



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων
Μηχανικών

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«Ναυτική και Θαλάσσια Τεχνολογία και Επιστήμη»

Μεταπτυχιακή εργασία

**Μελέτη της πιθανής επίδρασης των
δυναμικών θαλάσσιων συνθηκών στους
παράκτιους οικότοπους.
Εφαρμογή στην Αφάντου Ρόδου.**

Βύρων Μωραΐτης



Αθήνα, 2015

Φωτογραφία εξώφυλλου: Όρμος Αφάντου Ρόδου (<http://statbank.gr/afadou-rhodos/>)

Τίτλος:

Μελέτη της πιθανής επίδρασης των δυναμικών θαλάσσιων συνθηκών στους παράκτιους οικότοπους. Εφαρμογή στην Αφάντου Ρόδου.

Μεταπτυχιακός φοιτητής:

Βύρων Μωραΐτης (Α.Μ: 08113822)

Τριμελής επιτροπή:

Τακβόρ Σουκισιάν (επιβλέπων): Ερευνητής Β', ΕΛΚΕΘΕ

Σπυρίδων Α. Μαυράκος: Καθηγητής ΕΜΠ, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών

Κωνσταντίνος Μπελιμπασάκης: Αν. Καθηγητής ΕΜΠ, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών

Αθήνα, Ιούνιος 2015

Ευχαριστίες:

Στον επιβλέποντά μου κ. Τ. Σουκισιάν, Ερευνητή Β' του ΕΛΚΕΘΕ, για την όλη συνεργασία.

Στον κ. Β. Καψιμάλη, Ερευνητή Β' του ΕΛΚΕΘΕ, για την διάθεση των βαθυμετρικών δεδομένων και την συνεργασία.

Στον κ. Η. Μουσούλη, αντιπρόσωπο του ΔΗΙ, για την παροχή της άδειας χρήσης του αριθμητικού μοντέλου MIKE 21 και την υποστήριξη.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Σύμβολα και επεξήγηση	σελ. 9
Περίληψη - Abstract	σελ. 11
1. Εισαγωγή	σελ. 13
2. Η παράκτια ζώνη και το Μεσογειακό είδος <i>Posidonia oceanica</i>	
2.1. Παράκτια ζώνη και σχετικές διεργασίες	σελ.15
2.2. Το θαλάσσιο είδος <i>Posidonia oceanica</i>	σελ. 17
3. Κυματική θεωρία Boussinesq	
3.1. Σύντομη αναφορά στις κυματικές θεωρίες.....	σελ. 21
3.2. Βασικές εξισώσεις Boussinesq.....	σελ. 24
4. Το σύστημα προσομοίωσης MIKE 21 BW by DHI	
4.1. Γενική παρουσίαση του προγράμματος	σελ. 27
4.2. Μέθοδος επίλυσης - Αριθμητική Εφαρμογή	σελ. 28
4.3. Εφαρμογές και Δυνατότητες	σελ. 29
4.4. Εργαλεία του MIKE που χρησιμοποιήθηκαν	σελ. 31
4.5. Δημιουργία μοντέλου - MIKE21 Boussinesq Waves	σελ. 36
5. Περιγραφή της περιοχής μελέτης	
5.1. Κυματικό κλίμα	σελ. 41
5.2. Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά	σελ. 44
6. Εφαρμογή μεθόδου εργασίας στην περιοχή μελέτης	
6.1. Μέθοδος εργασίας	σελ. 47
6.2. Σύντομη αναφορά στις δοκιμαστικές προσομοιώσεις	σελ. 48
6.3. Εφαρμογή στην περιοχή μελέτης	σελ. 50
6.4. Παρουσίαση σεναρίων που μελετήθηκαν	
6.4.1. Σύνθεση βασικού υποβάθρου για όλα τα σενάρια	σελ. 58
6.4.2. Σενάρια μέσω κυματικών συνθηκών	σελ. 59
6.4.3. Σενάρια ακραίων κυματικών συνθηκών	σελ. 60
7. Αριθμητικά αποτελέσματα εφαρμογής του μοντέλου.....	σελ. 63
7.1. Αποτελέσματα σεναρίων μέσω κυματικών συνθηκών	σελ. 64
7.2. Αποτελέσματα σεναρίων ακραίων κυματικών συνθηκών	σελ. 70
7.3. Σύνθεση αριθμητικών αποτελεσμάτων και αξιολόγηση	σελ. 80
8. Συμπεράσματα - προτάσεις για μελλοντική έρευνα	σελ. 85
8.1. Το δυναμικό καθεστώς της περιοχής μελέτης	σελ. 86
8.2. Πιθανή επίδραση στους θαλάσσιους παράκτιους οικότοπους	σελ. 87
8.3. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	σελ. 90
9. Βιβλιογραφία	σελ. 93
10. Παραρτήματα	
10.1. Παράρτημα Α - Επιστημονικό υπόβαθρο του MIKE Zero tool Bathymetry Editor	σελ. 97
10.2. Παράρτημα Β - Ερευνητικά προγράμματα χαρτογράφησης οικοτόπων.....	σελ. 101

Στους γονείς μου

Σύμβολα και επεξήγηση

$x, y:$	Οριζόντιες καρτεσιανές συντεταγμένες σε m
$t:$	Χρόνος σε s
$h:$	Συνολικό βάθος ($h=d+z$) σε m
$H:$	Ύψος κύματος σε m
$\lambda:$	Μήκος κύματος σε m
$T:$	Περίοδος κύματος σε s
$d:$	Βάθος στη μέση στάθμη ηρεμίας σε m
$g:$	Επιτάχυνση της βαρύτητας ($g=9.81m/s^2$)
$n:$	Πορώδες
$P:$	Πυκνότητα ροής κατά x σε $m^3/(ms)$
$Q:$	Πυκνότητα ροής κατά y σε $m^3/(ms)$
$B:$	<i>Boussinesq</i> όρος διασποράς
$F_x:$	Όρος οριζόντιας τάσης κατά x
$F_y:$	Όρος οριζόντιας τάσης κατά y
$C:$	Συντελεστής αντίστασης <i>Chezy</i> σε $m^{1/2}/s$
$\alpha:$	Συντελεστής αντίστασης για στρωτή ροή σε πορώδες μέσο
$\beta:$	Συντελεστής αντίστασης για τυρβώδη ροή σε πορώδες μέσο
$\zeta:$	Διακύμανση της ελεύθερης επιφάνειας ως προς τη στάθμη αναφοράς σε m .

Περίληψη

Σε αυτή την εργασία γίνεται η χρήση αριθμητικού μοντέλου διάδοσης επιφανειακών κυματισμών, για τον προσδιορισμό των δυναμικών θαλάσσιων συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή μελέτης, την Αφάντου στην νοτιανατολική Ρόδο. Όπως και σε κάθε παράκτια περιοχή, τα μη γραμμικά φαινόμενα που συμβαίνουν κοντά στην ακτή της Αφάντου, συνθέτουν το υδροδυναμικό καθεστώς που επιδρά στην διαβίωση των τοπικών οικοτόπων. Στην περίπτωση της παρούσας εργασίας, αυτές οι συνθήκες προσομοιώνονται με το μοντέλο MIKE21 BW by DHI και προσδιορίζονται μέσω των αποτελεσμάτων για το πεδίο των -μέσων χρονικά και ολοκληρωμένων στην υδάτινη στήλη- ταχυτήτων μορίων νερού. Ιδιαίτερου ενδιαφέροντος είναι η εύρεση του πεδίου σε περιπτώσεις δράσης ακραίων κυματικών συνθηκών στην περιοχή, αφού εύλογα τότε θα επέλθει η σημαντικότερη επίδραση στους θαλάσσιους οικοτόπους, με αρνητικές συνέπειες στην ανάπτυξη και επιβίωσή τους. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στις επιδράσεις πάνω σε οικοτόπους ποσειδωνίας, καθώς ο ρόλος αυτού του προστατευόμενου είδους στα θαλάσσια οικοσυστήματα της Μεσογείου είναι πολύ σημαντικός. Η εύρεση των περιοχών με το εντονότερο υδροδυναμικό καθεστώς, που προκύπτει από την παρούσα μελέτη, συνδέεται άμεσα με τις περιοχές όπου θα είναι αδύνατη ή δύσκολη η εγκατάσταση και επιβίωση των ειδών. Αυτή η ιδέα, μάλιστα, της παράλληλης χαρτογράφησης των βιολογικών ειδών και της επίδρασης που έχουν στην βιωσιμότητά τους διάφορες φυσικές παράμετροι, όπως οι θαλάσσιες δυναμικές συνθήκες, είναι αντικείμενο πολλών διεθνών προγραμμάτων χαρτογράφησης οικοτόπων. Τα αποτελέσματα της εργασίας καθίστανται έτσι, δυνητικά, περεταίρω αξιοποιήσιμα.

Abstract

In this study, a numerical model for the propagation of waves is used in order to determine the dynamic sea conditions in the study area, namely the coastal area of Afantou in Rhodes island. As in any coastal area, the non-linear phenomena near the coast, form the area's hydrodynamic profile, which, in turn, affects the local habitats. In this thesis, the local coastal dynamic conditions (i.e., wave propagation patterns and time mean depth integrated water velocity fields) are simulated by the MIKE21 BW model (by DHI). The definition of the water velocity field is interesting particularly when extreme wave conditions prevail, as, in such cases, the negative effects on the local habitats, their establishment and growth will be reasonably stronger. Special reference is made to *poseidonica oceanica*, which is the most important protected species in Mediterranean sea habitats. According to the present study, the identification of the specific areas with the strongest hydrodynamics is directly correlated with the bottom areas where the species would probably not establish or survive. In fact, the concept of habitat mapping in an area in combination with the effect that several physical parameters have on the habitats (the dynamic sea conditions for instance), is the goal for many international scientific programs. This fact, renders the methodology developed in this study a potential tool for the assessment of applications related with habitat mapping.

1. Εισαγωγή

Στην εργασία γίνεται η χρήση αριθμητικού μοντέλου για τον προσδιορισμό των θαλάσσιων δυναμικών συνθηκών που επικρατούν σε μια περιοχή, βάσει του πεδίου των μέσων ταχυτήτων των μορίων νερού, με σκοπό τον εντοπισμό των περιοχών που η κυκλοφορία είναι εντονότερη και ασκούνται μεγαλύτερες πιέσεις στον πυθμένα. Σε αυτές τις περιοχές, κατά συνέπεια, αυξάνεται η πιθανότητα επίδρασης στους θαλάσσιους οικοτόπους, που συνήθως έχει ανασταλτικό ρόλο στην επιβίωση και ανάπτυξή τους. Η μελέτη εφαρμόζεται στην περιοχή Αφάντου στην Ρόδο, ακτή που βρίσκεται στο βορειοανατολικό μέρος του νησιού, στην οποία γίνονται την τελευταία τριετία δράσεις στα πλαίσια του προγράμματος “ΘΑΛΗΣ-ΕΚΠΑ – Υποθαλάσσια κοιτάσματα αδρανών υλικών: Μέθοδοι εντοπισμού και εξόρυξης, περιβαλλοντικές επιπτώσεις και δυνατότητες εκμετάλλευσης – MARE”, με το οποίο σχετίζεται η παρούσα έρευνα.

Το αριθμητικό μοντέλο που χρησιμοποιείται είναι το MIKE 21 της εταιρίας Danish Hydraulic Institute (DHI) και πιο συγκεκριμένα το MIKE 21 BW (Boussinesq waves). Το μοντέλο χρησιμοποιείται για την αριθμητική προσομοίωση κυματισμών που διαδίδονται σε παράκτια περιοχή επιλύοντας τις εξισώσεις Boussinesq, οι οποίες περιλαμβάνουν μη-γραμμικά χαρακτηριστικά και διασπορά συχνοτήτων. Τα χαρακτηριστικά και οι δυνατότητες του προγράμματος περιγράφονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 4, όπως αναλυτική περιγραφή γίνεται και για τα επιμέρους εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της εργασίας, την εισαγωγή και παραγωγή των απαιτούμενων αρχείων, την δημιουργία ενός σετ προσομοίωσης με τις σχετικές επιλογές, την εξαγωγή και παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Πιο συγκεκριμένα, τα τελικά αποτελέσματα αφορούν στις χρονικά μέσες ταχύτητες σωματιδίων νερού, ολοκληρωμένες για την κατακόρυφη κολώνα νερού, οι οποίες συνθέτουν το πεδίο μέσων ταχυτήτων που επικρατούν στην περιοχή. Αυτό το πεδίο υποδεικνύει τις περιοχές όπου, εστιασμένα, υπάρχει ενεργειακή συγκέντρωση και έτσι οι πιέσεις που ασκούνται στον πυθμένα είναι εντονότερες. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον αποτελούν οι περιπτώσεις που στην περιοχή επικρατούν ακραίες κυματικές συνθήκες, οι οποίες συνεπάγονται και τις μεγαλύτερες πιέσεις. Η τελευταία διαπίστωση, αξιοποιείται για την κατά προσέγγιση καταγραφή των περιοχών των οποίων οι θαλάσσιοι οικοτόποι είναι πιθανότερο να επηρεαστούν. Η διαδικασία αυτή σχετίζεται με επιστημονικά προγράμματα, βιολογικού κυρίως ενδιαφέροντος, που σκοπεύουν στην χαρτογράφηση παράκτιων περιοχών με βάση την επίδραση μιας σειράς παραγόντων στη βιωσιμότητα των οικοτόπων της, όπως η κατάταξη EUNIS, για την οποία γίνεται περεταίρω αναφορά στην εργασία. Πέραν των ακραίων περιπτώσεων, μελετώνται και σενάρια μέσων κυματικών συνθηκών, ώστε να εφαρμοστούν τα παραπάνω και να εξαχθούν αντίστοιχα αποτελέσματα για τις μέσες συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή.

Το κεφάλαιο 3, που ακολουθεί μετά την σύντομη αναφορά στο μαθηματικό υπόβαθρο και τις κυματικές θεωρίες του κεφαλαίου 2, αφορά στα γενικά χαρακτηριστικά της παράκτιας ζώνης, όπως αυτής που εξετάζεται στην εργασία, αλλά και βιολογικά στοιχεία για μια παράκτια Μεσογειακή περιοχή, με το ενδιαφέρον εστιάζεται στο είδος *roseidonia oceanica*. Στοιχεία για την ποσειδωνία (όπως είναι γνωστό το είδος στα ελληνικά) και τις πληροφορίες για τη δημιουργία

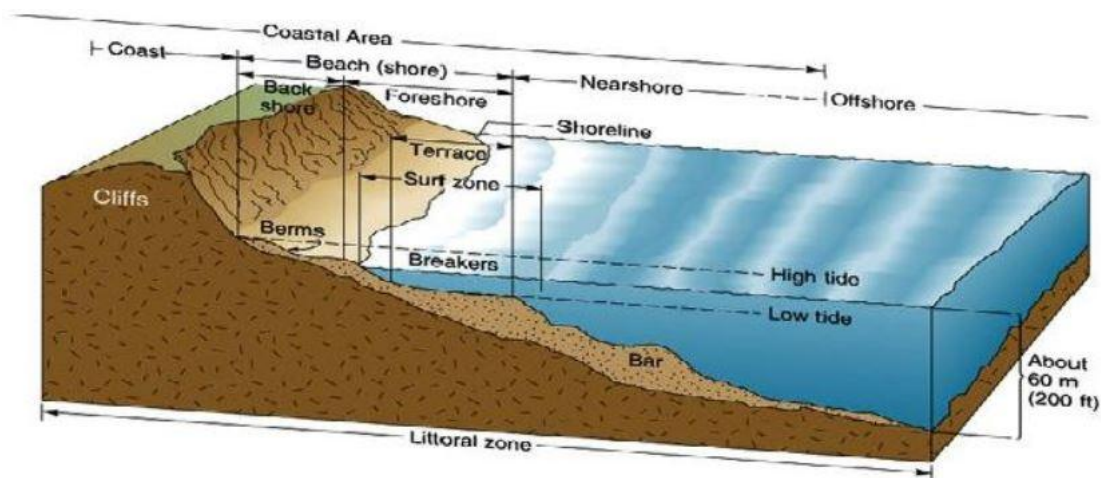
και ανάπτυξή του από σχετική βιβλιογραφία που περιγράφονται σε αυτό το κεφάλαιο, θα αξιοποιηθούν στο κεφάλαιο 8.

Η αναλυτική περιγραφή του μοντέλου, ως προς τα γενικά χαρακτηριστικά του και τα επιμέρους στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την εργασία, όπως προαναφέρθηκε, παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 4. Ακολουθεί η παρουσίαση της περιοχής μελέτης στο κεφάλαιο 5. Γίνεται γενική περιγραφή των κυματικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή -συνοδευόμενων από στατιστικά στοιχεία- και των διαθέσιμων δεδομένων και στοιχείων, τα οποία καθορίζουν τις επιλογές που εφαρμόστηκαν. Σε αυτό το κεφάλαιο, περιλαμβάνεται και η αιτιολόγηση των επιλογών που έγιναν για τη σύνθεση των βασικών στοιχείων των τελικών σετ, όπως της βαθυμετρίας, οι παραδοχές που λήφθηκαν, αλλά και διαθέσιμα από τη βιβλιογραφία γεωλογικά και βιολογικά στοιχεία για την περιοχή. Στα κεφάλαια 6.1-6.2, περιγράφονται συνοπτικά οι εργασίες που πραγματοποιήθηκαν για τη διερεύνηση των κατάλληλων τελικών επιλογών, μαζί με κάποια σχετικά στοιχεία. Στο ακόλουθο κεφάλαιο 6.3 γίνεται η συσχέτιση της παρουσίας του κεφαλαίου 5 με την γενική περιγραφή λειτουργιών του μοντέλου που προηγήθηκε στο κεφάλαιο 4, οπότε περιγράφονται οι ακριβείς επιλογές για τα διάφορα εργαλεία του προγράμματος, γίνεται η παρουσίαση της βαθυμετρίας της και άλλων βασικών στοιχείων για τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν. Τα παραπάνω συμπληρώνει το κεφάλαιο 6.4, όπου παρουσιάζονται τα τελικά σενάρια και τα αντίστοιχα σετ προσομοίωσης που οδηγούν στην εξαγωγή των ζητούμενων αποτελεσμάτων. Εδώ, γίνεται εστίαση στα συγκεκριμένα στοιχεία και επιλογές που αφορούν στο κάθε σενάριο, σε συνδυασμό με την γενική παρουσίαση που έγινε στο κεφάλαιο 5, την εφαρμογή στο 6 και το γενικό υπόβαθρο του 6.4.1. Τα αποτελέσματα περιγράφονται και παρουσιάζονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 7, όπου περιλαμβάνονται ανά περίπτωση τα αποτελέσματα, συνοδευόμενα με διαγράμματα και γραφήματα που προέκυψαν με τη βοήθεια των εργαλείων παρουσίασης του MIKE. Περεταίρω σχολιασμός και σύνθεση των αποτελεσμάτων γίνεται στο κεφάλαιο 8.1, ενώ στο κεφάλαιο 8.2 παρουσιάζεται η προσέγγιση σύνδεσης των αποτελεσμάτων με την πιθανή επίδραση στους παράκτιους θαλάσσιους οικότοπους. Ακόμη, περιγράφεται η προσέγγιση συσχέτισης των αποτελεσμάτων με τη μεθοδολογία χαρτογράφησης οικοτόπων, ενώ μια σύντομη αναφορά στα επιστημονικά προγράμματα χαρτογράφησης οικοτόπων και της επίδρασης που έχουν σε αυτούς οι τοπικές συνθήκες βρίσκεται στο παράρτημα Γ. Για την καλύτερη δυνατή εξαγωγή σχετικών πορισμάτων, λαμβάνονται υπόψη συνδυαστικά τα αποτελέσματα του κεφαλαίου 7, ο σχολιασμός της σύνθεσής τους στο 8.1, αλλά και οι πληροφορίες του κεφαλαίου 3. Η παρουσίαση αυτή, αποτελεί μια πρώτη κατηγοριοποίηση ως παράδειγμα συγκεκριμένης εφαρμογής προσδιορισμού της επίδρασης των θαλάσσιων δυναμικών συνθηκών στους παράκτιους οικότοπους μιας περιοχής, βάσει των διαθέσιμων δεδομένων και των παραδοχών που έγιναν στην εργασία. Τέλος, στο κεφάλαιο 8.3 περιγράφονται προτάσεις για την διενέργεια περεταίρω μελέτης για την επικύρωση και αξιοποίηση των αποτελεσμάτων της εργασίας.

