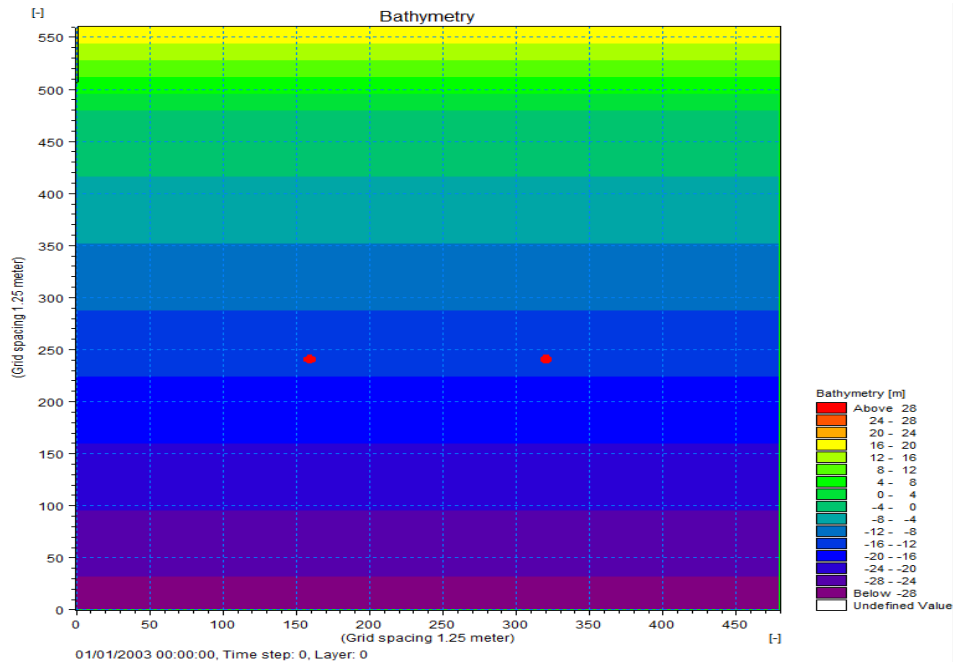


Εικόνα 5.4: Σημαντικό ύψος κύματος για περίπτωση με μία ανεμογεννήτρια.

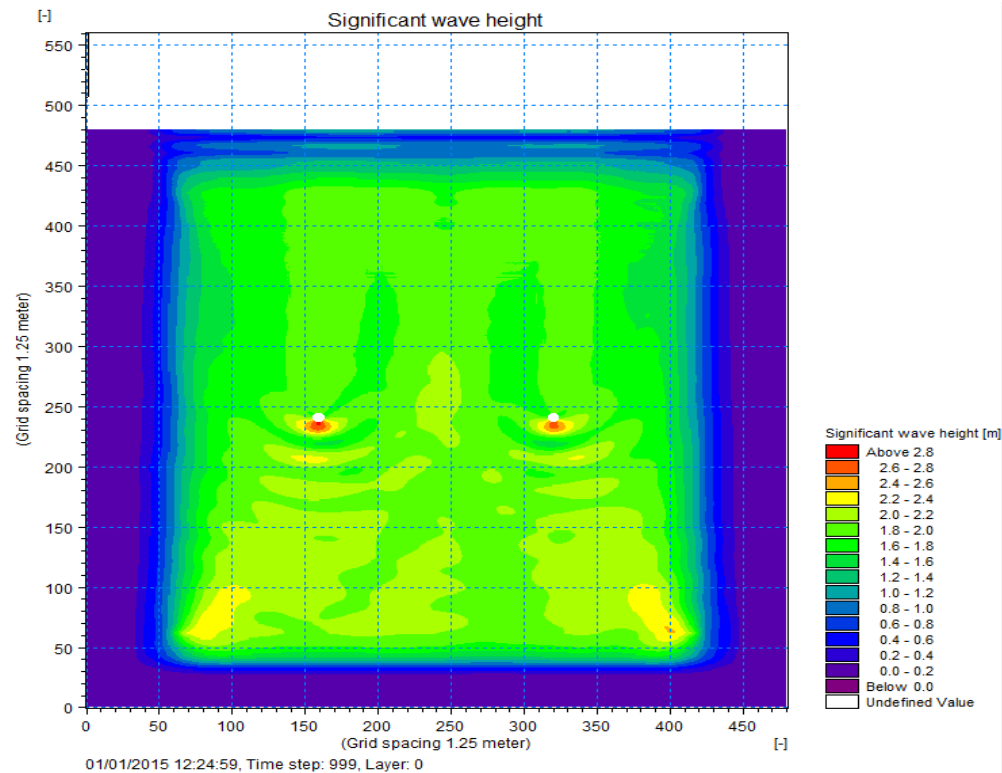
Στην εικόνα 5.4 φαίνεται η αναρρίχηση του κύματος μπροστά από την ανεμογεννήτρια, η μικρή διακύμανση του σημαντικού ύψους κύματος πίσω από την γεννήτρια και η μικρή μείωση του σημαντικού ύψους κύματος στα πλαϊνά της γεννήτριας. Διαπιστώνεται ότι το εμπόδιο προκαλεί μεταβολή στη ροή του νερού, το οποίο κινείται από το νότο προς το βορρά, με αποτέλεσμα την περιδίνηση πίσω από την ανεμογεννήτρια. Όσον αφορά την επιρροή της ανεμογεννήτριας στην συμπεριφορά του κύματος κοντά στην ακτή, δεν παρατηρούνται σημαντικές μεταβολές του σημαντικού ύψους κύματος (μικρότερες από 0,3%).



5.4 ΓΡΑΜΜΙΚΑ ΜΕΤΑΒΑΛΟΜΕΝΗ ΒΑΘΥΜΕΤΡΙΑ ΜΕ ΔΥΟ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ



Εικόνα 5.5: Πρότυπη βαθυμετρία γραμμικά μεταβαλλόμενη με κλίση 5%, με δύο γεννήτριες και κατεύθυνση ανέμου νότια.



Εικόνα 5.6: Σημαντικό ύψος κύματος για περίπτωση με δύο ανεμογεννήτριες.



Στην περίπτωση αυτή, όπως και στην προηγούμενη, η κατεύθυνση του ανέμου παραμένει νότια και όλες οι παράμετροι είναι ίδιοι. Διαπιστώνεται η αναρρίχηση του κύματος μπροστά από τις ανεμογεννήτριες, η μικρή διακύμανση του σημαντικού ύψους κύματος πίσω από τις γεννήτριες και η μικρή μείωση του σημαντικού ύψους κύματος στα πλαϊνά των γεννητριών. Όσον αφορά την επιρροή των ανεμογεννητριών στην συμπεριφορά του κύματος κοντά στην ακτή, δεν παρατηρούνται σημαντικές μεταβολές του σημαντικού ύψους κύματος. Τέλος δεν εμφανίζεται καμία μεταβολή του σημαντικού ύψους κύματος σε σημεία μεταξύ των δύο ανεμογεννητριών.

5.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν από τις πρότυπες εφαρμογές είναι:

- η αναρρίχηση του κύματος μπροστά από τις ανεμογεννήτριες.
- η μικρή διακύμανση του σημαντικού ύψους κύματος πίσω από τις ανεμογεννήτριες.
- η μικρή μείωση του σημαντικού ύψους κύματος στα πλαϊνά των ανεμογεννητριών.
- οι ελάχιστες μεταβολές του σημαντικού ύψους κύματος σε σημεία κοντά στην ακτογραμμή.
- καμία μεταβολή του σημαντικού ύψους κύματος σε σημεία μεταξύ των δύο ανεμογεννητριών.
- η μεταβολή της ροής του νερού όταν συναντά εμπόδια κατά την κατεύθυνση διάδοσής του, με την εμφάνιση περιδίνησης πίσω από το εμπόδιο.
- Καμία μεταβολή στη ροή του νερού στις υπόλοιπες περιοχές.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ MIKE 21 BW

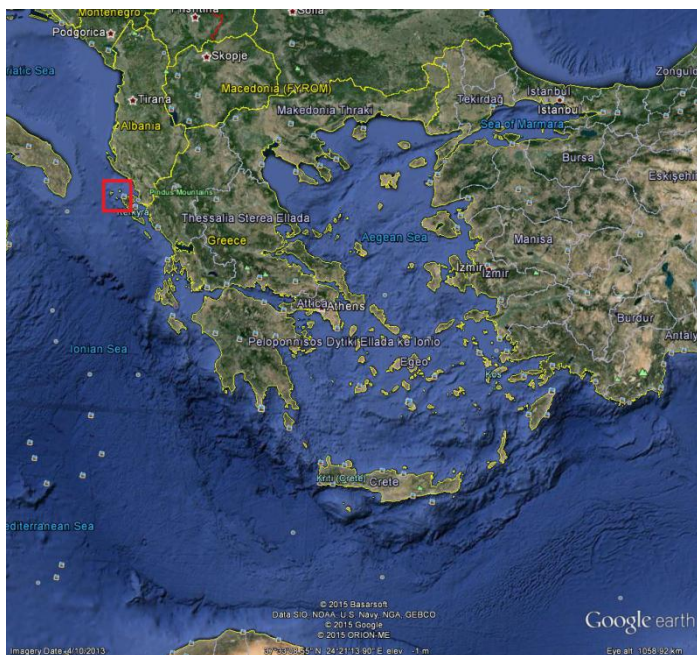
6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα Διαπόντια νησιά είναι νησιωτικό σύμπλεγμα 11 νησιών, που αποτελείται από τρία μεγαλύτερα νησιά και μερικές άλλες νησίδες βόρεια-βορειοδυτικά της Κέρκυρας σε απόσταση 9-20km από αυτήν [19]:

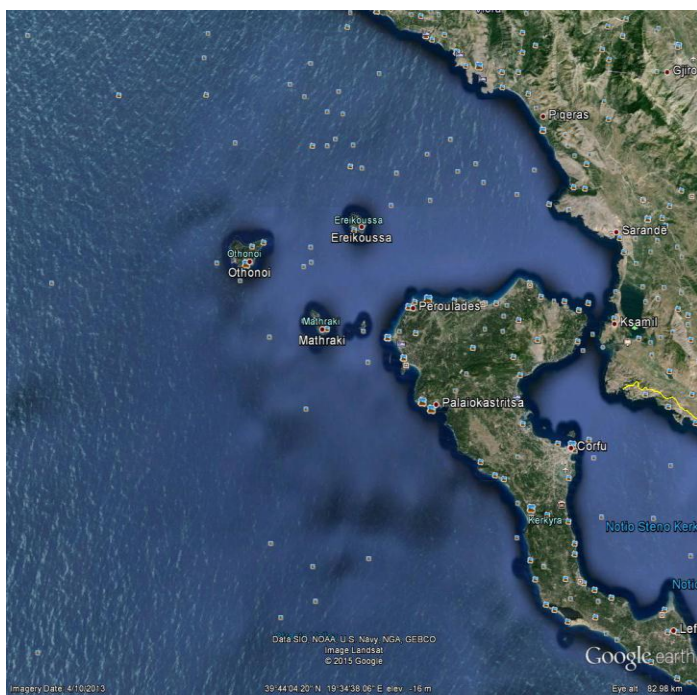
- Οθωνοί, το μεγαλύτερο από τα Διαπόντια νησιά και το δυτικότερο σημείο της ελληνικής επικράτειας (663 κάτοικοι κατά την απογραφή του 2001). Είναι το μεγαλύτερο από τα τρία Διαπόντια νησιά που βρίσκονται βόρεια της Κέρκυρας και ανήκουν στην Περιφέρεια Ιονίων Νήσων. Το έκτασης 10km² νησάκι, το μεγαλύτερο των Διαπόντιων αποτελεί το δυτικότερο σημείο της Ελληνικής επικράτειας απέχουν 11,5 ναυτικά μίλια από Κέρκυρα
- Ερεικούσα, το βορειότερο σημείο των Επτανήσων (698 κάτοικοι κατά την απογραφή του 2001). Σε απόσταση 6 ναυτικών μιλίων βόρεια από το ακρωτήριο Δράστη της βόρειας Κέρκυρας, βρίσκεται η Ερεικούσα, το βορειότερο από τα Διαπόντια νησιά. Το όνομα της, το οφείλει στον θάμνο Ρέικι, από τους οποίους είναι γεμάτο το νησί και οι οποίοι ανθίζουν το μήνα Οκτώβρη και ολόκληρο το τοπίο γίνεται... ροζ!
- Μαθράκι (297 κάτοικοι κατά την απογραφή του 2001). Απέχει 4,5 ναυτικά μίλια από τις βορειοδυτικές ακτές της Κέρκυρας . Με έκταση 3,1km².

και τις ακατοίκητες νησίδες:

- το Διάκοπο
- το Διάπλο
- το Καράβι
- το Καστρινό
- τη Λειψώ (ή Βάρκα)
- το Όστρακο
- την Πλάκα (ή Άγκυρα)
- την Πλατειά
- η Τραχειά (ή Τραχιά)



Εικόνα 6.1α: Γεωγραφικός προσανατολισμός της περιοχής μελέτης. [19]



Εικόνα 6.1β: Γεωγραφικός προσανατολισμός της περιοχής μελέτης. [19]

Το σύμπλεγμα των Διαπόντιων Νήσων βρίσκεται βόρεια της Κέρκυρας (γεωγραφικό μήκος $E19^{\circ}27'$ και γεωγραφικό πλάτος $N39^{\circ}50'$). Στην περιοχή των Διαπόντιων Νήσων μεταξύ των νησιών Οθωνοί, Μαθράκι και Ερεικούσα υπάρχει σχέδιο για την κατασκευή αιολικού πάρκου. Σκοπός αυτής της εργασίας είναι να διαπιστώσει αν υπάρχουν αλλαγές στο κυματικό πεδίο της περιοχής μετά την εγκατάσταση του πάρκου, την επίδραση που έχει η παρουσία του πάρκου στις ίδιες τις



ανεμογεννήτριες καθώς και την επίδραση στις παρακείμενες ακτές και στον πυθμένα εγκατάστασης. Στα πλαίσια της εργασίας το αιολικό πάρκο αποτελείται από 12 ανεμογεννήτριες των οποίων η μεταξύ τους απόσταση είναι περίπου 600m, ενώ τα βάθη της περιοχής εγκατάστασης ξεκινούν από τα 10m και δεν ξεπερνούν τα 45m. Η απόσταση μεταξύ των ανεμογεννητριών και τα βάθη εγκατάστασης έχουν επιλεγεί με βάση αντίστοιχα, υπάρχοντα αιολικά πάρκα του εξωτερικού. Όλες οι ανεμογεννήτριες του πάρκου είναι θεμελιωμένες σε ένα πάσσαλο (monopile).

Για την επίλυση του κυματικού πεδίου και τον υπολογισμό των βασικών κυματικών χαρακτηριστικών όπως το σημαντικό ύψος κύματος επιλέχτηκε το λογισμικό του Δανικού Ινστιτούτου DHI το MIKE 21 BW. Συνολικά οι περιπτώσεις που μελετήθηκαν είναι 8 και αφορούν 3 περιπτώσεις για το μέγιστο σημαντικό ύψος κύματος των 35 ετών, 3 περιπτώσεις για τη μέγιστη περίοδο κύματος των 35 ετών, και 2 περιπτώσεις με ενδεικτικά στοιχεία μη πραγματικά. Η βαθυμετρία, η θέση και η απόσταση των ανεμογεννητριών μεταξύ τους, η διεύθυνση των κυμάτων καθώς και όλες οι παράμετροι που επιλέχθηκαν για την προσομοίωση του μοντέλου κρατήθηκαν σταθεροί, ώστε να μπορεί να γίνει άμεση σύγκριση και αξιολόγηση μεταξύ των διαφορετικών περιπτώσεων. Οι διευθύνσεις έχουν αυξηθεί κατά $41,02^\circ$, όπως εξηγείται στο κεφ. 6.2.2. Τα στατιστικά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και οποιαδήποτε άλλη πληροφορία σχετικά με την περιοχή εγκατάστασης ελήφθησαν από το Ελληνικό Κέντρο Έρευνας και Θαλάσσιων Ερευνών (ΕΛΚΕΘΕ).

Περίπτωση 1^η περιοχή χωρίς ανεμογεννήτριες:

- Σημαντικό ύψος κύματος, $H_{m0} = 3,83m$
- Φασματική περίοδος αιχμής, $T_p = 8,51s$
- Μέση κατεύθυνση κυμάτων, $MWD = 150,82^\circ$
- Φάσμα συχνότητας JONSWAP
- Κατευθυντική διανομή κυματισμών (directional wave distribution)

Περίπτωση 2^η περιοχή με αιολικό πάρκο με 12 ανεμογεννήτριες:

- Σημαντικό ύψος κύματος, $H_{m0} = 3,83m$
- Φασματική περίοδος αιχμής, $T_p = 8,51s$
- Μέση κατεύθυνση κυμάτων, $MWD = 150,82^\circ$
- Φάσμα συχνότητας JONSWAP
- Κατευθυντική διανομή κυματισμών (directional wave distribution)

Περίπτωση 3^η περιοχή με αιολικό πάρκο με 1 ανεμογεννήτρια (No5):

- Σημαντικό ύψος κύματος, $H_{m0} = 3,83m$
- Φασματική περίοδος αιχμής, $T_p = 8,51s$



- Μέση κατεύθυνση κυμάτων, $MWD = 150,82^\circ$
- Φάσμα συχνότητας JONSWAP
- Κατευθυντική διανομή κυματισμών (directional wave distribution)

Περίπτωση 4^η αιολικό πάρκο χωρίς ανεμογεννήτριες:

- Σημαντικό ύψος κύματος, $H_{m0} = 1,37m$
- Φασματική περίοδος αιχμής, $T_p = 10,18s$
- Μέση κατεύθυνση κυμάτων, $MWD = 113,46^\circ$
- Φάσμα συχνότητας JONSWAP
- Κατευθυντική διανομή κυματισμών (directional wave distribution)

Περίπτωση 5^η αιολικό πάρκο με 12 ανεμογεννήτριες:

- Σημαντικό ύψος κύματος, $H_{m0} = 1,37m$
- Φασματική περίοδος αιχμής, $T_p = 10,18s$
- Μέση κατεύθυνση κυμάτων, $MWD = 113,46^\circ$
- Φάσμα συχνότητας JONSWAP
- Κατευθυντική διανομή κυματισμών (directional wave distribution)

Περίπτωση 6^η αιολικό πάρκο με 1 ανεμογεννήτρια (No5):

- Σημαντικό ύψος κύματος, $H_{m0} = 1,37m$
- Φασματική περίοδος αιχμής, $T_p = 10,18s$
- Μέση κατεύθυνση κυμάτων, $MWD = 113,46^\circ$
- Φάσμα συχνότητας JONSWAP
- Κατευθυντική διανομή κυματισμών (directional wave distribution)

Περίπτωση 7^η αιολικό πάρκο χωρίς ανεμογεννήτριες:

- Σημαντικό ύψος κύματος, $H_{m0} = 1,37m$
- Φασματική περίοδος αιχμής, $T_p = 10,18s$
- Μέση κατεύθυνση κυμάτων, $MWD = 180,00^\circ$
- Φάσμα συχνότητας JONSWAP
- Κατευθυντική διανομή κυματισμών (directional wave distribution)

Περίπτωση 8^η αιολικό πάρκο με 12 ανεμογεννήτριες:

- Σημαντικό ύψος κύματος, $H_{m0} = 1,37m$
- Φασματική περίοδος αιχμής, $T_p = 10,18s$
- Μέση κατεύθυνση κυμάτων, $MWD = 180,00^\circ$
- Φάσμα συχνότητας JONSWAP
- Κατευθυντική διανομή κυματισμών (directional wave distribution)



6.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΩΝΤΑΣ ΤΗ ΒΑΘΥΜΕΤΡΙΑ

Η περιοχή μελέτης έχει έκταση 10.0km x 2.5km (εικόνα 6.2) και τα στοιχεία της βαθυμετρίας ελήφθησαν από το Ελληνικό Κέντρο Έρευνας και Θαλάσσιων Ερευνών (ΕΛΚΕΘΕ), μετά από επί τόπου μετρήσεις για λογαριασμό του Ευρωπαϊκού προγράμματος COCONET.

Κατά τη σύσταση της βαθυμετρίας στο MIKE 21 BW, θα πρέπει να έχουμε κατά νου ότι τα βάθη νερού καθορίζουν τις κυματικές συνθήκες που μπορούν να διαμορφωθούν. Το μέγιστο βάθος του νερού περιορίζει την ελάχιστη περίοδο του κύματος που μπορεί να διαμορφωθεί, καθώς και το ελάχιστο βάθος των υδάτων μπορεί να περιορίσει το ύψος των κυμάτων, αν η θραύση του κύματος δεν περιλαμβάνεται. Περαιτέρω, το ρηχό βάθος του νερού έχει ως αποτέλεσμα μικρά μήκη κύματος, πράγμα που συνεπάγεται μικρή απόσταση του πλέγματος το οποίο και πάλι οδηγεί σε αύξηση του υπολογιστικού χρόνου. Ως εκ τούτου, μερικές φορές είναι αναγκαίο να τροποποιηθεί η βαθυμετρία ώστε να επιτευχθεί ένας αποδεκτός συμβιβασμός ανάμεσα σε μία σωστή βαθυμετρία και σωστές συνθήκες κύματος.



Εικόνα 6.2: Βαθυμετρία από ΕΛΚΕΘΕ στην οποία φαίνεται ακριβώς η περιοχή μελέτης.

6.2.1 ΓΕΝΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ ΠΡΙΝ ΤΗ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΗΣ ΒΑΘΥΜΕΤΡΙΑΣ

Η διακύμανση του βάθους του νερού στις Διαπόντιους Νήσους είναι μεγάλη και ως εκ τούτου θα επηρεάσει τη διάδοση και το μετασχηματισμό των κυμάτων, για αυτό είναι απαραίτητο τα όρια του μοντέλου να τοποθετηθούν μακριά από την περιοχή



του κύριου ενδιαφέροντος. Περαιτέρω, είναι επιθυμητό να έχουμε τα όρια σε μια περιοχή με σχετικά μικρή διακύμανση του βάθους του νερού.

Στη συνέχεια θα πρέπει να αποφασιστεί η απόσταση του πλέγματος του μοντέλου καθώς και το χρονικό βήμα λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω. Το MIKE 21 BW διαθέτει ένα εξαιρετικό εργαλείο το MIKE 21 BW Model Setup Planner με το οποίο μπορούμε να επιλέξουμε όλες τις παραμέτρους που χρειαζόμαστε για τη δημιουργία του μοντέλου, έτσι ώστε να μην υπάρχουν αστάθειες στο μοντέλο και να είναι εντός των περιορισμών για την χρήση των ενισχυμένων εξισώσεων Boussinesq. Η επιλογή των παραμέτρων αυτών έγινε με βάση το δυσμενέστερο σενάριο που είναι αυτό με τη μικρότερη περίοδο, δηλαδή για $T = 8,51s$.

The screenshot displays the MIKE 21 BW Model Setup Planner interface. On the left, the 'Define your model' section includes input fields for various parameters: Max. water depth (55), Min. water depth (3), Model extent in X-direction (10000), Model extent in Y-direction (2500), Percentage of water points (100), Max. distance for waves to propagate (10000), Time required for calculation of statistics (20), Computational points per CPU second (450000), Spectral peak period (8.51), and options for wave breaking/shoreline. The 'Calculate simulation period' section shows a total simulation time of 41.88 minutes. The 'Calculate and check/evaluate' section provides a table of upper limits and suggestions for T_{min} , dx , and dt .

	Classical eq.	Enhanced eq.
Min. wave period, T_{min} (s)	12.6	8.51
Max. spatial resolution, dx	9.68	6.41
Max. time step, dt (s)	0.416	0.243
Min. wave period, T_{min} (s) (Own suggestion)	12.6	8.51
Spatial resolution dx	9.68	5
Time step, dt (s)	0.416	0.2
Max. ratio h/L_0 for T_{min}	0.2216	0.4859
Max. ratio h/L_0 for T_p	0.0265	0.0265
Min. ratio L/dx for T_{min}	6.9753	8.9808
Min. ratio L/dx for T_p	4.6388	8.9808
Ratio T/dt for T_{min}	30.288	42.55
Ratio T/dt for T_p	20.456	42.55
Max. Courant Number	0.9987	0.9296
Estimated CPU time (hours)	0.9996	7.7749
Estimated RAM (MB)	30.128	96.225

Εικόνα 6.3: Το MIKE 21 BW Model Setup Planner για την προσομοίωση του αιολικού πάρκου στις Διαπόντιους Νήσους.



Από την παραπάνω εικόνα 6.3 παρατηρούμε για την περιοχή του μοντέλου μας ότι:

α) Το μέγιστο βάθος νερού είναι 55m και ότι το ελάχιστο βάθος είναι 3m. Τιμές βάθους από 0,2m έως 3m αντικαταστάθηκαν όλες από την τιμή των 3m, ώστε να πληρείται ο περιορισμός του ελάχιστου βάθους για την συγκεκριμένη περίοδο και μάλιστα από τη στιγμή που η μελέτη μας δεν περιλαμβάνει θραύση κύματος, ώστε να αποφύγουμε τη θραύση σε αυτές τις περιοχές. Η περιοχή αυτή βρίσκεται ανατολικά του πάρκου σε αρκετά μεγάλη απόσταση και δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα.

β) Η έκταση του μοντέλου στη x διεύθυνση είναι 10000m και στην y είναι 2500m.

γ) Το ποσοστό της περιοχής του μοντέλου που καλύπτεται από νερό είναι 100%.

δ) Η μέγιστη απόσταση για την διάδοση του κυματισμού από τη μία άκρη στην άλλη είναι 10000m.

ε) Ο απαιτούμενος χρόνος για τον υπολογισμό των στατιστικών του κύματος στο χώρο του μοντέλου είναι 20min (default). Αυτός ο χρόνος είναι συνήθως επαρκής για μια ασφαλή στατιστική εκτίμηση για το σημαντικό ύψος κύματος (ή για τον συντελεστή κυματικής διαταραχής) σε προβλήματα με σχετικά μικρές περιόδους.

Έχοντας επιλέξει τα παραπάνω παίρνουμε τα εξής αποτελέσματα για το μοντέλο μας:

α) Ο συνολικά απαιτούμενος χρόνος για την προσομοίωση είναι 41,88min, ο οποίος περιλαμβάνει τον απαιτούμενο χρόνο για την διάδοση των κυμάτων από τη γραμμή γένεσης των κυμάτων σε όλο το μοντέλο και τον απαιτούμενο χρόνο για τον υπολογισμό των στατιστικών του κύματος. Τελικά επιλέγουμε τα **45min**.

β) Χρησιμοποιώντας τις ενισχυμένες εξισώσεις Boussinesq για την επίλυση του μοντέλου, επιλέγουμε για την απόσταση του πλέγματος και το χρονικό βήμα:

- $\Delta x = 5m$
- $\Delta t = 0,2s$

ώστε να πληρούνται οι προϋποθέσεις για το μέγιστο λόγο $h / L_0 < 0,50$ και το μέγιστο αριθμό Courant, $Cr < 1$ (**maxCr = 0,9296**).

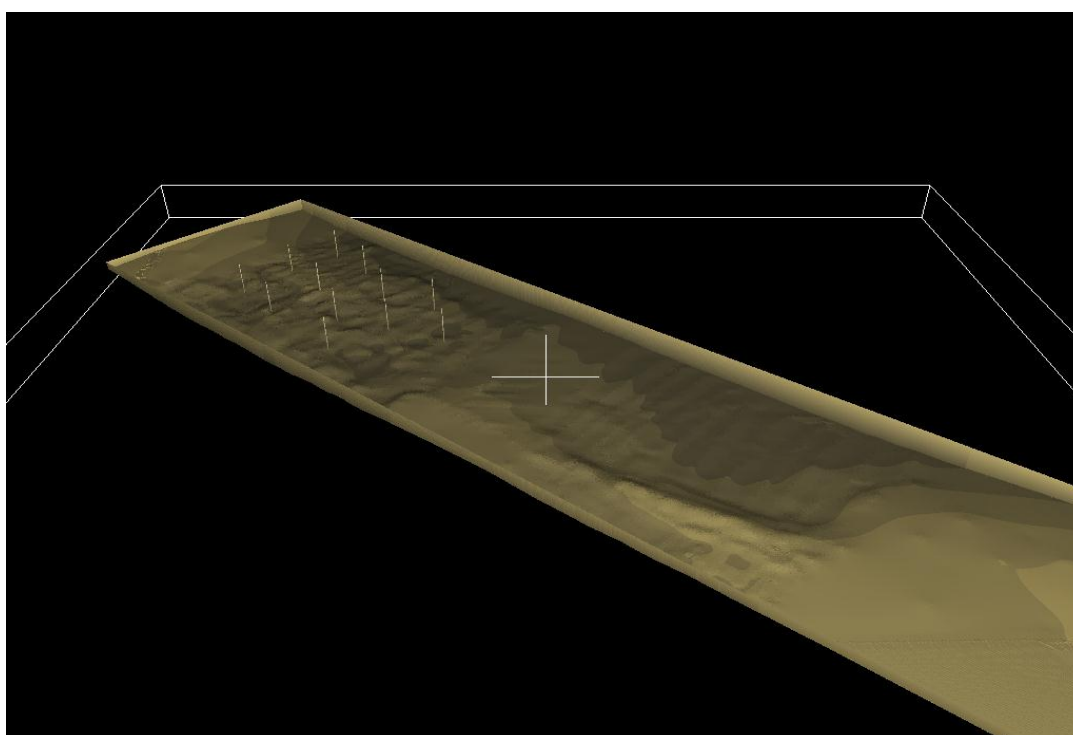
γ) Η εκτίμηση για τον υπολογιστικό χρόνο του μοντέλου με βάση και τον υπολογιστή που θα χρησιμοποιηθεί είναι περίπου 7 με 8 ώρες.