2. Η παράκτια ζώνη και το Μεσογειακό είδος *Posidonia oceanica*

2.1. Παράκτια ζώνη και σχετικές διεργασίες

Παράκτια ζώνη μπορεί να οριστεί η θαλάσσια ζώνη που εκτείνεται από την ακτή μέχρι και την υφαλοκρηπίδα. Θεωρητικά είναι η μία από τις δύο ζώνες που διακρίνεται ο θαλάσσιος χώρος κατά την Ωκεανογραφία. Στη παράκτια ζώνη, πέραν της μεγάλης ανθρώπινης δραστηριότητας, αναπτύσσονται οι περισσότεροι θαλάσσιοι οργανισμοί, κυρίως λόγω των ήπιων φυσικών συνθηκών (θερμοκρασία φωτισμός κ.λπ.) που επικρατούν σε αυτή (Βικιπαίδεια, 'παράκτια ζώνη'). Πιο συγκεκριμένα, κατά την βιολογική/ωκεανογραφική προσέγγιση, η παράκτια ζώνη (littoral zone) χωρίζεται σε τρεις επιμέρους υποπεριοχές, την supralittoral, την eurittoral και την ζώνη sublittoral. Στην πρώτη ζώνη ανήκει το ανώτατο τμήμα που βρέχεται τελικά μόνο σε συνθήκες καταιγίδας ή υψηλής παλίρροιας, με τους οργανισμούς που ζουν εκεί να έχουν να αντιμετωπίσουν τα ανάλογα προβλήματα. Η δεύτερη, 'μεσοπαραλιακή' ζώνη ή αιγιαλός, ακολουθεί και οριοθετείται από τη χαμηλή ανοιξιάτικη παλίρροια και περιλαμβάνει μεγάλη ποικιλία βιοκοινωνιών, μιας που η αντίστοιχη ποικιλότητα των κυματικών και υδροδυναμικών συνθηκών καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό αυτά τα περιβάλλοντα. Η τρίτη ζώνη, γνωστή και ως 'υποπαραλία', βρέχεται μόνιμα από νερό και εκτείνεται ως την υφαλοκρηπίδα, ή, εστιάζοντας στην βιολογική θεώρηση, στο όριο που το φως φτάνει στον θαλάσσιο πυθμένα. Είναι συνεπώς σημαντική λόγω του παραπάνω γεγονότος αλλά και της γενικά σταθερής θερμοκρασίας και πίεσης που παρουσιάζει, καθώς εκεί φιλοξενούνται οι περισσότεροι οργανισμοί. Χωρίζεται περαιτέρω σε δύο ζώνες, την infralittoral, στην οποία αναπτύσσονται κυρίως φύκια και στην circalittoral, που κυριαρχούν άμισχα ζώα όπως τα στρείδια (Wikipedia, 'littoral zone').



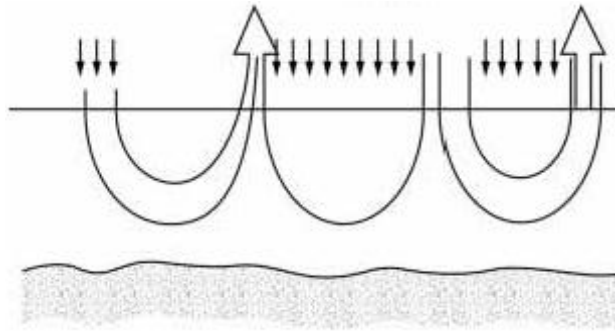
Εικόνα 2.1.1: Παράκτια ζώνη (Wikipedia)

Οι κυματισμοί των ρηχών υδάτων εμφανίζουν πλήθος χαρακτηριστικών ιδιοτήτων, οι οποίες τους διαχωρίζουν από τους κυματισμούς που εμφανίζονται σε βαθιά ύδατα. Καθώς ο κυματισμός διαδίδεται προς ρηχότερα ύδατα, η δυναμική του εμφανίζει σταδιακά μη γραμμικά χαρακτηριστικά. Η ενέργεια μεταφέρεται σε περιοχές μακριά από την κορυφή του φάσματος, σε περιοχές χαμηλότερων και υψηλότερων συχνοτήτων. Αυτό οφείλεται κυρίως στην μεταβολή του βάθους του νερού. Στις περιοχές ρηχών υδάτων ένα πλήθος διεργασιών συνθέτει μια ποικιλόμορφη εικόνα της θαλάσσιας επιφάνειας και του φάσματος των κυματισμών. Μεταξύ των παραπάνω είναι οι μη γραμμικές αλληλεπιδράσεις που εμφανίζονται μεταξύ των συνιστωσών του κυματικού φάσματος, η κυματική διάδοση σε περιοχές έντονης ρήχωσης, η θραύση κυματισμού κ.α. (S. R. Massel, 1989).

Τα όλο μικρότερα και πολλές φορές ιδιαίτερης κατανομής βάθη, οδηγούν σε σημαντική αλληλεπίδραση των διαδομένων προς την ακτή κυματισμών με τον θαλάσσιο πυθμένα, με αποτέλεσμα τα φαινόμενα μη γραμμικότητας και διασποράς που σχετίζονται με τους επιφανειακούς κυματισμούς βαρύτητας καθίστανται ολοένα και πιο σημαντικά. Συνεπώς γίνεται κατανοητό ότι η βαθυμετρία μιας παράκτιας περιοχής έχει καθοριστικό ρόλο, γεγονός που γίνεται φανερό και σημειώνεται και στην συνέχεια της εργασίας. Μερικά από τα παραπάνω φαινόμενα αποτελούν η ανάκλαση (reflection) και διάθλαση (refraction) των κυματισμών, η τροποποίηση του πλάτους των κυματισμών λόγω ρήχωσης (shoaling), η αλληλεπίδραση με την βαθυμετρία και φαινόμενα περίθλασης ή σκέδασης των κυματισμών (diffraction) και η διασπορά των κυματισμών (dispersion). Ακόμη, σημαντικά μη γραμμικά φαινόμενα είναι η τριβή στον πυθμένα και η εξασθένηση της ροής της κυματικής ενέργειας (bottom friction and wave energy dissipation), οι μη γραμμικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ διαφορετικών κυματικών συνιστωσών και η μεταφορά ενέργειας από μια αρχική ζώνη συχνοτήτων του φάσματος των κυματισμών προς μικρότερες και μεγαλύτερες συχνότητες (non-linear interactions), η δημιουργία (κυματογενών) ρευμάτων (wave induced currents) και μεταφορά μάζας και η θραύση των κυματισμών κοντά στην ακτή (wave breaking).

Τα παραπάνω φαινόμενα, ανάλογα με τις συνθήκες, τη γεωμορφολογία και το κυματικό καθεστώς που επικρατεί σε μια περιοχή, μπορεί να εμφανίζονται και συνδυαστικά, ενώ συνθέτουν τελικά τα διάφορα συστήματα κυκλοφορίας που παρατηρούνται στις παράκτιες περιοχές. Αξίζει να σημειωθεί, ότι αυτά τα συστήματα έχουν καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη των παράκτιων οικοτόπων, ιδιαίτερα όταν είναι αρκετά ισχυρά. Χαρακτηριστικό φαινόμενο που είναι πιθανό να εμφανιστεί κατά την ισχύ έντονων συνθηκών και έχει αρνητική επίδραση στην βιωσιμότητα των παράκτιων οικοτόπων, είναι τα επονομαζόμενα rip currents (βελοειδή κύματα).

Τα ρεύματα αυτά αποτελούν φαινόμενο παράκτιας κυκλοφορίας και παρουσιάζονται συχνά σε ομαλές/ευθείας ανάπτυξης και μεγάλου μήκους ακτές. Μια σχηματική αναπαράστασή τους φαίνεται ακολούθως, με τα ασθενή διάχυτα ρεύματα τροφοδοσίας να οδεύουν προς την παραλία (κάτω μέρος) και τα rip currents να κινούνται πολύ ισχυρότερα προς την αντίθετη κατεύθυνση.



Εικόνα 2.1.2.: Rip current (Coastal Processes with Engineering Applications, 2004)

Οι τιμές ταχύτητας των rip currents που εμφανίζονται υπεράκτια ξεπερνούν πολλές φορές τα 2m/s. Οι αιτίες δημιουργίας, που είναι αρκετές και περιγράφονται συνοπτικά με παράλληλες αναφορές σε αντίστοιχες εργασίες στο 'Coastal Processes with Engineering Applications' των R. G. Dean & R. A. Dalrymple (2004), περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων τη χωρική περιοδικότητα της βαθυμετρίας υπεράκτια, τη περιοδικότητα συγκεκριμένων κυματικών συνθηκών και την αλληλεπίδραση κυμάτων-ρευμάτων.

2.2. Το θαλάσσιο είδος *Posidonia oceanica*

Η *Posidonia oceanica* ή ποσειδωνία, αποτελεί το σημαντικότερο ίσως είδος των θαλάσσιων οικοτόπων της Μεσογείου (και άρα -δυνητικά- και της περιοχής μελέτης). Είναι γένος των μονοκοτυλήδων ανθοφόρων φυτών και παρόλο που ανήκει στα αγγειόσπερμα φυτά, φυτρώνει στον βυθό της θάλασσας (Βικιπαίδεια, 'ποσειδωνία'). Τα πιο συχνά βάθη στα οποία συναντάται στη Μεσόγειο το συγκεκριμένο είδος είναι στην παράκτια ζώνη έως τα 45m περίπου. Η ζώνη αυτή φαίνεται παραστατικά στην εικόνα 2.1.1 και σχεδόν ταυτίζεται (ως προς την τοπογραφία) με την περιοχή μελέτης της εργασίας, συνεπώς είναι άμεσου ενδιαφέροντος όπως θα περιγραφεί και στη συνέχεια. Πιο συγκεκριμένα, το είδος *roseidonia oceanica* συναντάται στις ζώνες infralittoral, sulittoral και circalittoral (δηλαδή κυρίως μεταξύ 1 και 35m), όπως φαίνεται σε μια πιο απλή απεικόνιση στην εικόνα 2.2.1.

Το κάτω όριο ανάπτυξης της ποσειδωνίας καθορίζεται από το που τελειώνει η ζώνη που φτάνει το φως στον πυθμένα, όριο που τελικά προσδιορίζεται ευκολότερα και δεν παρουσιάζει μεγάλη διαφοροποίηση ανά τις περιοχές. Ωστόσο, το άνω όριο για την εγκατάσταση, ανάπτυξη και διατήρηση του είδους, καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την υδροδυναμική μιας περιοχής και συγκεκριμένα όταν αυτή είναι εντονότερη στον πυθμένα. Επομένως διαφοροποιείται από περιοχή σε περιοχή περισσότερο, ενώ κάποιο μοντέλο για τη μελέτη αυτής της επίδρασης και της αντίστοιχης κατανομής των θαλάσσιων ειδών σε μικρά βάθη δεν έχει δημιουργηθεί ακόμη.



Εικόνα 2.2.1: Χαρακτηριστικά είδη της Μεσογειακής παράκτιας ζώνης (publicwiki.deltares.nl)

Οι κινήσεις των υδάτων διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη της ποσειδωνίας, αφού στα πρώτα στάδια ανάπτυξης τα νέα φυτά επηρεάζονται από πιθανή ταφή ή μετακίνηση (Infantes et. al., 2012). Μια αναλυτικότερη περιγραφή για την αντοχή του είδους στα πρώτα στάδια ανάπτυξής του στις υδροδυναμικές συνθήκες, δίνοντας έμφαση και στην ανατομία του φυτού, παρουσιάζεται στην εργασία των Infantes et. al., 2012.

Σύμφωνα με την εργασία των Vacchi et. al. (2014), το κύριο στοιχείο που καθορίζει το όριο ανάπτυξης των ποσειδωνιών προς την ακτή πάνω από ιζηματογενείς πυθμένες, με βάση καθαρά φυσικές παραμέτρους απουσία ανθρωπογενών επεμβάσεων, καθορίζεται από το όριο θραύσης των κυμάτων. Η επιρροή ανθρωπογενούς δραστηριότητας σε παράκτιες περιοχές, προκαλεί 'μετακίνηση' του ορίου σε μεγαλύτερα βάθη. Το φαινόμενο θραύσης υπερέχει της σημασίας των χαρακτηριστικών των τοπικών ιζημάτων για την ανάπτυξη των λιβαδιών.

Η αξιολόγηση της φυσικής θέσης του άνω ορίου των λιβαδιών ποσειδωνίας είναι καίριας σημασίας για τον προσδιορισμό σημείου αναφοράς τους, προκειμένου να διακριθεί ο αντίκτυπος των φυσικών διεργασιών έναντι των ανθρωπογενών (Vacchi et. al. 2014) και να αναπτυχθεί δραστηριότητα για την προστασία των οικοτόπων παγκοσμίως. Βέβαια η εύρεση ενός τέτοιου ορίου για μεγάλο εύρος περιπτώσεων δεν είναι απλή. Τα λιβάδια έχουν δυναμική συμπεριφορά και υπόκεινται σε κάθε είδους φυσικές και ανθρωπογενείς δραστηριότητες, αλλά και στις μεταβολές των κλιματικών συνθηκών.

Ως αναφορά στις τελευταίες, είναι γενικώς αποδεκτό σήμερα ότι τα πιο έντονα κλιματικά γεγονότα είναι πιθανότερο να έχουν επίδραση σε ένα αρκετά ανθεκτικό είδος, όπως είναι η ποσειδωνία. Έτσι, πέραν του αργού ρυθμού ανάπτυξης (απαιτείται μια χρονική περίοδος περί των δύο ετών για την δημιουργία και ανάπτυξη τους), απαιτούνται και ήπιες κυματικές και κατά συνέπεια ενεργειακές συνθήκες, που θα εξασφαλίσουν τη βιωσιμότητα των λιβαδιών

ποσειδωνίας. Επομένως, οι σχετικές μελέτες πρέπει να αξιοποιούν δεδομένα μεγάλων χρονικών περιόδων, που θα περιλαμβάνουν και τα ακραία συμβάντα.



Εικόνα 2.2.2: Λιβάδι ποσειδώνιας α) Νάξος (wikipedia), β) κόλπος Μιραμπέλλου (Θ. Νταλιάνης, ΙΘΑΒΙΓ, ΕΛΚΕΘΕ)

Περιστατικά ακραίων συνθηκών (όπως στην εκτεθειμένη περιοχή μελέτης) όπως προαναφέρθηκε, είναι δυνατό να ανακόψουν την εγκατάσταση και ανάπτυξη τέτοιων οικοτόπων ή, αν έχουν εγκατασταθεί, να επιδράσουν στην βιωσιμότητά

τους προκαλώντας τις βίαιες μετακινήσεις τους. Ακόμη και αν η συχνότητα των ακραίων συνθηκών είναι μικρή (μία φορά κάθε 2-3 χρόνια), η πιθανότητα να έχουν καίρια επίδραση σε τέτοιους παράκτιους οικότοπους είναι μεγάλη.

Η σημασία που έχουν τα λιβάδια ποσειδωνίας στο παγκόσμιο θαλάσσιο οικοσύστημα είναι αντίστοιχος με αυτόν των δασών στη στεριά: παραγωγή οργανικής ύλης, οξυγόνου, σταθεροποίηση των ιζημάτων, προσφορά βιοτόπων αναπαραγωγής και προστασίας σε πολλά είδη ζώων και αύξηση της βιοποικιλότητας. Για αυτό άλλωστε σήμερα, αφού έχει αναδειχθεί η αξία αυτού του οικοσυστήματος, η προστασία του ενσωματώθηκε στο θεσμικό πλαίσιο της Ε.Ε και στις εθνικές νομοθεσίες των κρατών μελών (NATURA 2000 κ.ά).