6.2.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΩΝΤΑΣ ΤΗΝ ΤΕΛΙΚΗ ΒΑΘΥΜΕΤΡΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

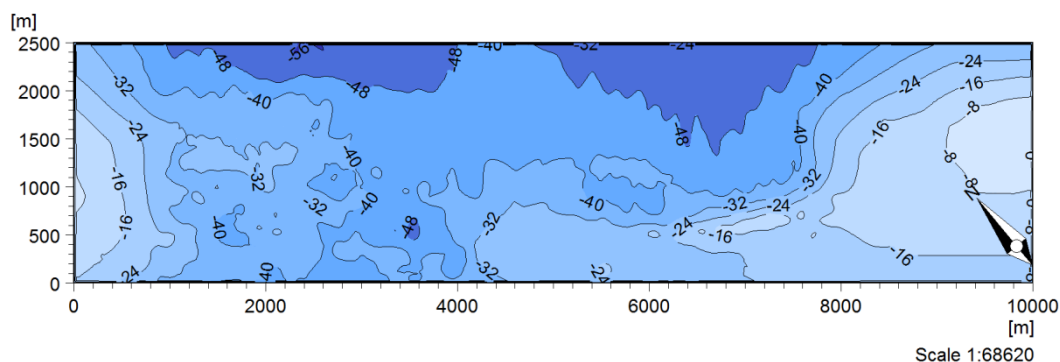
Όπως φαίνεται από την εικόνα 6.2 οι μετρήσεις έχουν ένα προσανατολισμό. Για την καλύτερη επεξεργασία των δεδομένων και των αποτελεσμάτων έγινε μια περιστροφή αυτής της βαθυμετρίας κατά 40° , με διεύθυνση αντίθετη από την φορά των δεικτών του ρολογιού. Για το λόγο αυτό και για να υπάρχει συνέπεια μεταξύ



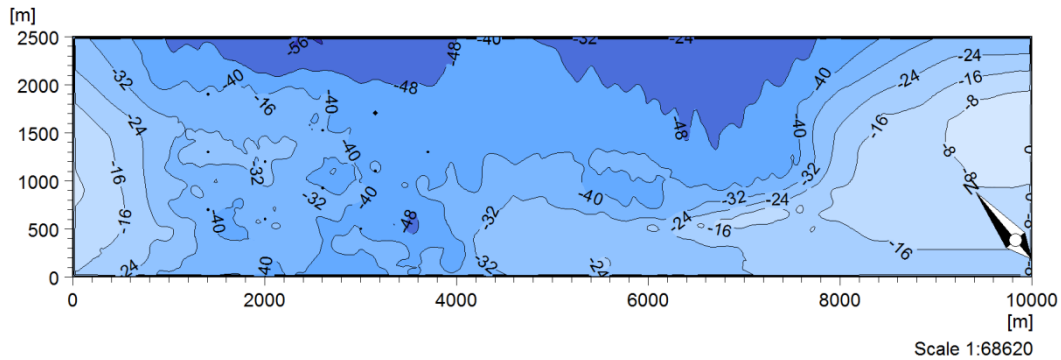
των πραγματικών μετρήσεων της διεύθυνσης των κυμάτων της περιοχής και των αποτελεσμάτων του μοντέλου, οι υπάρχουσες τιμές έχουν αυξηθεί κατά 40° . Χρησιμοποιήθηκε το γεωγραφικό σύστημα UTM-34. Λόγω της απόκλισης κατά $1,02^\circ$, η συνολική μεταβολή στον προσανατολισμό είναι $41,02^\circ$ και αυτή είναι η τελική γωνία που προστίθεται στο πρόγραμμα, ώστε να υπάρχει ταύτιση μεταξύ πραγματικότητας και μοντέλου. Η τελική βαθυμετρία μετά από επεξεργασία αποτελείται από 2001 σημεία στη διεύθυνση x και 501 σημεία στη διεύθυνση y, με απόσταση 5m μεταξύ τους και φαίνεται στις εικόνες 6.4, 6.5, 6.6. Στην εικόνα 6.4 μπορούμε να παρατηρήσουμε την απόλυτη ταύτιση με την πραγματικά μετρούμενη μορφολογία του πυθμένα που φαίνεται στην εικόνα 6.2.



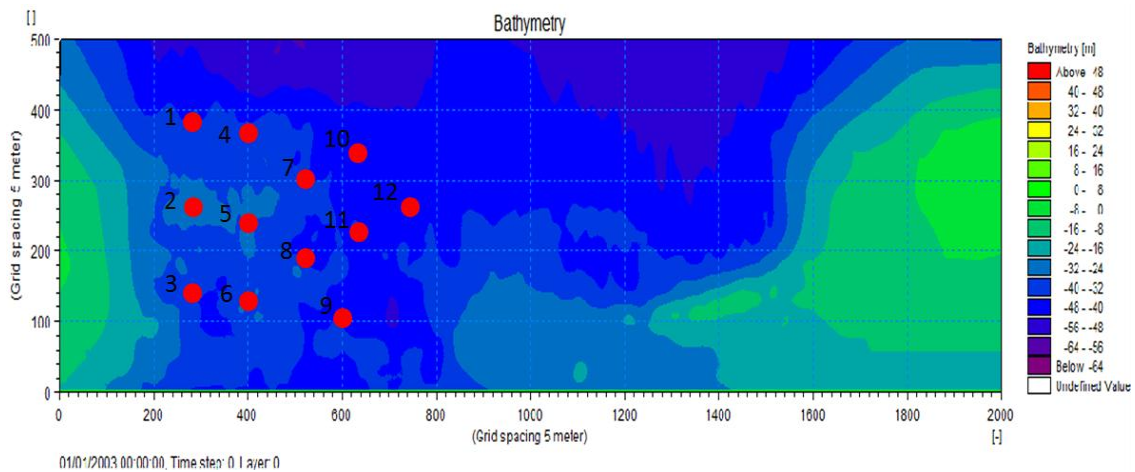
Εικόνα 6.4: Τρισδιάστατη απεικόνιση της βαθυμετρίας που εισάγεται στο μοντέλο.



Εικόνα 6.5: Δισδιάστατη απεικόνιση της βαθυμετρίας που εισάγεται στο μοντέλο με τις ισοβαθείς της.



Εικόνα 6.6α: Δισδιάστατη απεικόνιση της βαθυμετρίας που εισάγεται στο μοντέλο με τις θέσεις των 12 ανεμογεννητριών.



Εικόνα 6.6β: Δισδιάστατη απεικόνιση της βαθυμετρίας που εισάγεται στο μοντέλο με τις θέσεις των 12 ανεμογεννητριών αριθμημένες και μεγεθυμένες.

Στις περισσότερες εφαρμογές του MIKE 21 BW, οι κυματικές συνθήκες εισόδου επιβάλλονται μέσω της εσωτερικής παραγωγής κυμάτων. Αυτό γίνεται με την προσθήκη της απελευθέρωσης του προσπίπτοντος πεδίου κύματος κατά μήκος της γραμμής που ορίζεται ως γραμμή γένεσης κυματισμού. Ένα από τα πλεονεκτήματα της χρήσης εσωτερικών γραμμών κυματισμού είναι ότι το απορροφητικό στρώμα μπορεί να τοποθετηθεί πίσω από τη γραμμή γένεσης, για να απορροφήσει πλήρως τα κύματα τα οποία εξέρχονται του μοντέλου. Αυτό σημαίνει ότι όλα τα ανοιχτά όρια πρέπει να κλείσουν. Στην περίπτωση των ανοιχτών ορίων ο μελετητής μπορεί να εισάγει μέσω ενός αρχείου .dfs0/.dfs1 την εισερχόμενη κυματική ενέργεια στην περιοχή μελέτης μέσω μιας χρονοσειράς ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας. Η ανακλαστικότητα ωστόσο των ανοιχτών ορίων καθιστά προτιμότερη την προσομοίωση των εισερχόμενων κυματισμών με τη χρήση εσωτερικού κυματιστήρα



(internal wave generation), όπως συμβαίνει και στη συγκεκριμένη μελέτη παράλληλα με κλειστά όρια και απορροφητικά φίλτρα.

6.2.3 ΔΗΜΙΟΥΡΓΩΝΤΑΣ ΤΟ ΣΤΡΩΜΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ (SPONGE LAYER)

Το στρώμα απορρόφησης αποτελεί ένα «τέχνασμα», το οποίο θα εξασφαλίσει μια πιο σταθερή αριθμητική λύση και θα μειώσει τον κίνδυνο για μία αστοχία του μοντέλου (blow-up) που προκαλείται επειδή δε συμπεριλαμβάνεται η θραύση των κυματισμών. Η τροποποίηση αυτή δεν θα επηρεάσει τις συνθήκες προσομοίωσης του κύματος στην υπό μελέτη περιοχή. Αρχικά αλλάζουμε στη βαθυμετρία την τιμή της στεριάς από 10 σε 5 και στη συνέχεια κατασκευάζουμε το στρώμα απορρόφησης μέσω του εργαλείου του MIKE 21 BW, 'Generate Sponge and Porosity Layers Maps'.

Parameter Settings

Specify Parameters

On this page you specify the parameters for the calculation of the sponge or porosity (friction) coefficient maps.

The sponge map is generated using 'Sponge Layer Generation' and the porosity or friction maps by choosing the 'Porosity/Friction Layer Generation'.

Select area: x: begin: 0, end: 2000, y: 0, 500

Number of layers: 40

Add values along code value: 5

Include comers in search

Sponge Layer Generation

Base value: 9

Power value: 0.8

Porosity/Friction Layer Generation

Value: 0.85

Background value: 1

< Back, Next >, Cancel, Help

Εικόνα 6.7: Ρύθμιση παραμέτρων για τη δημιουργία της στοιβάδας απορρόφησης.

Οι παράμετροι για την κατασκευή του στρώματος απορρόφησης κρατήθηκαν σταθεροί για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, για την καλύτερη αξιολόγηση



και σύγκριση των αποτελεσμάτων. Αφού ορίσουμε τους κόμβους της περιοχής εισαγωγής και την τιμή της ξηράς, είναι επίσης σημαντικό να οριστεί το πάχος του στρώματος. Πολύ καλά χαρακτηριστικά απορρόφησης του κύματος λαμβάνονται για ένα πλάτος στρώματος απορρόφησης από μία έως δύο φορές το μήκος κύματος που αντιστοιχεί στο πιο ενεργητικό κύμα. Καθώς το μέγιστο βάθος είναι 55m και η μεγαλύτερη φασματική περίοδος αιχμής του κύματος από όλες τις περιπτώσεις που θα εξεταστούν είναι $T = 10,18s$, το αντίστοιχο μήκος κύματος είναι περίπου 162m κοντά στο υπεράκτιο όριο με βάση και τη σχέση $L_0 = gT^2/2\pi \approx 1,56T^2$. Αντίστοιχα για τη μικρότερη περίοδο $T = 8,51s$, το αντίστοιχο μήκος κύματος είναι περίπου 113m κοντά στο υπεράκτιο όριο. Έχοντας κατά νου ότι η απόσταση του πλέγματος που χρησιμοποιούμε είναι 5m, συμπεραίνουμε ότι ένα στρώμα πλάτους 40 κελιών πλέγματος είναι επαρκές και στις δύο περιπτώσεις.

Ο συντελεστής του στρώματος απορρόφησης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$C_{\text{sponge}} = a^{r^{2-1}}, i = 1, N_{\text{sponge}}$$

όπου N_{sponge} είναι ο αριθμός των γραμμών που αποτελούν το στρώμα απορρόφησης και στην περίπτωση μας είναι ίσο με 40.

6.2.4 ΔΗΜΙΟΥΡΓΩΝΤΑΣ ΤΟ ΣΤΡΩΜΑ ΠΟΡΩΔΟΥΣ (POROSITY LAYER)

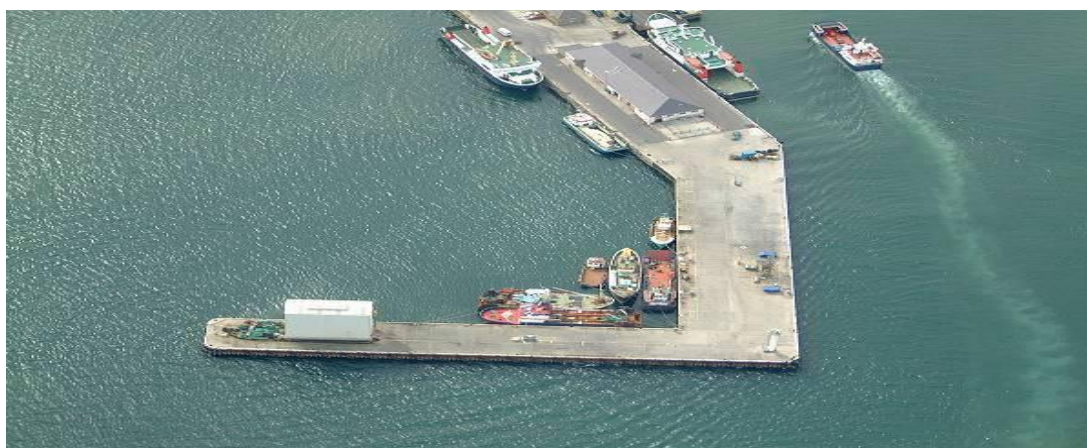
Ένα στρώμα πορώδους χρησιμοποιείται για να μοντελοποιήσει είτε μερική ανάκλαση και / ή μετάδοση διαμέσου διαφόρων τύπων κατασκευών, όπως λιμένες, κυματοθραύστες, λιμενοβραχίονες κ.α. Η τυπική διαδικασία είναι και πάλι να αλλάξουμε την αρχική τιμή της βαθυμετρίας π.χ. από 10 σε 8 και να κατασκευάσουμε το στρώμα πορώδους μέσω του εργαλείου του MIKE 21 BW, 'Calculate Reflection Coefficient'. Στην παρούσα εργασία δεν κάνουμε χρήση αυτής της δυνατότητας, διότι δεν διαθέτουμε τέτοιου είδους κατασκευή, ούτε ακτή με αντίστοιχα χαρακτηριστικά. Οι ανεμογεννήτριες είναι θεμελιωμένες σε μεταλλικό μονοπάσσαλο, ο οποίος θεωρείται ότι δεν έχει κάποιο πορώδες. Στη συνέχεια καθώς το πορώδες του μοντέλου εξαρτάται από την πορώδη δομή, την αντανάκλαση των κυμάτων, τις τοπικές συνθήκες των κυμάτων και το βάθος, το πορώδες είναι βασικά μια παράμετρος βαθμονόμησης του μοντέλου. Το μοντέλο συνήθως διαιρείται σε ένα μικρό αριθμό περιοχών με το ίδιο πορώδες ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής και τα υλικά από τα οποία αποτελείται.



Πίνακας 6.1: Περιοχές του με διαφορετικές τιμές πορώδους [20]

Area number in Figure 3.12	Type of structure	Estimated reflection coefficient R
1	Rocky beach, rock armour, see Figure 1.2	0.4
2	Wave absorber (Shed units), see Figure 2.26	0.4
3	Rock armour, see Figure 2.26, Figure 1.2 and Figure 2.26, slope ~ 1:1.5	0.3-0.4
4	Rock armour, see Figure 2.26, Figure 1.2 and Figure 2.26, slope ~ 1:5	0.2-0.3

Το πρόγραμμα αφού υπολογίσει τον συντελεστή πορώδους, στη συνέχεια υπολογίζει το πορώδες και ολόκληρο το χάρτη κατανομής του πορώδους του μοντέλου.



Εικόνα 6.8: Αεροφωτογραφίες της περιοχής Kirkwall Marine για την επιλογή των παραμέτρων του πίνακα 6.1. [20]



6.3 ΔΗΜΙΟΥΡΓΩΝΤΑΣ ΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΓΙΑ ΤΗ ΓΕΝΕΣΗ ΤΩΝ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ

Μέσω της γραμμής γένεσης των κυματισμών (wave generation line) προσομοιώνονται οι κυματισμοί που έρχονται από το υπεράκτιο περιβάλλον. Το πλεονέκτημα της χρήσης αυτού του εργαλείου είναι ότι το στρώμα απορρόφησης μπορεί να τοποθετηθεί πίσω από τη γραμμή γένεσης, ώστε να απορροφήσει τα κύματα που εγκαταλείπουν το χώρο μελέτης. Τα κύματα διαδίδονται πάντα από την αριστερή πλευρά της γραμμής, θέση (1) (εικόνα 4.6), θεωρώντας ότι είμαστε πάνω στη γραμμή. Για παράδειγμα αν τοποθετήσουμε τη γραμμή γένεσης κυματισμού κατά μήκος της νότιας πλευράς, ώστε να αναπαραστήσουμε νότιους ανέμους, η θέση (1) θα βρίσκεται στα αριστερά και η θέση (2) (εικόνα 4.6) θα βρίσκεται στα δεξιά. Μερικές φορές για πιο σταθερό μοντέλο μπορεί να χρειαστεί η θέση (1) να τοποθετηθεί λίγο εντός της ζώνης απορρόφησης, για να έχουμε πιο σταθερή λύση στα ρηχά νερά, χωρίς να επηρεαστούν τα αποτελέσματα στην περιοχή κύριου ενδιαφέροντος.

Τα δεδομένα εισάγονται μέσω του εργαλείου του MIKE 21 Toolbox 'Random Wave Generation' για τον σχηματισμό κατευθυντικών κυματισμών. Η διαδικασία είναι ίδια και για τις 8 περιπτώσεις, απλά θα υπάρχουν διαφορές ως προς την κατεύθυνση του κυματισμού, το σημαντικό ύψος κύματος και την περίοδο του κύματος ανάλογα με την περίπτωση. Οι παράμετροι όμως που αφορούν την περίπτωση με και χωρίς την παρουσία του αιολικού πάρκου κρατήθηκαν σταθεροί, για την καλύτερη αξιολόγηση και σύγκριση των αποτελεσμάτων, όπως έχει αναφερθεί ξανά. Ενδεικτικά στις εικόνες 6.9, 6.10, 6.11 και 6.12 παρουσιάζεται η δημιουργία της γραμμής γένεσης κυματισμών για την 1^η περίπτωση για:

- Σημαντικό ύψος κύματος, $H_{m0} = 3,83\text{m}$
- Φασματική περίοδος αιχμής, $T_p = 8,51\text{s}$
- Μέση περίοδος αιχμής, $MWD = 150,82^\circ$
- Φάσμα συχνότητας JONSWAP
- Κατευθυντική διανομή κυματισμών (directional wave distribution)

Οι τιμές γ , σ_a , σ_b είναι συντελεστές σχήματος που αντιστοιχούν σε ένα πρότυπο φάσμα JONSWAP:

$S(f) = S_{PM}(f) \cdot \gamma^\alpha$, όπου $S_{PM}(f)$ είναι το φάσμα Pierson-Moskowitz

$$\alpha = \exp[-1/2 \left(\frac{f - f_p}{\sigma f_p} \right)^2]$$

$\sigma = \sigma_a$ για $f \leq f_p$ και $\sigma = \sigma_b$ για $f > f_p$

όπου f είναι η συχνότητα του κύματος και f_p είναι η συχνότητα αιχμής του κύματος.



JONSWAP Spectrum Definition

JONSWAP Spectrum Definition
On this page you select parameters for JONSWAP spectrum definition.

JONSWAP Spectrum Defined by

Wind velocity 10 m above sea and fetch length

Significant wave height, peak period, sigma and gamma

Wind velocity at 10 m Shape parameters

Fetch length Gamma

Significant wave height [Hm0] Sigma_a

Peak wave period [Tp] Sigma_b

< Back Next > Cancel Help

Εικόνα 6.9: Παράμετροι που αφορούν το φάσμα συχνοτήτων JONSWAP.

Wave Generation

Wave Generation
On this page you can specify parameters for the wave generation.

Type of Waves:

One-dimensional

Unidirectional

Directional

Line Extent:

Start X

Start Y

End X

End Y

Auxiliary Parameters Specification:

Initial random number (seed)

Water depth

Smallest wave period in series

Rescale truncated spectrum

Grid Spacing:

X direction

Y direction

< Back Next > Cancel Help

Εικόνα 6.10: Παράμετροι που αφορούν τη γραμμή γένεσης κυματισμών.



Time Series Description

Specify Historical Date
On this page you specify the historical date of the first time step, number of time steps and the physical time step in seconds.

Specify Time Series

Calendar: 01/01/2015 12:00:00 → 01/01/2015 12:45:00

No. of steps: 13501

Interval: 0.2 [s]

< Back Next > Cancel Help

Εικόνα 6.11: Χρονική σειρά και χρονικό βήμα των κυματικών δεδομένων.

Description of Directional Distribution

Description of Directional Distribution
On this page you select one of directional distributions.

Select Convention of angles

Scientific / BW

Meteorological

Specify Grid Orientation

Grid Orientation: 0

Select Type of Directional Distribution

Frequency Independent Distribution

COSⁿ (dir - main dir)

Normal (i.e. Gaussian)

Uniform (i.e. Rectangular)

Frequency Dependent Distribution

COS^{2s} ((dir - main dir)/2)

User defined directional spectrum

Specify Spreading Parameters

Main wave direction: 150.82

Max deviation from main dir.: 30

Power of cosine: 8

Variance: 0.5

< Back Next > Cancel Help

Εικόνα 6.12: Καθορισμός της κατεύθυνσης των κυματισμών.

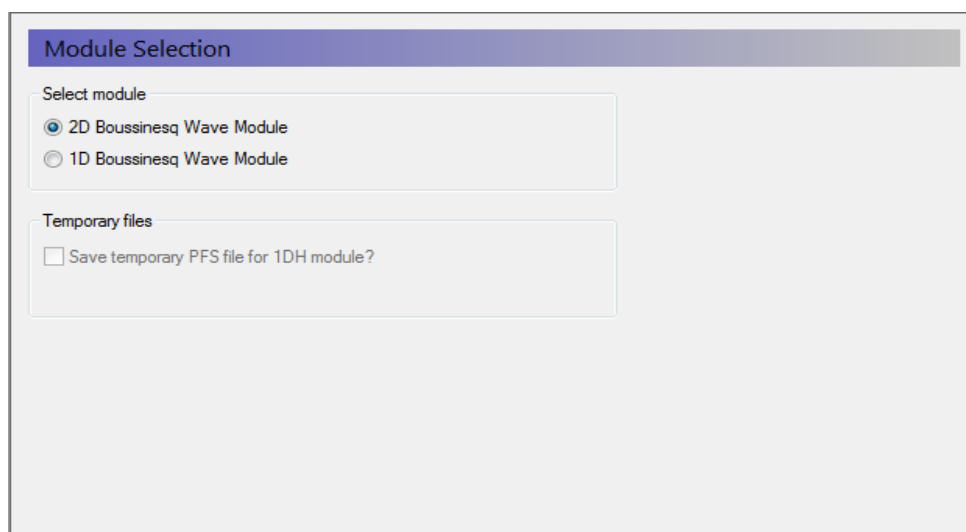


6.4 ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΟΥ ΜΙΚΕ 21 BW

Όλες οι απαραίτητες ρυθμίσεις, καθώς και οι πληροφορίες που θα αντλήσει το λογισμικό για να κάνει τους υπολογισμούς του, π.χ. βαθυμετρία, στρώμα απορρόφησης, στρώμα πορώδους, γραμμή γένεσης κυματισμών κ.α., γίνονται μέσω του 'Boussinesq Waves (.bw)'. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι ρυθμίσεις που έγιναν για την 1^η περίπτωση (εικόνες 6.13, 6.14, 6.15, 6.16), για αιολικό πάρκο χωρίς ανεμογεννήτριες:

- Σημαντικό ύψος κύματος, $H_{m0} = 3,83\text{m}$
- Φασματική περίοδος αιχμής, $T_p = 8,51\text{s}$
- Μέση κατεύθυνση κύματος, $MWD = 150,82^\circ$
- Φάσμα συχνότητας JONSWAP
- Κατευθυντική διανομή κυματισμών (directional wave distribution)

Πρέπει να υπενθυμίσουμε ότι όλες οι παράμετροι που επιλέχθηκαν για την προσομοίωση του μοντέλου κρατήθηκαν σταθεροί, ώστε να μπορεί να γίνει άμεση σύγκριση και αξιολόγηση μεταξύ των διαφορετικών περιπτώσεων.



Εικόνα 6.13: Επιλογή της ενότητας (υπορουτίνας) προσομοίωσης (module).



Type of Equation

Deep Water Terms

Exclude

Include

Dispersion Factor

Linear dispersion factor: 0.0666667

Εικόνα 6.14: Επιλογή του συντελεστή διασποράς B.

Numerical Parameters

Space discretisation of the convective terms

Quadratic upwinding with simple upwinding at steep gradients and near land

Time discretisation of the cross-Boussinesq terms

Time-extrapolation factor: 0.8

Depth-dependent time-extrapolation:

Exclude

Include

For water depths greater than: 40

use time-extrapolation factor: 0.7

Εικόνα 6.15: Αριθμητικές παράμετροι που αφορούν τη διακριτοποίηση του χώρου και του χρόνου των όρων Boussinesq.

Simulation Period

Simulation Period

Number of time steps: 13501

Time step interval: 0.2 [sec]

Simulation start time: 01/01/2015 12:00:00

Simulation end time: 01/01/2015 12:45:00

Warm-up Period

Number of time steps: 0

Courant Number

Max Courant No: 0.94355

Εικόνα 6.16: Προσομοίωση του χρόνου με την επιλογή του χρονικού βήματος.



Στην παρούσα εργασία περιλαμβάνεται επίσης ένα φίλτρο σε βάθος μικρότερο από 3m (στα ανατολικά του μοντέλου), για πιο σταθερή λύση στα ρηχά νερά και να αποφευχθούν αστάθειες του προγράμματος. Δεν περιλαμβάνεται η τριβή του πυθμένα, το ιξώδες του νερού, η θραύση των κυματισμών με δεδομένο ότι δεν έχουμε ακτογραμμή στο μοντέλο για να θεωρήσουμε μετακίνηση ακτογραμμής ή κάποια κατασκευή που να απαιτείται καθώς η κατασκευή μας είναι σχετικά μικρή. Εάν είχε συμπεριληφθεί η θραύση κυματισμών στο μοντέλο, τότε θα απαιτούνταν μία απόσταση πλέγματος μεταξύ 0,5-2m για να επιλύσει τα θραυόμενα κύματα και το χρονικό βήμα θα έπρεπε να μειωθεί τόσο, ώστε ο αριθμός Courant να παραμείνει κάτω από τη μονάδα. Όλο αυτό θα είχε ως συνέπεια σημαντική αύξηση του αριθμού των υπολογιστικών σημείων και της απαιτούμενης υπολογιστικής μνήμης (RAM), με αποτέλεσμα να απαιτείται υπολογιστικός χρόνος μπορεί και 2 με 3 φορές περισσότερο.

Η μέση κατεύθυνση κύματος που αναφέρεται σχετικά συχνά στην παρούσα εργασία, αφορά την κατεύθυνση του κύματος με βάση την αρχή συντεταγμένων που χρησιμοποιεί το λογισμικό και δεν είναι οι πραγματικές διευθύνσεις.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΘΑΛΑΣΣΑΣ

7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αναλυτικά οι τρεις καταστάσεις θάλασσας, τα αποτελέσματα που προκύπτουν σε σχέση με τα πιο σημαντικά κυματικά μεγέθη και γίνεται αξιολόγηση και σύγκριση των αποτελεσμάτων που αφορούν αντίστοιχες περιπτώσεις. Οι δύο πρώτες αφορούν πραγματικές καταστάσεις θάλασσας και μελετώνται περαιτέρω τρεις περιπτώσεις σε κάθε μια, ενώ η τρίτη είναι θεωρητική με σκοπό να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα και μελετώνται περαιτέρω δύο περιπτώσεις.

7.2 ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΘΑΛΑΣΣΑΣ - ΣΕΝΑΡΙΟ 1

Το πρώτο σενάριο είναι σχετικό με την κατάσταση θάλασσας με το υψηλότερο σημαντικό ύψος κύματος (H_{m0}) πάνω από την περιοχή του αιολικού πάρκου, που παρατηρείται μεταξύ των ετών 1979 και 2013. Η τιμή αυτή είναι αποτέλεσμα της ανάλυσης δεδομένων που έγιναν από το Ελληνικό Κέντρο Έρευνας και Θαλάσσιων Ερευνών (ΕΛΚΕΘΕ) στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού προγράμματος COCONET. Οι επιλεγμένες τιμές για τη Μέση Κατεύθυνση του Κύματος (MWD) και την Περίοδο Αιχμής του Κύματος (T_p), είναι οι τιμές που αντιστοιχούν στο υψηλότερο $H_{m0} = 3,83m$. Η ημερομηνία κατά την οποία παρατηρείται το υψηλότερο H_{m0} ήταν στις 4 Οκτωβρίου 1992 και αντιστοιχούσε σε $MWD = 160,2^\circ$ και $T_p = 8,51s$.

Λαμβάνοντας υπόψη την κατεύθυνση του μέσου κύματος η θάλασσα διαδίδεται από νοτιοανατολικές διευθύνσεις, δηλαδή $160,2^\circ$. Έτσι η ανάντη περιοχή κάθε ανεμογεννήτριας βρίσκεται στο νότιο-ανατολικό άκρο της και η κατάντη περιοχή βρίσκεται στο βόρειο-δυτικό άκρο της. Υπενθυμίζουμε σε αυτό το σημείο ότι λόγω της περιστροφής του μοντέλου κατά 40° αντίθετα από τη φορά των δεικτών του ρολογιού και λόγω της απόκλισης του γεωγραφικού συστήματος κατά $1,02^\circ$ αντίθετα από τη φορά των δεικτών του ρολογιού η μέση κατεύθυνση του κύματος στο μοντέλο, με βάση και τους άξονες αναφοράς του, έγινε $MWD = 150,82^\circ$. Το μοντέλο αποτελείται από ένα ορθογώνιο πλέγμα με 2001 σημεία στον άξονα x και 501 σημεία στον άξονα y, με απόσταση 5m μεταξύ τους, καλύπτοντας συνολικά μία περιοχή $10000 \times 2500m$.