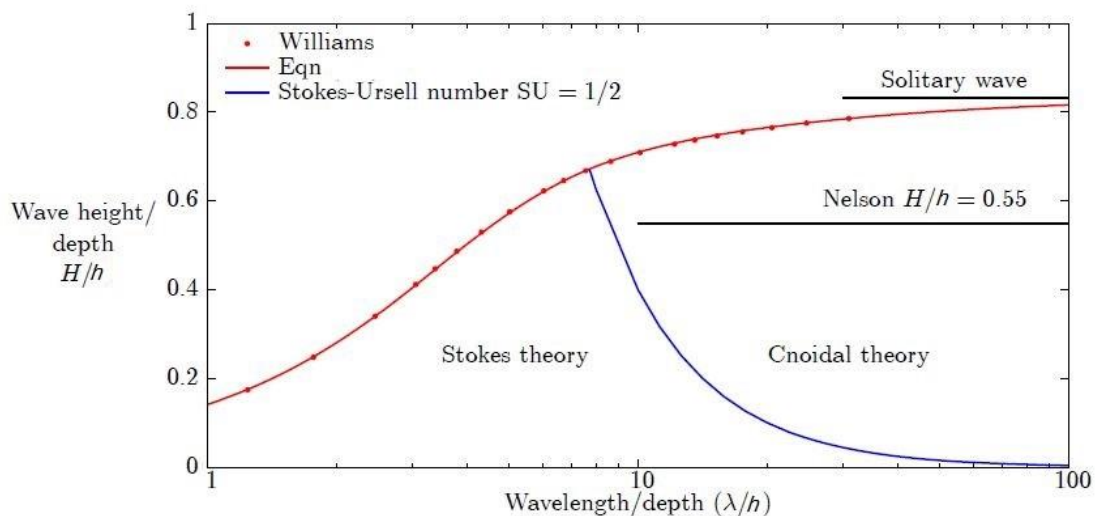
3. Κυματική θεωρία Boussinesq

3.1. Σύντομη αναφορά στις κυματικές θεωρίες

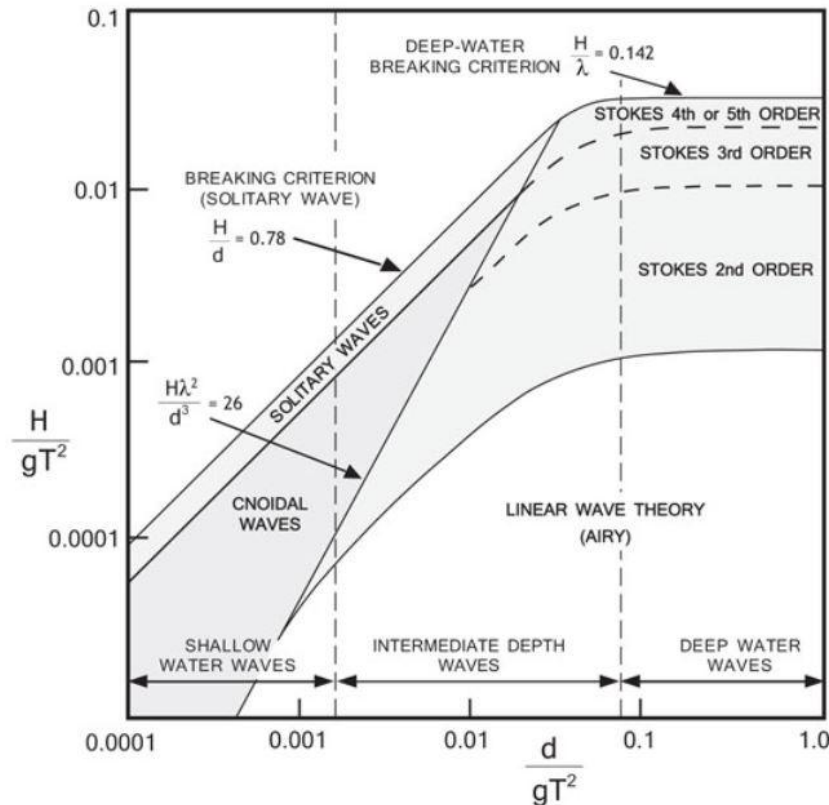
Στα πλαίσια αυτής της εργασίας εφαρμόζεται η κυματική θεωρία Boussinesq, μέσω του κυματικού αριθμητικού μοντέλου MIKE 21 BW που επιλύει τις τροποποιημένες εξισώσεις τύπου Boussinesq. Προτού παρουσιαστούν οι βασικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο στο κεφάλαιο 2.2, γίνεται μια σύντομη αναφορά στις σημαντικότερες και ευρέως χρησιμοποιούμενες κυματικές θεωρίες για τη μελέτη και αριθμητική επίλυση διαδιδόμενων κυματισμών.

Η απλούστερη προσέγγιση είναι η γραμμική ή airy θεωρία. Η κλασική θεωρία κυματισμών απειροστού πλάτους βασίζεται στις παραδοχές μικρών τιμών των λόγων $\varepsilon=H/d$ και $H/\lambda(\ll 1)$ και αμελητέων δυνάμεων ιξώδους (και κατά δυνατότητα αστρόβιλης ροής). Ωστόσο, αποτελεί μια εξιδανικευμένη εκδοχή, που δεν περιγράφει τελικά ρεαλιστικά τους κυματισμούς και δεν προβλέπει τα μη γραμμικά φαινόμενα που υπεισέρχονται στην διάδοσή τους, γεγονός που οδήγησε στη δημιουργία μη γραμμικών θεωριών.

Οι πιο σημαντικές μη γραμμικές κυματικές θεωρίες, 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 θεωρία της ροϊκής συνάρτησης (stream function). Οι μη-γραμμικές θεωρίες περιγράφουν καλύτερα από τη θεωρία Airy το μη συμμετρικό προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας κατά την οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση. Η ισχύς των παραπάνω θεωριών, που κατά περίπτωση μπορεί να αλληλεπικαλύπτονται, ποικίλει και έχει να κάνει τόσο με τη μαθηματική όσο και με τη φυσική ισχύ τους. Αυτό εξετάζεται με υπολογισμό συγκεκριμένων παραμέτρων, όπως η παράμετρος Ursell (U) ή η παράμετρος Π , που έχουν να κάνουν, κατά κύριο λόγο, με το ύψος και μήκος του κυματισμού και το βάθος στο οποίο διαδίδεται.



Εικόνα 3.1.1: Περιοχή ισχύος κυματικών θεωριών κατά Fenton και επιπλέον πειραματικά στοιχεία (Fenton, J. D. (1990) Nonlinear wave theories)



Εικόνα 3.1.2: Περιοχές ισχύος κυματικών θεωριών (<http://www.flow3d.com>)

Στο σχήμα 3.1.1 η διαχωριστική γραμμή, που αναφέρεται σε τιμή παραμέτρου Ursell περίπου 75 (ή $\Pi=0.3$) αφορά ιδιαίτερα τη θεωρία Boussinesq, καθώς η εφαρμογή των εξισώσεων Boussinesq γίνεται ακριβώς σε αυτές τις περιπτώσεις, με επιτυχή μοντελοποίηση των κυματισμών.

Όπως περιγράφηκε και στο κεφάλαιο 2.1, κατά τη διάδοση των κυματισμών από τα βαθιά νερά στον παράκτιο χώρο και κυρίως κοντά στην ακτή, αναπτύσσονται πολλά φαινόμενα κυρίως μη γραμμικής φύσεως, τα οποία δεν περιγράφονται επαρκώς για όλες τις περιπτώσεις από τις θεωρίες που προαναφέρθηκαν. Αυτό καθίσταται εφικτό με τα μαθηματικά μοντέλα τύπου Boussinesq. Τα μοντέλα αυτά (που ονομάστηκαν έτσι λόγω του J. V. Boussinesq παρουσίασε τη θεωρία το 1872) βασίζονται στην επίλυση των διαφορικών εξισώσεων τύπου Boussinesq, οι οποίες προκύπτουν από την ολοκλήρωση κατά το βάθος των εξισώσεων Euler, θεωρώντας αστρόβιλη ροή και σε πρώτο στάδιο σχετικά μακρούς κυματισμούς.

Η πρωταρχική εξίσωση Boussinesq, διαμορφώθηκε από τον Peregrine (1967,1972), δίνοντας τη βάση των γνωστών μοντέλων Boussinesq. Βαθμιαία τα μοντέλα αυτά επεκτάθηκαν για (ελαφρώς) μη γραμμικούς κυματισμούς και για (πλήρως) διασπειρόμενους κυματισμούς, ιδιότητες των οποίων ποσοτικοποιούν δύο αδιάστατες παράμετροι. Η πρώτη είναι η $\epsilon=H/d$ (ύψος κύματος προς τοπικό βάθος) και εκφράζει τη μη-γραμμικότητα, ενώ η δεύτερη είναι η $\sigma^2=(h/L)^2$, (το τετράγωνο του λόγου του βάθους προς ένα χαρακτηριστικό οριζόντιο μήκος, συνήθως το μήκος κύματος) και εκφράζει τη διασπορά συχνοτήτων.

Σύμφωνα με τον Ι. Καζάκη (2014), από υπολογιστικής άποψης τα μοντέλα Boussinesq θεωρούνται αποδοτικότερα σε σύγκριση με τις πιο περίπλοκες πλήρεις εξισώσεις Navier-Stokes (fully Navier-Stokes 2D/3D models) και πιο ακριβή από τις

εξισώσεις ρηχών νερών. Τα πλεονεκτήματα αυτά οδήγησαν τα τελευταία χρόνια σε αρκετές επιστημονικές προσπάθειες για την υπέρβαση των αρχικών μειονεκτημάτων των μοντέλων Boussinesq. Ενώ λοιπόν οι αρχικές εξισώσεις Peregrine (1967) βασίζονται στην παραδοχή μικρών τιμών των παραμέτρων, βαθμιαία έχουν γίνει προσπάθειες για επέκταση του πεδίου εφαρμογής των μοντέλων. Έτσι, βελτιωμένες εκδόσεις μοντέλων Boussinesq επιτρέπουν την εφαρμογή τους σε βαθύτερα νερά (Witting (1984), Murray (1989), Madsen et al. (1991), Nwogu (1993), Karambas (1999), Zou (1999), Gobbi and Kirby (2000) κλπ.) βελτιώνοντας τα χαρακτηριστικά διασποράς τους. Βελτιώσεις των μοντέλων έχουν επιτευχθεί και όσον αφορά στην υπέρβαση της αρχικής υπόθεσης της ήπιας μη γραμμικότητας (Madsen et al. (2002,2003), Bingham and Agnon (2005), Schäffer (2004), Wei et al. (1995), Beji and Nadaoka (1996) κλπ.) μέχρι και λίγο πριν τη θραύση. Γενικά οι διάφορες κατευθύνσεις επέκτασης των μοντέλων Boussinesq είναι η μεταβαλλόμενη βαθυμετρία, η βελτιωμένη διασπορά συχνοτήτων, η βελτιωμένη μη-γραμμική συμπεριφορά, η ανάπτυξη σε σειρά Taylor των όρων των εξισώσεων γύρω από διαφορετικές κατά βάθος θέσεις, η συμπερίληψη της θραύσης, η συμπερίληψη της τριβής πυθμένα, η συμπερίληψη της επιφανειακής τάσης, η ύπαρξη εσωτερικών κυματισμών κλπ. Οι κυριότερες διαφορές μεταξύ των διαφόρων μορφών των μοντέλων αφορούν κυρίως στη διαφορετική επιλογή (θεώρηση) της οριζόντιας ταχύτητας και στις διαφορετικές εκφράσεις των όρων ανώτερης τάξης που διατηρούνται κατά την κατάστρωση των εξισώσεων. Ως προς την επιλογή της οριζόντιας ταχύτητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέση ως προς το βάθος ταχύτητα, η ταχύτητα στην ελεύθερη επιφάνεια, η ταχύτητα σε τυχαίο βάθος ή η ταχύτητα στον πυθμένα.

Καθώς η εργασία δεν επικεντρώνεται στη μελέτη των κυματικών θεωριών και της θεωρίας Boussinesq πιο συγκεκριμένα, δεν γίνεται περεταίρω ανάλυσή τους. Ο αναγνώστης για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τις κυματικές θεωρίες και το μαθηματικό τους υπόβαθρο, μπορούν να ανατρέξουν στην εξής βιβλιογραφία:

Θεωρία Stokes έως πέμπτης τάξης

Massel S. R. (1989) *Hydrodynamics of coastal zones (κεφάλαιο 2)*,

μη γραμμικές θεωρίες

Fenton, J. D. (1985) *A fifth-order Stokes theory for steady waves*,

Fenton, J. D. (1990) *Nonlinear wave theories*,

Dingenmanns M. W. (1997) *Water wave propagation over uneven bottoms (κεφάλαιο 2.8) και αναλυτική περιγραφή του μοντέλου Boussinesq των χαρακτηριστικών του και των μοντέλων και βελτιώσεων που έχουν παραχθεί (κεφάλαιο 5)*.

Καζάκης Ι. (2014) *Αριθμητική προσομοίωση κυματισμού σε περιοχές μεταβαλλόμενης βαθυμετρίας με χρήση του αριθμητικού κυματικού μοντέλου MIKE 21 by DHI' (κεφάλαιο 2 γραμμική και μη γραμμικές θεωρίες, κεφάλαιο 3 μοντέλα διάδοσης κυματισμών Boussinesq)*.

3.2. Βασικές εξισώσεις Boussinesq

Το MIKE 21 BW επιλύει τις τροποποιημένες εξισώσεις τύπου Boussinesq σε μία ή δύο οριζόντιες διαστάσεις ως προς την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας ζ και τις ολοκληρωμένες κατά βάθος συνιστώσες τις οριζόντιας ταχύτητας P και Q . Το σύστημα εξισώσεων του διδιάστατου μοντέλου (2DH) BW (*Madsen et al. (1997a,b)*) είναι:

Εξίσωση συνέχειας:

$$n \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0 \quad , \quad (1)$$

Εξίσωση ορμής κατά x:

$$n \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{PQ}{h} \right) + \frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial y} + F_x n^2 gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + n^2 P \left[\alpha + \beta \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{h} \right] + \frac{gP \sqrt{P^2 + Q^2}}{h^2 C^2} + n \Psi_1 = 0 \quad , \quad (2)$$

Εξίσωση ορμής κατά y:

$$n \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{PQ}{h} \right) + \frac{\partial R_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial x} + F_y n^2 gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + n^2 Q \left[\alpha + \beta \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{h} \right] + \frac{gQ \sqrt{P^2 + Q^2}}{h^2 C^2} + n \Psi_2 = 0 \quad , \quad (3)$$

όπου οι όροι διασποράς Boussinesq Ψ_1 και Ψ_2 δίνονται από τις εκφράσεις:

$$\Psi_1 \equiv - \left(B + \frac{1}{3} \right) d^2 (P_{xt} + Q_{yt}) - nBgd^3 (\zeta_{xxx} + \zeta_{xyy}) - dd_x \left[\frac{1}{3} P_{xt} + \frac{1}{6} Q_{yt} + nBgd (2\zeta_{xx} + \zeta_{yy}) \right] - dd_y \left(\frac{1}{6} Q_{xt} + nBgd \zeta_{xy} \right) \quad , \quad (4)$$

και

$$\Psi_2 \equiv - \left(B + \frac{1}{3} \right) d^2 (Q_{yt} + P_{xt}) - nBgd^3 (\zeta_{yyy} + \zeta_{xxy}) - dd_y \left[\frac{1}{3} Q_{yt} + \frac{1}{6} P_{xt} + nBgd (2\zeta_{yy} + \zeta_{xx}) \right] - dd_x \left(\frac{1}{6} P_{yt} + nBgd \zeta_{xy} \right) \quad . \quad (5)$$

όπου οι δείκτες x, y και t υποδηλώνουν μερική διαφόριση ως προς το χώρο και το χρόνο αντίστοιχα.

Οι όροι οριζόντιας τάσης δίνονται από σχέσεις που περιέχουν τις οριζόντιες βαθμίδες των ολοκληρωμένων ως προς το βάθος ταχυτήτων:

$$F_x = - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[v_t \frac{\partial P}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[v_t \left(\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial Q}{\partial x} \right) \right] \right\} , \quad (6)$$

$$F_y = - \left\{ \frac{\partial}{\partial y} \left[v_t \frac{\partial Q}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[v_t \left(\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial y} \right) \right] \right\} . \quad (7)$$

όπου είναι v_t ο οριζόντιος συντελεστής τυρβώδους συνεκτικότητας.

Οι όροι R_{xx}, R_{xy} και R_{yy} , αφορούν στην επίδραση του επιφανειακού κυλίνδρου και της συνεπαγόμενης ανομοιομορφίας της κατακόρυφης κατανομής της οριζόντιας ταχύτητας στην εξίσωση της ορμής και δίνονται από τις σχέσεις:

$$R_{xx} = \frac{\delta}{1 - \delta/d} \left(c_x - \frac{P}{d} \right)^2 , \quad (8)$$

$$R_{xy} = \frac{\delta}{1 - \delta/d} \left(c_x - \frac{P}{d} \right) \left(c_y - \frac{Q}{d} \right) , \quad (9)$$

$$R_{yy} = \frac{\delta}{1 - \delta/d} \left(c_y - \frac{Q}{d} \right)^2 . \quad (10)$$

όπου $\delta(t, x, y)$ είναι η πυκνότητα του επιφανειακού κυλίνδρου και c_x και c_y οι συνιστώσες της ταχύτητάς του. Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με αυτά τα μεγέθη, δίδονται στα Madsen et al. (1997a), p. 258ff και Sørensen et al. (2004), p. 182ff, ωστόσο δεν θα γίνει εδώ περεταίρω αναφορά, καθώς στα πλαίσια της εργασίας δεν συμπεριλαμβάνεται το φαινόμενο της θραύσης του κύματος στις προσομοιώσεις, με το οποίο σχετίζονται άμεσα τα παραπάνω.

4. Το σύστημα προσομοίωσης MIKE 21 BW by DHI

4.1. Γενική παρουσίαση του προγράμματος

Στην διπλωματική αυτή εργασία χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό μοντέλο MIKE 21 BW (Boussinesq waves) προκειμένου να προσομοιωθούν διάφορες περιπτώσεις κυματικών συνθηκών στην περιοχή ενδιαφέροντος και να μελετηθεί η επίδρασή τους στην παράκτια ζώνη, κυρίως ως προς την κυκλοφορία και τη δυναμική που αναπτύσσεται στον πυθμένα, ώστε να προσδιοριστούν οι πιθανές επιπτώσεις στους τοπικούς θαλάσσιους οικοτόπους. Το MIKE 21 BW είναι ένα μοντέλο του MIKE 21 της εταιρίας Danish Hydraulic Institute (DHI). Είναι ένα προηγμένης τεχνολογίας πακέτο για την αριθμητική προσομοίωση της διάδοσης βραχέων και μακρών κυματισμών κοντά και εντός λιμενικών εγκαταστάσεων, καθώς και σε παράκτιες περιοχές. Αποτελεί μία από τις δημοφιλέστερες εμπορικές προτάσεις της αγοράς. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια γενική αναφορά για το περιβάλλον και τις χρήσεις του προγράμματος, ενώ στην συνέχεια της εργασίας γίνεται εκτενέστερη περιγραφή των διαθέσιμων επιλογών και εργαλείων και των συγκεκριμένων σετ που επιλέχθηκαν σε αυτήν.