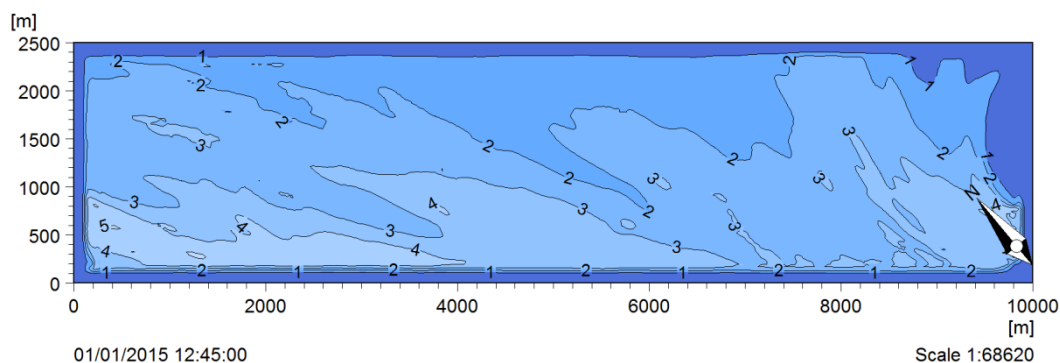
Η αρχική κατάσταση της μορφολογίας του πυθμένα είναι ίδια για όλες τις περιπτώσεις. Τέλος πρέπει να τονιστεί ότι για την καλύτερη αξιολόγηση και σύγκριση των αποτελεσμάτων, επιλέχτηκαν οι ίδιες παράμετροι του λογισμικού.



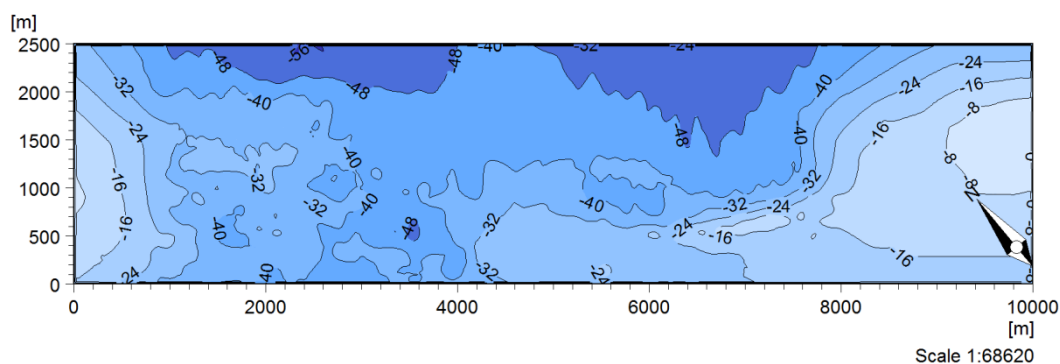
7.2.1 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 1^η - ΠΕΡΙΟΧΗ ΧΩΡΙΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Περίπτωση 1^η περιοχή χωρίς ανεμογεννήτριες:

- Σημαντικό ύψος κύματος, $H_{m0} = 3,83\text{m}$
- Φασματική περίοδος αιχμής, $T_p = 8,51\text{s}$
- Μέση περίοδος αιχμής (μοντέλο), $MWD = 150,82^\circ$
- Φάσμα συχνότητας JONSWAP
- Κατευθυντική διανομή κυματισμών (directional wave distribution)



Εικόνα 7.1: Τιμές του σημαντικού ύψους κύματος περίπτωση 1^η.



Εικόνα 7.2: Βαθυμετρία περιοχής μελέτης.

Η περίπτωση αυτή αφορά την ανοιχτή θάλασσα χωρίς την παρουσία του αιολικού πάρκου και μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι υπάρχουν περιοχές με μεγάλες τιμές του σημαντικού ύψους κύματος που φτάνουν τα 4,8m, οι οποίες επηρεάζονται από τη μορφολογία του πυθμένα, όπως οι απότομες κλίσεις του πυθμένα (κάτω αριστερά), η παρουσία τοπικών υφάλων ή βυθισμάτων (στη θέση 700,100 περίπου του πλέγματος) και η μετάβαση από ρηχό σε βαθύ νερό και το αντίστροφο (βόρεια,



ανατολικά και δυτικά). Για την καλύτερη κατανόηση του πλέγματος, τονίζουμε ότι κάθε σημείο του πλέγματος έχει απόσταση από το γειτονικό του 5m, οπότε η συνολική περιοχή που καλύπτουμε είναι 10km επί 2,5km.

7.2.2 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 2^η - ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕ ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ ΜΕ 12 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Περίπτωση 2^η περιοχή με αιολικό πάρκο με 12 ανεμογεννήτριες:

- Σημαντικό ύψος κύματος, $H_{m0} = 3,83m$
- Φασματική περίοδος αιχμής, $T_p = 8,51s$
- Μέση περίοδος αιχμής (μοντέλο), $MWD = 150,82^\circ$
- Φάσμα συχνότητας JONSWAP
- Κατευθυντική διανομή κυματισμών (directional wave distribution)

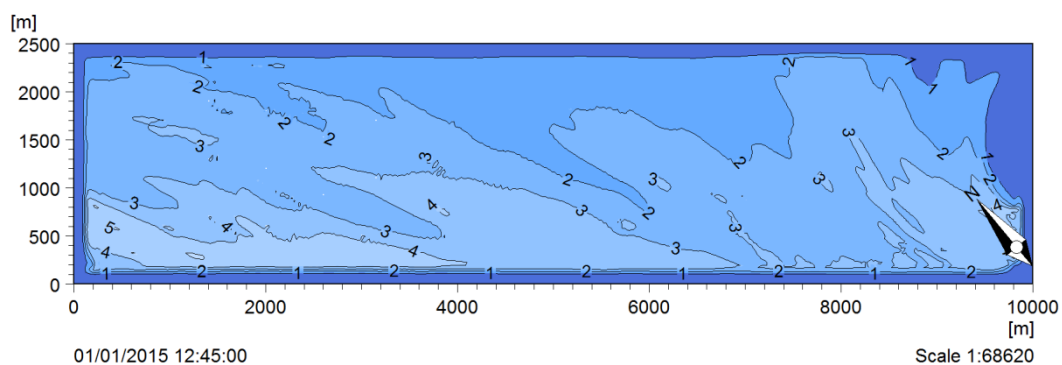
Στην περίπτωση αυτή το αιολικό πάρκο περιλαμβάνει 12 ανεμογεννήτριες διαμέτρου $D = 9m$, σε απόσταση μεταξύ τους περίπου 600m, εγκατεστημένες σε ένα πάσσαλο (monopile), στα ανατολικά της περιοχής του μοντέλου (εικόνα 6.6). Στον πίνακα 7.1 φαίνονται οι συντεταγμένες κάθε μίας ανεμογεννήτριας κατά τη διεύθυνση x και y , ορίζοντας ως αρχή των αξόνων τους άξονες του πλέγματος (σημείο O κάτω αριστερά), σε συντεταγμένες πλέγματος, θυμίζοντας ότι η απόσταση κάθε σημείου του πλέγματος είναι 5m. Επίσης φαίνονται, ο αύξων αριθμός και το βάθος εγκατάστασης z σε m κάθε ανεμογεννήτριας. Από τον πίνακα 7.1 προκύπτει ότι το αιολικό πάρκο εκτείνεται σε μια περιοχή (με συντεταγμένες πλέγματος [$\times 5m$]) στον άξονα x από 280-740 και στον άξονα y από 100-380.

Η θέση των γεννητριών επιλέχτηκε με βάση το τοπικό βάθος της περιοχής εγκατάστασης, της μεταξύ τους απόστασης και της απόστασής τους από τη γραμμή γένεσης των κυματισμών και τα όρια του μοντέλου για την αποφυγή επιρροής των αποτελεσμάτων από ανακλάσεις στα όρια, αν και για το λόγο αυτό υπάρχουν τα στρώματα απορρόφησης. Η βαθυμετρία είναι ίδια με την 1^η περίπτωση, όπως και οι παράμετροι που επιλέχτηκαν για το στήσιμο του μοντέλου στο λογισμικό MIKE 21 BW.

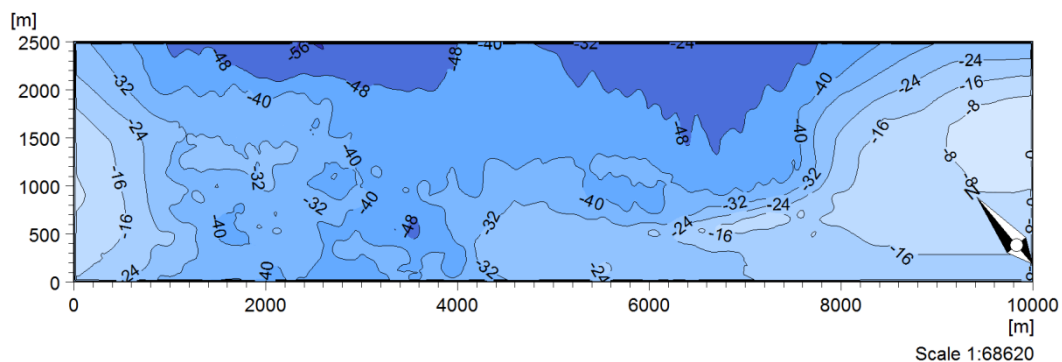


Πίνακας 7.1: Συντεταγμένες και βάθος ανεμογεννητριών που απαρτίζουν το αιολικό πάρκο

α/α	Συντεταγμένη x [x5m]	Συντεταγμένη y [x5m]	Βάθος z [m]
1	280	380	38,80
2	280	260	29,10
3	280	140	38,60
4	400	360	36,00
5	400	240	29,70
6	400	120	34,60
7	520	305	38,20
8	520	185	39,90
9	600	100	41,10
10	630	340	40,70
11	630	220	39,80
12	740	260	44,10



Εικόνα 7.3: Τιμές του σημαντικού ύψους κύματος περίπτωση 2^η.



Εικόνα 7.4: Βαθυμετρία περιοχής μελέτης.



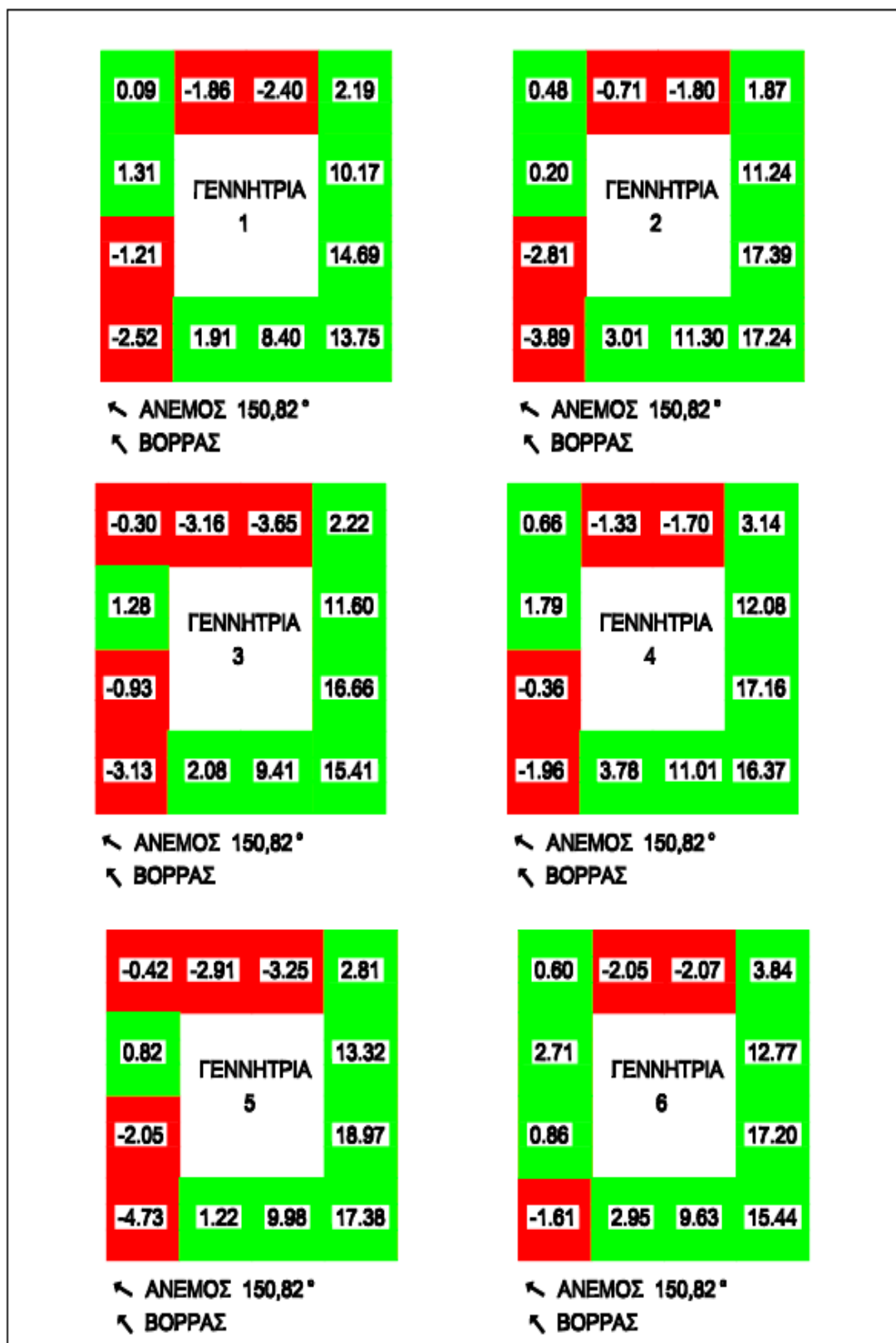
7.2.2.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ 1^{ης} ΚΑΙ 2^{ης} ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΙΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΟΣΩΝ ΑΦΟΡΑ ΤΟ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟ ΥΨΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ

Από τις εικόνες 7.1, 7.3 διαπιστώνουμε ότι σε γενικές γραμμές η παρουσία του αιολικού πάρκου δεν επηρεάζει ιδιαίτερα τις τιμές του σημαντικού ύψους κύματος. Οι περιοχές που εμφάνιζαν υψηλές τιμές, χωρίς την παρουσία του αιολικού πάρκου, είναι ακριβώς ίδιες και όταν υπάρχει το πάρκο. Εκεί όμως που υπάρχει αλλαγή είναι οι περιοχές ακριβώς γύρω από τις ανεμογεννήτριες.

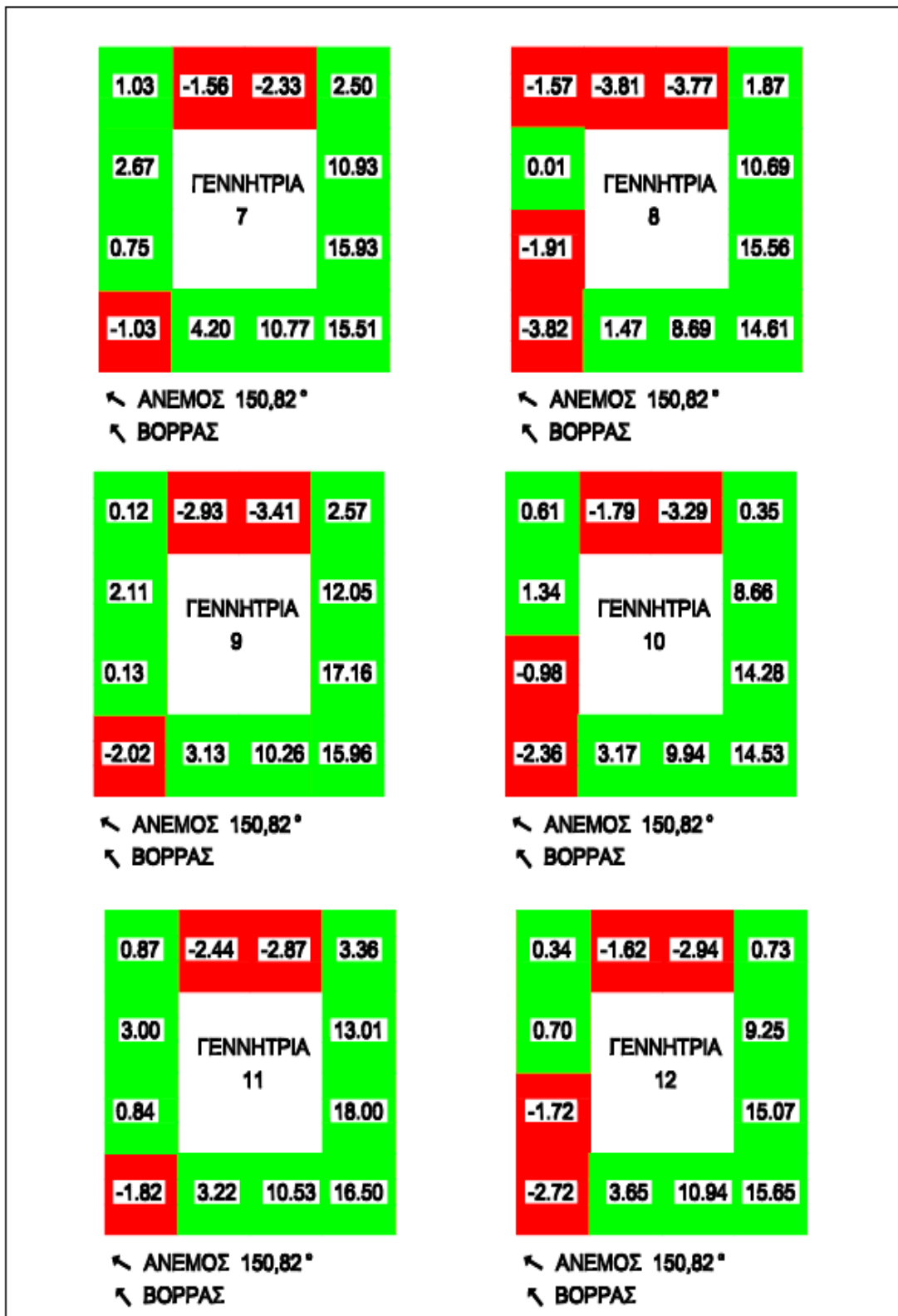
Σε θέσεις ανάντη των ανεμογεννητριών έχουμε έντονη αναρρίχηση με αύξηση του σημαντικού ύψους κύματος από +14% έως +19%, στις πλάγιες θέσεις έχουμε μικρή μείωση από -1% έως -5% και σε θέσεις κατάντη έχουμε μικρές αυξομειώσεις (συνήθως μικρή αύξηση) μεταξύ -2% και +2%, κάτι που οφείλεται στη ροή του νερού όταν συναντά μπροστά της εμπόδιο και τους στροβιλισμούς που ακολουθούν τη ροή. Η ανύψωση αυτή έχει παρατηρηθεί και σε άλλες εργασίες, καθώς και σε πειραματικές δοκιμές, οι οποίες διαπίστωσαν αυτό το φαινόμενο. Η αναρρίχηση αυτή και γενικά η ίδια συμπεριφορά παρατηρήθηκε πιο καθαρά και στις πρότυπες εφαρμογές του κεφαλαίου 5 στην περίπτωση της ομαλά γραμμικής βαθυμετρίας με μία και δύο ανεμογεννήτριες. Ακόμη η ύπαρξη του αιολικού πάρκου δεν επηρεάζει τις τιμές του σημαντικού ύψους κύματος κοντά στην ακτή, σε περιοχές με μικρό βάθος, όπως και σε περιοχές που βρίσκονται μεταξύ των ανεμογεννητριών διατηρώντας σχεδόν τα ίδια αποτελέσματα με την περίπτωση που το αιολικό πάρκο απουσιάζει.

Στις εικόνες 7.5α και 7.5β που ακολουθούν φαίνεται η μεταβολή του σημαντικού ύψους κύματος σε σημεία γύρω από κάθε ανεμογεννήτρια (ποσοστό μεταβολής), με και χωρίς το αιολικό πάρκο, μετά το πέρας των 45min, που είναι ο χρόνος προσομοίωσης, ο χρόνος δηλαδή ώσπου να διαδοθεί πλήρως σε όλη την περιοχή του μοντέλου η κυματική ενέργεια.

Η ανεμογεννήτρια με τη μεγαλύτερη μεταβολή είναι η Νο5, η οποία βρίσκεται κεντρικά στο αιολικό πάρκο. Αυτό συμβαίνει πιθανώς λόγω της συγκεκριμένης μορφολογίας του στερεού πυθμένα στον οποίο είναι θεμελιωμένη, αλλά και της επίδρασης που δέχεται από τις υπόλοιπες ανεμογεννήτριες, κάτι το οποίο εξετάζεται ξεχωριστά για το λόγο αυτό στην 3^η περίπτωση.



Εικόνα 7.5α: Ποσοστιαία μεταβολή του σημαντικού ύψους κύματος (με και χωρίς το αιολικό πάρκο 1^η και 2^η περίπτωση) σε σημεία γύρω από κάθε ανεμογεννήτρια μετά το πέρας της προσομοίωσης 45min. Θυμίζοντας ότι ένα σημείο ισούται με ένα κελί πλέγματος, δηλαδή ίσο με 5m.

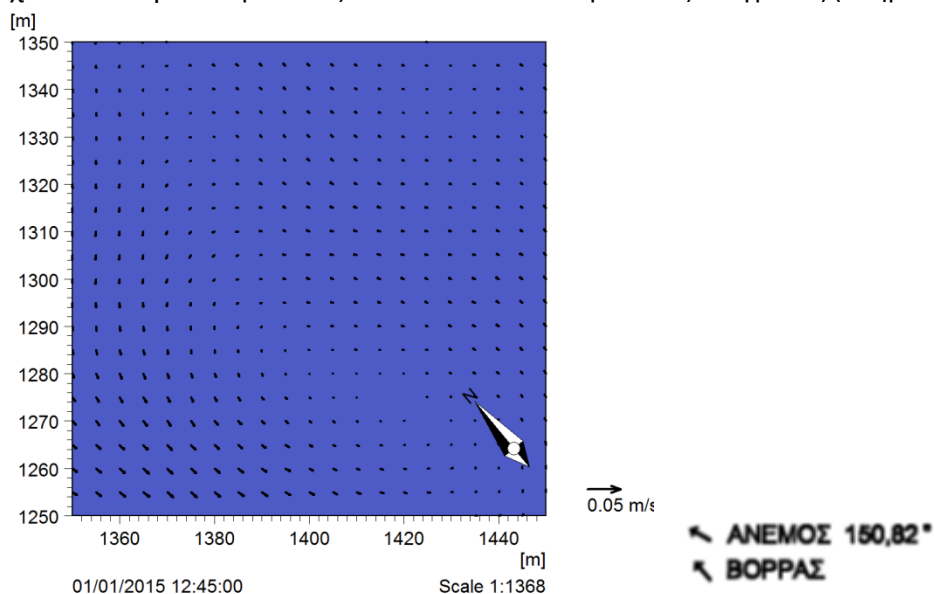


Εικόνα 7.5β: Ποσοστιαία μεταβολή του σημαντικού ύψους κύματος (με και χωρίς το αιολικό πάρκο 1^η και 2^η περίπτωση) σε σημεία γύρω από κάθε ανεμογεννήτρια μετά το πέρας της προσομοίωσης 45min. Θυμίζοντας ότι ένα σημείο ισούται με ένα κελί πλέγματος, δηλαδή ίσο με 5m.

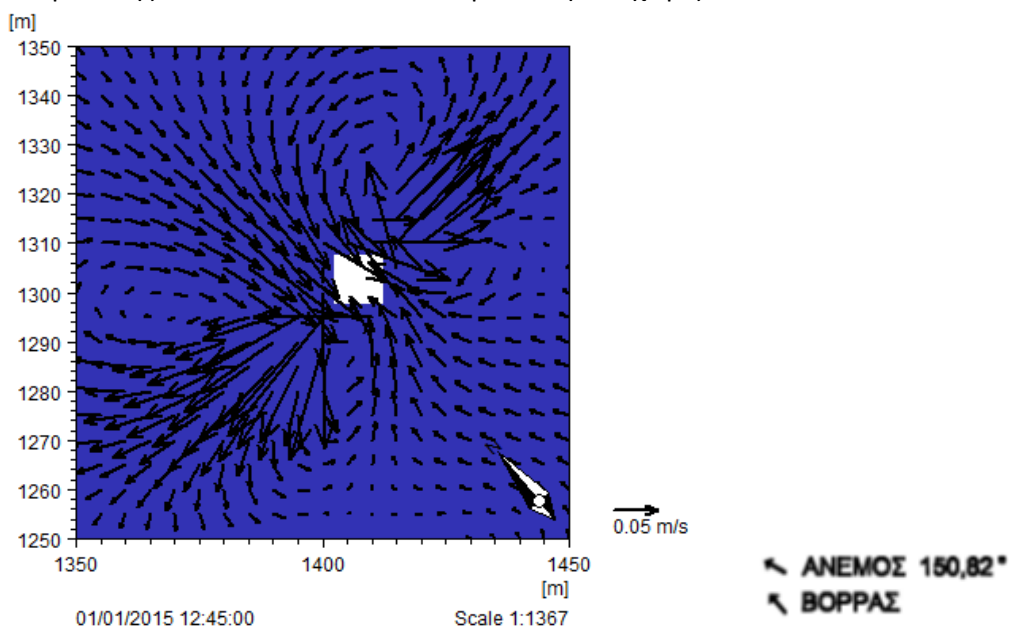


7.2.2.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ 1^{ης} ΚΑΙ 2^{ης} ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΙΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΟΣΩΝ ΑΦΟΡΑ ΤΗΝ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ

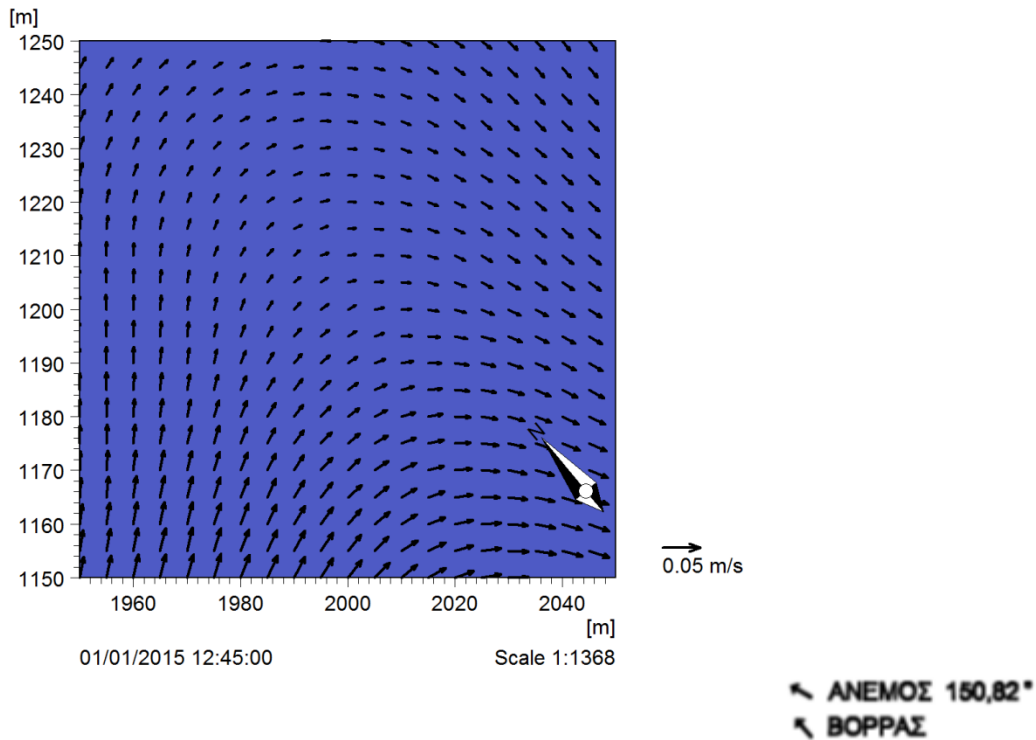
Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις ανεμογεννήτριες Νο2, Νο5 και Νο11 που εμφανίζουν τις πιο μεγάλες μεταβολές του σημαντικού ύψους κύματος. Επίσης, λόγω θέσης παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον, η πρώτη βρίσκεται στην πίσω πλευρά του πάρκου, η δεύτερη στο κέντρο και η τρίτη στη μπροστινή πλευρά, όπως έρχεται το κύμα. Οι μονάδες παντού δίνονται σε μονάδες πλέγματος (1σημείο=5m).



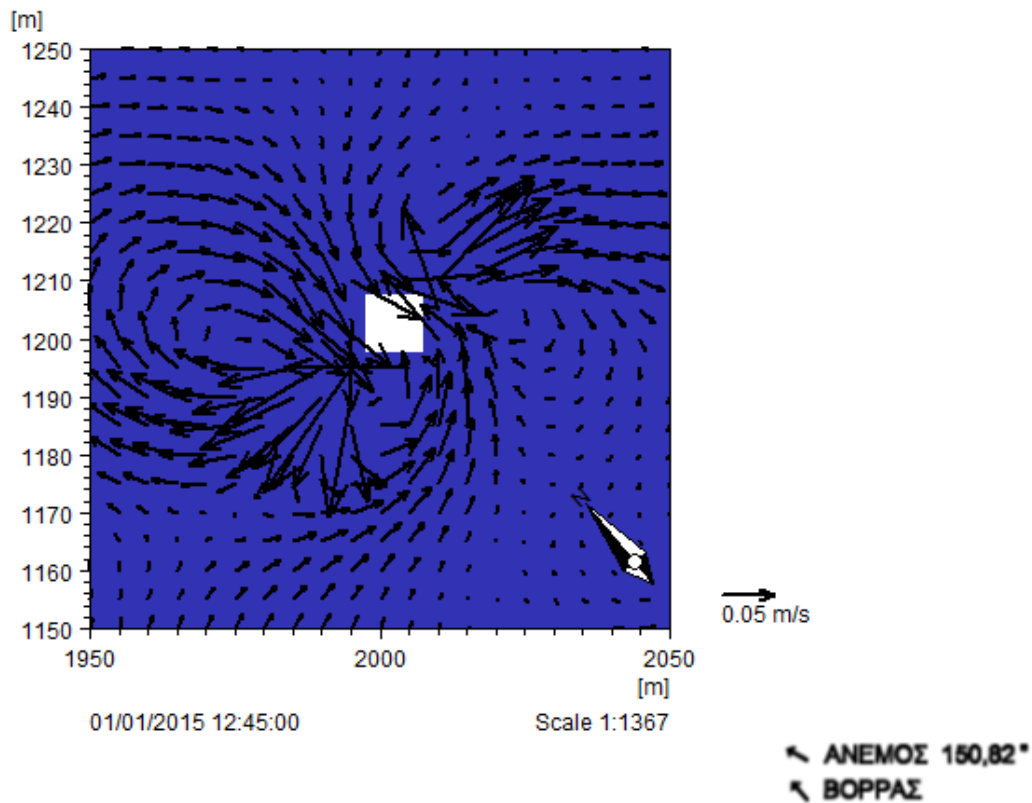
Εικόνα 7.6α: Κυκλοφορία του νερού γύρω την ανεμογεννήτρια Νο2 μετά το πέρας της προσομοίωσης 45min. 1^η περίπτωση χωρίς το αιολικό πάρκο.