Το πρόγραμμα MIKE 21 BW περιλαμβάνει δύο υποπρογράμματα:

- 2DH (δυο οριζόντιες χωρικές μεταβλητές) κυματικό μοντέλο Boussinesq,
- 1DH (μία οριζόντια χωρική μεταβλητή) κυματικό μοντέλο Boussinesq.

Στα πλαίσια της εργασίας γίνεται χρήση μόνο του δισδιάστατου μοντέλου, συνεπώς περεταίρω περιγραφή γίνεται για αυτό και η οποιαδήποτε αναφορά στη συνέχεια θα αφορά σε αυτό.

Τα δύο αυτά μοντέλα βασίζονται στην επίλυση στο πεδίο του χρόνου των εξισώσεων τύπου Boussinesq. Οι χρησιμοποιούμενες εξισώσεις περιλαμβάνουν μη-γραμμικά χαρακτηριστικά και διασπορά συχνοτήτων. Η διασπορά των συχνοτήτων εισάγεται στις εξισώσεις ορμής λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση των κατακόρυφων επιταχύνσεων στην κατανομή των πιέσεων.

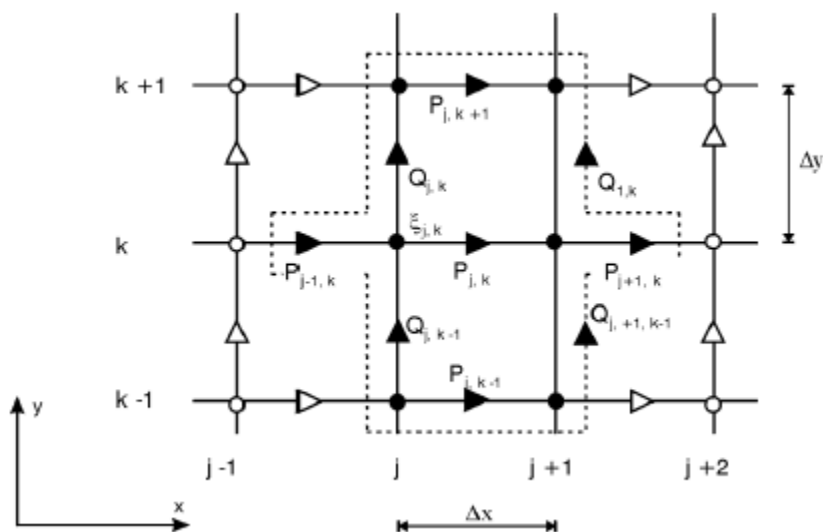
Τα (δύο) μοντέλα, όπως προαναφέρθηκε, επιλύουν τις εξισώσεις τύπου Boussinesq, χρησιμοποιώντας μια έκφραση ροής (flux-formulation) με βελτιωμένα χαρακτηριστικά γραμμικής διασποράς. Οι αρχικές εξισώσεις προτάθηκαν από τους *Madsen et al. (1991)* και τους *Madsen και Sørensen (1992)*. Με τη βελτιωμένη μορφή των εξισώσεων, τα μοντέλα είναι ικανά να περιγράψουν την κατευθυντική διάδοση μιας ομάδας κυματισμών από τα βαθιά στα ρηχά νερά. Οι εξισώσεις έχουν εφαρμογή για μέγιστο λόγο βάθους προς μήκος κύματος στα βαθιά $d/L_0 \approx 0.5$ (ή $kd \approx 3.1$), ενώ για τις κλασικές εξισώσεις του *Peregrine (1967)* ο μέγιστος λόγος είναι $d/L_0 \approx 0.22$ (ή $kd \approx 1.4$). Οι εξισώσεις του μοντέλου έχουν επεκταθεί για να λάβουν υπόψη -προαιρετικά- τη θραύση των κυματισμών και τη μετακίνηση της ακτογραμμής κατά την αναρρίχηση των κυμάτων, σύμφωνα με τις εργασίες των *Madsen et al. (1997a,b)* και *Sørensen et al. (1998,2004)*.

4.2. Μέθοδος επίλυσης - Αριθμητική Εφαρμογή

Το δισδιάστατο μοντέλο (2DH) BW επιλύει τις βελτιωμένες εξισώσεις τύπου Boussinesq μέσω ενός πεπλεγμένου αριθμητικού σχήματος πεπερασμένων διαφορών σε έναν έκκεντρο ορθογωνικό κάναβο. Η αριθμητική μέθοδος που χρησιμοποιείται, ονόματι SYSTEM 21, παρουσιάστηκε πρώτα από τους Abbott et al (1973) και επεκτάθηκε, από τον ίδιο, σε μοντελοποίηση κυμάτων μικρού μήκους κύματος το 1978. Από τότε, η μέθοδος βρίσκεται υπό συνεχή ανάπτυξη και βελτίωση (βλ. Madsen et al (1991) και Madsen και Sørensen (1992)).

Οι διαφορικές εξισώσεις διακριτοποιούνται χωρικά σε ένα ορθοκανονικό πλέγμα, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.3. Τα βαθμωτά μεγέθη, όπως η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας, ορίζονται με βάση τους κόμβους του πλέγματος, ενώ οι συνιστώσες του ρεύματος ενδιάμεσως των κόμβων ανά κατεύθυνση. Η προσέγγιση πεπερασμένων διαφορών των χωρικών παραγώγων είναι ένα απλό κεντράρισμα, εκτός των εκ μεταφοράς όρων, που περιγράφουν αναλυτικά οι Madsen και Sørensen (1992).

Η ολοκλήρωση στο χρόνο γίνεται με χρήση ενός χρονικά ευθυγραμμισμένου πεπλεγμένου σχήματος:



Εικόνα 4.2: Ορθοκανονικό πλέγμα στο επίπεδο.

Ο αλγόριθμος που εφαρμόζεται είναι ένας μη-επαναληπτικός αλγόριθμος εναλλασσόμενων κατευθύνσεων (ADI), που χρησιμοποιεί μέθοδο 'κλασματικού βήματος' (fractional step technique) και ημι-γραμμικοποίηση των μη γραμμικών όρων ('side feeding'). Τα τρισδιάγραμμα συστήματα εξισώσεων που προκύπτουν, επιλύονται με τον γνωστό αλγόριθμο Double Sweep.

4.3. Εφαρμογές και Δυνατότητες

Το μοντέλο Mike 21 BW είναι σε θέση να δίνει λύσεις κοντά στην ακτή, λαμβάνοντας υπ όψιν προαιρετικά την θραύση του κυματισμού και την μεταβολή της ακτογραμμής, ενώ παράλληλα προσομοιώνει την συνδυασμένη επίδραση όλων των σημαντικών φαινομένων που αφορούν χώρους, όπως λιμάνια, κόλπους και γενικότερα κατασκευές άρρηκτα συνδεδεμένες με την υδρομηχανική. Τα φαινόμενα αυτά είναι:

- ✓ Ρήχωση
- ✓ Διάθλαση
- ✓ Περίθλαση
- ✓ Θραύση κυματισμού
- ✓ Επίδραση πυθμένα μέσω τριβής
- ✓ Μεταβολή της ακτογραμμής
- ✓ Μερική ανάκλαση και διάδοση
- ✓ Μη γραμμική αλληλεπίδραση μεταξύ κυματισμών
- ✓ Διασπορά συχνότητας
- ✓ Διασπορά κατεύθυνσης

Το MIKE 21 BW μπορεί να προσομοιώσει φαινόμενα όπως η ομαδοποίηση κυματισμών (wave grouping), το surf beat, η δημιουργία δεσμευμένων χαμηλών και υψηλών αρμονικών (generation of bound sub-harmonics and super-harmonics) και η αλληλεπίδραση κυματικών τριάδων κοντά στο συντονισμό (near-resonant triad interactions). Επομένως, μπορούν να περιγραφούν ικανοποιητικά λεπτομέρειες όπως η γένεση και απελευθέρωση ταλαντώσεων χαμηλών συχνοτήτων λόγω μετασχηματισμών του αρχικού κύματος, φαινόμενο σημαντικό για το συντονισμό εντός των λιμένων και τις παράκτιες διεργασίες. Ως αναφορά την θραύση των κυματισμών (τύπου spilling), αν αυτή συμπεριληφθεί, εφαρμόζεται βάσει της προσέγγισης του επιφανειακού κυλίνδρου. Η επιρροή στην κυματική διάδοση προσομοιώνεται με την εισαγωγή επιπλέον συναγωγικών όρων στις εξισώσεις ορμής και ο προσδιορισμός των επιφανειακών κυλίνδρων γίνεται γεωμετρικά. Ο κύλινδρος λογίζεται ως ένα υδάτινο τμήμα που απομονώνεται από την υπόλοιπη κίνηση και μεταφέρεται με την ταχύτητα διάδοσης του κύματος. Η θραύση ξεκινάει όταν η κλίση της ελεύθερης επιφάνειας ξεπεράσει μια οριακή τιμή.

Ειδικότερα το δισδιάστατο μοντέλο έχει εφαρμογές όπως:

- ✓ προσδιορισμός των κυματικών διαταραχών προκαλούμενων από ανεμογενείς κυματισμούς και αποθάλασσες,
- ✓ ανάλυση ταλαντώσεων χαμηλών συχνοτήτων (συντονισμός σε λιμάνια),
- ✓ διαμόρφωση κυματισμών σε παράκτιες περιοχές όπου η ανάκλαση και περίθλαση είναι σημαντικά φαινόμενα,
- ✓ υπολογισμοί στην surf zone, όπως η παράκτια κυκλοφορία λόγω κυμάτων ή το run up/down,

- ✓ προσομοίωση της διάδοσης και διαμόρφωσης κυμάτων λόγω της κίνησης των ποίων ή ενός τσουνάμι, κ.ά.

Με το μοντέλο υπάρχει δυνατότητα διάδοσης κυματισμών προς την ακτή, που ορίζονται σε ανοικτό σύνορο ή επί μιας γραμμής διάδοσης εντός του μοντέλου. Στην πρώτη περίπτωση, απαιτούνται πρόσθετες πληροφορίες, όπως χρονοσειρές της ανύψωσης της επιφάνειας και η πυκνότητα ροής και αναμένεται ανάκλαση από την περιοχή μελέτης, ενώ στην δεύτερη, μπορούν να οριστούν τα χαρακτηριστικά των κυματισμών που θα 'γεννηθούν' με μια σειρά επιλογών, που αφορούν κανονικά και μη κύματα, διεύθυνση διάδοσης τους κλπ. Στην εργασία χρησιμοποιείται αυτή η δεύτερη περίπτωση της εσωτερικής διάδοσης στο μοντέλο και περισσότερα σχετικά με τις επιλογές και το εργαλείο του προγράμματος αναφέρονται στην αντίστοιχη παράγραφο παρακάτω.

Σημειώνεται, ότι η γραμμή διάδοσης που ορίζεται με αυτόν τον τρόπο, τοποθετείται μπροστά από ένα απορροφητικό 'στρώμα' -sponge layer- το οποίο απορροφά τα κύματα που κατευθύνονται εκτός της μοντελοποιημένης περιοχής. Περισσότερα για αυτήν την ζώνη και τις δυνατότητες και χρήσεις της αναφέρονται στη συνέχεια. Σε περίπτωση, τέλος, που υπάρχουν πορώδεις κατασκευές με συνεπαγόμενα φαινόμενα ανάκλασης ή/και μετάδοσης των κυματισμών μέσα από αυτές, υπάρχει η δυνατότητα τοποθέτησης ζωνών πορώδους, περίπτωση η οποία δεν αφορά την συγκεκριμένη εργασία.

Το MIKE21 BW έχει εφαρμοστεί επιτυχώς σε πληθώρα περιπτώσεων, με τα αποτελέσματα να έχουν επαληθευτεί με αποτελέσματα αναλυτικών λύσεων και άλλων στοιχείων από τη βιβλιογραφία, αποτελέσματα φυσικών μοντέλων και περιπτώσεων σύνθετων γεωμετριών λιμένων, μετρήσεων πεδίου κλπ. Οι σχετικές επαληθεύσεις με πειραματικά και αναλυτικά δεδομένα, περιγράφονται στα Madsen et al (1991) και Madsen και Sørensen (1992). Έχει γίνει επικύρωση, ακόμη, με βάση διάφορες γεωφυσικές συνθήκες, ρεαλιστικότερες και πιο σύνθετες συγκριτικά με ακαδημαϊκές ή εργαστηριακές μελέτες.

Τα εξαγόμενα αποτελέσματα περιλαμβάνουν ντετερμινιστικά, μέσης φάσης και αποτελέσματα κυματικών διαταραχών. Μεταξύ των παραπάνω, περιλαμβάνονται αποτελέσματα ντετερμινιστικών παραμέτρων, όπως χρονοσειρές της ανύψωσης της επιφάνειας και των ολοκληρωμένων στο βάθος συνιστωσών της ταχύτητας και αποτελέσματα μέσης φάσης ολοκληρωμένων στον χρόνο μεγεθών. Περισσότερα για τα εξαγόμενα αρχεία και τις συγκεκριμένες επιλογές που αφορούν την εργασία περιγράφονται στην συνέχεια.

Πληθώρα δυνατοτήτων παρέχεται και για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων, μιας που ο χρήστης με μια σειρά εργαλείων μπορεί να παράξει δισδιάστατα και τρισδιάστατα γραφήματα ή και βίντεο, να προβεί σε ανάλυση χρονοσειρών, στατιστική ανάλυση κ.ά.

4.4 Εργαλεία του MIKE που χρησιμοποιήθηκαν

Το πακέτο του MIKE, παρέχει μια σειρά από εργαλεία τα οποία είναι χρήσιμα τόσο για την εισαγωγή και παραγωγή δεδομένων, όσο και για την επεξεργασία και παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Καθώς ο αριθμός και οι χρήσεις τους ποικίλουν, σκόπιμα παρουσιάζονται στη συνέχεια τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας.

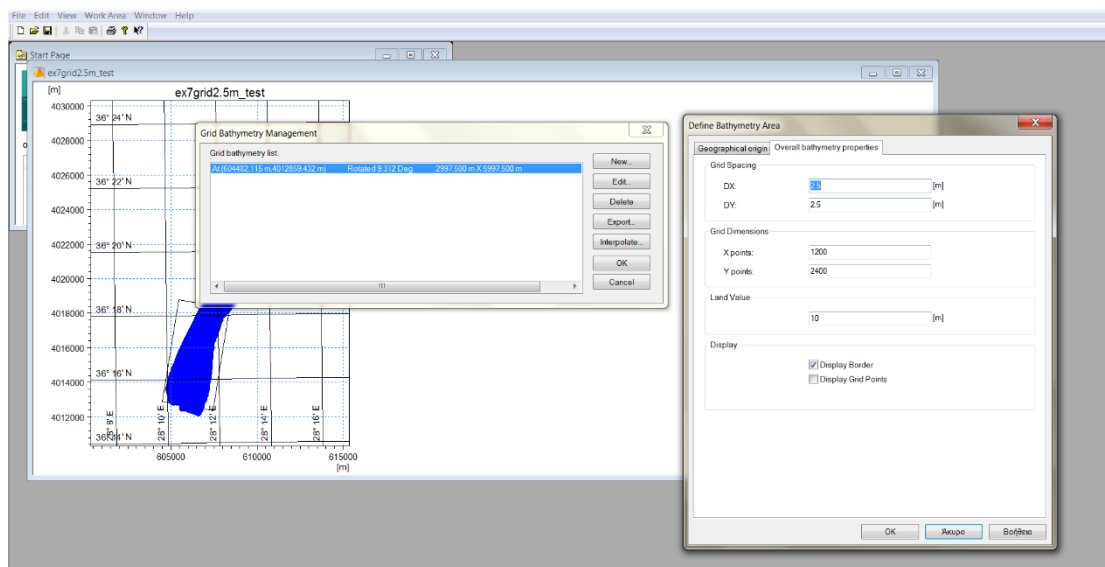
Το *MIKE Zero tool GIS - MIKE2GRD*, είναι ένα εργαλείο του προγράμματος, με το οποίο δεδομένα μορφής Ascii μετατρέπονται σε αρχεία τύπου πλέγματος MIKE21 (.dfs2). Καθίσταται έτσι δυνατό, αρχεία (χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτό των πρωτογενών αρχείων βαθυμετρίας) να μετατραπούν σε αρχεία δισδιάστατων πλεγμάτων, που μπορούν να αξιοποιηθούν στην συνέχεια ως input αρχεία σε άλλα εργαλεία ή στη σύνθεση του μοντέλου.

Πριν παρουσιαστεί η δομή ενός MIKE21 Boussinesq Waves αρχείου, περιγράφεται σύντομα το *MIKE 21 BW Model Setup Planner*, που αποτελεί εργαλείο-βοήθημα για τη σύνθεση του μοντέλου. Ουσιαστικά, είναι ένας υπολογιστής βασικών παραμέτρων, που, βάσει ορισμένων βασικών μεγεθών που ορίζουμε και τα οποία είναι χαρακτηριστικά για το μοντέλο που θα συνθέσουμε, δίνει προτεινόμενες τιμές του χωρικού και χρονικού βήματος και άλλων μεγεθών. Βέβαια, οι τιμές αυτές έχουν καίρια σημασία, καθώς δεν είναι απλά κάποιες προτάσεις από τις οποίες είναι εφικτό να αποκλίνουμε ανεξέλεγκτα, αλλά τιμές με βάση τις οποίες μια προσομοίωση είναι εφικτό να ολοκληρωθεί και να δώσει λογικά αποτελέσματα. Το εργαλείο δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να προτείνει ή να διαμορφώσει τις προτεινόμενες τιμές, παρέχοντας όμως επανυπολογισμένες συγκεκριμένες παραμέτρους και δηλώνοντας αν η επιλογή είναι κατάλληλη ή όχι για την εκτέλεση της εκάστοτε επιλογής. Τα πεδία που συμπληρώνει ο χρήστης, αφορούν τις χωρικές διαστάσεις του μοντέλου, το μέγιστο και ελάχιστο βάθος θάλασσας, το ποσοστό κάλυψης του πεδίου με νερό, την απόσταση κατά προσέγγιση που διανύουν οι κυματισμοί διαδιδόμενοι προς την ακτή, τη φασματική μέγιστη περίοδο, αλλά και τον ελάχιστο χρόνο προσομοίωσης, την υπολογιστική ισχύ του συστήματος του και την συμπερίληψη φαινομένων θραύσης του κύματος/κινούμενης ακτογραμμής. Ως αποτελέσματα, παρουσιάζονται τα μέγιστα όρια των τιμών της ελάχιστης περιόδου κύματος και του χωρικού και χρονικού βήματος προσομοίωσης, που ενδιαφέρουν ιδιαίτερα στο όλο στήσιμο του μοντέλου. Ακόμη, περιλαμβάνονται λόγοι χαρακτηριστικών μεγεθών, η κατά προσέγγιση απαιτούμενη υπολογιστική ισχύς με τον χρόνο υπολογισμού που απαιτείται και ο χαρακτηριστικός courant number, η μέγιστη τιμή του οποίου δεν πρέπει να ξεπερνά τη μονάδα. Τα αποτελέσματα αυτά, δίδονται τόσο για τις κλασσικές όσο και για τις βελτιωμένες εξισώσεις Boussinesq, που περιλαμβάνουν όρους για βαθύ νερό.

Το εργαλείο με το οποίο γίνεται εισαγωγή και επεξεργασία των δεδομένων βαθυμετρίας και εξάγεται το τελικό αρχείο βαθυμετρίας που θα χρησιμοποιηθεί, είναι το *MIKE Zero tool Bathymetry Editor*. Αυτό που κάνει το εργαλείο, είναι να δέχεται αρχεία βαθυμετρίας, όπως xyz ή .dfs2 και μετά από μια διαδικασία (που περιγράφεται στη συνέχεια) να εξάγει ένα αρχείο MIKE binary bathymetry (.dfs2),

έναν δισδιάστατο χάρτη με την βαθυμετρία τοποθετημένη γεωγραφικά και σε ορθοκανονικό πλέγμα συγκεκριμένης διαμέρισης.

Αρχικά, ορίζεται ένα σύστημα συντεταγμένων, επί του οποίου θα εισαχθούν με κάποια μέθοδο παρεμβολής οι τιμές της βαθυμετρίας που εισάγουμε. Καθορίζεται, λοιπόν, η περιοχή μελέτης, βάσει του συστήματος συντεταγμένων και των ακριβών χωρικών συντεταγμένων (σε μοίρες ή μέτρα) που θα αποτελέσουν σημείο αναφοράς του πεδίου που θα δημιουργηθεί, καθώς και των χωρικών διαστάσεων του. Το γεωγραφικά τοποθετημένο και οριοθετημένο κενό πλέγμα που προκύπτει (με ορθογώνια ή τετραγωνικά στοιχεία πλέγματος), είναι η βάση για να εφαρμοστεί μέθοδος παρεμβολής που θα παράξει τελικά το ζητούμενο αρχείο.



Εικόνα 4.4.1 : Περιβάλλον εργασίας του MIKE Bathymetries

Με αντίστοιχο τρόπο με τον οποίο ορίστηκε το αρχικό πλέγμα, ορίζεται τώρα η ακριβής περιοχή μελέτης επάνω σε αυτό, ως αναφορά την ακριβή γεωγραφική θέση και διαστάσεις, την χωρική διαμέριση ανά άξονα, καθώς και μία τιμή-κωδικό που θα τοποθετηθεί στις περιοχές ξηράς. Η μέθοδος παρεμβολής πραγματοποιείται σε τρεις φάσεις (περιγράφεται η επιλογή που χρησιμοποιήθηκε). Αρχικά, εντοπίζονται οι περιοχές ξηράς, με βάση τα κελιά του πλέγματος των οποίων το κέντρο βρίσκεται εντός πολυγώνου ξηράς (εφόσον έχουν συμπεριληφθεί τέτοια στοιχεία κατά την εισαγωγή των αρχικών δεδομένων). Με τη μέθοδο συμπλήρωσης πολυγώνων, ο αλγόριθμος του εργαλείου αναγνωρίζει τις περιοχές ξηράς, σκανάροντας διαδοχικά τα κελιά του πλέγματος και θέτοντας την τιμή ξηράς που έχει ορίσει ο χρήστης στο πλέγμα κατάλληλα. Εναλλακτικά, αν δεν έχουν εισαχθεί πολύγωνα ξηράς, στο τελικό αρχείο θα είναι σαφής η οριοθέτηση της ξηράς, αφού δεν θα έχουν τεθεί τιμές επ'αυτής. Στην δεύτερη φάση, ονόματι box grouping, εκχωρείται στα κελιά του πλέγματος που δεν έχουν οριστεί ως ξηρά η κατάλληλη τιμή βάρους. Με τη διαδικασία που ακολουθείται στη φάση αυτή, ξεδιαλέγονται τα πρωτογενή δεδομένα βαθυμετρίας που βρίσκονται πιο κοντά στα κελιά και 'κλειδώνουν' στις αντίστοιχες θέσεις. Έχοντας γίνει η προετοιμασία της δεύτερης φάσης, στην τρίτη

φάση ολοκληρώνεται η διαδικασία, με τον ορισμό σε όλο το πλέγμα (πλην των σημείων ξηράς, όπως αυτά προσδιορίστηκαν προηγουμένως) των τιμών βαθυμετρίας, με χρήση της μεθόδου 'συμπλήρωσης κενών'. Η βασική ιδέα της μεθόδου είναι ότι, για ένα δεδομένο σημείο στο οποίο θα οριστεί τιμή βάθους, αναζητούνται σημεία των πρωτογενών δεδομένων που είναι σχετικά κοντά με αυτό (εντός του κελιού), ενώ σημεία που είναι σε μεγαλύτερη απόσταση (από την ακτίνα αναζήτησης που ορίζεται) δεν θα ληφθούν υπόψη (βλ. παράρτημα Α).

Το αρχείο που προκύπτει είναι το τελικό αρχείο βαθυμετρίας, ένας δισδιάστατος χάρτης βαθυμετρίας, σύμφωνα με όλες τις επιλογές που προαναφέρθηκαν, το οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί στο στήσιμο του μοντέλου. Το ίδιο το αρχείο του εργαλείου, επίσης, αποθηκεύεται, για ενδεχόμενες αλλαγές στην παραγωγή του τελικού αρχείου.

Έχοντας προηγηθεί η δημιουργία των αρχείων βαθυμετρίας, είναι δυνατή η προσθήκη ζωνών απορρόφησης (sponge layer) σε επιλεγμένες περιοχές, διαδικασία που γίνεται με τη βοήθεια του *MIKE 21 Tool Generate Sponge and Porosity Layer Map*. Στην πράξη, για όλες τις -δισδιάστατες- εφαρμογές του μοντέλου MIKE 21 BW, πρέπει να ετοιμαστούν χάρτες (dfs2-file) προκειμένου να επιτευχθεί ικανοποιητική απορρόφηση τόσο μικρών όσο και μεγάλων περιόδων κυμάτων. Οι ζώνες απορρόφησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ένα αποτελεσματικό μέσο απορρόφησης των κυματισμών κατά την προσομοίωση. Μπορούν να τοποθετηθούν κατά μήκος των συνόρων του μοντέλου ώστε να επιτρέψουν φαινόμενα ακτινοβολίας που πιθανών να εμφανίζονται κατά την πρόσπτωση των κυματισμών στα σύνορα της προς μοντελοποίηση περιοχής. Τα φαινόμενα ακτινοβολίας λειτουργούν απορροφητικά στο ποσοστό ακτινοβολίας της κυματικής ενέργειας έξω από την περιοχή μοντελοποίησης.

Για να δημιουργηθεί ο δισδιάστατος (εσωτερικός της βαθυμετρίας) χάρτης με τις ζώνες των απορροφητικών συντελεστών επί των ζητούμενων περιοχών, απαιτείται ως input αρχείο το dfs2 αρχείο που έχει προκύψει από τη δημιουργία της βαθυμετρίας, το οποίο όμως έχει τροποποιηθεί για να 'δεχτεί' το sponge layer. Συγκεκριμένα, αλλάζουμε τις τιμές του χάρτη βαθυμετρίας στα σύνορα της επιλογής μας σε μια τιμή-κωδικό, που το εργαλείο θα αναγνωρίσει και θα εισάγει κατά μήκος τους όλη τη ζώνη, όπως αυτή θα υπολογιστεί στη συνέχεια. Για να γίνει αυτή η αντικατάσταση, δηλώνουμε στο κατάλληλο πεδίο του εργαλείου την τιμή κωδικό. Ακόμη, δηλώνουμε την ακριβή περιοχή εφαρμογής (σε περίπτωση που αυτή διαφέρει από την αρχική περιοχή μελέτης), την τιμή που θα δοθεί ως 'φόντο' για τα σημεία που δεν θα παραχθεί ζώνη απορρόφησης, αλλά και την επιλογή συμπερίληψης των γωνιών για την ορθή παραγωγή της ζώνης επί των γωνιών που συναντώνται τα σύνορα. Βασική επιλογή αποτελεί το πλήθος των γραμμών-ζωνών, δηλαδή το πλάτος του στρώματος και οι τιμές των συντελεστών που το συνοδεύουν. Για το πλήθος των γραμμών ισχύει $C_{sponge} = a^{r^{i-1}}, i = 1, N_{sponge}$, όπου a είναι η base value και r η power value. Ανάλογα με αυτό το πλήθος (συνήθως κυμαίνεται από 10-50 στρώσεις) δίνονται προτεινόμενες τιμές των δύο συντελεστών. Τελικά το αρχείο που παράγεται είναι ένας δισδιάστατος χάρτης, με τις κατάλληλες τιμές, ανά στρώση, της ζώνης, επί των συνόρων που έχουν επιλεγεί και την τιμή φόντου στο υπόλοιπο πεδίο.

Ως αναφορά στα κύματα τα οποία θα προσομοιωθούν, υπάρχουν δύο επιλογές. Η πρώτη υλοποιείται με το *MIKE 21 Toolbox Regular Wave Generation* (κανονικοί κυματισμοί), το οποίο με βάση την κυματική θεωρία που θα επιλεγεί, παράγει χρονοσειρές της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας, της πυκνότητας ροής και των παράγωγων φυσικών μεγεθών. Δίνεται η δυνατότητα επιλογής μεταξύ των θεωριών Snoidal, Boussinesq και Fourier, καθώς και της τάξης της κάθε θεωρίας, ανάλογα με το βαθμό μη γραμμικότητας που χρειάζεται να εισαχθεί. Ακόμη ορίζονται η χρονική διάρκεια και το χρονικό βήμα, ώστε να συνάδουν με αυτά της προσομοίωσης. Το αρχείο που παράγεται (MIKE Zero time series file .dfs1) μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως input στη σύνθεση του μοντέλου για την παραγωγή και διάδοση κυματισμών επί της γραμμής εσωτερικής διάδοσης.

Η δεύτερη επιλογή υλοποιείται με το *MIKE 21 Toolbox Random Wave Generation* (κατευθυντικοί κυματισμοί), όπου παράγονται και πάλι χρονοσειρές της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας, της πυκνότητας ροής και των παράγωγων φυσικών μεγεθών, με βάση τώρα ενός από τα διατιθέμενα φάσματα συχνοτήτων και μιας κατανομής κατευθύνσεων διάδοσης. Τα φάσματα συχνοτήτων που μπορεί να επιλέξει ο χρήστης περιλαμβάνουν οχτώ επιλογές, μεταξύ των οποίων το φάσμα JONSWAP, που χρησιμοποιείται στην εργασία. Το φάσμα JONSWAP προσδιορίζεται από το σημαντικό ύψος κύματος H_{m0} , την μέγιστη περίοδο κύματος T_p και τις παραμέτρους σχήματος σ_a , σ_b και γ , ενώ περαιτέρω αναφορά γίνεται στο παράρτημα Β. Οι ακόλουθες επιλογές που περιγράφονται προϋποθέτουν την αρχική επιλογή φάσματος το φάσμα JONSWAP. Έχοντας εισάγει το σημαντικό ύψος κύματος, την μέγιστη περίοδο κύματος και τις παραμέτρους σχήματος, ο χρήστης επιλέγει τον τύπο των κυματισμών, μεταξύ μονοδιάστατων, μονοκατευθυντικών και κατευθυντικών κυμάτων. Για τα τελευταία, από τα οποία παράγονται short crested irregular κύματα, επιλέγονται κάποιες βοηθητικές παράμετροι: ένα αριθμός τυχαίας γέννησης - random seed για τον υπολογισμό των τυχαίων φάσεων στην έκφραση Fourier, το βάθος νερού (αντιπροσωπευτική τιμή για την γραμμή διάδοσης) για τον υπολογισμό της πυκνότητας ροών επί της γραμμής διάδοσης και η μικρότερη κυματική περίοδος που θέλουμε να λυθεί κατά την προσομοίωση. Ακόμη δίνεται η προαιρετική επιλογή επαναπροσαρμογής περικομμένου φάσματος, για την διατήρηση της αρχικά ορισμένης ολικής ενέργειας, όπως δυνατή προαιρετική επιλογή είναι και η δεύτερης τάξης παραγωγή/γέννηση κυματιστών, όπου προστίθενται οι οριακές υπό και υπεραρμονικές, στην περίπτωση που το ύψος των κυμάτων θα είναι δυσανάλογα μεγάλο ως προς το βάθος διάδοσης. Καθορίζονται η γεωγραφική τοποθέτηση της γραμμής εσωτερικής διάδοσης και η χωρική διαμέριση, καθώς και η χρονική διάρκεια και χρονικό βήμα των χρονοσειρών που θα προκύψουν, όλα με βάση τις αντίστοιχες τιμές του μοντέλου. Ο καθορισμός της κατανομής των κατευθύνσεων της κυματικής ενέργειας περιλαμβάνει σειρά επιλογών, που αφορούν το σύστημα με βάση το οποίο μετρώνται οι δοθείσες γωνίες, τις ρυθμίσεις κατανομής κατεύθυνσης και τις παραμέτρους διάδοσης, καθώς και τον προσανατολισμό του πλέγματος για το μοντέλο (αν αυτός έχει τροποποιηθεί ως προς τον πραγματικό βορρά). Η επιλογή της κατανομής $\cos^n(\theta - \theta_{main})$, μιας κατανομής ανεξάρτητης της συχνότητας που χρησιμοποιείται και στην συγκεκριμένη άσκηση, απαιτεί να οριστούν ακόμη η κύρια διεύθυνση διάδοσης, η μέγιστη απόκλιση από αυτή και η τιμή του δείκτη n . Πριν ολοκληρωθεί η διαδικασία, δίνεται η δυνατότητα ορισμού φάσματος αναφοράς (ενός επιθυμητού

παραγόμενου φάσματος) και σημείων αναφοράς για τον έλεγχο του κυματικού πεδίου μπροστά στη γραμμή διάδοσης. Το αρχείο που παράγεται (.dfs1), περιλαμβάνει την πυκνότητα ροής και την κλίση της ελεύθερης επιφάνειας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως input στο στήσιμο του μοντέλου για την γέννηση και διάδοση κυματισμών επί της γραμμής εσωτερικής διάδοσης.

Τέλος, το *MIKE 21 Toolbox statistics* είναι ένα εργαλείο με το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί βασική στατιστική ανάλυση σε διάφορους τύπους εξαγόμενων αρχείων του MIKE. Αφού εισαχθεί ένα αρχείο (output ενός module του MIKE), επιλέγεται το χρονικό και χωρικό διάστημα επί του οποίου θα υπολογιστούν τα στατιστικά μεγέθη που θα επιλεγούν. Αυτά περιλαμβάνουν μέγιστες, ελάχιστες και μέσες τιμές, διαμέσους, τυπική απόκλιση και ποσοστό υπέρβασης τιμής κατωφλίου για το σύνολο των δεδομένων που έχουν επιλεγεί. Το εξαγόμενο αρχείο περιέχει τα τελικά δεδομένα και η μορφή του είναι αντίστοιχη του αρχικού αρχείου που εισήχθη (πχ δισδιάστατος πίνακας, γραμμή, στήλη ή χρονοσειρά).

Τα εργαλεία που διατίθενται για παρουσίαση των αποτελεσμάτων, όπως και τα υπόλοιπα εργαλεία, καλύπτουν μεγάλο εύρος, ανάλογα με τα αποτελέσματα, τα τελικά ζητούμενα, την εφαρμογή κλπ. Τα τρία κύρια εργαλεία επεξεργασίας και παρουσίασης αποτελεσμάτων του προγράμματος, που χρησιμοποιήθηκαν και στην συγκεκριμένη εργασία, περιγράφονται συνοπτικά στην συνέχεια.

Με το *MIKE Zero tool: extraction time series from 2D data*, είναι δυνατό να εξαχθούν από ένα δισδιάστατο αρχείο κάποιου μεγέθους, οι χρονοσειρές του μεγέθους για ένα ή περισσότερα σημεία του δισδιάστατου πλέγματος. Οι χρονοσειρές αφορούν στα μέτρα, αλλά κατ'επιλογήν και στα διανύσματα των επιλεγμένων μεγεθών, καθιστώντας έτσι δυνατή τη μελέτη της χρονικής μεταβολής μεγεθών συγκεκριμένων σημείων της περιοχής μελέτης. Οι τιμές που παρουσιάζονται στο αποτέλεσμα, για τα βαθμωτά μεγέθη, περιλαμβάνουν τις τιμές επί των κόμβων του πλέγματος. Το εργαλείο είναι χρήσιμο για την, εν συνεχεία, οπτική παρουσίαση, για παράδειγμα, μιας χρονοσειράς για επιλεγμένα σημεία του χώρου ενός δισδιάστατου μοντέλου.

Το *MIKE Zero Plot composer* είναι ένα ισχυρό εργαλείο που δίνει στον χρήστη τη δυνατότητα να εισάγει διάφορους τύπους αρχείων του MIKE και να εξάγει πληθώρα διαγραμμάτων/γραφημάτων. Τα input αρχεία μπορούν κατ'επιλογήν να μετατραπούν σε άλλου τύπου αρχείο, να ευθυγραμμιστούν γεωγραφικά και να αλλάξει η οπτική παρατήρησής τους και οι διαστάσεις τους, προτού ετοιμαστεί η παρουσίασή τους. Τα κύρια διαγράμματα αφορούν διαγράμματα ευέλικτου πλέγματος (mesh), πλέγματος (grid), προφίλ και χρονοσειρών. Υπάρχουν ωστόσο και αρκετά διαθέσιμα προχωρημένα διαγράμματα, όπως διάγραμμα πιθανοτήτων, οπτικοποίησης ροής, κυκλικά διαγράμματα κατανομής διευθύνσεων κ.ά. Με την εισαγωγή των αρχείων, που μπορεί να περιλαμβάνουν βαθμωτά και διανυσματικά μεγέθη, ακολουθεί καθορισμός παραμέτρων δημιουργίας του διαγράμματος, που περιλαμβάνει πλήθος επιλογών και ρυθμίσεων για την προβολή και εμφάνιση. Δίνεται ακόμη η δυνατότητα βιντεοσκόπησης για διαγράμματα που αφορούν χρονικά μεταβαλλόμενα μεγέθη, ενώ τα αποτελέσματα εξάγονται σε διάφορους τύπους αρχείων. Στην εργασία παρήχθησαν διαγράμματα πλέγματος (grid) και χρονοσειρών.