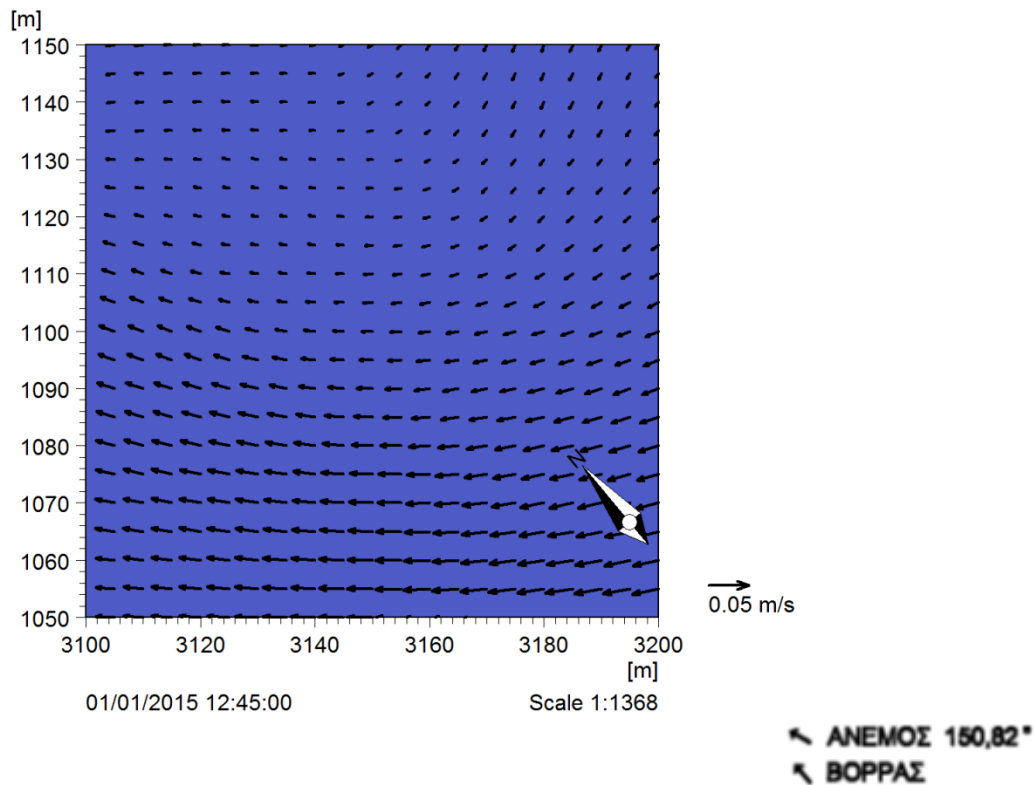
Εικόνα 7.6β: Κυκλοφορία του νερού γύρω την ανεμογεννήτρια Νο2 μετά το πέρας της προσομοίωσης 45min. 2^η περίπτωση με το αιολικό πάρκο.



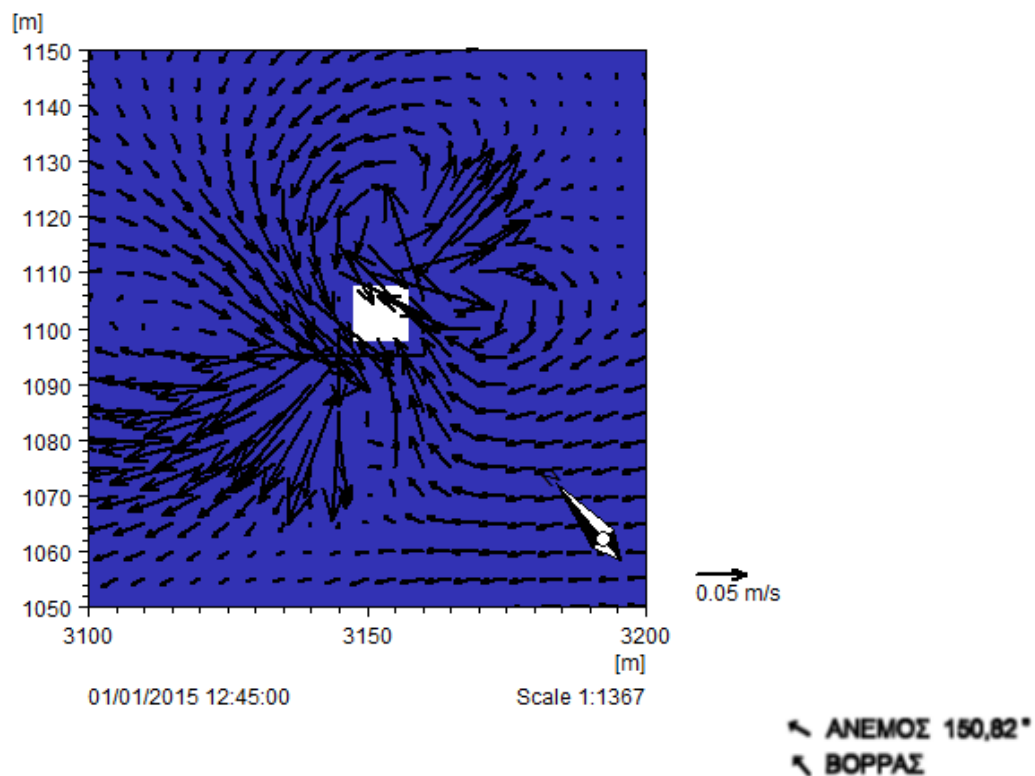
Εικόνα 7.6γ: Κυκλοφορία του νερού γύρω την ανεμογεννήτρια Νο5 μετά το πέρας της προσομοίωσης 45min. 1^η περίπτωση χωρίς το αιολικό πάρκο.



Εικόνα 7.6δ: Κυκλοφορία του νερού γύρω την ανεμογεννήτρια Νο5 μετά το πέρας της προσομοίωσης 45min. 2^η περίπτωση με το αιολικό πάρκο.



Εικόνα 7.6ε: Κυκλοφορία του νερού γύρω την ανεμογεννήτρια Νο11 μετά το πέρας της προσομοίωσης 45min. 1^η περίπτωση χωρίς το αιολικό πάρκο.



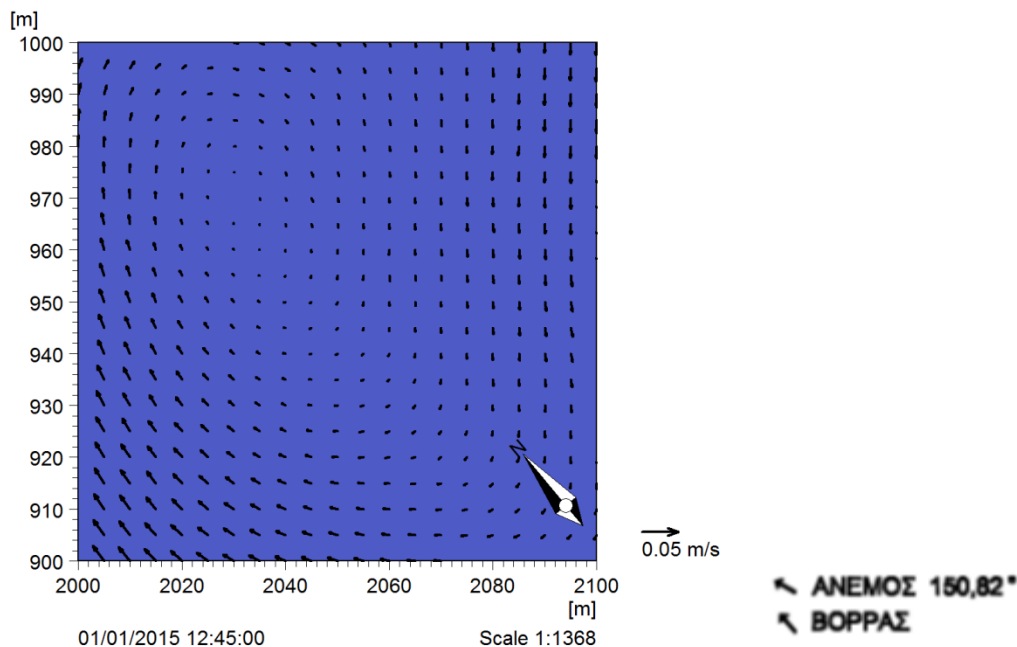
Εικόνα 7.6στ: Κυκλοφορία του νερού γύρω την ανεμογεννήτρια Νο11 μετά το πέρας της προσομοίωσης 45min. 2^η περίπτωση με το αιολικό πάρκο.



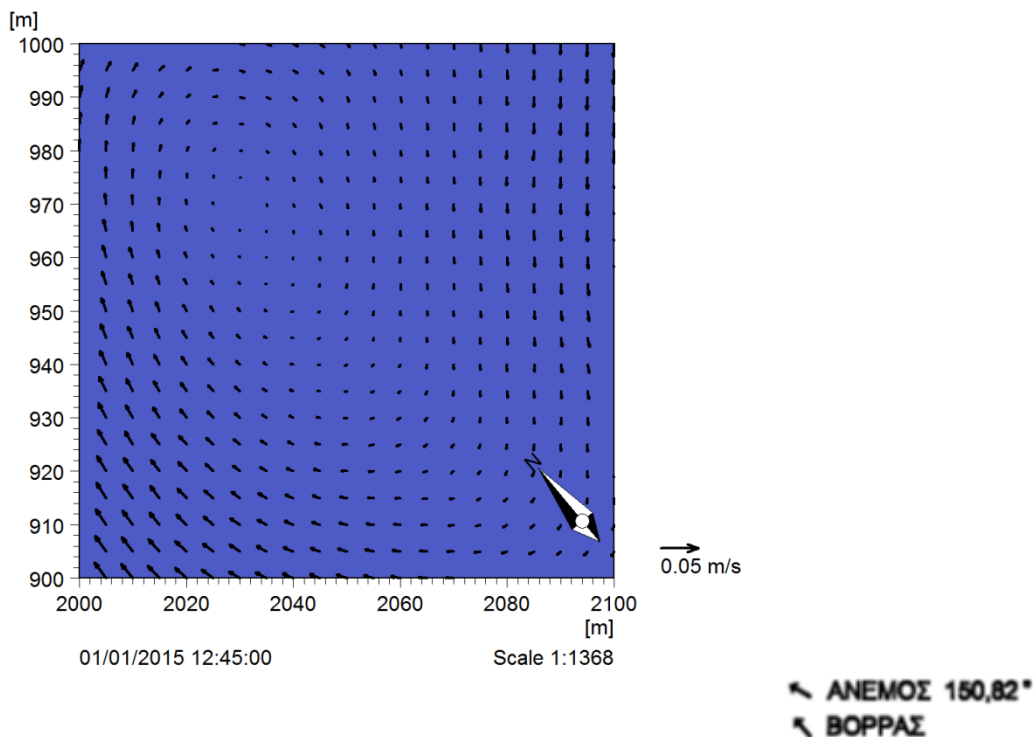
Στις παραπάνω εικόνες παρουσιάζεται η συνισταμένη ολοκληρωμένη στο βάθος ταχύτητα του νερού σε θέσεις όπου θα εγκατασταθούν οι ανεμογεννήτριες, ώστε να γίνει σύγκριση των δύο περιπτώσεων με και χωρίς την παρουσία τους. Από τις παραπάνω εικόνες γίνεται φανερό η μεταβολή της κατεύθυνσης της συνισταμένης ταχύτητας, των ολοκληρωμένων στο βάθος συνιστωσών της, των ταχυτήτων u_0 και v_0 στη διεύθυνση x και y αντίστοιχα. Η μεταβολή έχει τα ίδια χαρακτηριστικά σε όλες τις ανεμογεννήτριες με μικρές παραλλαγές ανάλογα και με τις τοπικές μορφολογικές συνθήκες. Γίνεται φανερό η σημασία του εμποδίου που συναντά η ροή του νερού κατά τη διεύθυνση διάδοσής της, που παίζει καθοριστικό ρόλο στη μεταβολή της. Η ροή αποκτά χαρακτηριστικά τυρβώδους ροής με στροβιλισμούς, κάτι που αντανάκλαται και στις τιμές του σημαντικού ύψους κύματος γύρω από τις ανεμογεννήτριες που είδαμε στην προηγούμενη ενότητα.

7.2.2.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ 1^{ης} ΚΑΙ 2^{ης} ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΕΝΔΙΑΜΕΣΑ ΑΠΟ ΤΙΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΟΣΟΝ ΑΦΟΡΑ ΤΗΝ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ

Από τις παρακάτω εικόνες 7.7α και 7.7β προκύπτει ότι δεν υπάρχει μεταβολή στην κατεύθυνση της συνισταμένης ολοκληρωμένης στο βάθος ταχύτητας σε σημεία που βρίσκονται μεταξύ των ανεμογεννητριών λόγω της παρουσίας του αιολικού πάρκου. Ελάχιστες ή καθόλου μεταβολές εμφανίζονται στο μέτρο της ταχύτητας αυτής.

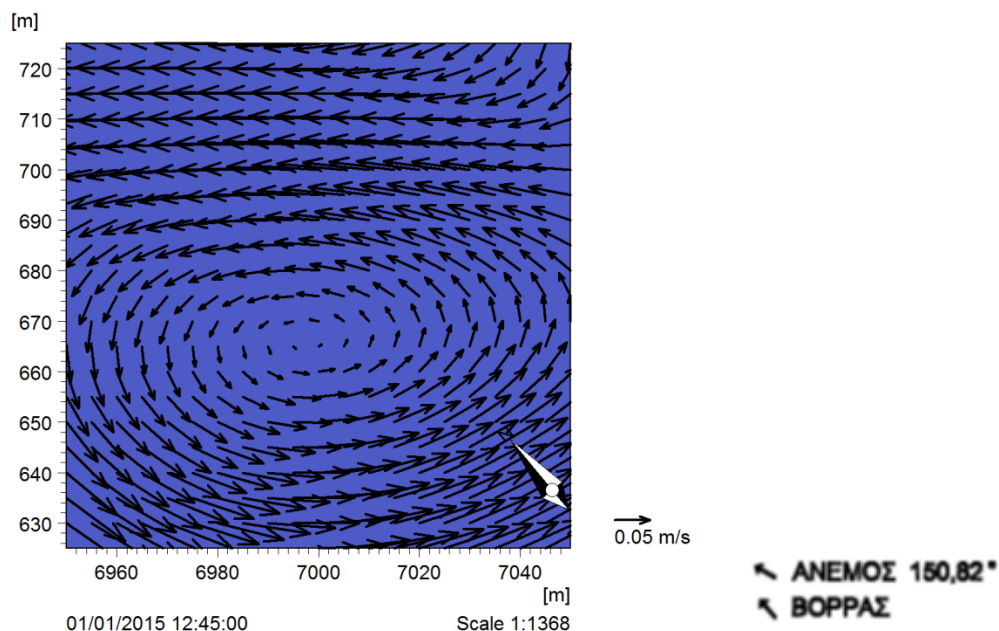


Εικόνα 7.7α: Κυκλοφορία του νερού στο σημείο 410,190 που βρίσκεται ενδιάμεσα από τις ανεμογεννήτριες Νο3, Νο5, Νο6, Νο8 μετά το πέρας της προσομοίωσης 45min. 1^η περίπτωση χωρίς το αιολικό πάρκο.

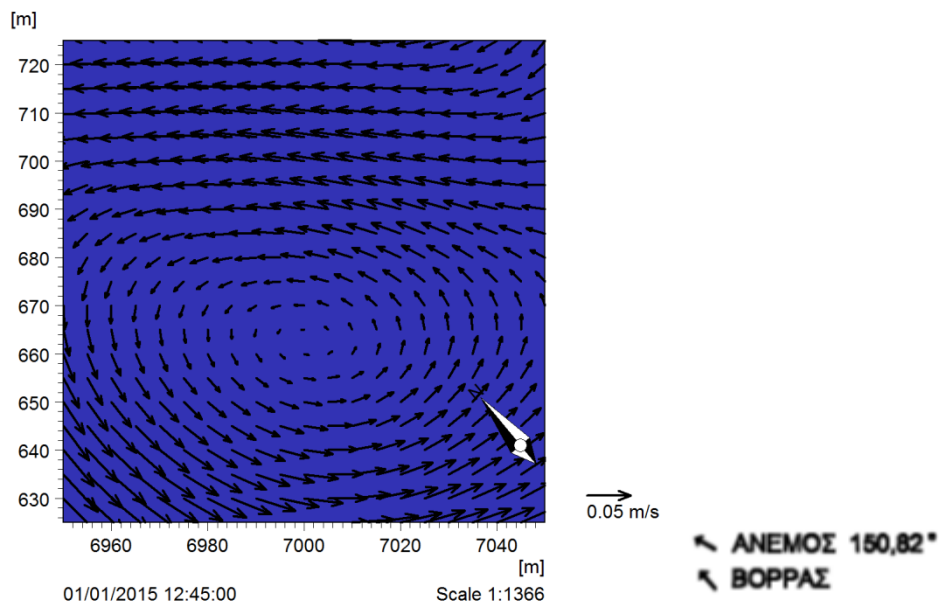


Εικόνα 7.7β: Κυκλοφορία του νερού στο σημείο 410,190 που βρίσκεται ενδιάμεσα από τις ανεμογεννήτριες Νο3, Νο5, Νο6, Νο8 μετά το πέρας της προσομοίωσης 45min. 2^η περίπτωση με το αιολικό πάρκο.

7.2.2.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ 1^{ης} ΚΑΙ 2^{ης} ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΣΕ ΣΗΜΕΙΑ ΜΕ ΑΠΟΤΟΜΗ ΚΛΙΣΗ ΠΥΘΜΕΝΑ ΟΣΟΝ ΑΦΟΡΑ ΤΗΝ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ

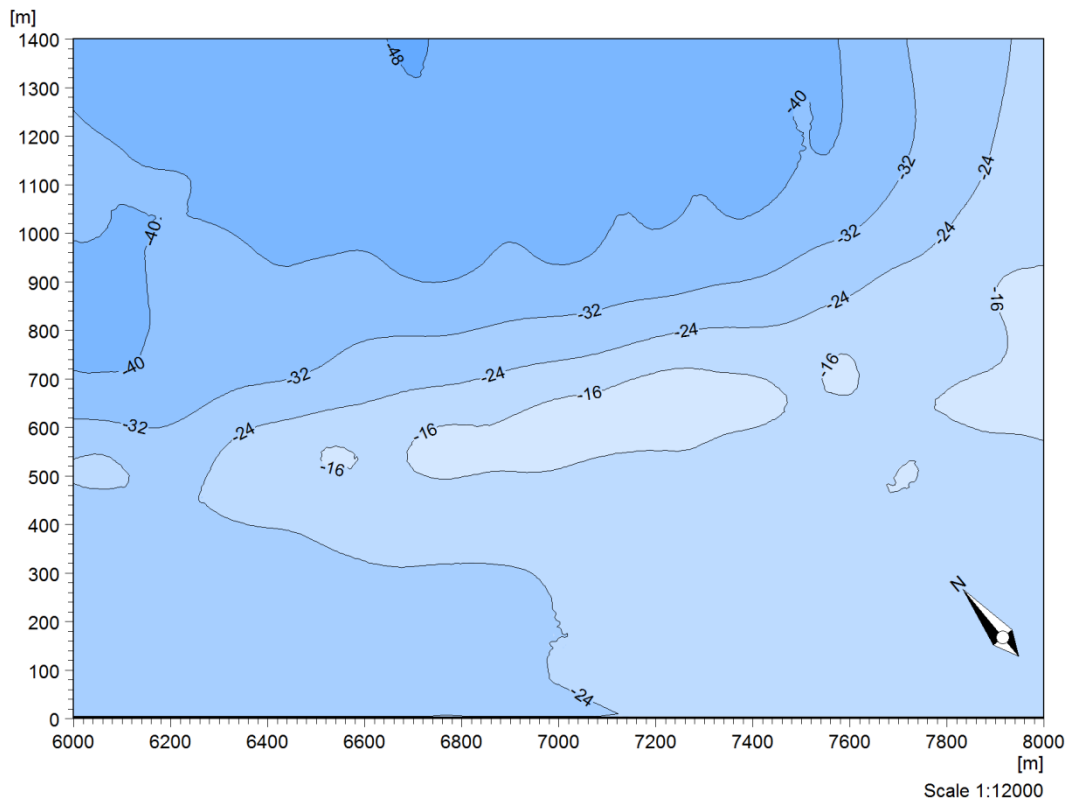


Εικόνα 7.8α: Κυκλοφορία του νερού στο σημείο 1400,135 μετά το πέρας της προσομοίωσης 45min. 1^η περίπτωση χωρίς το αιολικό πάρκο.



Εικόνα 7.8β: Κυκλοφορία του νερού στο σημείο 1400,135 μετά το πέρας της προσομοίωσης 45min. 2^η περίπτωση με το αιολικό πάρκο.

Από τις εικόνες 7.8α και 7.8β προκύπτει ότι δεν υπάρχει μεταβολή στην κατεύθυνση της συνισταμένης ολοκληρωμένης στο βάθος ταχύτητας σε σημεία με απότομη κλίση του πυθμένα και έντονα μεταβαλλόμενη βαθυμετρία λόγω της παρουσίας του αιολικού πάρκου. Ελάχιστες ή καθόλου μεταβολές εμφανίζονται στο μέτρο της ταχύτητας αυτής. Αξίζει όμως να σημειωθεί η μεταβολή της ροής του νερού και η εμφάνιση περιδίνησης στην περιοχή αυτή που εμφανίζεται απότομη αλλαγή του πυθμένα με κλίση που φθάνει τοπικά το 10%. Να θυμίσουμε ότι οι κυματισμοί κινούνται σε διεύθυνση νοτιοανατολική και ότι συναντούν μία ρηχή περιοχή και στη συνέχεια κινούνται σε βαθιά νερά όπως φαίνεται στην εικόνα 7.9. Η περιοχή αυτή που μοιάζει με ύφαλο, λειτουργεί σαν εμπόδιο όπως ακριβώς και οι ανεμογεννήτριες επιφέροντας παρόμοιες μεταβολές στη ροή του νερού με στροβιλισμούς.



Εικόνα 7.9: Βαθυμετρία στο σημείο 1400,135.

7.2.3 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 3^η - ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕ ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ ΜΕ 1 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ

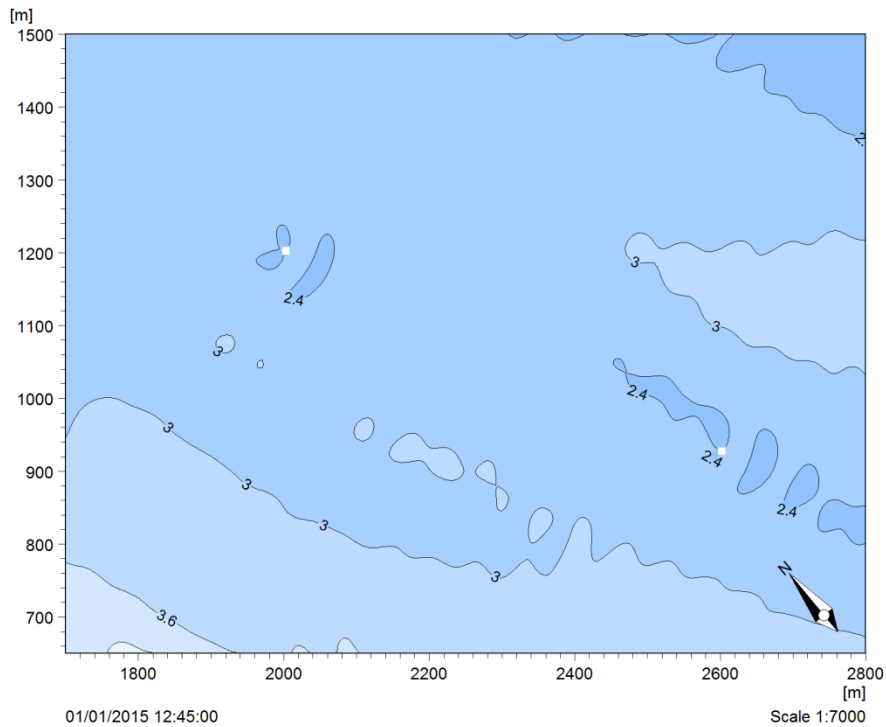
Περίπτωση 3^η περιοχή με αιολικό πάρκο με 1 ανεμογεννήτρια (No5):

- Σημαντικό ύψος κύματος, $H_{m0} = 3,83\text{m}$
- Φασματική περίοδος αιχμής, $T_p = 8,51\text{s}$
- Μέση περίοδος αιχμής, $MWD = 150,82^\circ$
- Φάσμα συχνότητας JONSWAP
- Κατευθυντική διανομή κυματισμών (directional wave distribution)

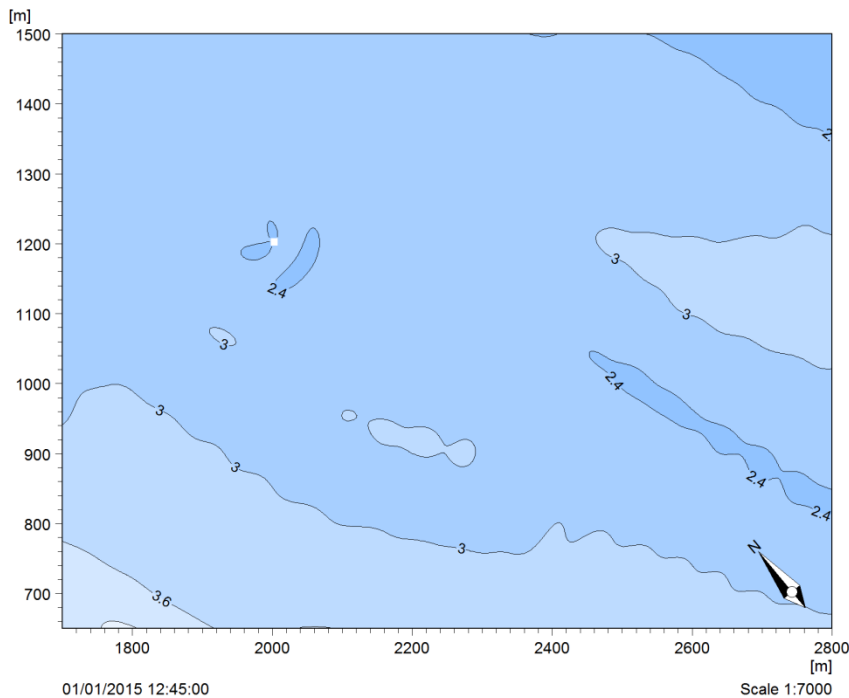
Στην περίπτωση αυτή θεωρούμε ότι το αιολικό πάρκο αποτελείται από μία ανεμογεννήτρια, ούτως ώστε να διερευνήσουμε την επιρροή που δέχεται η κάθε μία ανεμογεννήτρια από τις γειτονικές της. Για το σκοπό αυτό επιλέγουμε την ανεμογεννήτρια No5 (με συντεταγμένες πλέγματος 400,240 [x5m]), που είναι αυτή της 2^{ης} περίπτωσης με τη μεγαλύτερη αύξηση του σημαντικού ύψους κύματος, αλλά και αυτή που βρίσκεται κεντρικά στο πάρκο, οπότε θεωρητικά δέχεται και τη μεγαλύτερη επιρροή. Τα αποτελέσματα θα συγκριθούν με τις δύο προηγούμενες περιπτώσεις, ενώ όλες οι παράμετροι παραμένουν ίδιες.