Το *MIKE Zero result viewer* είναι ένα εργαλείο με χρήσεις αντίστοιχες του Plot composer. Τα input αρχεία μπορούν και πάλι να προέρχονται από διάφορα

modules του MIKE και με την εισαγωγή τους ο χρήστης μπορεί να έχει μια άμεση εικόνα, συμπεριλαμβανομένων των χρονικά μεταβαλλόμενων μεγεθών, των οποίων η βιντεοσκόπησή είναι εφικτή και εδώ. Υπάρχει η δυνατότητα ακόμη καθορισμού στρωμάτων απεικόνισης των διαφόρων στοιχείων (κατακόρυφα επίπεδα παρουσίας) αλλά και η εξαγωγή δεδομένων -ως γραφημάτων- για επιλεγμένα σημεία ή προφίλ που μπορούν να επιλεγούν απευθείας στην εικόνα που προβάλλεται. Υπάρχει και εδώ η δυνατότητα επιλογής του τύπου εικόνας ή βίντεο των εξαγόμενων αρχείων.

Τέλος, το *MIKE Animator Plus*, είναι το εργαλείο με το οποίο καθίσταται δυνατή η τρισδιάστατη, ρεαλιστικού τύπου παρουσίαση δεδομένων, αλλά και η δισδιάστατη απεικόνισή τους. Χαρακτηριστική είναι η δυνατότητα τα input αρχεία, που και εδώ μπορεί να είναι οποιουδήποτε τύπου MIKE αρχεία, να μπορούν να παρουσιαστούν ταυτόχρονα, για παράδειγμα ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μέγεθος να παρουσιαστεί, ως μέτρο και διάνυσμα, πάνω στην τρισδιάστατη απεικονισμένη βαθυμετρία. Η βιντεοσκόπηση του τρισδιάστατου περιβάλλοντος είναι εφικτή, ενώ και εδώ οι επιλογές εμφάνισης ή και βιντεοσκόπησης των επιλεγμένων, περιλαμβάνει μεγάλη γκάμα επιλογών και ρυθμίσεων, όπως και της αποθήκευσής τους.

4.5. Δημιουργία μοντέλου - MIKE21 Boussinesq Waves

Το κεφάλαιο αυτό έχει να κάνει με το στήσιμο του μοντέλου, που υπολογιστικά υλοποιείται με τη βοήθεια του MIKE21 Boussinesq Waves (BW). Το MIKE21 Boussinesq Waves είναι το module του MIKE που θα χρησιμοποιηθεί στην άσκηση ως υπολογιστικό μοντέλο διάδοσης και μελέτης κυματισμών, σύμφωνα με τη θεωρία Boussinesq. Το αρχείο τύπου .bw που προκύπτει, αποτελεί ουσιαστικά το σετ που συντίθεται και περιλαμβάνει όλες εκείνες τις πληροφορίες που αφορούν την συγκεκριμένη προσομοίωση. Η δομή του MIKE21 BW, ως προς τα δεδομένα, τις ρυθμίσεις και τις επιλογές που εμπεριέχει, είναι αντίστοιχης λογικής με τα στάδια που περιγράφονται και στο κεφάλαιο 6.1. Στην συνέχεια, περιγράφονται συνοπτικά οι ενέργειες στις οποίες προβαίνει ο χρήστης προκειμένου να ολοκληρώσει ένα σετ και να προχωρήσει σε προσομοίωση.

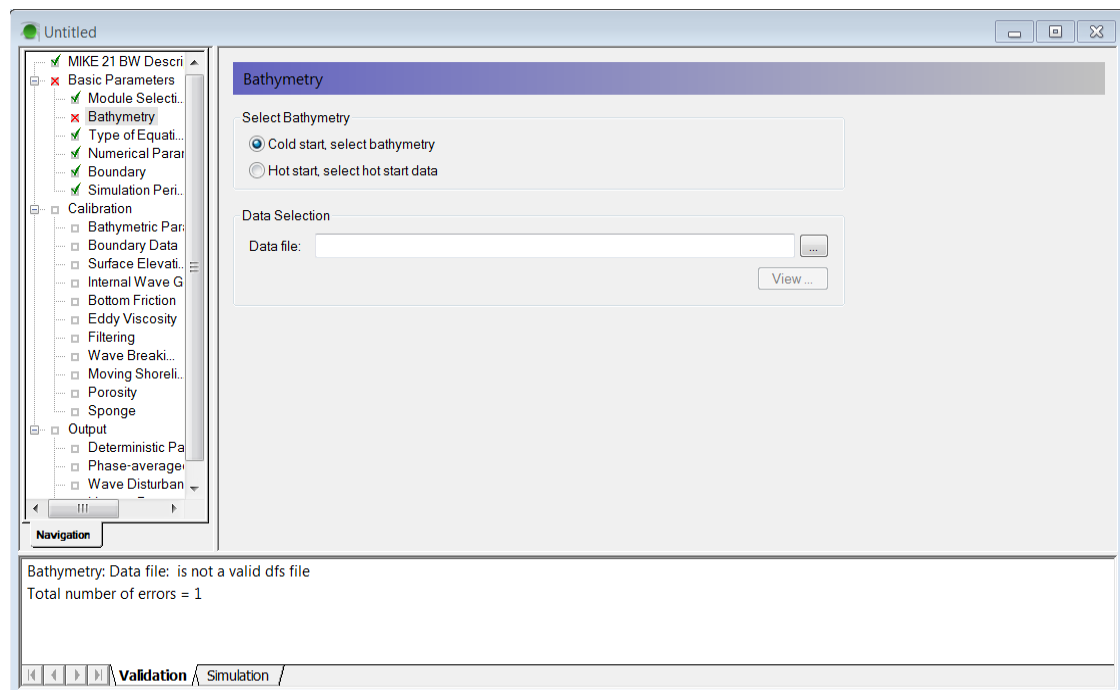
Αρχικά ορίζονται οι βασικές παράμετροι, με πρώτη την επιλογή μονοδιάστατου ή δισδιάστατου μοντέλου. Το δισδιάστατο μοντέλο (2DH), που χρησιμοποιείται και στην εργασία αυτή, όπως προαναφέρθηκε επιλύει τις βελτιωμένες εξισώσεις τύπου Boussinesq μέσω ενός πεπλεγμένου αριθμητικού σχήματος πεπερασμένων διαφορών σε έναν έκκεντρο ορθογωνικό κάναβο. Ορίζεται έπειτα η βαθυμετρία-περιοχή μοντέλου, μέσω ενός αρχείου .dfs2, όπως αυτό έχει προκύψει μέσω του MIKE Zero tool Bathymetry Editor (βλ. κεφάλαιο 4.4). Σε περίπτωση που προϋπάρχει διατάραξη, εισάγεται εναλλακτικά το αρχείο που περιέχει τις απαραίτητες πληροφορίες το οποίο θα έχει προκύψει από άλλη προσομοίωση.

Όπως έγινε ήδη φανερό, η βαθυμετρία παίζει καθοριστικό ρόλο στο στήσιμο του μοντέλου. Πέραν της εκάστοτε συγκεκριμένης γεωμορφολογίας της περιοχής

μελέτης με τα φαινόμενα που την συνοδεύουν, τα μέγιστα και ελάχιστα βάθη επηρεάζουν την επιλογή χωρικής διαμέρισης του μοντέλου και κατ'επέκταση της απαιτούμενης υπολογιστικής ισχύος. Το κέρδος σε υπολογιστική ισχύ είναι αυτό, επίσης, που οδηγεί στην αφαίρεση ή εδαφοποίηση περιοχών που δεν ενδιαφέρουν την μελέτη. Αυτά τα βάθη σχετίζονται, τέλος, και με την επιλογή της θραύσης κύματος, αν αυτή συμπεριληφθεί

Ακολούθως, επιλέγεται ο τύπος εξίσωσης, μεταξύ κλασικών και βελτιωμένων εξισώσεων Boussinesq. Οι βελτιωμένες εξισώσεις συμπεριλαμβάνουν όρους για το βαθύ νερό, επεκτείνοντας επιλογές του λόγου μέγιστου βάθους/μικρότερου μήκους κύματος έως 0,5 και επιλέγονται για μεγαλύτερη ακρίβεια και αριθμητική σταθερότητα. Ο συντελεστής γραμμικής διασποράς για τις βελτιωμένες εξισώσεις προτείνεται να είναι ίσος με $B = 1/15 = 0.067$. Και αυτή η επιλογή, καθορίζει τις επιλογές διαμέρισης χώρου/χρόνου και άρα τις απαιτήσεις υπολογιστικής ισχύος.

Σε επιλογή δισδιάστατου μοντέλου, ορίζονται στην συνέχεια οι αριθμητικές παράμετροι, δηλαδή η μέθοδος της χωρικής και χρονικής ολοκλήρωσης των συναγόμενων όρων των εξισώσεων Boussinesq. Η χωρική διακριτοποίηση των συναγόμενων όρων γίνεται με τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών με μεταβλητή που ορίζεται σε ορθοκανονικό πλέγμα, που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4.2. Ωστόσο, η μέθοδος μπορεί να οδηγήσει σε σφάλμα κατά την προσομοίωση, ιδίως στις περιπτώσεις πυκνής διαμέρισης. Διατίθενται έτσι και κάποιες άλλες μέθοδοι διακριτοποίησης, που λειτουργούν με αριθμητική διάχυση, ώστε να παρακαμφθούν οι πιθανές αστάθειες (κατά σειρά προτεραιότητας: central differencing with simple upwinding at steep gradients and near land, quadratic upwinding with simple upwinding at steep gradients and near land και simple upwinding differencing).



Εικόνα 4.5.1: Περιβάλλον εργασίας του MIKE21 BW

Η χρονική διακριτοποίηση των 'cross' όρων των εξισώσεων Boussinesq (Q_{xyt} , Q_{yt} και Q_{xt} στην x και P_{xyt} , P_{xt} και P_{yt} στην y) περιλαμβάνει επιλογή του χρονικού παράγοντα παρεκβολής, καθώς και του ίδιου παράγοντα εξαρτωμένου από το βάθος (και το όριο βάθους για την εφαρμογή) αν αυτός συμπεριληφθεί. Ο χρονικός παράγοντας παρεκβολής λαμβάνει την τιμή 0 ή 1, ενώ αν συμπεριληφθεί και η εξάρτηση από το βάθος (κυρίως σε περιπτώσει που υπάρχουν αστάθειες σε μεγαλύτερα βάθη) ο αντίστοιχος παράγοντας λαμβάνει την τιμή 0,8 ή 0,5.

Τέλος, επιλέγονται και εισάγονται δεδομένα για τα σύνορα της περιοχής, αν επιλεγεί από το χρήστη (για συγκεκριμένες εφαρμογές) και ο χρόνος προσομοίωσης με το χρονικό βήμα. Το χρονικό βήμα είναι αυτό για το οποίο έγινε λόγος κατά την περιγραφή του MIKE 21 BW Model Setup Planner στο κεφάλαιο 3.4, καθορίζεται από την επιλογή τύπου εξισώσεων Boussinesq και την συμπερίληψη ή μη της θραύσης και η σωστή επιλογή του σχετίζεται με την τιμή που προκύπτει για τον αριθμό Courant (για μια 2DH εφαρμογή πρέπει να είναι μικρότερος ή ίσος της μονάδας). Αν έχουν εισαχθεί 'χειροκίνητα' δεδομένα για τα σύνορα, ορίζεται και μια αρχική χρονική περίοδος προσομοίωσης για αποφυγή σφαλμάτων στα πρώτα βήματα της προσομοίωσης.

Συνεχίζοντας με την βαθμονόμηση και τις υπόλοιπες επιλογές, ορίζεται η τιμή-κωδικός που αναπαριστά ξηρά (στο αντίστοιχο αρχείο βαθυμετρίας που εισήχθη νωρίτερα) και το επίπεδο αναφοράς μέτρησης του βάθους, αν αυτό είναι διάφορο του μηδέν. Αν έχουν ορισθεί ανοικτά σύνορα, εισάγονται εδώ τα αρχεία με τα απαραίτητα σχετικά δεδομένα (για την ελεύθερη επιφάνεια), ειδάλως θεωρούνται ως κλειστά επί των οποίων θα εκτείνονται απορροφητικά στρώματα (sponge layers). Ως προς αυτά, εισάγεται το κατάλληλο αρχείο, όπως αυτό προέκυψε από το MIKE 21 Tool Generate Sponge and Porosity Layer Map και περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4.4. Αντίστοιχο αρχείο που προκύπτει από το ίδιο εργαλείο, εισάγεται και στην περίπτωση που συμπεριλαμβάνεται στην μελέτη στρώμα πορώδους (porosity layer, συνήθως σε παράκτιες κατασκευές).

Ανάλογα με τις επιλογές που έχουν προηγηθεί από τον χρήστη σε σχέση με τη διάδοση των κυματισμών, προκύπτει κατάλληλο αρχείο με χρήση του εργαλείου MIKE 21 Toolbox Regular ή Random Wave Generation, όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4.4. Το αρχείο αυτό εισάγεται, σε αυτή τη φάση, στο πεδίο εσωτερικής κυματικής διάδοσης, συνοδευόμενο από τον τύπο κυμάτων που θα προσομοιωθούν (μονοδιάστατα, μονοκατευθυντικά, κατευθυντικά) καθώς και τις συντεταγμένες της γραμμής διάδοσης από την οποία θα παραχθούν και θα διαδοθούν οι κυματισμοί. Υπάρχει η δυνατότητα παραπάνω από μία γραμμών διάδοσης.

Σημαντικές επιλογές αποτελούν η συμπερίληψη ή μη της θραύσης κύματος και της κινούμενης ακτογραμμής. Η εκάστοτε εφαρμογή θα επιβάλλει στην ουσία αν και ποια από αυτά τα φαινόμενα θα συμπεριληφθούν στην προσομοίωση, με τη συνεπαγόμενη επίδραση στο στήσιμο της βαθυμετρίας και την υπολογιστική ισχύ που θα απαιτηθεί. Για κάθε φαινόμενο, εντάσσεται μια σειρά από παράγοντες που εισάγονται από τον χρήστη. Στην περίπτωση της θραύσης, που βασίζεται στην ιδέα του επιφανειακού κυλίνδρου, εισάγονται μεταβλητές που σχετίζονται με αυτήν: ο παράγοντας μορφής του κυλίνδρου, ταχύτητας κυλίνδρου, η τελική και εσωτερική γωνία θραύσης, ο χρόνος μεταξύ δύο κυμάτων που έχουν υποστεί θραύση και η διεύθυνση κύματος. Για την κινούμενη ακτογραμμή, για την οποία χρησιμοποιείται η τεχνική σχισμών-slot technique (βλ. Madsen et al (1997a)) οι επιλογές αφορούν τις

παραμέτρους σχισμής: βάθος και πλάτος της, παράμετρος εξομάλυνσης και συντελεστής τριβής αν επιλεγεί μη μηδενικός.

Τέλος, καθορίζονται αν θα περιληφθούν το ιξώδες της τυρβώδους ροής, η τριβή στον πυθμένα και το φίλτρο χαμηλών συχνοτήτων, με τις επιλογές που τα συνοδεύουν. Για το ιξώδες, που μπορεί να είναι σταθερό ή να μεταβάλλεται χωρικά και με μαθηματική διατύπωση του βάσει της ταχύτητας ή της ροής, επιλέγεται ο κατάλληλος συντελεστής (ή αρχείο) τύρβης ή Smagorinsky. Η τριβή μπορεί επίσης να έχει σταθερή ή μεταβαλλόμενη χωρικά τιμή, με τα αντίστοιχα πεδία να συμπληρώνονται κατάλληλα. Η διατύπωση γίνεται με βάση τον αριθμό Chezy ή Manning. Η επιλογή φίλτρου γίνεται με σκοπό να εξαλειφθούν σφάλματα σχετικά με εμφάνιση ασταθειών λόγω υψηλών συχνοτήτων κυρίως όταν προσομοιώνεται και η θραύση ή η κινούμενη ακτογραμμή. Εισάγεται ένα αρχείο-χάρτης, βάσει του αρχείου βαθυμετρίας και έχοντας διαμορφώσει τις τιμές κατάλληλα.

Έχοντας εξασφαλίσει την ορθή εισαγωγή των παραπάνω, ο χρήστης ορίζει τέλος τα αποτελέσματα που θέλει να εξάγει. Τα αποτελέσματα περιλαμβάνουν παραμέτρους ντετερμινιστικές, μέσες κατά φάση και κυματικής διαταραχής, ενώ μπορούν να εξαχθούν και δεδομένα hotstart, για τη χρήση τους ως input σε άλλη προσομοίωση. Μερικές πληροφορίες για αυτά ακολουθούν στη συνέχεια.

Πέραν του τίτλου, του τύπου αρχείου και άλλων τέτοιων πρακτικών επιλογών που κάνει ο χρήστης για τα αποτελέσματα, καθοριστικός είναι ο τύπος του αρχείου που θα επιλέξει για κάθε ένα από αυτά, μεταξύ των οποίων τα αρχεία δεδομένων point series (dfs0), δεδομένων line series (dfs1) και δεδομένων grid series (dfs2). Ακόμη δύναται να επιλέξει την ακριβή χρονική περίοδο και χρονικό βήμα για τα οποία θα καταγραφούν τα αποτελέσματα, αλλά αν θέλει και το ακριβές σημείο/γραμμή/χωρίο στα οποία θα υπολογιστούν αυτές οι παράμετροι.