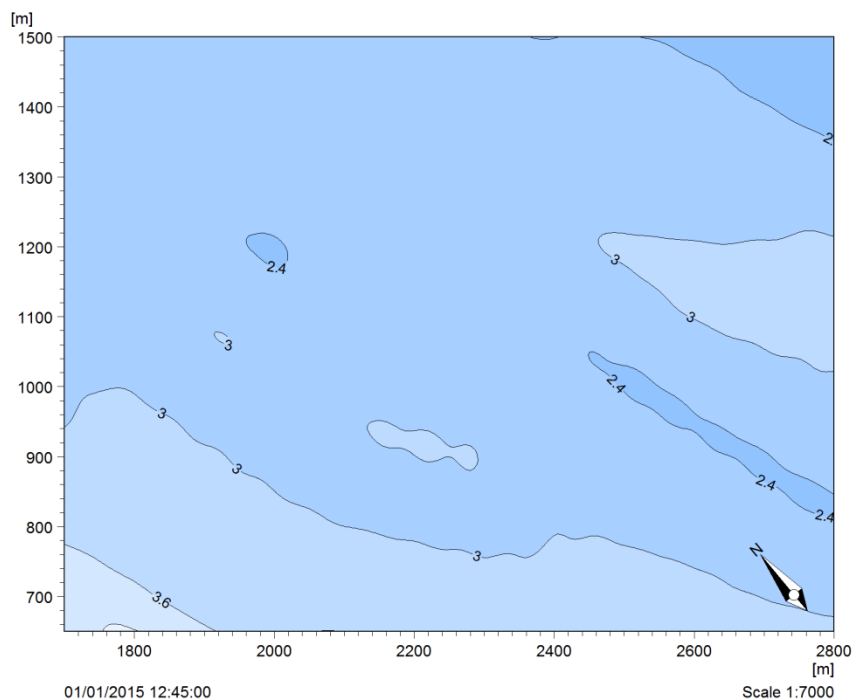
7.2.3.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ 2^{ης} ΚΑΙ 3^{ης} ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ Νο5 ΟΣΩΝ ΑΦΟΡΑ ΤΟ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟ ΥΨΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ



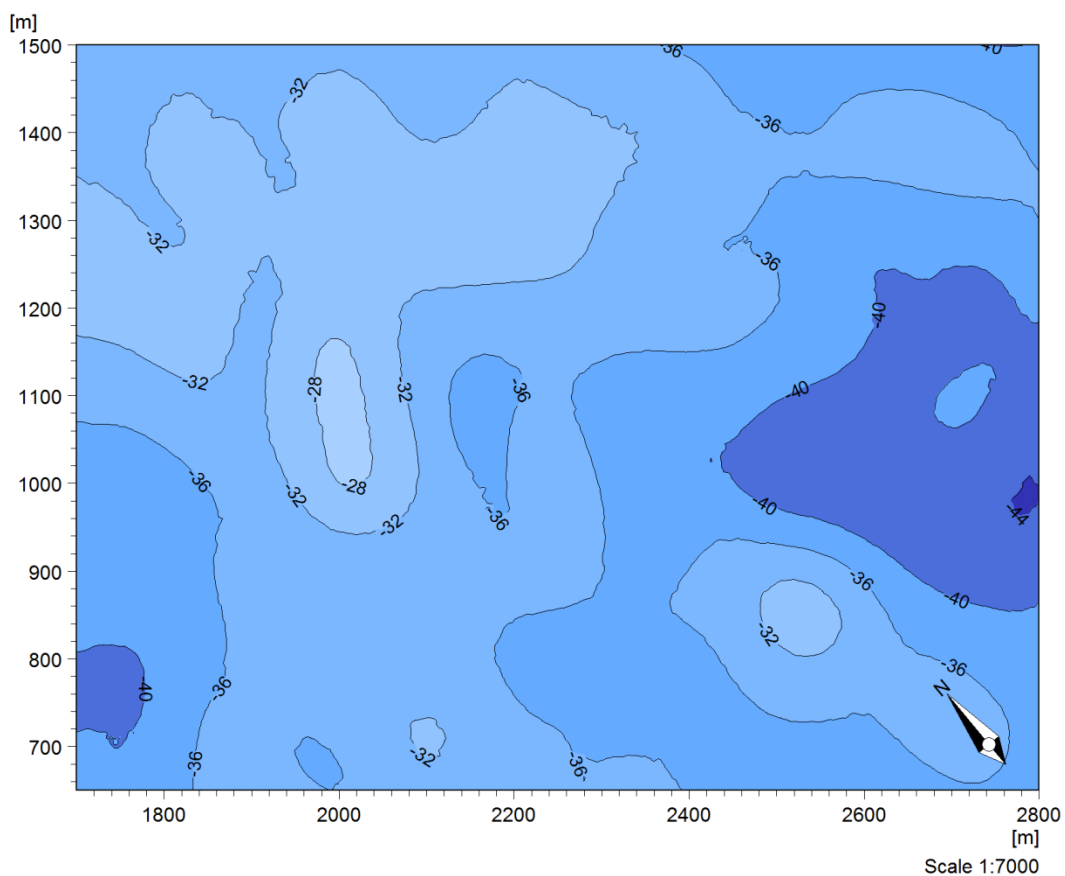
Εικόνα 7.10α: Σημαντικό ύψος κύματος στην περίπτωση αιολικού πάρκου με 12 γεννήτριες. Η γεννήτρια Νο5 βρίσκεται πάνω αριστερά .



Εικόνα 7.10β: Σημαντικό ύψος κύματος στην περίπτωση αιολικού πάρκου με 1 γεννήτρια. Η γεννήτρια Νο5 βρίσκεται πάνω αριστερά.



Εικόνα 7.10γ: Σημαντικό ύψος κύματος στην περίπτωση που δεν υπάρχουν γεννήτριες.

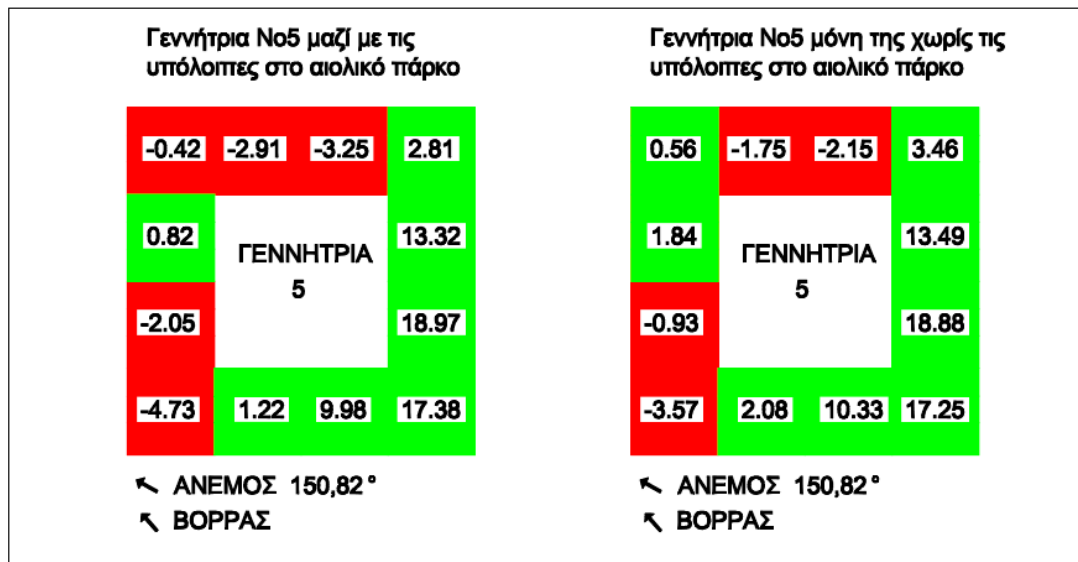


Εικόνα 7.10δ: Βαθυμετρία γύρω από τη γεννήτρια Νο5, η οποία έχει εγκατασταθεί στη θέση 400,240 (συντεταγμένες πλέγματος [x5m]).



Από τις παραπάνω εικόνες φαίνεται ότι το σημαντικό ύψος κύματος μεταβάλλεται ελάχιστα, λόγω της παρουσίας του πάρκου, εκτός από τα σημεία που έχουν εγκατασταθεί οι ανεμογεννήτριες. Όπως έχουμε ήδη δει και σε προηγούμενα, εμφανίζεται σημαντική αναρρίχηση ανάντη και μικρή κατάντη, με μικρούς στροβιλισμούς στα πλαϊνά της ανεμογεννήτριας. Το φαινόμενο της αναρρίχησης εμφανίζεται και στις δύο περιπτώσεις, είτε δηλαδή η γεννήτρια Νο5 είναι μόνη της, είτε μαζί με τις υπόλοιπες. Τα φαινόμενα είχε παρατηρηθεί και στις πρότυπες εφαρμογές του κεφαλαίου 5 και σε εργασίες και πειράματα της διεθνούς βιβλιογραφίας. Η ύπαρξη του αιολικού πάρκου με τις 12 γεννήτριες έχει μικρή επίδραση στο σημαντικό ύψος κύματος στα σημεία γύρω από την ανεμογεννήτρια Νο5, με διακύμανση από -0,10% έως +1,20%. Το φαινόμενο δηλαδή της σκίασης της ανεμογεννήτριας από τις υπόλοιπες, σε ένα αιολικό πάρκο δεν εμφανίζεται έντονα κάτι που οφείλεται στην απόσταση μεταξύ των ανεμογεννητριών (600m) που επιλέχτηκε για την παρούσα εργασία.

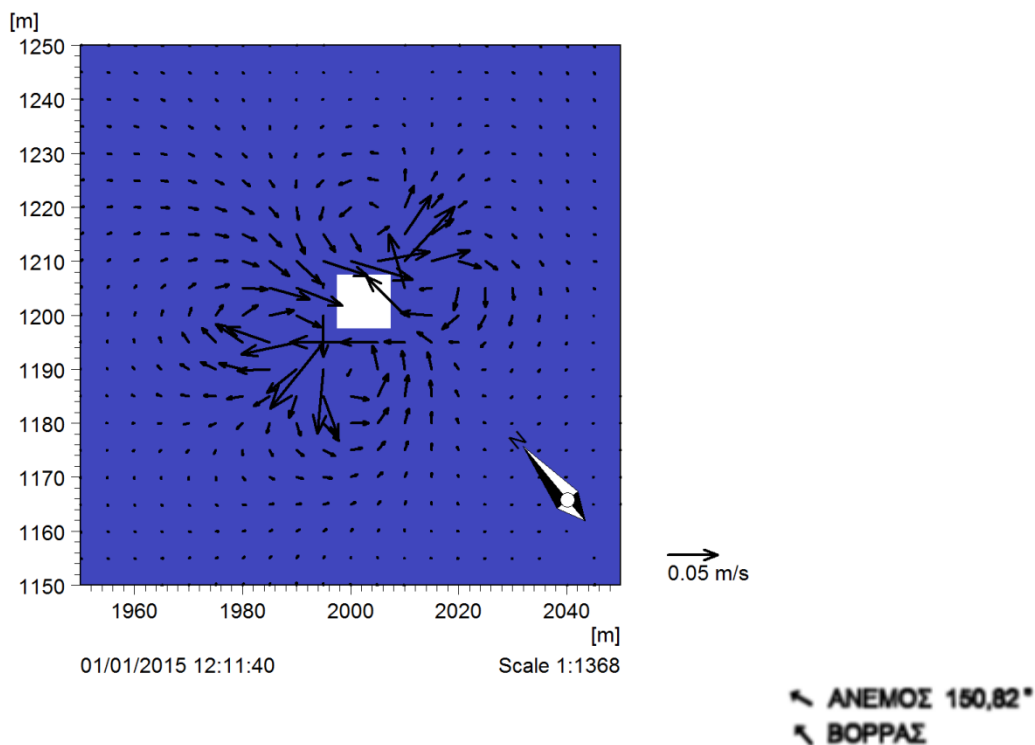
Στην εικόνα 7.11 φαίνεται η ποσοστιαία μεταβολή του σημαντικού ύψους κύματος γύρω από την γεννήτρια Νο5 (με και χωρίς το αιολικό πάρκο) μετά το πέρας της προσομοίωσης 45min. Σε γενικές γραμμές η παρουσία του πάρκου αυξάνει έστω και λίγο το σημαντικό ύψος κύματος γύρω από την γεννήτρια.



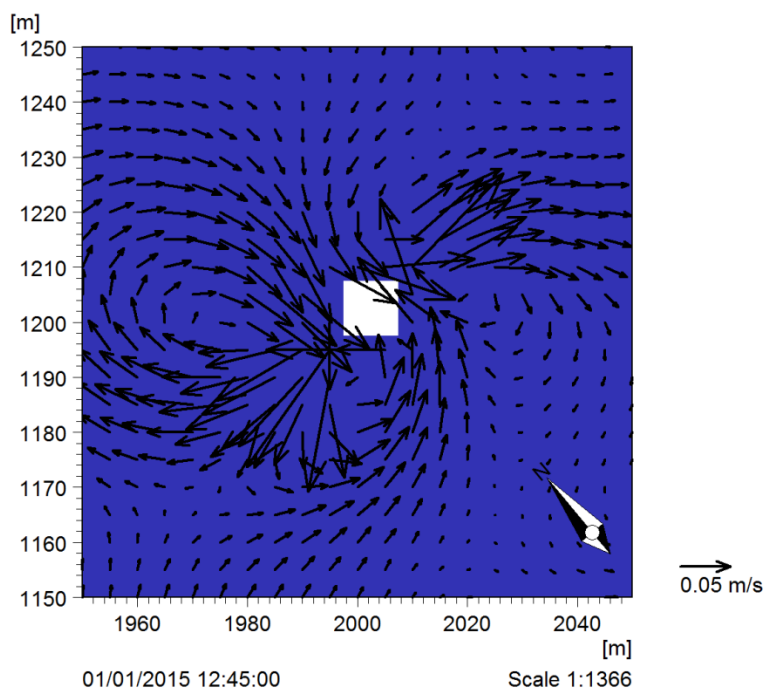
Εικόνα 7.11: Ποσοστιαία μεταβολή του σημαντικού ύψους κύματος (α) αριστερά με και χωρίς το αιολικό πάρκο 1^η και 2^η περίπτωση, β) δεξιά με και χωρίς τη γεννήτρια Νο5, 1^η και 3^η περίπτωση) σε σημεία γύρω από την ανεμογεννήτρια Νο5 μετά το πέρας της προσομοίωσης 45min. Θυμίζοντας ότι ένα σημείο ισούται με ένα κελί πλέγματος, δηλαδή ίσο με 5m.



7.2.3.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ 2^{ης} ΚΑΙ 3^{ης} ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΙΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΟΣΩΝ ΑΦΟΡΑ ΤΗΝ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ



Εικόνα 7.12α: Κυκλοφορία γύρω από την ανεμογεννήτρια Νο5: α) μαζί με τις υπόλοιπες



Εικόνα 7.12β: Κυκλοφορία γύρω από την ανεμογεννήτρια Νο5: β) μόνη της.

Από τις εικόνες 7.12α και 7.12β προκύπτει ότι δεν υπάρχει μεταβολή στην κατεύθυνση της συνισταμένης ολοκληρωμένης στο βάθος ταχύτητας στα σημεία γύρω από την ανεμογεννήτρια Νο5 λόγω της παρουσίας του αιολικού πάρκου.



Υπάρχει όμως πιο έντονη κυκλοφορία στην περίπτωση που η γεννήτρια είναι μόνη της. Στην περίπτωση αυτή δηλαδή φαίνεται η επίδραση του πάρκου στην κυκλοφορία του νερού γύρω από μια γεννήτρια που βρίσκεται κεντρικά στο πάρκο. Η μεταβολή της ροής εξαιτίας του εμποδίου είναι εμφανής και στις δύο περιπτώσεις με εμφάνιση περιδίνησης και στροβιλισμών.

7.3 ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΘΑΛΑΣΣΑΣ – ΣΕΝΑΡΙΟ 2

Το δεύτερο σενάριο είναι σχετικό με την κατάσταση θάλασσας με την υψηλότερη περίοδο αιχμής του κύματος (T_p) πάνω από την περιοχή του αιολικού πάρκου, που παρατηρείται μεταξύ των ετών 1979 και 2013. Η τιμή αυτή είναι αποτέλεσμα της ανάλυσης δεδομένων που έγιναν από το Ελληνικό Κέντρο Έρευνας και Θαλάσσιων Ερευνών (ΕΛΚΕΘΕ). Οι επιλεγμένες τιμές για Μέση Κατεύθυνση του Κύματος (MWD) και το σημαντικό ύψος κύματος (H_{m0}), είναι οι τιμές που αντιστοιχούν στην υψηλότερη $T_p = 10,18s$. Η ημερομηνία κατά την οποία παρατηρείται η υψηλότερη T_p ήταν στις 8 Φεβρουαρίου 1994 και αντιστοιχούσε σε $MWD = 197,56^\circ$ και $H_{m0} = 1,37m$.

Λαμβάνοντας υπόψη την κατεύθυνση του μέσου κύματος η θάλασσα διαδίδεται από νοτιοανατολικές διευθύνσεις, δηλαδή $197,56^\circ$. Έτσι η ανάντη περιοχή κάθε ανεμογεννήτριας βρίσκεται στο νότιο-ανατολικό άκρο της και η κατάντη περιοχή βρίσκεται στο βόρειο-δυτικό άκρο της. Υπενθυμίζουμε σε αυτό το σημείο ότι λόγω της περιστροφής του μοντέλου κατά 40° αντίθετα από τη φορά των δεικτών του ρολογιού και λόγω της απόκλισης του γεωγραφικού συστήματος κατά $1,02^\circ$ αντίθετα από τη φορά των δεικτών του ρολογιού η μέση κατεύθυνση του κύματος στο μοντέλο, με βάση και τους άξονες αναφοράς του, έγινε $MWD = 113,46^\circ$. Το σύστημα γωνιών του μοντέλου έχει το 0 στα ανατολικά και θεωρεί ως θετική φορά, αυτή που είναι αντίθετη της φοράς των δεικτών του ρολογιού.

Το μοντέλο αποτελείται από ένα ορθογώνιο πλέγμα με 2001 σημεία στον άξονα x και 501 σημεία στον άξονα y, με απόσταση 5m μεταξύ τους. Η αρχική κατάσταση της μορφολογίας του πυθμένα είναι ίδια για όλες τις περιπτώσεις.

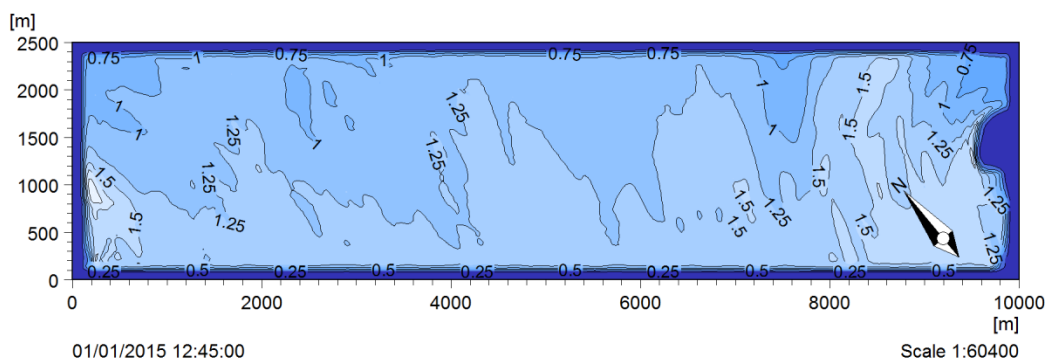
7.3.1 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 4^η - ΠΕΡΙΟΧΗ ΧΩΡΙΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Περίπτωση 4^η περιοχή χωρίς ανεμογεννήτριες:

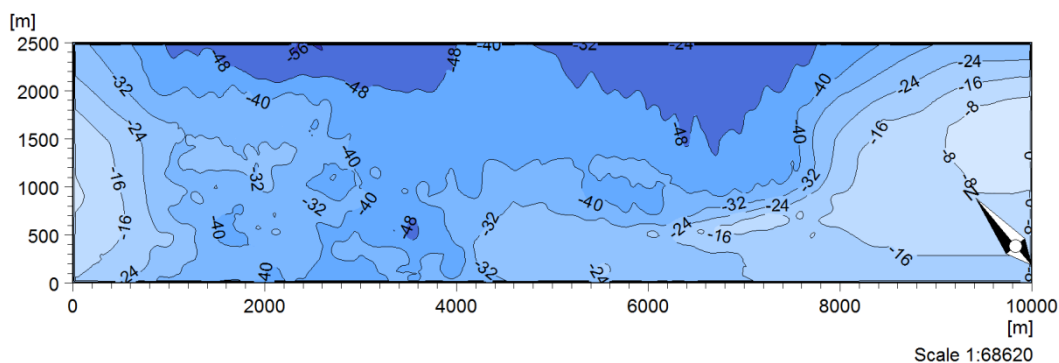
- Σημαντικό ύψος κύματος, $H_{m0} = 1,37m$
- Φασματική περίοδος αιχμής, $T_p = 10,18s$
- Μέση περίοδος αιχμής (μοντέλο), $MWD = 113,46^\circ$



- Φάσμα συχνότητας JONSWAP
- Κατευθυντική διανομή κυματισμών (directional wave distribution)



Εικόνα 7.13: Τιμές του σημαντικού ύψους κύματος που αφορούν την 4^η περίπτωση.



Εικόνα 7.14: Βαθυμετρία περιοχής μελέτης.

Η περίπτωση αυτή αφορά την ανοιχτή θάλασσα χωρίς την παρουσία του αιολικού πάρκου και μπορούμε να παρατηρήσουμε μια πιο ομαλοποιημένη κατάσταση, σε σχέση με το σενάριο 1, με τιμές του σημαντικού ύψους κύματος οι οποίες δεν διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους, εκτός από μια μικρή περιοχή στα δυτικά, όπου η τιμή του σημαντικού ύψους κύματος φτάνει τα 2,25m. Αυτό συμβαίνει πιθανότατα λόγω των ρηχών νερών, απότομη μεταβολή του βάθους και μεγάλη κλίση πυθμένα. Λίγο πιο βορειοδυτικά βρίσκονται οι Οθωνοί. Και σε αυτή την περίπτωση όμως συναντάμε συνήθως μεγαλύτερες τιμές του σημαντικού ύψους κύματος σε περιοχές με ρηχά νερά από ότι σε βαθιά. Οι εσωτερικοί παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για το στήσιμο του μοντέλου είναι ίδιοι με το σενάριο 1. Για την καλύτερη κατανόηση του πλέγματος, τονίζουμε ότι κάθε σημείο του πλέγματος έχει απόσταση από το γειτονικό του 5m, οπότε η συνολική περιοχή που καλύπτουμε είναι 10km επί 2,5km.



7.2.2 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 5^η - ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕ ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ ΜΕ 12 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Περίπτωση 5^η περιοχή με αιολικό πάρκο με 12 ανεμογεννήτριες:

- Σημαντικό ύψος κύματος, $H_{m0} = 1,37\text{m}$
- Φασματική περίοδος αιχμής, $T_p = 10,18\text{s}$
- Μέση περίοδος αιχμής (μοντέλο), $MWD = 113,46^\circ$
- Φάσμα συχνότητας JONSWAP
- Κατευθυντική διανομή κυματισμών (directional wave distribution)

Στην περίπτωση αυτή το αιολικό πάρκο περιλαμβάνει 12 ανεμογεννήτριες διαμέτρου $D = 9\text{m}$, σε απόσταση μεταξύ τους περίπου 600m, εγκατεστημένες σε ένα πάσσαλο (monopile), στα ανατολικά της περιοχής του μοντέλου. Στον πίνακα φαίνονται οι συντεταγμένες κάθε μίας ανεμογεννήτριας, ορίζοντας ως αρχή των αξόνων τους άξονες του πλέγματος (σημείο O κάτω αριστερά), σε συντεταγμένες πλέγματος, θυμίζοντας ότι η απόσταση κάθε σημείου του πλέγματος είναι 5m. Η θέση των γεννητριών είναι ακριβώς ίδια με αυτή του σεναρίου 1, ώστε να μπορεί να γίνει καλύτερη αξιολόγηση και σύγκριση των αποτελεσμάτων. Θυμίζουμε τον πίνακα 7.1 με τις συντεταγμένες του αιολικού πάρκου.

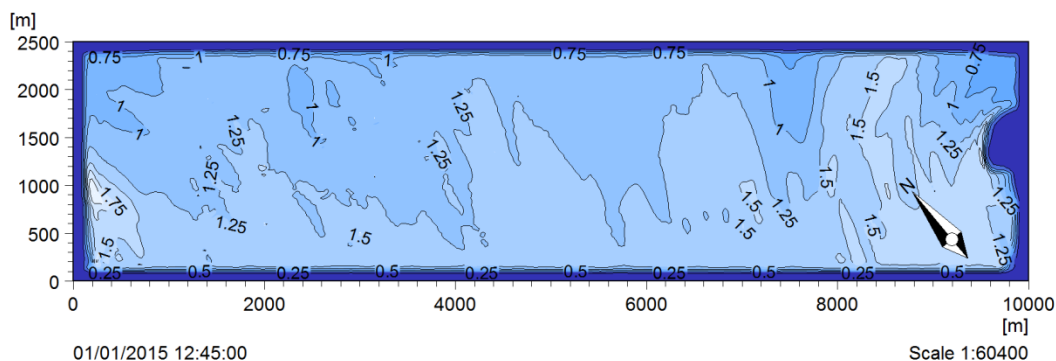
Πίνακας 7.1: Συντεταγμένες και βάθος ανεμογεννητριών που απαρτίζουν το αιολικό πάρκο

α/α	Συντεταγμένη x [x5m]	Συντεταγμένη y [x5m]	Βάθος z [m]
1	280	380	38,80
2	280	260	29,10
3	280	140	38,60
4	400	360	36,00
5	400	240	29,70
6	400	120	34,60
7	520	305	38,20
8	520	185	39,90
9	600	100	41,10
10	630	340	40,70
11	630	220	39,80
12	740	260	44,10

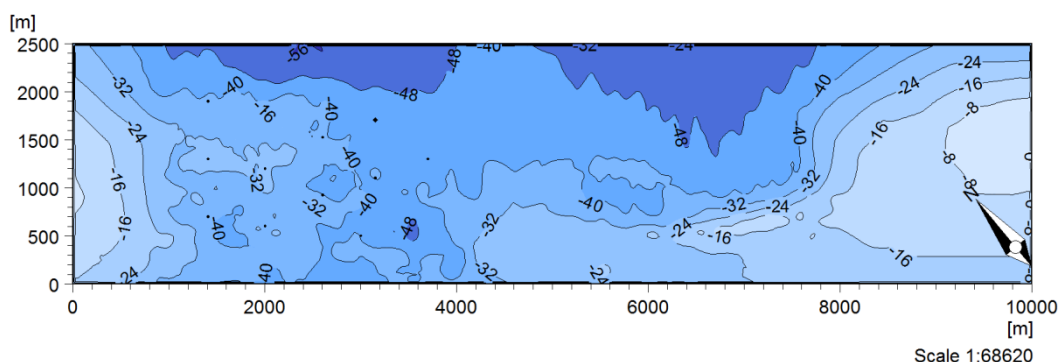
Το αιολικό πάρκο εκτείνεται σε μια περιοχή, (με συντεταγμένες πλέγματος [x5m]), στον άξονα x από 280-740 και στον άξονα y από 100-380.



7.3.2.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ 4^{ης} ΚΑΙ 5^{ης} ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΙΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΗΤΡΙΕΣ ΟΣΩΝ ΑΦΟΡΑ ΤΟ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟ ΥΨΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ

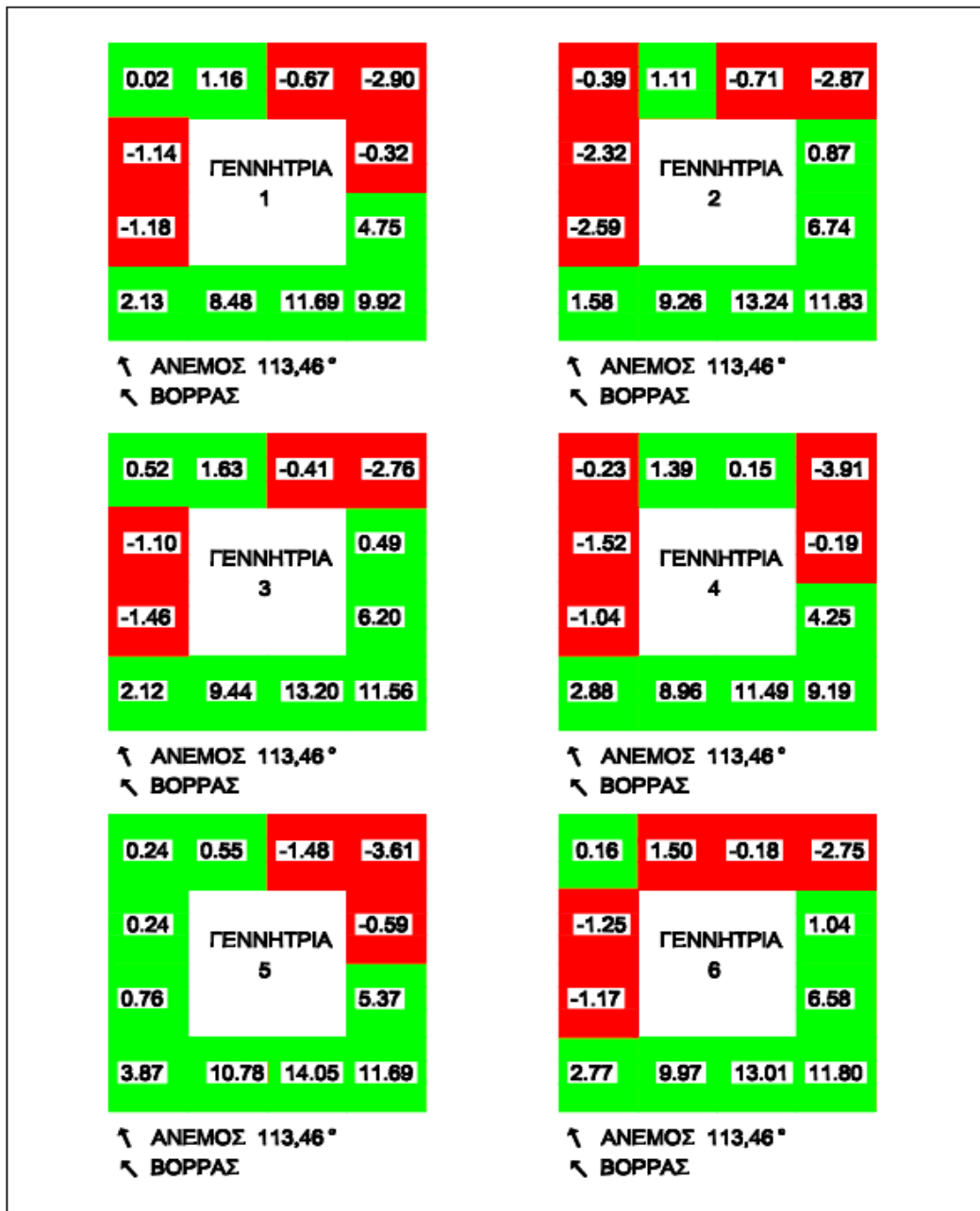


Εικόνα 7.15: Τιμές του σημαντικού ύψους κύματος που αφορούν την 5^η περίπτωση.