Τα κύρια ντετερμινιστικά αποτελέσματα, περιλαμβάνουν τη στάθμη επιφάνειας, την ανύψωση επιφάνειας, τη ροή κατά διεύθυνση και τη -σταθερή- βαθυμετρία, ενώ αν θα προσομοιωθεί και η θραύση μπορούν να εξαχθούν αποτελέσματα και για αυτήν (πυκνότητα, γωνία κυλίνδρου, ταχύτητα του ανά άξονα). Τα phase averaged αποτελέσματα που μπορούν να επιλεγούν είναι το σημαντικό ύψος κύματος, το μέγιστο ύψος κύματος, η μέγιστη και ελάχιστη και μέση ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας, η μέση ροή και μέση ταχύτητα ανά άξονα, η μέση πυκνότητα κυλίνδρου θραύσης, η στάθμη νερού με θραύση, ο χρόνος πρώτου κύματος, η ασυμμετρία και κύρτωση. Τα αποτελέσματα κυματικής διαταραχής εστιάζονται στο σημαντικό ύψος κύματος, τον συντελεστή κυματικής διαταραχής (σημαντικό ύψος προς εισερχόμενο σημαντικό ύψος κύματος) και τον χρόνο άφιξης του πρώτου κύματος που θα προσομοιωθεί. Επιπλέον επιλογές αφορούν σε χωρικά και χρονικά στοιχεία, ενώ το αποτέλεσμα περιλαμβάνει στατιστικά μεγέθη από ανάλυση στην επιλεγμένη περιοχή, όπως μέγιστες, ελάχιστες και μέσες τιμές, τυπική απόκλιση. Τέλος, η επιλογή εξαγωγής hotstart παραμέτρων, απαιτεί τον ορισμό χρονικής περιόδου και συχνότητας καταγραφής δεδομένων και το αρχείο που προκύπτει αποτελεί αρχείο input με τα δεδομένα που περιγράφουν την κατάσταση θάλασσας όπως έχει προκύψει στο τέλος μιας προσομοίωσης. Σημειώνεται ακόμη, ότι για όλα τα παραπάνω αποτελέσματα, ο χρήστης ενημερώνεται σχετικά με το εκτιμώμενο μέγεθος τους.

Οι παραπάνω είναι οι επιλογές με τις οποίες ολοκληρώνεται ένα αρχείο MIKE21 Boussinesq Waves (.bw). Η ορθή εισαγωγή των απαιτούμενων αρχείων και

των επιλογών που γίνονται επικυρώνονται από το πρόγραμμα με ένα χαρακτηριστικό 'τικ' και τελικά το αρχείο μπορεί να αποθηκευτεί και να ανακτηθεί οποιαδήποτε στιγμή. Με την επιλογή run, αρχίζει η προσομοίωση του σετ που δημιουργήθηκε, για την εξέλιξη της οποίας ο χρήστης ενημερώνεται από μπάρα προόδου και πληροφορίες στο παράθυρο του προγράμματος, ενώ αν θέλει μπορεί να επιλέξει προεπισκόπηση των τρεχόντων εξαγομένων δεδομένων. Τα αποτελέσματα αυτά αποθηκεύονται στον, κατά επιλογή του χρήστη, προορισμό στον ηλεκτρονικό υπολογιστή, ενώ ένα log file περιέχει όλες τις πληροφορίες σχετικά με την προσομοίωση, τα input και output αρχεία, πληροφορίες για τυχόν σφάλματα κλπ.

5. Περιγραφή της περιοχής μελέτης

5.1 Κυματικό κλίμα

Η μελέτη που γίνεται στην συγκεκριμένη εργασία αφορά την περιοχή Αφάντου στη Ρόδο. Βρίσκεται στην βορειοανατολική πλευρά του νησιού, με συνολικό μήκος ακτής περίπου 7-8km.



Εικόνα 5.1.1: Γεωγραφική θέση της περιοχής μελέτης (Google Earth)



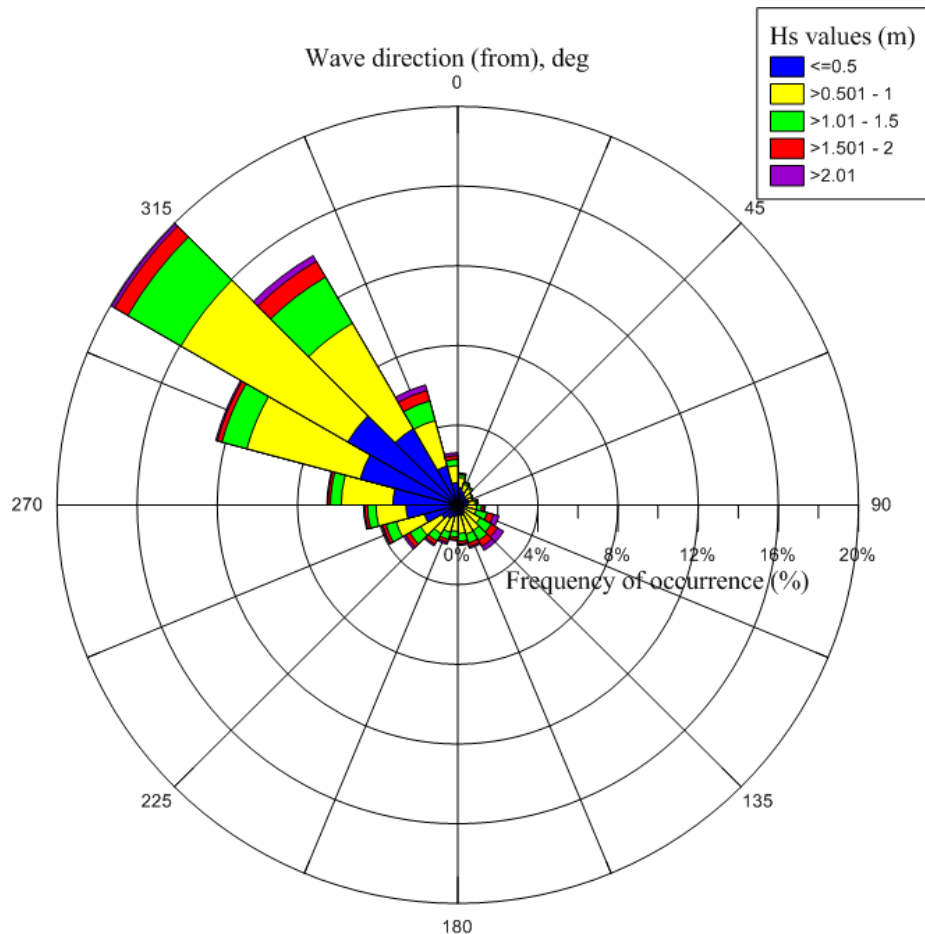
Εικόνα 5.1.2: Παραλία Αφάντου Ρόδου (Google Earth)

Για τον προσδιορισμό των κυματικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή και την περεταίρω στατιστική μελέτη αυτών, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα που διατέθηκαν από το ΕΛΚΕΘΕ. Συγκεκριμένα, τα δεδομένα περιλαμβάνουν τις τιμές του σημαντικού ύψους κύματος (H_s), της περιόδου (T_e) από την οποία προέκυψαν οι απαραίτητες τιμές της μέγιστης περιόδου (T_p) και της διεύθυνσης διάδοσης (μετεωρολογική, σε μοίρες) για το κοντινότερο γεωγραφικά σημείο στην Αφάντου που υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα. Τα δεδομένα καλύπτουν χρονική περίοδο 34 ετών, από το 1979 έως και το 2013, με τιμές ανά εξάωρο, δίνοντας έτσι ένα σύνολο 51132 τιμών ανά μέγεθος. Η στατιστική μελέτη των δεδομένων έγινε με τη βοήθεια των MATLAB και MS Excel και τα βασικά στοιχεία που παρήχθησαν παρουσιάζονται στην συνέχεια.

Όπως φαίνεται από την κατανομή των διευθύνσεων κύματος (εικόνα 5.1.3), οι επικρατούσες διευθύνσεις διάδοσης στην περιοχή είναι βρίσκονται μέσα σε έναν μάλλον στενό τομέα γύρω από περί τις 300° , δηλαδή βορειοδυτικές. Για αυτές τις διευθύνσεις επικρατούν οι μέσες κυματικές συνθήκες στην περιοχή. Όπως φαίνεται από την εικόνα 5.1.3 και τον πίνακα 5.1.1, για τέτοιες συνθήκες οι μέσες τιμές του σημαντικού ύψους κύματος και της μέγιστης περιόδου είναι σχετικά μικρές. Ακόμη, φαίνεται ότι βρίσκονται κοντά στις πιο πιθανές τιμές, καθιστώντας τες έτσι στατιστικά τις τιμές που ορίζουν το κυματικό καθεστώς της περιοχής. Συνεπώς, κατά κύριο λόγο στην περιοχή γίνεται διάδοση από ξηρά προς θάλασσα και επικρατούν ήπιες κυματικές συνθήκες, συνθέτοντας μια κατάσταση που δεν έχει αξιολογήσιμο αντίκτυπο στο ενεργειακό καθεστώς της περιοχής και άρα κάποια σημαντική πιθανή επίδραση στους τοπικούς οικοτόπους. Με βάση αυτά τα στοιχεία, θα προκύψουν τα σενάρια μέσων κυματικών συνθηκών στην περιοχή, τα οποία θα αναφερθούν και στην συνέχεια.

	Hs (m)	Tp (s)
Μέση τιμή	0.756	3.941
Πιο συχνή τιμή	0.324	3.675
Μέγιστη τιμή	4.612	8.769
Ελάχιστη τιμή	0.063	1.633
Τυπική απόκλιση	0.494	0.830
Εκατοστημόριο 0.99	2.471	6.326

Πίνακας 5.1.1: Στατιστικά στοιχεία των κυματικών δεδομένων



Εικόνα 5.1.3: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των κυματικών διευθύνσεων διάδοσης και των αντίστοιχων σημαντικών υψών κύματος στην περιοχή μελέτης

Υπάρχει, ωστόσο, ένα ποσοστό διευθύνσεων της τάξης του 10% με διεύθυνση διάδοσης προς την ακτή (νοτιοανατολικές), οι οποίες όμως χαρακτηρίζονται από τους υψηλότερους κυματισμούς. Αυτό αναμένεται, καθώς το αντίστοιχο ελεύθερο μήκος πνοής (fetch length, περίπου 750km) είναι σχετικά μεγάλο και έντονα κυματικά φαινόμενα πλήττουν την παράκτια περιοχή. Αυτές είναι οι περιπτώσεις που ενδιαφέρουν κυρίως αυτήν τη μελέτη, καθώς τα πιο έντονα φαινόμενα στην περιοχή θα έχουν και τη μεγαλύτερη επίδραση στις υποθαλάσσιες πιέσεις και κινήσεις, με ισχυρότερο πιθανό αντίκτυπο στους παράκτιους θαλάσσιους οικότοπους. Οι βασικότερες στατιστικές παράμετροι των φασματικών χαρακτηριστικών δίνονται στον πίνακα 5.1.1. Από τον πίνακα προκύπτει ότι υπάρχουν συγκεκριμένες ακραίες συνθήκες στην περιοχή, οι οποίες, έστω και με μικρή συχνότητα εμφάνισης, μπορεί να έχουν σημαντική επίδραση στο ενεργειακό καθεστώς και κατ'επέκταση στην βιωσιμότητα των παράκτιων οικοτόπων. Πιο συγκεκριμένα, οι περιπτώσεις αυτές που έχουμε μέγιστες τιμές σημαντικών υψών και μέγιστων περιόδων προσδιορίζονται περίπου στο 1% των περιπτώσεων. Αυτές είναι οι περιπτώσεις που, για τις διευθύνσεις που προαναφέρθηκε, συντίθενται τα σενάρια ακραίων κυματικών συνθηκών στην περιοχή, για τα οποία θα γίνει λόγος στην συνέχεια.

5.2 Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά

Πέραν των κυματικών δεδομένων, το ΕΛΚΕΘΕ διέθεσε και τα απαραίτητα δεδομένα της βαθυμετρίας της περιοχής. Τα δεδομένα δόθηκαν σε αρχείο xyz και καλύπτουν το μεγαλύτερο παράκτιο μέρος της περιοχής, η οποία φαίνεται εποπτικά στην εικόνα 5.1.2. Τα δεδομένα αυτά προήλθαν από επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων πολυδεσμικού βυθομέτρου που χρησιμοποιήθηκε σε αποστολή στον όρμο Αφάντου. Περισσότερα για τα βαθυμετρικά στοιχεία, την επεξεργασία τους και την τελική απόδοση της βαθυμετρίας της περιοχής μελέτης, περιγράφονται στο κεφάλαιο 6.3.

Γεωλογικά η περιοχή (και η Ρόδος γενικότερα) παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, αφού αποτελεί το ανατολικό όριο του νησιωτικού τόξου του Αιγαίου. Ο όρμος Αφάντου συγκεκριμένα, ανήκει στις ακτές αλλουβιακών πεδιάδων που συναντώνται στις ανατολικές ακτές του νησιού (Βερυκίου-Παπασπυριδάκου Ε., Μπαθρέλλος Γ., Σκυλοδήμου Χ., 2004). Σημαντικά στοιχεία για τη γεωλογία-μορφολογία της περιοχής, αλλά και βιολογικά στοιχεία που ενδιαφέρουν ιδιαίτερα την εργασία, λαμβάνονται από τα αποτελέσματα των ωκεανογραφικών αποστολών στην περιοχή στα πλαίσια της Πράξης: “ΘΑΛΗΣ- ΕΚΠΑ – Υποθαλάσσια κοιτάσματα αδρανών υλικών: Μέθοδοι εντοπισμού και εξόρυξης, περιβαλλοντικές επιπτώσεις και δυνατότητες εκμετάλλευσης – MARE” το 2013, με υπεύθυνο δράσης τον κ. Κ. Καψιμάλη και το 2015 στα πλαίσια του ίδιου προγράμματος για τη μελέτη υποβάθρου της βενθικής μικροπανίδας στην περιοχή, με υπεύθυνο τον κ. Α. Ευαγγελόπουλο. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των αποστολών αυτών, η μορφολογία της παραλίας χαρακτηρίζεται ως σχετικά ομαλή (κλίσεις του μετώπου 5-7ο) με ευθύγραμμη ανάπτυξη (μήκος της ακτογραμμής περίπου 7 km). Το χερσαίο τμήμα της παραλίας έχει πλάτος 50-70 m και αποτελείται από χονδρή άμμο, χαλίκια και κροκάλες. Αναφέρεται, ακόμη, η ύπαρξη μιας σειράς θινών στο χερσαίο όριο

της οπισθοπαραλίας, η οποία πιθανώς να έχει διαβρωθεί από τις σύγχρονες ανθρώπινες δραστηριότητες. Αποτυπώματα παλαιοπαραλιών (notches) στους βραχώδεις κρημούς του Λαδικού και Κολυμπίων και χερσαίες εμφανίσεις beachrocks δηλώνουν έντονες ανοδικές τεκτονικές κινήσεις της ευρύτερης περιοχής κατά τη διάρκεια του Ολοκαίνου. Στον πυθμένα, υπάρχουν ενδιαφέρουσες γεωμορφές, που κυρίως περιορίζονται στα μικρότερα βάθη έως 10m, όπως η χαμηλού αναγλύφου γεωμορφές γλωσσοειδών ρυτίδων- αμμοκυμάτων, οι οποίες είναι χαρακτηριστικές ρηχών περιβαλλόντων που καλύπτονται από άμμο. Όσο τα βάθη του νερού μεγαλώνουν (από 10m έως ~35 m) οι διαστάσεις των ρυτίδων ελαττώνονται, ενώ εξαφανίζονται μετά τα 35-40m. Γενικά, η περιοχή που βρίσκεται σε βάθη νερού από 15m έως 35m αποτελείται από μέση-ψιλή άμμο, ενώ στα βάθη νερού >40-45m το ποσοστό της ιλυαργίλου (mud) αυξάνει. Χαρακτηριστικό είναι το βραχώδες υπόστρωμα που είναι ιδιαίτερα εμφανές στο νότιο τμήμα. Η αυξημένη τοπικά ανακλαστικότητα του βυθού, πέραν του βραχώδους υποστρώματος ενδέχεται να οφείλεται και στην ύπαρξη αραιής φυτοκάλυψης, ωστόσο, ως αναφορά τη βιολογία, δεν υπάρχει κάποια άλλη αξιόλογη αναφορά, καθώς δεν έχει διαπιστωθεί η ύπαρξη λιβαδιού *Posidonia oceanica* στον Όρμο ή *Cymodocea nodosa* (στα ρηχότερα νερά), αλλά μόνο ένα είδος άλγης, η *Caulerpa racemosa* στο νότιο τμήμα. Γενικότερα, η περιοχή βαθών 10-25m που καλύπτει όλο το κεντρικό μέρος της περιοχής μελέτης (κυρίως γύρω στα 15m), χαρακτηρίζεται από εντονότερη υδροδυναμική σε σχέση με μεγαλύτερα βάθη ~40-45m, όπως αναμένεται και από τη βαθυμετρία, με συνέπεια την παρουσία συναθροίσεων βενθικής μακροπανίδας σημαντικά διαφορετικής δομής και μικρότερης αριθμητικής αφθονίας και πυκνότητας ειδών.

6. Εφαρμογή μεθοδολογίας στην περιοχή μελέτης

6.1. Μέθοδος εργασίας

Στα πλαίσια της εργασίας έγινε πλήθος δοκιμών, που αφορούν την κατάλληλη επιλογή και χωροθέτηση-περιγραφή της περιοχής μελέτης με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα, των παραμέτρων σχετικά με το είδος και την διάδοση των κυματισμών, των παραμέτρων αριθμητικής επίλυσης και χρονικής και χωρικής διαμέρισης, αλλά και των κατάλληλων επιλογών των παραγόμενων αρχείων για την επιτυχή επεξεργασία και παρουσίαση των αποτελεσμάτων με γνώμονα το στόχο της εργασίας. Για να καταστεί δυνατή μια τέτοια εκτενής διερεύνηση και εφαρμογή του μοντέλου, τόσο για τα τελικά δεδομένα όσο και για αυτά που δεν παρουσιάζονται, ακολουθήθηκε μια σειρά εργασίας, τα βασικά βήματα της οποίας περιγράφονται ως εξής:

- καθορισμός και οριοθέτηση προβλήματος
- συλλογή των δεδομένων
- σύνθεση (σετάρισμα) του μοντέλου
- βαθμονόμηση και επικύρωση του μοντέλου
- εκτέλεση των συνθέσεων μοντέλων
- παρουσίαση των αποτελεσμάτων

Ξεκινώντας με τον καθορισμό του προβλήματος, έγινε προσδιορισμός της περιοχής ενδιαφέροντος (γεωγραφικά) αλλά και των κυματικών συνθηκών που επικρατούν σε αυτή και των κύριων κυματικών φαινομένων που διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση της παράκτιας περιοχής.

Η συλλογή δεδομένων αφορά στα στοιχεία που καθορίστηκαν στο πρώτο στάδιο. Το βασικότερο στοιχείο, που καθορίζει τόσο την επιλογή και 'στήσιμο' της περιοχής μελέτης, όσο και τα επόμενα βήματα στη διαμόρφωση (set-up) του μοντέλου, αποτελεί η βαθυμετρία της περιοχής. Ακόμη, απαραίτητα είναι τα κυματικά δεδομένα, με βάση τα οποία προσδιορίζονται οι κυματικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή και προσομοιώνονται τα διάφορα σενάρια που επιλέγονται στη συνέχεια.