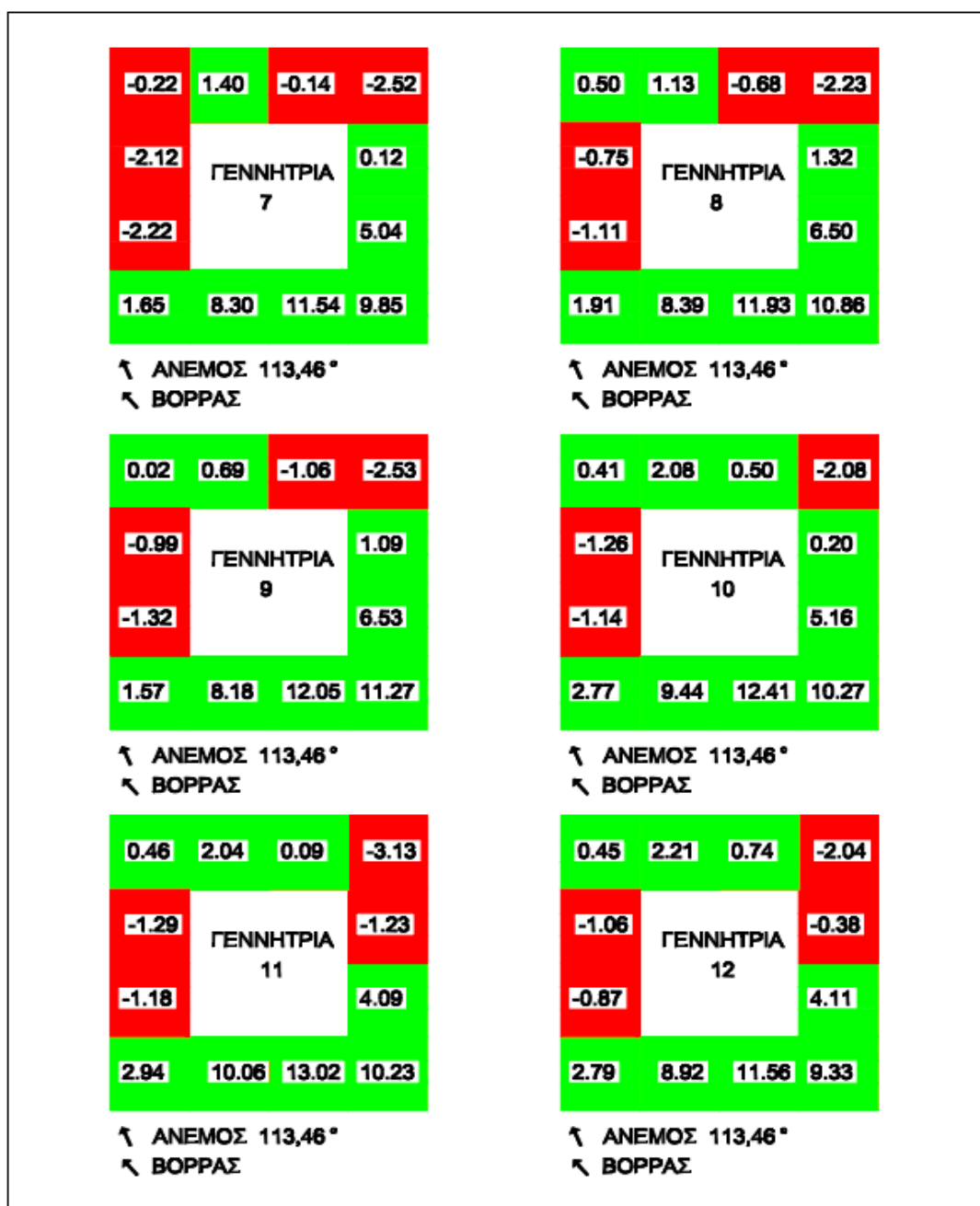


Εικόνα 7.16: Βαθυμετρία περιοχής μελέτης.

Συγκρίνοντας τις περιπτώσεις 4 και 5, όπως αντίστοιχα και στην περίπτωση 1 και 2 γίνεται φανερό ότι η παρουσία του αιολικού πάρκου δεν επηρεάζει το σημαντικό ύψος κύματος σε περιοχές κοντά ή μακριά από αυτό. Σε θέσεις ανάντη των ανεμογεννητριών έχουμε έντονη αναρρίχηση με αύξηση του σημαντικού ύψους κύματος από +11% έως +14%, στις πλάγιες θέσεις έχουμε μικρή μείωση από -1% έως -4% και σε θέσεις κατάντη έχουμε μικρές αυξομειώσεις (συνήθως μικρή αύξηση) μεταξύ -2% και +2%, κάτι που οφείλεται στη ροή του νερού όταν συναντά μπροστά της εμπόδιο και τους στροβιλισμούς που ακολουθούν τη ροή. Η αναρρίχηση αυτή και γενικά η ίδια συμπεριφορά παρατηρήθηκε πιο καθαρά και στις πρότυπες εφαρμογές του κεφαλαίου 5 στην περίπτωση της ομαλά γραμμικής βαθυμετρίας με μία και δύο ανεμογεννήτριες. Ακόμη η ύπαρξη του αιολικού πάρκου δεν επηρεάζει τις τιμές του σημαντικού ύψους κύματος κοντά στην ακτή, σε περιοχές με μικρό βάθος, όπως και σε περιοχές που βρίσκονται μεταξύ των ανεμογεννητριών διατηρώντας σχεδόν τα ίδια αποτελέσματα με την περίπτωση που το αιολικό πάρκο απουσιάζει.



Εικόνα 7.17α: Ποσοστιαία μεταβολή του σημαντικού ύψους κύματος (με και χωρίς το αιολικό πάρκο 4^η και 5^η περίπτωση) σε σημεία γύρω από κάθε ανεμογεννήτρια μετά το πέρας της προσομοίωσης 45min. Θυμίζοντας ότι ένα σημείο ισούται με ένα κελί πλέγματος, δηλαδή ίσο με 5m.



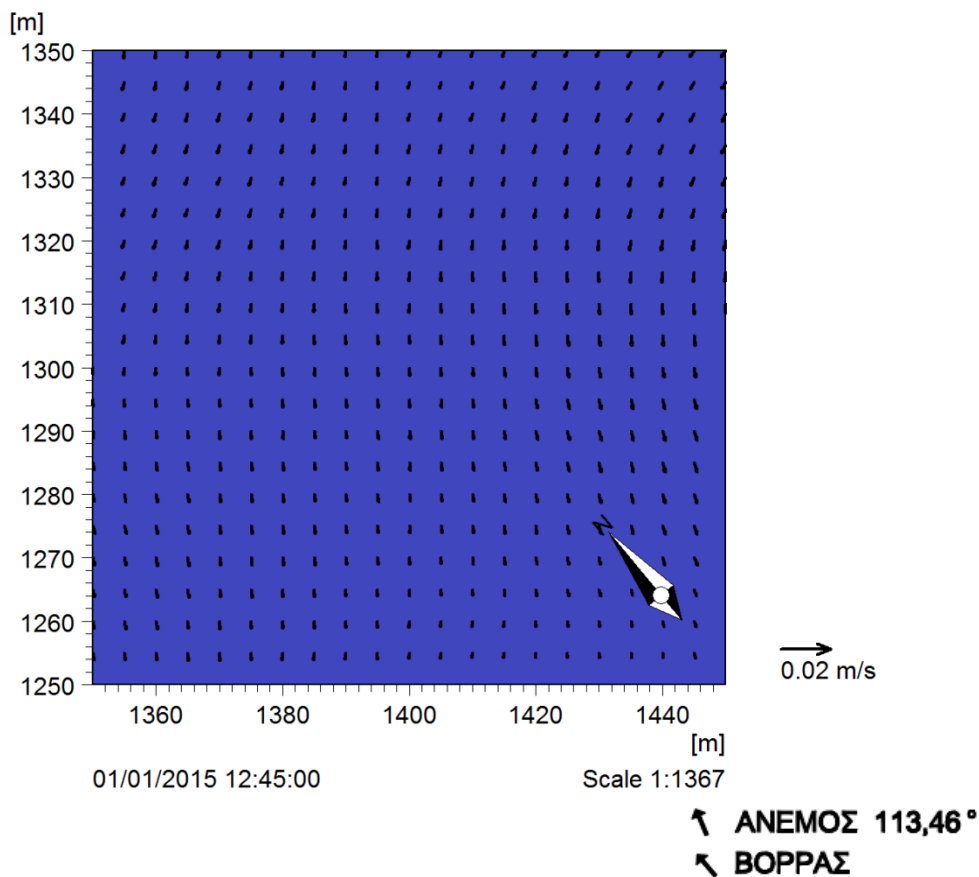
Εικόνα 7.17β: Ποσοστιαία μεταβολή του σημαντικού ύψους κύματος (με και χωρίς το αιολικό πάρκο 4^η και 5^η περίπτωση) σε σημεία γύρω από κάθε ανεμογεννήτρια μετά το πέρας της προσομοίωσης 45min. Θυμίζοντας ότι ένα σημείο ισούται με ένα κελί πλέγματος, δηλαδή ίσο με 5m.

Στις εικόνες 7.17α και 7.17β φαίνεται η μεταβολή του σημαντικού ύψους κύματος σε σημεία γύρω από κάθε ανεμογεννήτρια (ποσοστό μεταβολής), με και χωρίς το αιολικό πάρκο, μετά το πέρας των 45min, που είναι ο χρόνος προσομοίωσης, ο χρόνος δηλαδή ώσπου να διαδοθεί πλήρως σε όλη την περιοχή του μοντέλου η κυματική ενέργεια. Η ανεμογεννήτρια με τη μεγαλύτερη μεταβολή είναι η Νο5, η οποία βρίσκεται κεντρικά στο αιολικό πάρκο. Αυτό συμβαίνει πιθανώς λόγω της

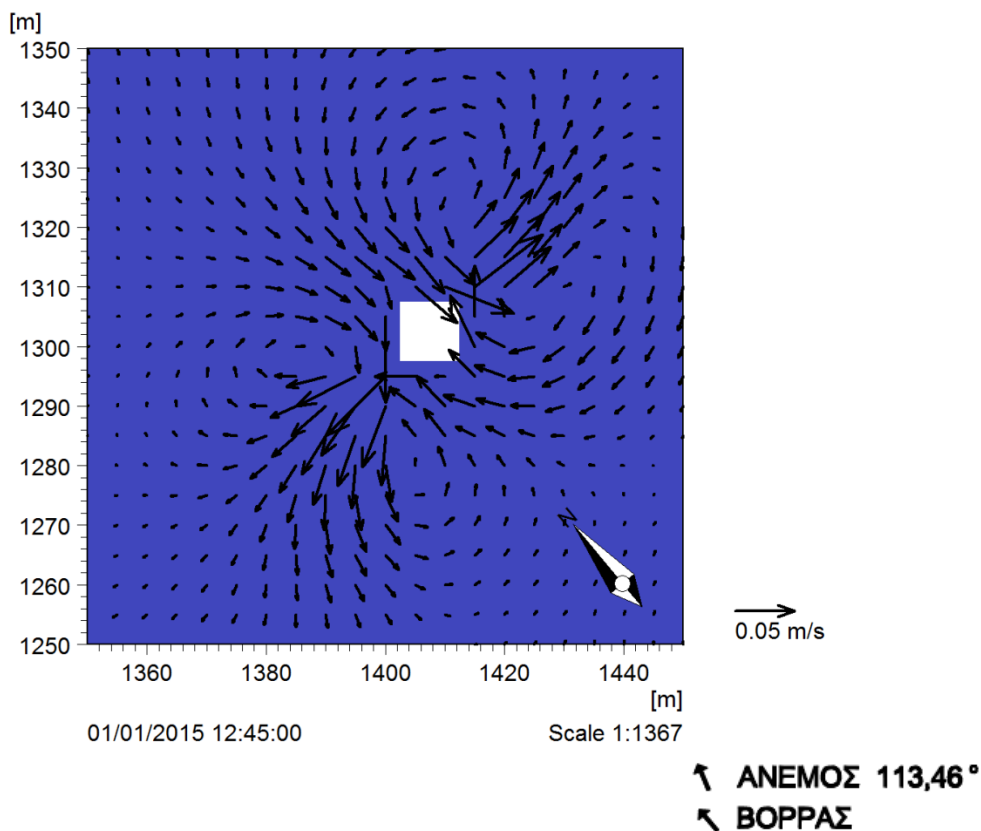


συγκεκριμένης μορφολογίας του στερεού πυθμένα στον οποίο είναι θεμελιωμένη, αλλά και της επίδρασης που δέχεται από τις υπόλοιπες ανεμογεννήτριες, κάτι το οποίο εξετάζεται ξεχωριστά για το λόγο αυτό στην 6^η περίπτωση.

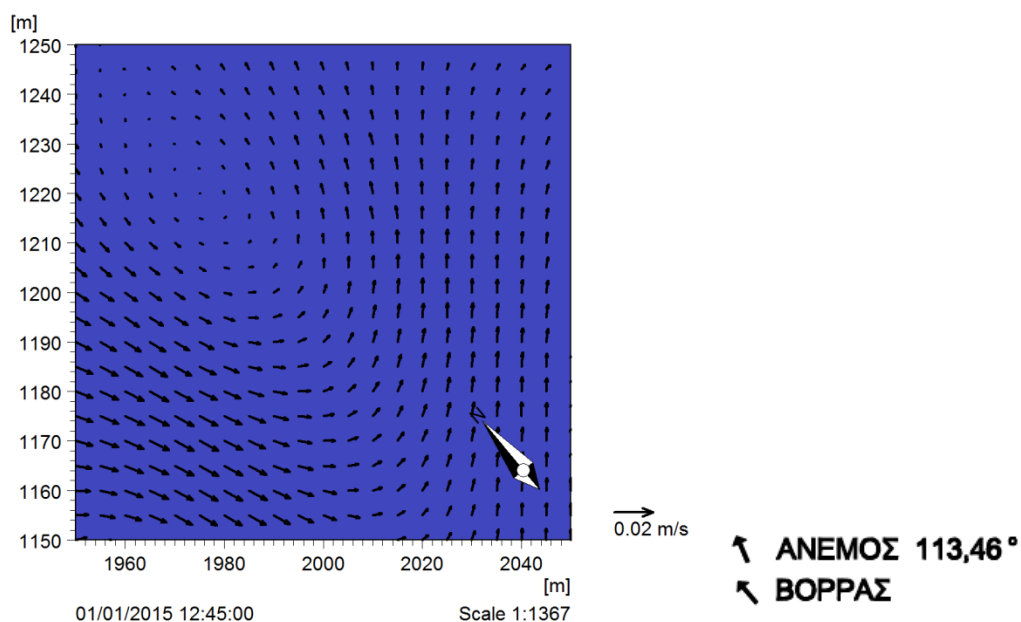
7.3.2.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ 4^{ης} ΚΑΙ 5^{ης} ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΙΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΟΣΟΝ ΑΦΟΡΑ ΤΗΝ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ



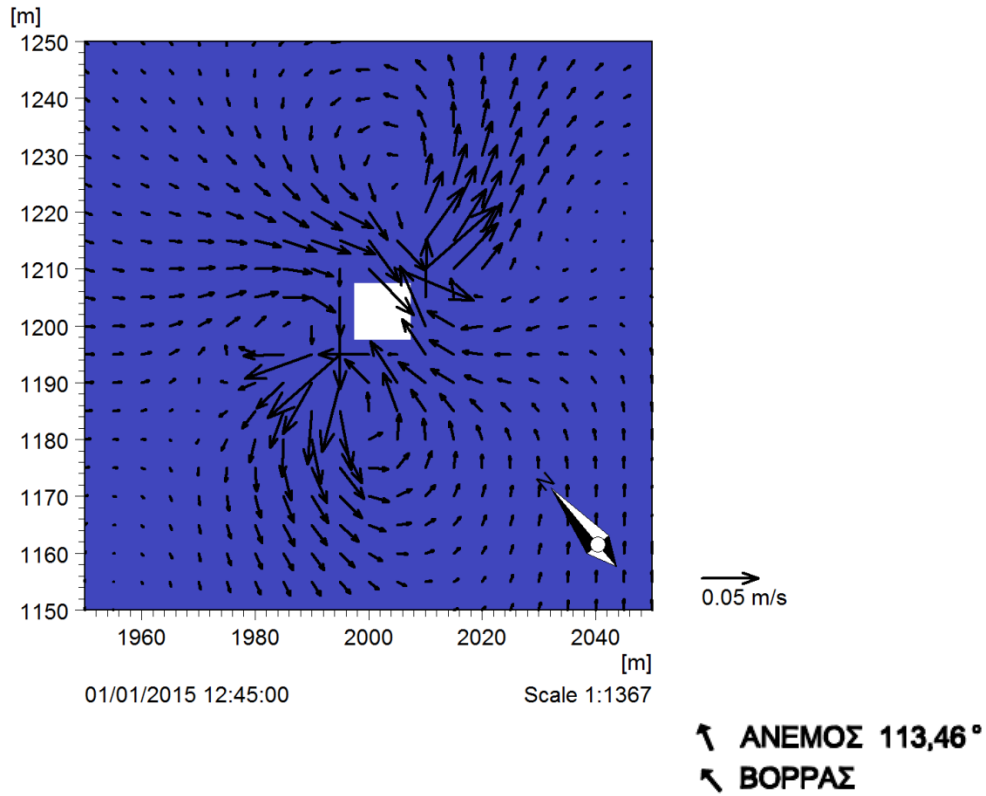
Εικόνα 7.18α: Κυκλοφορία του νερού γύρω την ανεμογεννήτρια Νο2 μετά το πέρας της προσομοίωσης 45min. 4^η περίπτωση χωρίς το αιολικό πάρκο.



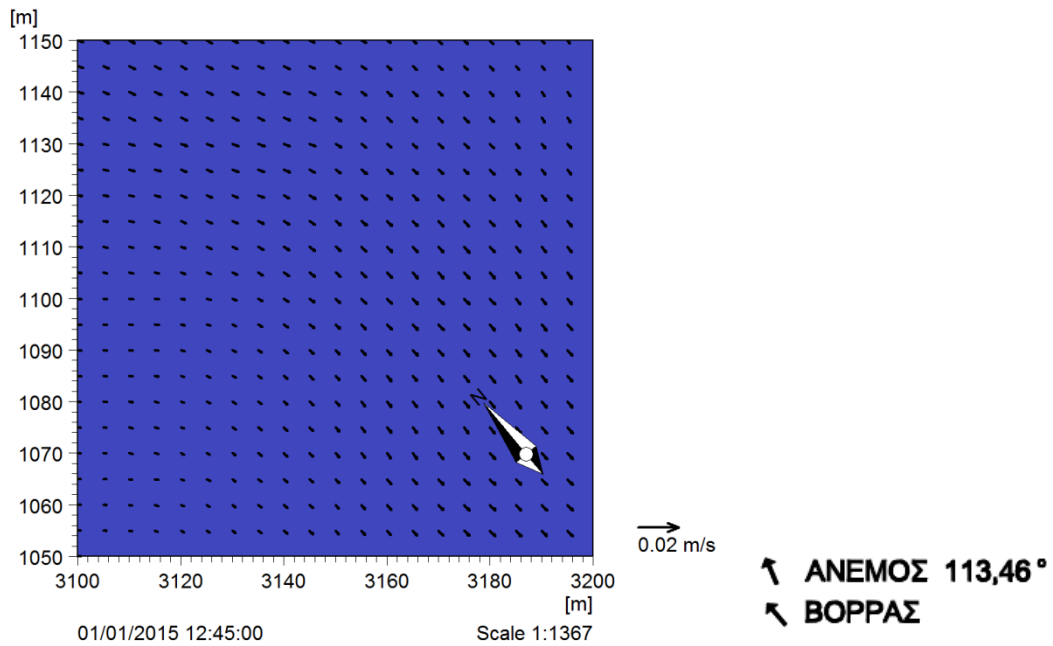
Εικόνα 7.18β: Κυκλοφορία του νερού γύρω την ανεμογεννήτρια Νο2 μετά το πέρας της προσομοίωσης 45min. 5^η περίπτωση με το αιολικό πάρκο.



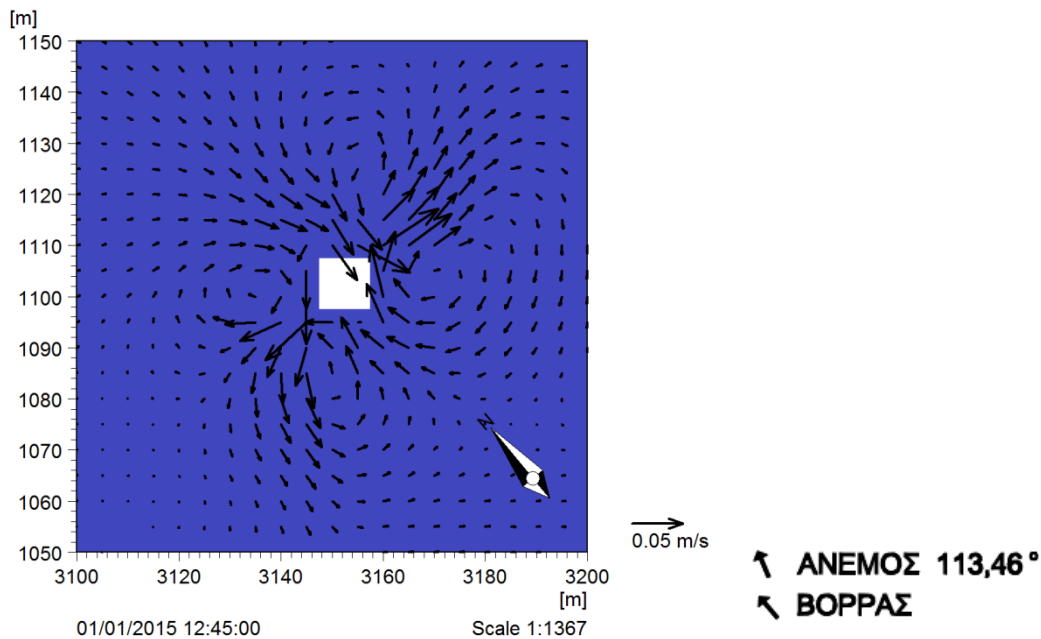
Εικόνα 7.18γ: Κυκλοφορία του νερού γύρω την ανεμογεννήτρια Νο5 μετά το πέρας της προσομοίωσης 45min. 4^η περίπτωση χωρίς το αιολικό πάρκο.



Εικόνα 7.18δ: Κυκλοφορία του νερού γύρω την ανεμογεννήτρια Νο5 μετά το πέρας της προσομοίωσης 45min. 5^η περίπτωση με το αιολικό πάρκο.



Εικόνα 7.18ε: Κυκλοφορία του νερού γύρω την ανεμογεννήτρια Νο11 μετά το πέρας της προσομοίωσης 45min. 4^η περίπτωση χωρίς το αιολικό πάρκο.

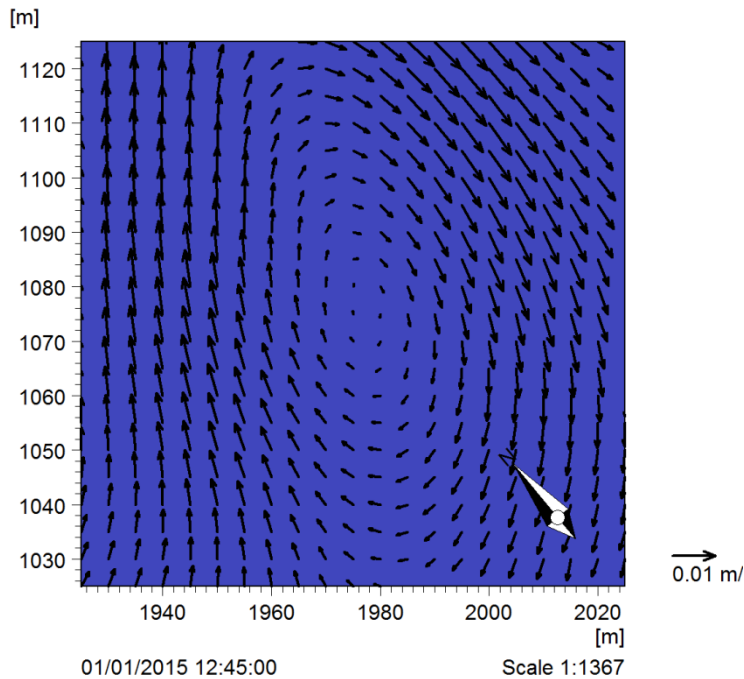


Εικόνα 7.18στ: Κυκλοφορία του νερού γύρω την ανεμογεννήτρια No11 μετά το πέρας της προσομοίωσης 45min. 5^η περίπτωση με το αιολικό πάρκο.

Στις παραπάνω εικόνες παρουσιάζεται η συνισταμένη ολοκληρωμένη στο βάθος ταχύτητα του νερού σε θέσεις όπου θα εγκατασταθούν οι ανεμογεννήτριες, ώστε να γίνει σύγκριση των δύο περιπτώσεων με και χωρίς την παρουσία τους. Από τις παραπάνω εικόνες γίνεται φανερή η μεταβολή της κατεύθυνσης της συνισταμένης ταχύτητας, των ολοκληρωμένων στο βάθος συνιστωσών της, των ταχυτήτων u_0 και v_0 στη διεύθυνση x και y αντίστοιχα. Η μεταβολή έχει τα ίδια χαρακτηριστικά σε όλες τις ανεμογεννήτριες με μικρές παραλλαγές ανάλογα και με τις τοπικές μορφολογικές συνθήκες και έχει πανομοιότυπα χαρακτηριστικά με αυτά του σεναρίου 1. Γίνεται φανερή η σημασία του εμποδίου που συναντά η ροή του νερού κατά τη διεύθυνση διάδοσής της, που παίζει καθοριστικό ρόλο στη μεταβολή της. Η ροή αποκτά χαρακτηριστικά τυρβώδους ροής με στροβιλισμούς, κάτι που αντανακλάται και στις τιμές του σημαντικού ύψους κύματος γύρω από τις ανεμογεννήτριες που είδαμε στην προηγούμενη ενότητα.

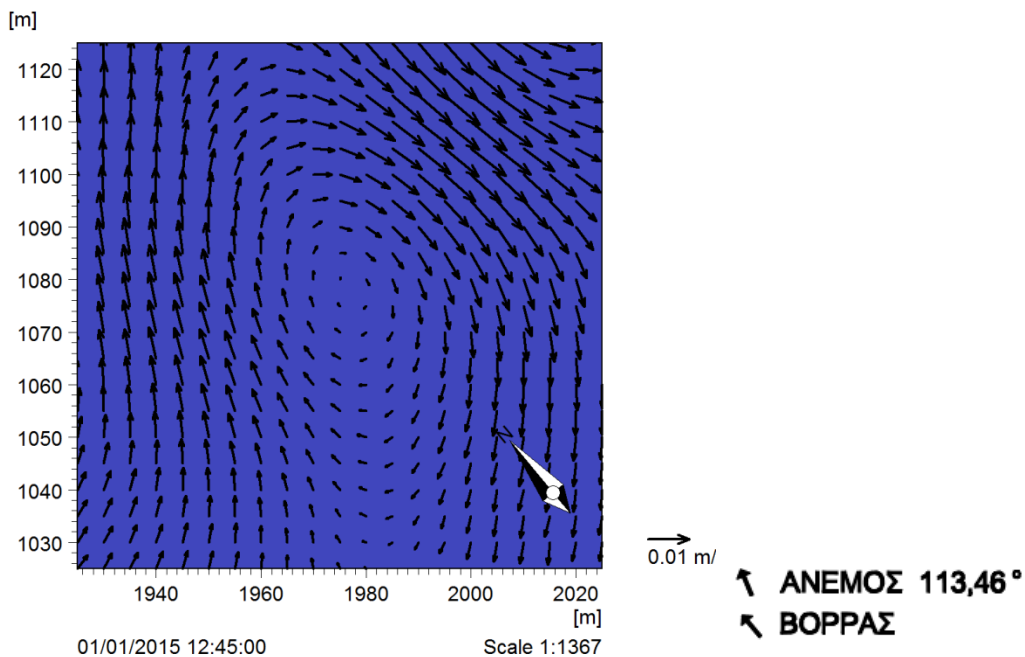


7.3.2.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ 4^{ης} ΚΑΙ 5^{ης} ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΕΝΔΙΑΜΕΣΑ ΑΠΟ ΤΙΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΟΣΩΝ ΑΦΟΡΑ ΤΗΝ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ



↖ **ΑΝΕΜΟΣ 113,46°**
↙ **ΒΟΡΡΑΣ**

Εικόνα 7.19α: Κυκλοφορία γύρω από το σημείο 395,215 που βρίσκεται ελάχιστα νοτιοδυτικά της ανεμογεννήτριας Νο5 μετά το πέρας της προσομοίωσης 45min. 4^η περίπτωση χωρίς το αιολικό πάρκο.



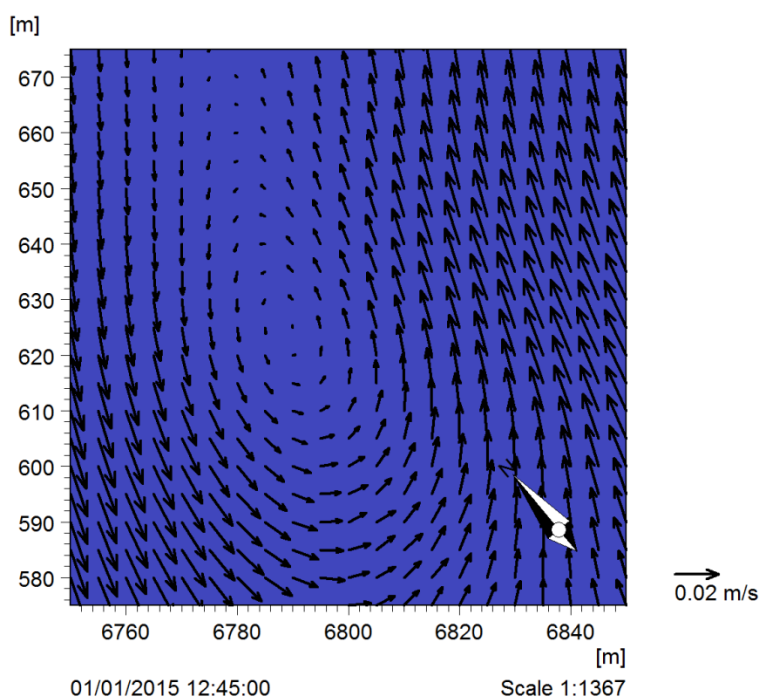
↖ **ΑΝΕΜΟΣ 113,46°**
↙ **ΒΟΡΡΑΣ**

Εικόνα 7.19β: Κυκλοφορία γύρω από το σημείο 395,215 που βρίσκεται ελάχιστα νοτιοδυτικά της ανεμογεννήτριας Νο5 μετά το πέρας της προσομοίωσης 45min. 5^η περίπτωση με το αιολικό πάρκο.



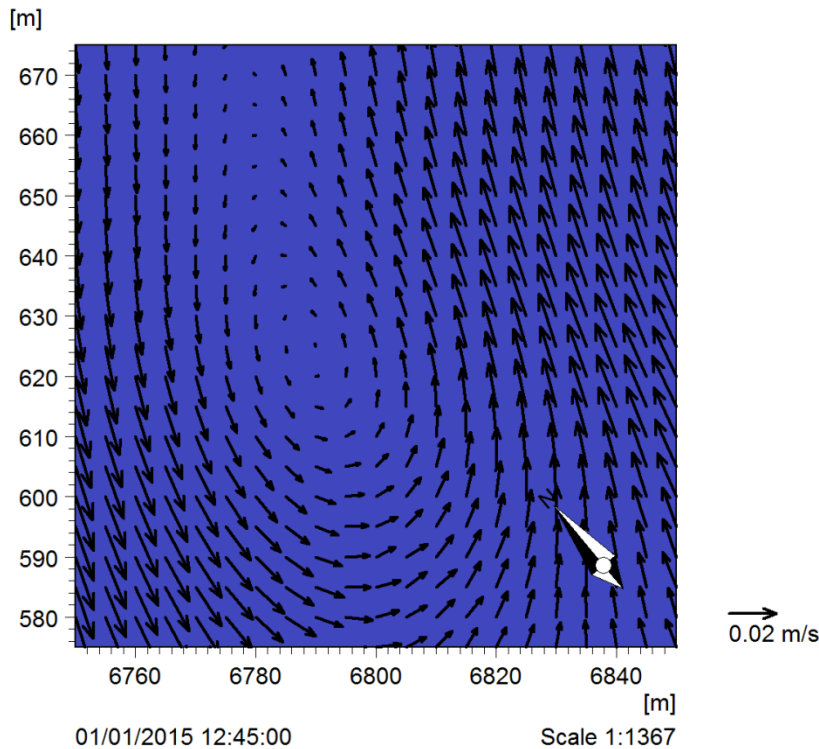
Από τις παραπάνω εικόνες 7.19α και 7.19β προκύπτει ότι δεν υπάρχει αξιοσημείωτη μεταβολή στην κατεύθυνση της συνισταμένης ολοκληρωμένης στο βάθος ταχύτητας σε σημεία που βρίσκονται μεταξύ των ανεμογεννητριών λόγω της παρουσίας του αιολικού πάρκου. Ελάχιστες ή καθόλου μεταβολές εμφανίζονται στο μέτρο της ταχύτητας αυτής. Αξίζει να αναφερθεί σε αυτό το σημείο, ότι μικρές δίνες και στροβιλισμοί εμφανίζονται ακριβώς στις ίδιες περιοχές και στις δύο περιπτώσεις, με και χωρίς την παρουσία του αιολικού πάρκου. Οι περιοχές αυτές όμως είναι διαφορετικές από το σενάριο 1, γεγονός που οφείλεται στη διαφορετική διεύθυνση των κυματισμών και γενικά στη διαφορετική κατάσταση θάλασσας.

7.3.2.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ 4^{ης} ΚΑΙ 5^{ης} ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΣΕ ΣΗΜΕΙΑ ΜΕ ΑΠΟΤΟΜΗ ΚΛΙΣΗ ΠΥΘΜΕΝΑ ΟΣΟΝ ΑΦΟΡΑ ΤΗΝ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ



↖ **ΑΝΕΜΟΣ 113,46°**
↖ **ΒΟΡΡΑΣ**

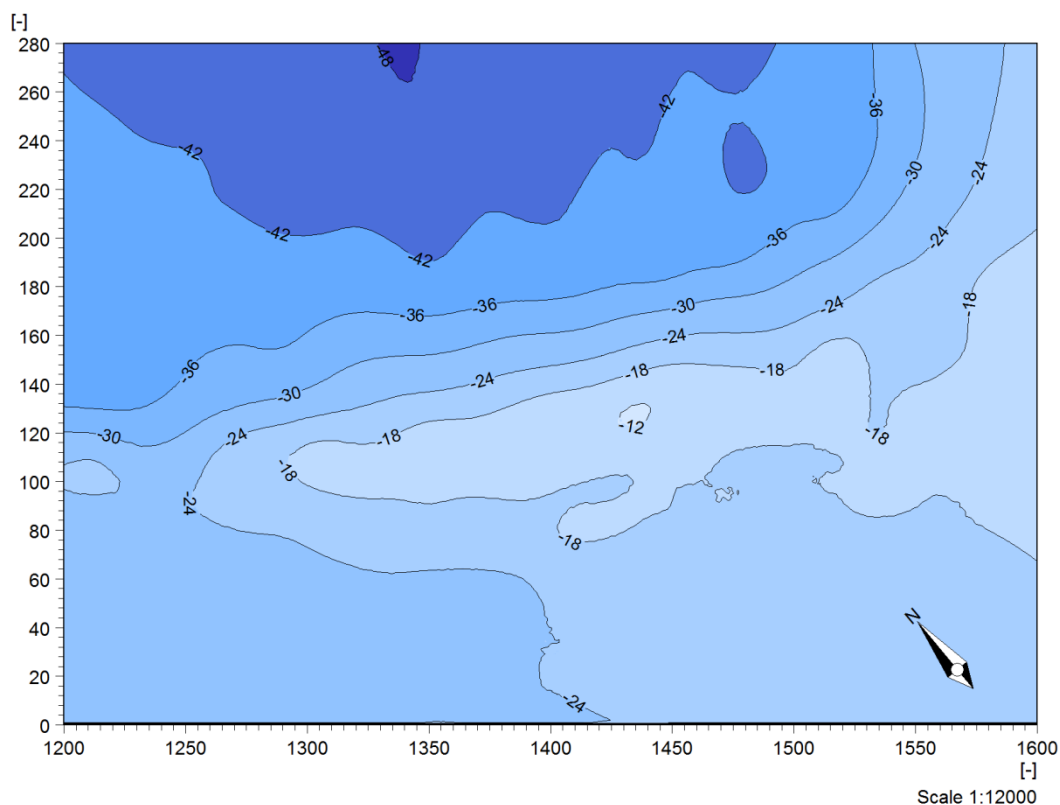
Εικόνα 7.20α: Κυκλοφορία γύρω από το σημείο 1360,125 που βρίσκεται σε περιοχή με πιο απότομες κλίσεις του πυθμένα μετά το πέρας της προσομοίωσης 45min. 4^η περίπτωση χωρίς το αιολικό πάρκο.



↖ **ΑΝΕΜΟΣ 113,46°**
↙ **ΒΟΡΡΑΣ**

Εικόνα 7.20β: Κυκλοφορία γύρω από το σημείο 1360,125 που βρίσκεται σε περιοχή με πιο απότομες κλίσεις του πυθμένα μετά το πέρας της προσομοίωσης 45min. 5^η περίπτωση με το αιολικό πάρκο.

Από τις εικόνες 7.20α και 7.20β προκύπτει ότι δεν υπάρχει αξιοσημείωτη μεταβολή στην κατεύθυνση της συνισταμένης ολοκληρωμένης στο βάθος ταχύτητας σε σημεία με απότομη κλίση του πυθμένα και έντονα μεταβαλλόμενη βαθυμετρία λόγω της παρουσίας του αιολικού πάρκου. Ελάχιστες ή καθόλου μεταβολές εμφανίζονται στο μέτρο της ταχύτητας αυτής. Αξίζει όμως να σημειωθεί η μεταβολή της ροής του νερού και η εμφάνιση περιδίνησης στην περιοχή αυτή που εμφανίζεται απότομη αλλαγή του πυθμένα με κλίση που φθάνει τοπικά το 10%. Να θυμίσουμε ότι οι κυματισμοί κινούνται σε διεύθυνση νοτιοανατολική και ότι συναντούν μία ρηχή περιοχή και στη συνέχεια κινούνται σε βαθιά νερά όπως φαίνεται στην εικόνα 7.21. Η περιοχή αυτή μοιάζει με ύφαλο, λειτουργεί σαν εμπόδιο όπως ακριβώς και οι ανεμογεννήτριες επιφέροντας παρόμοιες μεταβολές στη ροή του νερού με στροβιλισμούς. Η περιοχή αυτή μοιάζει με αυτή του σεναρίου 1, απλά μετακινείται το σημείο γύρω από το οποίο έχουμε την εμφάνιση της δίνης.



Εικόνα 7.21: Βαθυμετρία στο σημείο 1360,125 (συντεταγμένες πλέγματος [x5m]).

7.3.3 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 6^η - ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕ ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ ΜΕ 1 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ

Περίπτωση 3^η περιοχή με αιολικό πάρκο με 1 ανεμογεννήτρια (No5):

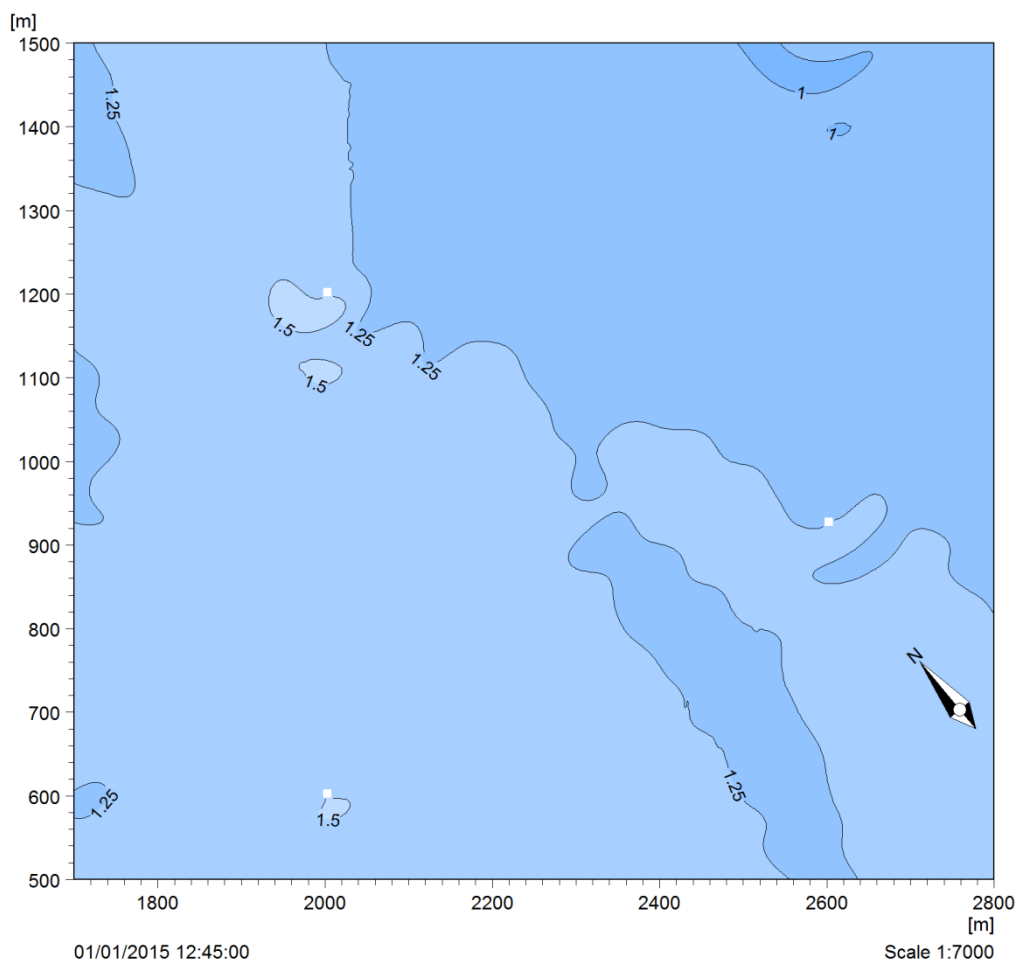
- Σημαντικό ύψος κύματος, $H_{m0} = 1,37\text{m}$
- Φασματική περίοδος αιχμής, $T_p = 10,18\text{s}$
- Μέση περίοδος αιχμής, $MWD = 113,46^\circ$
- Φάσμα συχνότητας JONSWAP
- Κατευθυντική διανομή κυματισμών (directional wave distribution)

Στην περίπτωση αυτή θεωρούμε ότι το αιολικό πάρκο αποτελείται από μία ανεμογεννήτρια, ούτως ώστε να διερευνήσουμε την επιρροή που δέχεται η κάθε μία ανεμογεννήτρια από τις γειτονικές της. Για το σκοπό αυτό επιλέγουμε την ανεμογεννήτρια No5 (με συντεταγμένες πλέγματος 400,240 [x5m]), που είναι αυτή της 4^{ης} περίπτωσης με τη μεγαλύτερη αύξηση του σημαντικού ύψους κύματος, αλλά και αυτή που βρίσκεται κεντρικά στο πάρκο, οπότε θεωρητικά δέχεται και τη μεγαλύτερη επιρροή. Η ανεμογεννήτρια αυτή ήταν πάλι και στη 2^η περίπτωση αυτή με τη μεγαλύτερη αύξηση του σημαντικού ύψους κύματος. Αυτό βέβαια μπορεί να οφείλεται στο ότι και στις δύο περιπτώσεις η κατεύθυνση του κυματισμού μοιάζει

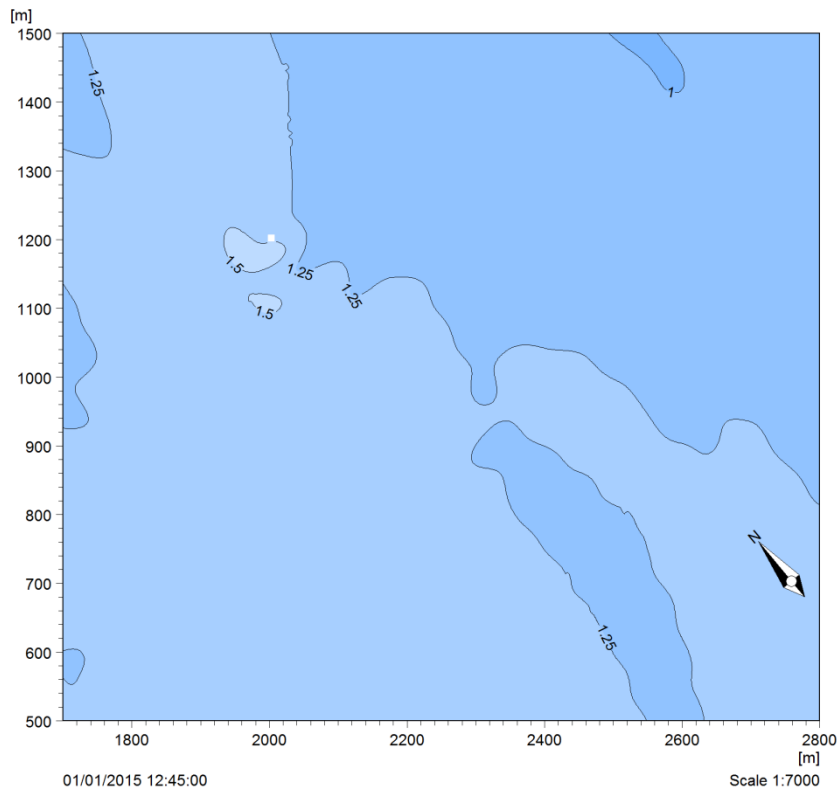


σχετικά, είναι νότια-νοτιοανατολική, μπορεί να οφείλεται και στην τοπική μορφολογία του πυθμένα και του περιβάλλοντος χώρου. Τα αποτελέσματα θα συγκριθούν με τις δύο προηγούμενες περιπτώσεις, ενώ όλες οι παράμετροι παραμένουν ίδιες.

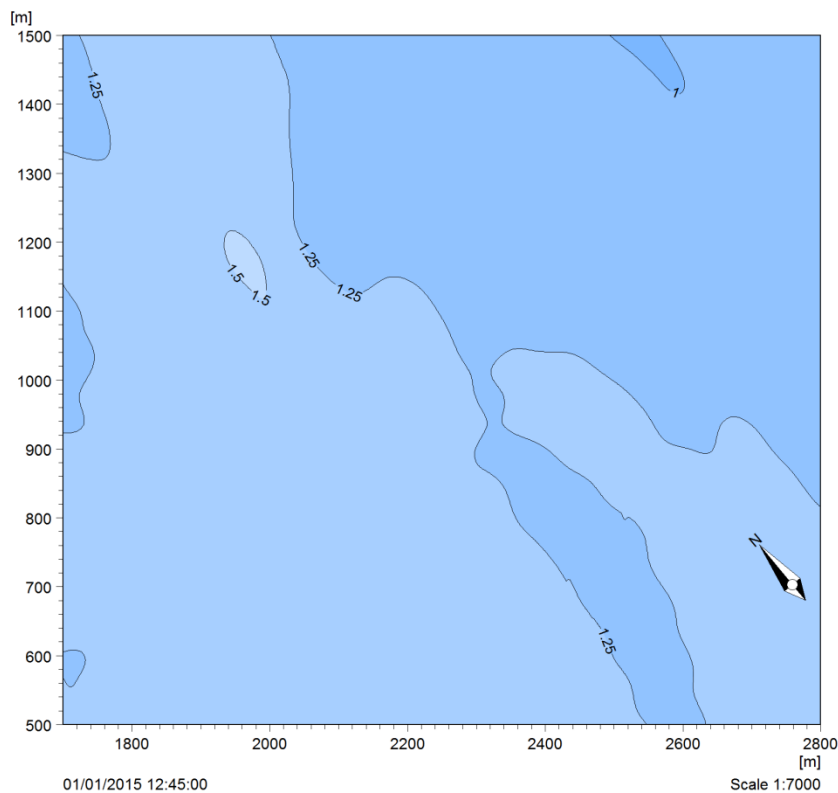
7.3.3.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ 5^{ης} ΚΑΙ 6^{ης} ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΙΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΟΣΩΝ ΑΦΟΡΑ ΤΟ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟ ΎψΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ



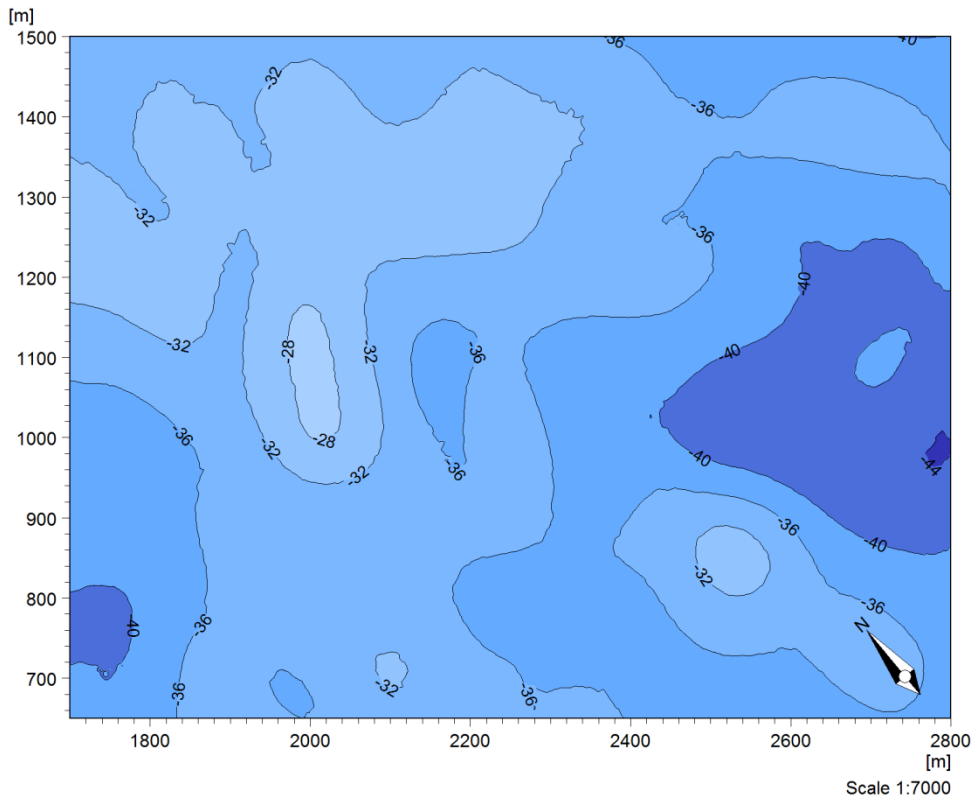
Εικόνα 7.22α: Σημαντικό ύψος κύματος στην περίπτωση αιολικού πάρκου με 12 γεννήτριες. Η γεννήτρια Νο5 βρίσκεται πάνω αριστερά (συντεταγμένες πλέγματος [x5m]).



Εικόνα 7.22β: Σημαντικό ύψος κύματος στην περίπτωση αιολικού πάρκου με 1 γεννήτρια. Η γεννήτρια Νο5 βρίσκεται πάνω αριστερά (συντεταγμένες πλέγματος [x5m]).



Εικόνα 7.22γ: Σημαντικό ύψος κύματος στην περίπτωση που δεν υπάρχουν γεννήτριες. (συντεταγμένες πλέγματος [x5m]).



Εικόνα 7.22δ: Βαθυμετρία γύρω από τη γεννήτρια Νο5, η οποία έχει εγκατασταθεί στη θέση 400,240 (συντεταγμένες πλέγματος [x5m]).

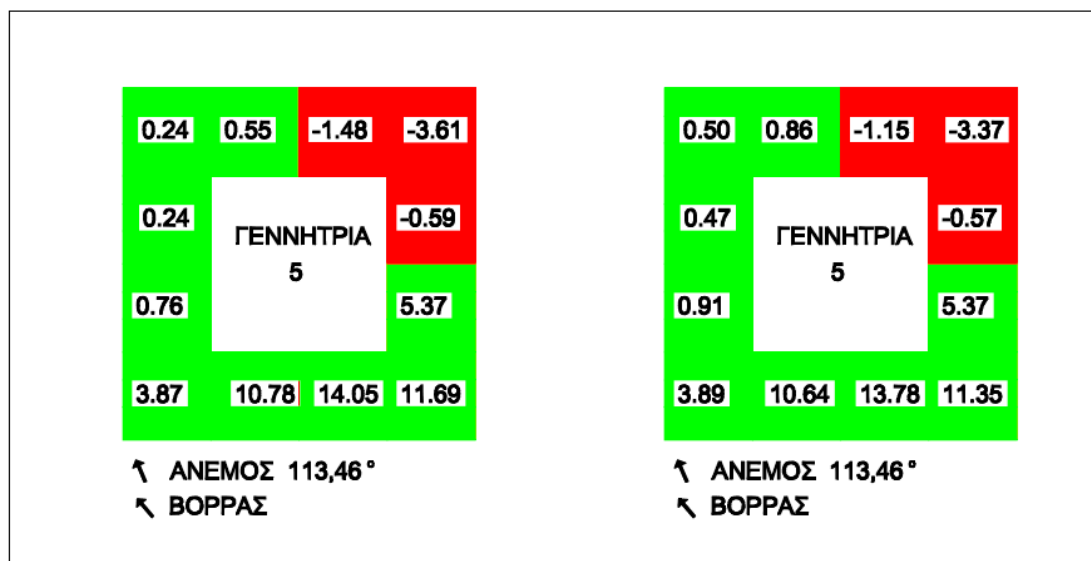
Από τις παραπάνω εικόνες φαίνεται ότι το σημαντικό ύψος κύματος μεταβάλλεται ελάχιστα, λόγω της παρουσίας του πάρκου, εκτός από τα σημεία που έχουν εγκατασταθεί οι ανεμογεννήτριες. Όπως έχουμε ήδη δει και σε προηγούμενα, εμφανίζεται σημαντική αναρρίχηση ανάντη και μικρή κατάντη, με μικρούς στροβιλισμούς στα πλαϊνά της ανεμογεννήτριας. Το φαινόμενο της αναρρίχησης εμφανίζεται και στις δύο περιπτώσεις, είτε δηλαδή η γεννήτρια Νο5 είναι μόνη της, είτε μαζί με τις υπόλοιπες. Σε γενικές γραμμές δεν επηρεάζεται σημαντικά το σημαντικό ύψος κύματος στην περιοχή λόγω της παρουσίας του αιολικού πάρκου, πιθανώς λόγω της επαρκούς απόστασης μεταξύ των ανεμογεννητριών και ίσως του βάθους εγκατάστασης τα οποίο δεν είναι μικρό.

Η ύπαρξη του αιολικού πάρκου με τις 12 γεννήτριες έχει μικρή επίδραση στο σημαντικό ύψος κύματος στα σημεία γύρω από την ανεμογεννήτρια Νο5, με διακύμανση από -0,30% έως +0,35%. Το φαινόμενο δηλαδή της σκίασης της ανεμογεννήτριας από τις υπόλοιπες, σε ένα αιολικό πάρκο δεν εμφανίζεται έντονα κάτι που οφείλεται στην απόσταση μεταξύ των ανεμογεννητριών (600m) που επιλέχτηκε για την παρούσα εργασία.

Στην εικόνα 7.23 φαίνεται η ποσοστιαία μεταβολή του σημαντικού ύψους κύματος γύρω από την γεννήτρια Νο5 (με και χωρίς το αιολικό πάρκο) μετά το πέρασ της

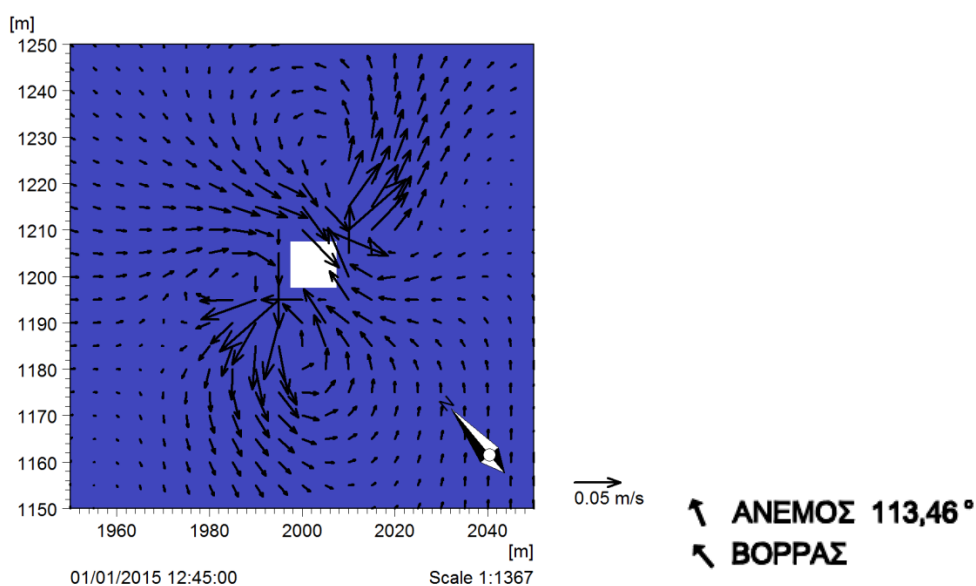


προσομοίωσης 45min. Σε γενικές γραμμές η παρουσία του πάρκου αυξάνει έστω και λίγο το σημαντικό ύψος κύματος γύρω από την γεννήτρια.

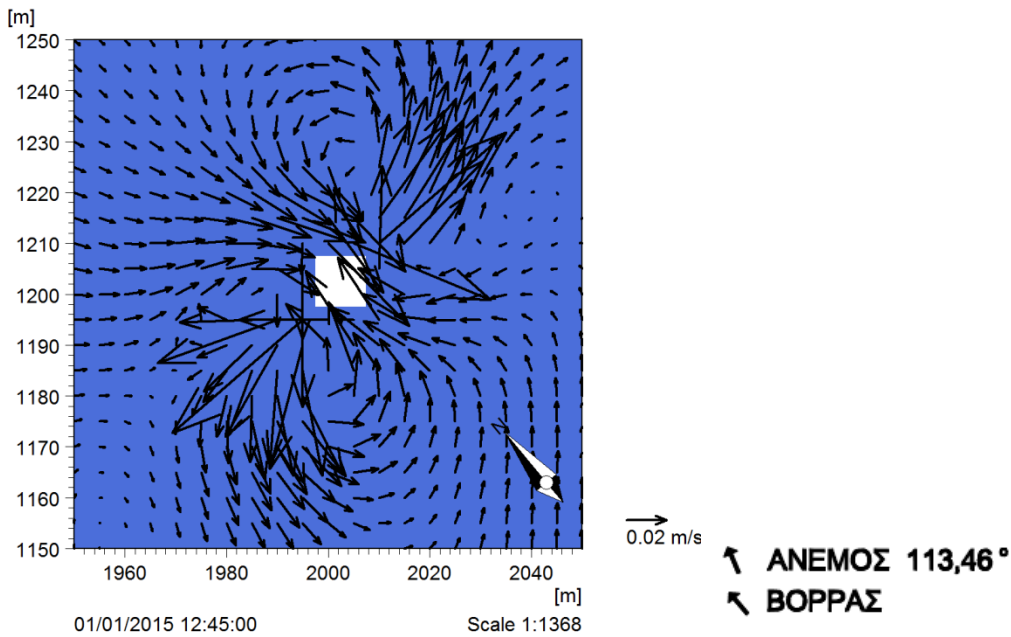


Εικόνα 7.23: Ποσοστιαία μεταβολή του σημαντικού ύψους κύματος (α) αριστερά με και χωρίς το αιολικό πάρκο 4^η και 5^η περίπτωση, β) δεξιά με και χωρίς τη γεννήτρια Νο5, 4^η και 6^η περίπτωση) σε σημεία γύρω από την ανεμογεννήτρια Νο5 μετά το πέρας της προσομοίωσης 45min. Θυμίζοντας ότι ένα σημείο ισούται με ένα κελί πλέγματος, δηλαδή ίσο με 5m.

7.3.3.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ 5^{ης} ΚΑΙ 6^{ης} ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΙΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΟΣΟΝ ΑΦΟΡΑ ΤΗΝ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ



Εικόνα 7.24α: Κυκλοφορία γύρω από την ανεμογεννήτρια Νο5: α) μαζί με τις υπόλοιπες.



Εικόνα 7.24β: Κυκλοφορία γύρω από την ανεμογεννήτρια Νο5: β) μόνη της.

Από τις εικόνες 7.24α και 7.24β προκύπτει ότι δεν υπάρχει μεταβολή στην κατεύθυνση της συνισταμένης ολοκληρωμένης στο βάθος ταχύτητας στα σημεία γύρω από την ανεμογεννήτρια Νο5 λόγω της παρουσίας του αιολικού πάρκου. Υπάρχει όμως πιο έντονη κυκλοφορία στην περίπτωση που η γεννήτρια είναι μόνη της. Στην περίπτωση αυτή δηλαδή φαίνεται η επίδραση του πάρκου στην κυκλοφορία του νερού γύρω από μια γεννήτρια που βρίσκεται κεντρικά στο πάρκο. Η μεταβολή της ροής εξαιτίας του εμποδίου είναι εμφανής και στις δύο περιπτώσεις με εμφάνιση περιδίνησης και στροβιλισμών. Η μεταβολή της ροής εξαιτίας του εμποδίου είναι εμφανής και στις δύο περιπτώσεις με εμφάνιση περιδίνησης και στροβιλισμών με τα ίδια χαρακτηριστικά.

7.4 ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΘΑΛΑΣΣΑΣ – ΣΕΝΑΡΙΟ 3

Το τρίτο και τελευταίο σενάριο είναι θεωρητικό και αποσκοπεί αποκλειστικά στην εξέταση της μεταβολής του σημαντικού ύψους κύματος, λόγω της παρουσίας του αιολικού πάρκου, σε διάφορες αποστάσεις από αυτό. Χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα που είναι σχετικά με την κατάσταση θάλασσας με την υψηλότερη περίοδο αιχμής του κύματος (T_p) πάνω από την περιοχή του αιολικού πάρκου, που παρατηρείται μεταξύ των ετών 1979 και 2013, με μοναδική αλλαγή τη διεύθυνση των κυματισμών, η οποία επιλέχτηκε δυτική (όσον αφορά τον προσανατολισμό του μοντέλου) για λόγους ευκολίας της έρευνας. Οι επιλεγμένες τιμές για Μέση



Κατεύθυνση του Κύματος (MWD) και το σημαντικό ύψος κύματος (H_{m0}), είναι οι τιμές που αντιστοιχούν στην υψηλότερη $T_p = 10,18s$ και $H_{m0} = 1,37m$.

Υπενθυμίζουμε σε αυτό το σημείο ότι λόγω της περιστροφής του μοντέλου κατά 40° αντίθετα από τη φορά των δεικτών του ρολογιού και λόγω της απόκλισης του γεωγραφικού συστήματος κατά $1,02^\circ$ αντίθετα από τη φορά των δεικτών του ρολογιού η μέση κατεύθυνση του κύματος στο μοντέλο διαφέρει από αυτήν της πραγματικότητας. Στο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε η $MWD = 180,00^\circ$ ενώ στην πραγματικότητα θα ήταν βορειοδυτικής κατεύθυνσης $221,02^\circ$. Το σύστημα γωνιών του μοντέλου έχει το 0 στα ανατολικά και θεωρεί ως θετική φορά, αυτή που είναι αντίθετη της φοράς των δεικτών του ρολογιού.

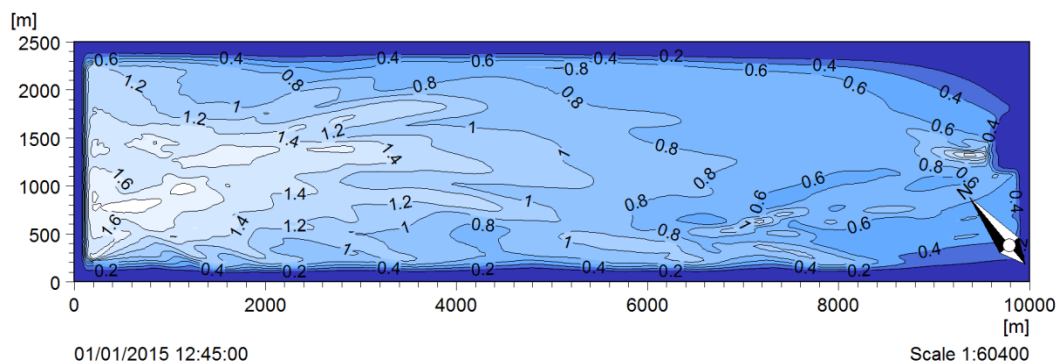
Το μοντέλο αποτελείται από ένα ορθογώνιο πλέγμα με 2001 σημεία στον άξονα x και 501 σημεία στον άξονα y, με απόσταση 5m μεταξύ τους. Η αρχική κατάσταση της μορφολογίας του πυθμένα είναι ίδια για όλες τις περιπτώσεις.

Η ανάλυση αφορά δύο περιπτώσεις με και χωρίς την εγκατάσταση του αιολικού πάρκου και τα αποτελέσματα συγκρίνονται μεταξύ τους.

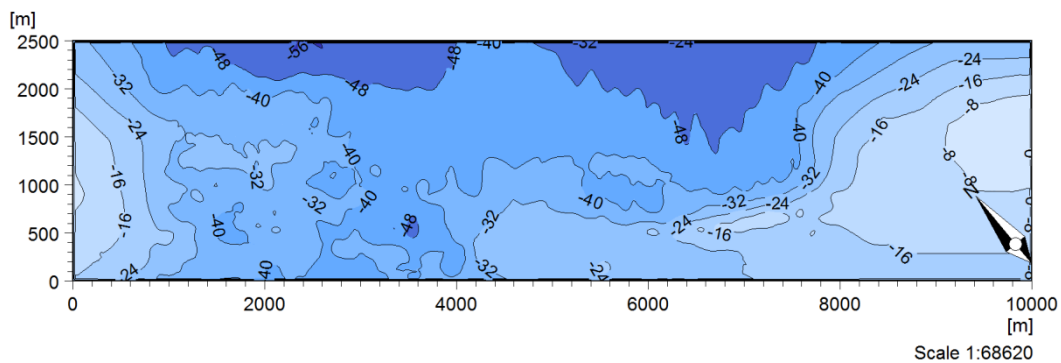
7.4.1 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 7^η - ΠΕΡΙΟΧΗ ΧΩΡΙΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Περίπτωση 7^η αιολικό πάρκο χωρίς ανεμογεννήτριες:

- Σημαντικό ύψος κύματος, $H_{m0} = 1,37m$
- Φασματική περίοδος αιχμής, $T_p = 10,18s$
- Μέση περίοδος αιχμής, $MWD = 180,00^\circ$
- Φάσμα συχνότητας JONSWAP
- Κατευθυντική διανομή κυματισμών (directional wave distribution)



Εικόνα 7.25: Τιμές του σημαντικού ύψους κύματος που αφορούν την 7^η περίπτωση.



Εικόνα 7.26: Βαθυμετρία περιοχής μελέτης.

Η περίπτωση αυτή αφορά την ανοιχτή θάλασσα χωρίς την παρουσία του αιολικού πάρκου και μπορούμε να παρατηρήσουμε τιμές του σημαντικού ύψους κύματος οι οποίες οι οποίες είναι μεγαλύτερες σε περιοχές με ρηχά νερά, από ότι σε περιοχές με βαθιά. Τέτοιες περιοχές είναι στα δυτικά, ουσιαστικά μπροστά από την περιοχή που θα εγκατασταθεί το αιολικό πάρκο, όπου συναντάμε και τις μέγιστες τιμές, οπουδήποτε η ροή καθώς έρχεται από βαθύτερη περιοχή συναντά τοπικά ρηχά και στα ανατολικά (μπροστά από το Μαθράκι) με έντονη αναρρίχηση. Αυτό συμβαίνει πιθανότατα λόγω των ρηχών νερών, απότομη μεταβολή του βάρους και μεγάλη κλίση πυθμένα. Λίγο πιο βορειοδυτικά βρίσκονται οι Οθωνοί. Και σε αυτή την περίπτωση όμως συναντάμε συνήθως μεγαλύτερες τιμές του σημαντικού ύψους κύματος σε περιοχές με ρηχά νερά από ότι σε βαθιά. Οι εσωτερικοί παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για το στήσιμο του μοντέλου είναι ίδιοι με τα προηγούμενα σενάρια. Για την καλύτερη κατανόηση του πλέγματος, τονίζουμε ότι κάθε σημείο του πλέγματος έχει απόσταση από το γειτονικό του 5m, οπότε η συνολική περιοχή που καλύπτουμε είναι 10km επί 2,5km.

7.4.2 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 8^η - ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕ ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ ΜΕ 12 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Περίπτωση 8^η αιολικό πάρκο με 12 ανεμογεννήτριες:

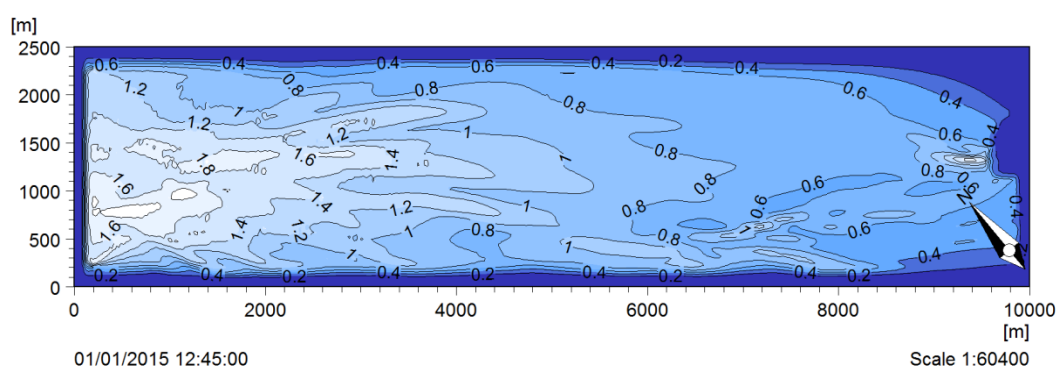
- Σημαντικό ύψος κύματος, $H_{m0} = 1,37m$
- Φασματική περίοδος αιχμής, $T_p = 10,18s$
- Μέση περίοδος αιχμής, $MWD = 180,00^\circ$
- Φάσμα συχνότητας JONSWAP
- Κατευθυντική διανομή κυματισμών (directional wave distribution)

Στην περίπτωση αυτή το αιολικό πάρκο περιλαμβάνει 12 ανεμογεννήτριες διαμέτρου $D = 9m$, σε απόσταση μεταξύ τους περίπου 600m, εγκατεστημένες σε

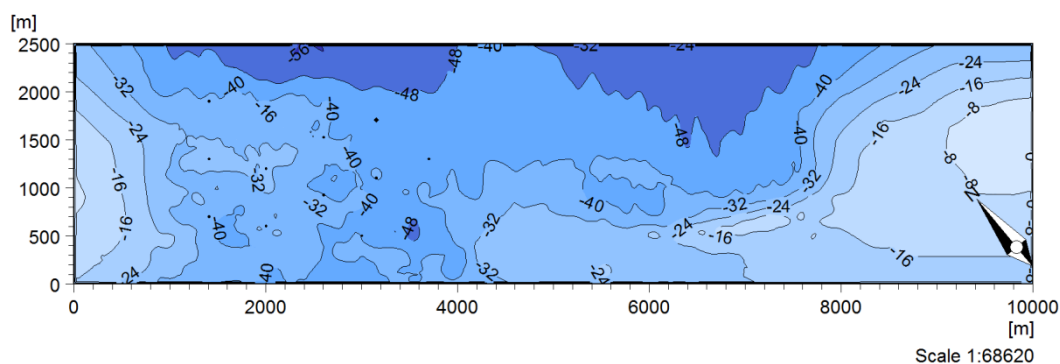


ένα πάσσαλο (moorpile), στα ανατολικά της περιοχής του μοντέλου. Στον πίνακα 7.1 φαίνονται οι συντεταγμένες κάθε μίας ανεμογεννήτριας, ορίζοντας ως αρχή των αξόνων τους άξονες του πλέγματος (σημείο Ο κάτω αριστερά), σε συντεταγμένες πλέγματος, θυμίζοντας ότι η απόσταση κάθε σημείου του πλέγματος είναι 5m. Το αιολικό πάρκο εκτείνεται σε μια περιοχή, (με συντεταγμένες πλέγματος [x5m]), στον άξονα x από 280-740 και στον άξονα y από 100-380.

7.4.2.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ 7^{ης} ΚΑΙ 8^{ης} ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΟΣΟΝ ΑΦΟΡΑ ΤΟ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟ ΥΨΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗΝ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΠΟ ΤΟ ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ



Εικόνα 7.27: Τιμές του σημαντικού ύψους κύματος που αφορούν την 8^η περίπτωση.



Εικόνα 7.28: Βαθυμετρία περιοχής μελέτης.

Συγκρίνοντας τις περιπτώσεις 7 και 8, γίνεται φανερό ότι η παρουσία του αιολικού πάρκου δεν επηρεάζει το σημαντικό ύψος κύματος σε περιοχές κοντά ή μακριά από αυτό. Η μόνη επιρροή είναι σε θέσεις ανάντη και κατάντη των ανεμογεννητριών, όπως είδαμε και στα προηγούμενα κεφάλαια. Η μεταβολή του σημαντικού ύψους του κύματος ακόμα και στις περιοχές που έχει μεγάλες τιμές δεν είναι μεγαλύτερη από 0,5%. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές του μέσου σημαντικού



ύψους του κύματος και η μεταβολή του, μετά και πριν την εγκατάσταση του αιολικού πάρκου σε απόσταση ανά 250m από αυτό. Οι τιμές αυτές ξεκινούν από ποσοστιαία μεταβολή 0,95% σε μικρή απόσταση από το πάρκο (περίπου 300m), και φθίνουν όσο απομακρυνόμαστε από αυτό, μέχρις ότου αρχίσουν λίγο να αυξάνουν καθώς πλησιάζουμε την ακτή στο Μαθράκι στα δυτικά και τελικά γίνονται απειροελάχιστες.

Πίνακας 7.2: Μεταβολή του σημαντικού ύψους κύματος σε απόσταση ανά 250m από το αιολικό πάρκο με και χωρίς την παρουσία του πάρκου. Σημεία με συντεταγμένες πλέγματος [x5m]

α/α	Συντεταγμένη x [x5m]	Συντεταγμένη y [x5m]	Μεταβολή του μέσου σημαντικού ύψους κύματος μετά και πριν την εγκατάσταση του πάρκου [m]	Ποσοστιαία μεταβολή %
1	750	200	0.0009	0.088
2	750	250	-0.0120	-0.884
3	750	300	-0.0010	-0.090
4	800	200	-0.0049	-0.487
5	800	250	0.0122	0.954
6	800	300	-0.0092	-0.817
7	850	200	-0.0027	-0.278
8	850	250	0.0064	0.533
9	850	300	-0.0051	-0.468
10	900	200	-0.0020	-0.206
11	900	250	0.0048	0.424
12	900	300	-0.0029	-0.277
13	950	200	-0.0015	-0.155
14	950	250	0.0029	0.275
15	950	300	-0.0020	-0.201
16	1000	200	-0.0003	-0.028
17	1000	250	0.0020	0.200
18	1000	300	-0.0014	-0.149
19	1050	200	0.0003	0.034
20	1050	250	0.0013	0.137
21	1050	300	-0.0018	-0.199
22	1100	200	0.0004	0.047
23	1100	250	0.0004	0.047
24	1100	300	-0.0015	-0.169
25	1150	200	0.0010	0.116
26	1150	250	0.0002	0.023
27	1150	300	-0.0008	-0.103



28	1200	200	0.0017	0.201
29	1200	250	-0.0004	-0.048
30	1200	300	0.0000	0.008
31	1250	200	0.0019	0.230
32	1250	250	-0.0012	-0.143
33	1250	300	0.0003	0.047
34	1300	200	0.0012	0.155
35	1300	250	-0.0023	-0.275
36	1300	300	-0.0000	-0.013
37	1350	200	0.0014	0.187
38	1350	250	-0.0023	-0.282
39	1350	300	-0.0006	-0.083
40	1400	200	0.0011	0.169
41	1400	250	-0.0019	-0.248
42	1400	300	-0.0007	-0.105
43	1450	200	0.0008	0.123
44	1450	250	-0.0015	-0.212
45	1450	300	-0.0005	-0.083
46	1500	200	0.0002	0.036
47	1500	250	-0.0014	-0.209
48	1500	300	-0.0001	-0.023
49	1550	200	-0.0001	-0.018
50	1550	250	-0.0016	-0.249
51	1550	300	0.0002	0.031
52	1600	200	0.0004	0.072
53	1600	250	-0.0018	-0.293
54	1600	300	0.0007	0.111
55	1650	200	0.0006	0.106
56	1650	250	-0.0017	-0.272
57	1650	300	0.0007	0.112
58	1700	200	0.0007	0.107
59	1700	250	-0.0015	-0.231
60	1700	300	0.0001	0.026
61	1750	200	0.0002	0.046
62	1750	250	-0.0010	-0.137
63	1750	300	-0.0002	-0.035
64	1800	200	-0.0003	-0.058
65	1800	250	-0.0017	-0.227
66	1800	300	0.0002	0.025
67	1850	200	0.0004	0.067
68	1850	250	-0.0008	-0.090
69	1850	300	-0.0005	-0.081



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 – ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

8.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται συνοπτικά όλα τα συμπεράσματα και οι παρατηρήσεις που προέκυψαν από την ανάλυση της παρούσας εργασίας:

- Η παρουσία του αιολικού πάρκου δεν επηρεάζει ιδιαίτερα τις τιμές του σημαντικού ύψους κύματος. Οι περιοχές που εμφάνιζαν υψηλές τιμές, χωρίς την παρουσία του αιολικού πάρκου, είναι ακριβώς ίδιες και όταν υπάρχει το πάρκο. Εκεί όμως που υπάρχει αλλαγή είναι οι περιοχή ακριβώς γύρω από τις ανεμογεννήτριες.
- Σε θέσεις ανάντη των ανεμογεννητριών έχουμε έντονη αναρρίχηση με αύξηση του σημαντικού ύψους κύματος, στις πλάγιες θέσεις έχουμε μικρή μείωση και σε θέσεις κατάντη έχουμε μικρές αυξομειώσεις (συνήθως μικρή αύξηση), κάτι που οφείλεται στη ροή του νερού όταν συναντά μπροστά της εμπόδιο και τους στροβιλισμούς που ακολουθούν τη ροή.
- Η ύπαρξη του αιολικού πάρκου δεν επηρεάζει τις τιμές του σημαντικού ύψους κύματος κοντά στην ακτή, σε περιοχές με μικρό βάθος, όπως και σε περιοχές που βρίσκονται μεταξύ των ανεμογεννητριών διατηρώντας σχεδόν τα ίδια αποτελέσματα με την περίπτωση που το αιολικό πάρκο απουσιάζει.
- Η ανεμογεννήτρια με τη μεγαλύτερη μεταβολή είναι η Νο5, η οποία βρίσκεται κεντρικά στο αιολικό πάρκο. Αυτό συμβαίνει πιθανώς λόγω της συγκεκριμένης μορφολογίας του στερεού πυθμένα στον οποίο είναι θεμελιωμένη, αλλά και της επίδρασης που δέχεται από τις υπόλοιπες ανεμογεννήτριες.
- Η μεταβολή της ροής του νερού όταν συναντά εμπόδια κατά την κατεύθυνση διάδοσής του, με την εμφάνιση περιδίνησης πίσω από το εμπόδιο.
- Δεν υπάρχει σημαντική μεταβολή στην κατεύθυνση της συνισταμένης ολοκληρωμένης στο βάθος ταχύτητας σε σημεία που βρίσκονται μεταξύ των ανεμογεννητριών λόγω της παρουσίας του αιολικού πάρκου. Ελάχιστες ή καθόλου μεταβολές εμφανίζονται στο μέτρο της ταχύτητας αυτής.
- Δεν υπάρχει αξιοσημείωτη μεταβολή στην κατεύθυνση της συνισταμένης ολοκληρωμένης στο βάθος ταχύτητας σε σημεία με απότομη κλίση του πυθμένα και έντονα μεταβαλλόμενη βαθυμετρία λόγω της παρουσίας του αιολικού πάρκου. Ελάχιστες ή καθόλου μεταβολές εμφανίζονται στο μέτρο της ταχύτητας αυτής.
- Η μεταβολή της ροής του νερού και η εμφάνιση περιδίνησης στην περιοχή αυτή που εμφανίζεται απότομη αλλαγή του πυθμένα με κλίση που φθάνει τοπικά το 10%.



- Η παρουσία του πάρκου αυξάνει έστω και λίγο το σημαντικό ύψος κύματος γύρω από την γεννήτρια Νο5. Επηρεάζει επίσης την κυκλοφορία του νερού γύρω από αυτή. Το φαινόμενο δηλαδή της σκίασης της ανεμογεννήτριας από τις υπόλοιπες, σε ένα αιολικό πάρκο δεν εμφανίζεται έντονα κάτι που οφείλεται στην απόσταση μεταξύ των ανεμογεννητριών (600m) που επιλέχτηκε για την παρούσα εργασία.
- Δεν υπάρχει μεταβολή στην κατεύθυνση της συνισταμένης ολοκληρωμένης στο βάθος ταχύτητας στα σημεία γύρω από την ανεμογεννήτρια Νο5 λόγω της παρουσίας του αιολικού πάρκου.
- Οι τιμές του σημαντικού ύψους κύματος οι οποίες είναι μεγαλύτερες σε περιοχές με ρηγά νερά, από ότι σε περιοχές με βαθιά.
- Η παρουσία του αιολικού πάρκου δεν επηρεάζει το σημαντικό ύψος κύματος σε περιοχές κοντά ή μακριά από αυτό. Η μόνη επιρροή είναι σε θέσεις ανάντη και κατάντη των ανεμογεννητριών.
- Οι τιμές του σημαντικού ύψους κύματος ξεκινούν από μία τιμή σε μικρή απόσταση από το πάρκο και φθίνουν όσο απομακρυνόμαστε από αυτό, μέχρις ότου αρχίσουν λίγο να αυξάνουν καθώς πλησιάζουμε την ακτή στο Μαθράκι στα δυτικά και τελικά γίνονται απειροελάχιστες.

8.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Τα συμπεράσματα ουσιαστικά ισχύουν μόνο για υπεράκτια αιολικά πάρκα παρόμοιου μεγέθους. Για μια άλλη διαμόρφωση του αιολικού πάρκου, στο συγκεκριμένο χώρο θα πρέπει να διεξαχθούν άλλες αναλύσεις. Η τάση σε υπεράκτια αιολικά πάρκα είναι προς μεγαλύτερες αλλά λιγότερες ανεμογεννήτριες στην ίδια περιοχή που σημαίνει ότι η επίδραση της διάθλασης σε γενικές γραμμές θα είναι μικρότερη.

Η έρευνα που διεξήχθη με την παρούσα εργασία αφορά συγκεκριμένη περιοχή μελέτης και καταστάσεων θάλασσας. Το γενικότερο θέμα είναι αρκετά δυναμικό και ενδέχεται να εξαχθούν διαφορετικά αποτελέσματα, αν χρησιμοποιηθούν διαφορετικές παράμετροι. Είναι σημαντικό να διερευνηθεί αν υπάρχει σημαντική επιρροή στα επιφανειακά κύματα και την κυκλοφορία του νερού από τον αριθμό των ανεμογεννητριών και το σχήμα του αιολικού πάρκου μέσα στο εσωτερικό του πάρκου και στην κοντινή παράκτια περιοχή.

Επίσης ένα σημαντικό θέμα που πρέπει να εξεταστεί και αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τη μελέτη της αντοχής σε κόπωση της ανεμογεννήτριας είναι η



επιρροή των κυματισμών για πολύ μεγάλα χρονικά διαστήματα. Τέλος πρέπει να αναζητηθεί το μέγεθος της υποσκαφής στη θεμελίωση των ανεμογεννητριών και τρόπος αντιμετώπισής του.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Kai Wei, Sanjay R. Arwade, Andrew T. Myers, *Incremental wind-wave analysis of the structural capacity of offshore wind turbine support structures under extreme loading.*
2. S. Ponce de Leon, J.H.Bettencourt, N.Kjerstad, *Simulation of irregular waves in an offshore wind farm with a spectral wave model.*
3. J. Ramirez, P. Frigaard, T. Lykke Andersen, L. de Vos, *Large scale model test investigation on wave run-up in irregular waves at slender piles.*
4. Kimon Argyriadis, Germanischer Lloyd WindEnergie GmbH, As@gl-group.com, *Recommendations for design of offshore wind turbines External conditions.*
5. C. Pérez-Collazo , D.Greaves, G.Iglesias, *A review of combined wave and offshore wind energy.*
6. Jūratė Kriaučiūnienė, Brunonas Gailiusis, Milda Kovalenkoviėnė, *Peculiarities of sea wave propagation in the Klaipėda Strait, Lithuania.*
7. Michele Samorani, *The Wind Farm Layout Optimization Problem.*
8. Nils Drønen and Rolf Deigaard, *ADAPTATION OF A BOUSSINESQ WAVE MODEL FOR DUNE EROSION MODELING.*
9. *Triton Knoll Offshore Wind Farm Ltd Triton Knoll Preliminary Environmental Information*
10. *MIKE 21 BOUSSINESQ WAVE MODULE SCIENTIFIC DOCUMENTATION BY DHI 2014*
11. Michiel B. Zaaijer, *Comparison of monopile, tripod, suction bucket and gravity base design for a 6 MW turbine.*
12. *Bill Cooper, Frank Beiboer, Potential effects of offshore wind developments on coastal processes, ETSU W/35/00596/00/REP URN 02/1336 Contractor ABP Marine Environmental Research Ltd.*
13. Judith Bosboom, *Wind-Wave Induced Oscillatory Velocities Predicted by Boussinesq Models Terra et Aqua – Number 80 – September 2000.*



14. M. B. ABBOTT Reader, H. M. PINN and O. SKOVGAARD, *ON THE NUMERICAL MODELLING OF SHORT WAVES IN SHALLOW WATER*, International Institute for Hydraulic and Environmental Engineering, Delft, Netherlands, Head, Computational Hydraulic Centre, Danish Hydraulic Institute, Horsholm, Denmark
15. Madsen, Russel Murray and Ole R. Sorensen, *Part 1: A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics*, 'Danish Hydraulic Institute, Agern Alle 5, DK-2970 Horsholm, Denmark
16. A. Madsen and Ole R. Sorensen, *A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics Part 2. A slowly-varying bathymetry*, 'Danish Hydraulic Institute, Agern Alle 5, DK-2970 Horsholm, Denmark.
17. O.R. Sørensen , H.A. Schaffer, P.A. Madsen, *Surf zone dynamics simulated by a Boussinesq typemodel. III. Wave-induced horizontal nearshore circulations*, International Research Centre for Computational Hydrodynamics (ICCH), Danish Hydraulic Institute, Agern.
18. MIKE 21 BW BOUSSINESQ WAVE MODULE USER GUIDE BY DHI 2014
19. wikipedia.org
20. MIKE 21 Boussinesq Wave Module Step-by-step training guide Mike by DHI
21. Panagiotis Skarlas, *IMPACT ASSESSMENT OF OFFSHORE ARTIFICIAL BARRIERS TO THE SEDIMENTS EQUILIBRIUM USING MIKE 21/3 COUPLED MODEL FM*, Thesis, national Technical University of Athens, 06-2015
22. W. Blenderman, *Umgebungsbedingungen und Lastannahmen in der Meerestechnik*, Institut für Schiffbau, 1995
23. John Wiley and Sons, Short, A. D. ed. *Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics*. Chichester, UK, 1999.
24. Elizabeth H. Boak and Ian L. Turner, *Shoreline Definition and Detection: A Review*.
25. Kun-Tan Chang, Dong-Sheng Jeng, *Numerical study for wave-induced seabed response around offshore wind turbine foundation in Donghai offshore wind farm*, Shanghai, China
26. S. Astariz , J. Abanades, C. Perez-Collazo , G. Iglesias, *Improving wind farm accessibility for operation & maintenance through a co-located wave farm: Influence of layout and wave climate*.
27. Xiaojing Sun, Diangui Huang , Guoqing Wu, *The current state of offshore wind energy technology development*.
28. Edgar Mendoza , Rodolfo Silva , Barbara Zanuttigh , Elisa Angelelli , Thomas Lykke Andersend, Luca Martinelli , Jørgen Quvang Harck Nørgaard , Piero Ruol, *Beach response to wave energy converter farms acting as coastal defence*.
29. J. Abanades , D. Greaves, G. Iglesias, *Wave farm impact on the beach profile: A case study*.
30. Matthew P. McCombs, Ryan P. Mulligan , Leon Boegman, *Offshore wind farm impacts on surface waves and circulation in Eastern Lake Ontario*.



31. Joseph Appiott, Amardeep Dhanju, Biliana Cicin-Sain, *Encouraging renewable energy in the offshore environment.*
32. Long Chen, Wei-Haur Lam, *Methods for predicting seabed scour around marine current turbine.*
33. I. Spiropoulou, D. Karamanis, G. Kehayias, *Offshore wind farms development in relation to environmental protected areas.*
34. Haiwen Zhang, Hemming A. Schäffer, Kim P. Jakobsen, *Deterministic combination of numerical and physical coastal wave models.*
35. Marco Guerrinia, Giorgio Bellottia, Yang Fanb, Leopoldo Franco, *Numerical modelling of long waves amplification at Marina di Carrara Harbour.*
36. Andrew B. Kennedy, Qin Chen, James T. Kirby and Robert A. Dalrymple, *BOUSSINESQ MODELING OF WAVE TRANSFORMATION, BREAKING, AND RUNUP. I:1D.*
37. Erik Damgaard Christensen, Martin Johnson , Ole Rene Sørensen , Charlotte Bay Hasager, Merete Badger , Søren Ejling Larsen, *Transmission of wave energy through an offshore wind turbine farm.*
38. P.A. Madsen , O.R. Sdrensen, H.A. Schaffer, *Surf zone dynamics simulated by a Boussinesq type model. Part II: surf beat and swash oscillations for wave groups and irregular waves.*