Η σύνθεση του μοντέλου, μαζί με την ακόλουθη βαθμονόμηση και επικύρωση του, είναι η κύρια εργασία ως προς την πρακτική/υπολογιστική εφαρμογή του μοντέλου. Ουσιαστικά, σε αυτό το στάδιο τα -πραγματικά- δεδομένα μετατρέπονται σε μορφή που είναι αντιληπτή από το πρόγραμμα και εν συνεχεία επιλύονται στο χωρικό πλέγμα που επιλέγεται. Βάση αποτελεί το αρχείο της βαθυμετρίας, ένας δισδιάστατος χάρτης με την τιμή βάθους σε κάθε σημείο του χωρικού πλέγματος. Ακόμη, εισάγεται το αρχείο ορισμού των ζωνών απορρόφησης (sponge layer), ένας δισδιάστατος χάρτης για την απορρόφηση κυμάτων μικρού/μεγάλου μήκους κύματος, ενώ σε περίπτωση ύπαρξης κατασκευών (όχι σε αυτή την μελέτη) εισάγεται και ένα αρχείο δισδιάστατου χάρτη πορώδους. Τέλος,

σε αυτό το στάδιο καθορίζεται και η γραμμή διάδοσης κυματισμών χωρικά, αλλά και το είδος, κατεύθυνσή των διαδιδόμενων κυματισμών κλπ.

Η βαθμονόμηση και επικύρωση μοντέλου, περιλαμβάνει αφενός την επιλογή επιπλέον παραμέτρων που ολοκληρώνουν το εκάστοτε σενάριο που πρόκειται να προσομοιωθεί, αφετέρου την προσέγγιση, με μια σειρά δοκιμών, της πιο ορθής επιλογής για την περίπτωση που μελετάται. Έτσι, μαζί με όλες τις επιλογές που έχουν προηγηθεί, προστίθενται προαιρετικά ρυθμίσεις ως προς τις τριβές στον πυθμένα, την θραύση του κύματος κ.ά., ενώ το όλο πακέτο υπόκειται σε αρκετές αλλαγές και ρυθμίσεις ανάλογα με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν με υπάρχουσες μετρήσεις ή δεδομένα, που δεν οδηγεί σε επιστημονικά ορθά συμπεράσματα (με βάση τα γνωστά στοιχεία και τις συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή), συνήθως έχει ως αποτέλεσμα τη διαμόρφωση των κυματικών διαταραχών που επιβάλλονται, της μεθόδου αριθμητικής επίλυσης που επιλέγεται, αλλά και πιο βασικών επιλογών όπως το ίδιο το αρχείο της βαθυμετρίας ή ο χρόνος προσομοίωσης, η χρονική και χωρική διαμέριση κλπ.

Όταν η διαδικασία που περιγράφηκε επαναληφθεί όσο κρίνεται αναγκαίο και υπάρχει μία σύγκλιση στο ρεαλιστικότερο και επιστημονικά ορθό αποτέλεσμα, με βάση όλες τις επιλογές που έχουν γίνει, επιλέγονται και εκτελούνται οι τελικές συνθέσεις. Αυτές θα δώσουν τα αποτελέσματα που θα αξιοποιηθούν παρακάτω.

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων αποτελεί καίρια διαδικασία. Οι δυνατότητες παρουσίασης ή/και περεταίρω επεξεργασίας των αποτελεσμάτων είναι πολλές και ο όγκος των αποτελεσμάτων (συνήθως) είναι μεγάλος. Συνεπώς, με βάση τα ζητούμενα, επιλέγονται τα κατάλληλα εξαγόμενα δεδομένα και παρουσιάζονται, κατά κύριο λόγο γραφικά, προς σχολιασμό και εξαγωγή συμπερασμάτων.

6.2. Σύνοψη αναφορά στις δοκιμαστικές προσομοιώσεις

Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζεται συνοπτικά μια αναδρομή στη διερεύνηση που έγινε μέσω του MIKE για την εύρεση των τελικών περιπτώσεων που μελετήθηκαν. Κατά την έρευνα εξετάστηκε πλήθος περιπτώσεων, που καλύπτει δοκιμές και ελέγχους σε σχέση με τη βαθυμετρία και τη χωρική και χρονική διαμέριση, τις επιλογές αριθμητικών παραμέτρων για την επίλυση, τη διάδοση των κυματισμών, την επιλογή των input αρχείων και συνθηκών και βέβαια την ορθότητα των αποτελεσμάτων και την εξαγωγή και παρουσίαση τους. Η έρευνα ολοκληρώθηκε με την προσομοίωση περίπου 250 επιτυχώς ολοκληρωμένων και μη σεναρίων, των οποίων κάποια στοιχεία παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Οι διαδικασίες διερεύνησης που πραγματοποιήθηκαν μπορούν να χωριστούν σε τρεις φάσεις. Κατά την πρώτη φάση, σημαντικό μέρος αποτέλεσε η εξοικείωση με το πρόγραμμα, τις διαθέσιμες επιλογές κατά το 'στήσιμο' και εκτέλεσή του και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Παρήχθησαν τα πρώτα αρχεία βαθυμετρίας και ακολούθησε μια σειρά δοκιμαστικών προσομοιώσεων, με συνδυασμούς δεδομένων και επιλογών εκτέλεσης. Αποτέλεσμα των παραπάνω

αποτέλεσε η δεύτερη φάση, που πλέον μελετήθηκαν σενάρια πιο ανταποκρίνονταν στις ρεαλιστικές συνθήκες. Ακολούθησαν διαδοχικές διορθώσεις, ενώ κύριο χαρακτηριστικό σε αυτή τη φάση αποτελούν οι πρώτες προσομοιώσεις κατευθυντικών κυματισμών. Η τρίτη φάση, αξιοποιώντας τα πορίσματα των προηγούμενων, έχει ως κατάληξη τη σύνθεση των τελικών σεναρίων που μελετήθηκαν. Ωστόσο, δοκιμάστηκαν κάποια σενάρια υπέρ-ακραίων συνθηκών και κάποια επιπλέον συγκεκριμένα τεστ.

Στην πρώτη φάση, έγινε παραγωγή αρκετών σεναρίων βαθυμετρίας, σε συνδυασμό με τα στοιχεία που περιλαμβάνει το Setup Planner. Το χωρίο διαμορφώθηκε περί τις δέκα φορές, περιλαμβάνοντας επεξεργασία περικοπής, περιστροφής και αλλαγής των χωρικών διαστάσεων του. Κύριος σκοπός για αυτό, ήταν η μη συμπερίληψη περιοχών με ελλείψεις δεδομένων βαθυμετρίας (όπως προαναφέρθηκε δεν ήταν εφικτή η ορθή συμπλήρωση των 'κενών' περιοχών) και η εξαίρεση σχετικών ανωμαλιών, αλλά και η καλύτερη δυνατή τοποθέτηση της γραμμής διάδοσης, ώστε να εκτείνεται σε παρόμοια βάθη και να περικλείει τη μεγαλύτερη δυνατή περιοχή διάδοσης. Προέκυψαν έτσι χωρία μήκους 1400-1600 m, πλάτους 3000-5000 m και περιστροφής ως προς τον βορρά 24° - 26° . Η χωρική διαμέριση έλαβε τιμές στο εύρος 0.16-3.5 m, ενώ το χρονικό βήμα τις τιμές 0.05, 0.1, 0.15 s. Ακόμη, οι εκτελέσεις που δεν ολοκληρώθηκαν λόγω σφάλματος, ξαναεκτελέστηκαν με διαφορετικές επιλογές αριθμητικών παραμέτρων. Η διαδικασία αυτή έγινε βάσει υπόδειξης του εγχειριδίου του MIKE, κατά το οποίο για να παρακαμφθούν τα σφάλματα επιλέγονται με σειρά προτεραιότητας οι εξής εναλλακτικές εκδοχές χωρικής διακριτοποίησης των παραγόμενων όρων :

- central differencing with side-feeding
- central differencing with simple upwinding at steep gradients and near land
- quadratic upwinding with simple upwinding at steep gradients and near land
- simple upwinding differencing

Επίσης, κατά αντιστοιχία, εάν και πάλι υπάρχουν αστάθειες, γίνονται επιπλέον επιλογές που αφορούν τη χρονική διακριτοποίηση των cross-όρων των εξισώσεων Boussinesq. Έτσι, επιλέγονται με σειρά προτεραιότητας οι παράγοντες χρονικής παρεκβολής 1 και 0 και προαιρετικά, επιπλέον, οι εξαρτώμενοι από το βάθος παράγοντες, στην περίπτωση της εργασίας με τιμές 0.8, 0.5 και 0 για βάθη μεγαλύτερα των 5m ή σε όλο το πεδίο (MIKE21 Boussinesq Wave Module, User Guide, chapter 5.2.4). Οι προσομοιώσεις περιελάμβαναν διάδοση κανονικών κυματισμών, ύψους 0.8-1m και περιόδου 5.2s, ενώ δοκιμές έγιναν με ζώνη απορρόφησης 10 και 20 στρωμάτων.

Στην δεύτερη φάση, διορθώσεις οδήγησαν σε μια βαθυμετρία, που τελικά θα αποτελέσει την τελική βαθυμετρία, στην οποία διαδόθηκαν κύματα ύψους 1, 3 και 5m για μεγαλύτερους χρόνους διάδοσης, έως και μία ώρα. Και εδώ οι προσομοιώσεις καλύπτουν μεγάλο φάσμα δοκιμών, κυρίως με διαφορετικές επιλογές ζώνης απορρόφησης και αριθμητικών παραμέτρων χωρικής και χρονικής διακριτοποίησης, όπως περιγράφηκαν προηγουμένως. Μεταξύ των προσομοιώσεων υπήρξαν και κάποιες που, επιλεγμένα, αποτέλεσαν στην ουσία πρώιμα αποτελέσματα. Ακόμη, πραγματοποιήθηκαν (με αντίστοιχες κυματικές

συνθήκες) οι πρώτες προσομοιώσεις κατευθυντικών κυματισμών, ενώ έγιναν και δοκιμές σχετικά με το ελάχιστο βάθος διάδοσης.

Η τρίτη και τελική φάση, βασίζεται στην τελική βαθυμετρία, χαρακτηριστικά της οποίας περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο και αφορά διάδοση αποκλειστικά κατευθυντικών κυματισμών, υπό διαφορετικές γωνίες διάδοσης. Η κατάληξη είναι τα τελικά σενάρια που προσομοιώθηκαν, τα οποία περιγράφονται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο. Χάριν πληρότητας, στη φάση αυτή πραγματοποιήθηκε και μια σειρά από προσομοιώσεις για κάποια υπέρ-ακραία σενάρια, εξετάστηκε η χρήση άλλης χωρικής και χρονικής διαμέρισης με τη πιθανή παράλληλη χρήση της θραύσης κύματος για δύο νέα σενάρια και η προσομοίωση σε διαταραγμένη θάλασσα. Ωστόσο, δεν παρουσιάζονται κάποια από αυτά τα αποτελέσματα, καθώς όποια προέκυψαν από επιτυχώς ολοκληρωμένες προσομοιώσεις δεν κρίθηκαν αξιόπιστα, αφού δεν υποστηρίζονται επαρκώς από τα διαθέσιμα δεδομένα ή και αποκλίνουν από τις ρεαλιστικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή.

Σημειώνεται και πάλι, ότι η επιλογή των τελικών σεναρίων που θα περιγραφούν στο επόμενο κεφάλαιο, έγινε με βάση την παραπάνω διερεύνηση και με άξονα τα διαθέσιμα δεδομένα (σε επίπεδο βαθυμετρίας, κυματικών συνθηκών και in situ παρατηρήσεων), τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων της διερεύνησης, την διαθέσιμη υπολογιστική ισχύ και την καλύτερη δυνατή προσέγγιση των ζητούμενων.

6.3. Εφαρμογή στην περιοχή μελέτης

Η παρουσίαση που έγινε στο κεφάλαιο 4 δίνει το υπόβαθρο επί του οποίου γίνεται η εφαρμογή τόσο των εργαλείων που περιγράφονται στα κεφάλαια 4.4-4.5, όσο και των πορισμάτων που προέκυψαν από τη ροή εργασίας κατά τα 6.1 και 6.2. Αυτό περιλαμβάνει τα στοιχεία που παρουσιάζονται ακολούθως και αφορούν στις βασικές παραμέτρους που διέπουν το πρόβλημα, τη βαθυμετρία και το στρώμα απορρόφησης και έπειτα στο κεφάλαιο 6.5 τις κυματικές συνθήκες.

Μια πρώτη εισαγωγή των βαθυμετρικών δεδομένων στο MIKE, ώστε να αναγνωρίζονται από αυτό και να επεξεργαστούν περεταίρω, έγινε με τη βοήθεια του εργαλείου MIKE Zero tool GIS - MIKE2GRD, που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4.4. Το αρχείο που προέκυψε έδωσε τη δυνατότητα μιας πρώτης απεικόνισης της βαθυμετρίας, της κατανομής των τιμών βάθους, αλλά και των περιοχών όπου υπήρχε έλλειψη δεδομένων. Αυτή η έλλειψη λήφθηκε υπόψη στην συνέχεια της επεξεργασίας, με το MIKE Zero tool Bathymetry Editor, οπότε και περικόπηκαν οι αντίστοιχες περιοχές, καθώς δεν καθίσταται δυνατό να συμπληρωθούν τεχνητά με ορθό τρόπο (πλην περιοχών μικρής έκτασης). Οι διαδικασίες που είναι απαραίτητες για να παραχθεί το τελικό αρχείο βαθυμετρίας μέσω του εργαλείου περιγράφηκαν αναλυτικότερα στο κεφάλαιο 4.4. Καθοριστική σημασία στις επιλογές που γίνονται για τη δημιουργία του τελικού αρχείου βαθυμετρίας παίζει τόσο το μέγιστο και ελάχιστο βάθος του τελικού χωρίου, όσο και οι διαστάσεις του, ο χρόνος προσομοίωσης, η μέγιστη περίοδος αλλά και η διαθέσιμη υπολογιστική ισχύς. Τα

παραπάνω συνθέτουν τις επιλογές που εισάγονται στο MIKE 21 BW Model Setup Planner, όπως περιγράφηκε και αναλυτικότερα στο κεφάλαιο 4.4. Αυτό το εργαλείο-βοήθημα του MIKE υπολογίζει, βάσει των τιμών που έχει εισάγει ο χρήστης, μεταξύ άλλων, τις κατάλληλες τιμές χωρικής και χρονικής διαμέρισης. Όπως είναι αντιληπτό, έστω και μια μικρή μεταβολή των παραμέτρων που αναφέρθηκαν προηγουμένως, μπορεί να προκαλέσει δραστική αλλαγή στις τιμές χωρικής και χρονικής διαμέρισης. Συνεπώς, στη φάση αυτή, έγιναν αρκετές δοκιμές με βάση το δίπτυχο Bathymetry Editor και Setup Planner, ώστε να επιτευχθεί ένα επιθυμητό αποτέλεσμα.

Στην περίπτωση που εξετάζεται στην εργασία, κείριο ρόλο για να υπάρξει αυτό το επιθυμητό αποτέλεσμα έπαιξε η διαθέσιμη βαθυμετρία χωρίς ελλείψεις και το ζητούμενο να περιληφθεί η μεγαλύτερη δυνατή περιοχή και μέχρι το μικρότερο δυνατό βάθος. Αυτά ίσχυσαν λαμβάνοντας υπόψη συγκεκριμένη μέγιστη περίοδο (που επιλέχθηκε αντιπροσωπευτικά $T=7s$), την διαθέσιμη υπολογιστική ισχύ και την επιλογή επίλυσης βελτιωμένων εξισώσεων Boussinesq, που περιλαμβάνουν όρους για βαθύ νερό, ώστε να επιλυθούν οι πιο ενεργητικές συνιστώσες του κυματικού φάσματος. Στα παραπάνω προστίθεται η επιλογή μη συμπερίληψης του φαινομένου θραύσης κύματος, καθώς δεν υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα και στοιχεία, που είναι απαραίτητο να περιληφθούν στη σύνθεση του μοντέλου, σχετικά με το φαινόμενο στην περιοχή μελέτης. Επίσης, η χωρική και χρονική διαμέριση που προέκυπτε σε συνδυασμό με την έκταση της περιοχής για κάποια πλασματικά σενάρια που συντέθηκαν δοκιμαστικά, απαιτούσαν πολύ μεγάλη υπολογιστική ισχύ που δεν ήταν διαθέσιμη.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, προέκυψε η τελική σύνθεση που φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα 6.3.1, με βάση την οποία επιλέχθηκαν οι κατάλληλες τιμές στο Bathymetry Editor.

MIKE 21 BW Model Setup Planner

MI

Define your model

 SI units for lengths (m)

 US units for length (ft)

Max. water depth

52

Min. water depth

0.7

Model extent in X-direction

2000

Model extent in Y-direction

4700

Percentage of water points (%)

80

Max. distance for waves to propagate

1800

Time required for calculation of statistics (minutes prototype time)

20

Computational points per CPU second ²⁾

500000

Spectral peak period (s)

7

 Exclude wave breaking/moving shoreline

 Include wave breaking/moving shoreline

Calculate simulation period

Total time required for simulation (minutes prototype time) ³⁾

25.07

Legend:

OK

Not OK

Notes:

¹⁾ The MIKE 21 BW Model Setup Planner is based on the step-by-step procedure shown [here](#).

²⁾ The computational points per CPU second can be found at the end of the run log file.

³⁾ Includes the travel time of the first wave and the time required for calculation of wave statistics.

⁴⁾ The spatial resolution may be OK in case of wave breaking/moving shoreline. Make sure the ratio L/dx is 20-40 for T_p (see check/evaluation box).

Calculate and check/evaluate T_{min} , dx and dt ¹⁾

Upper limits

Min. wave period, T_{min} (s)

Classical eq.

12.3

Enhanced eq.

8.16

Max. spatial resolution, dx

4.59

3.03

Max. time step, dt (s)

0.203

0.134

Own suggestion

Min. wave period, T_{min} (s)

12.3

8.16

Spatial resolution ⁴⁾, dx

4.59

2.5

Time step, dt (s)

0.203

0.1

Check/evaluation of selected T_{min} , dx and dt

Max. ratio h/L_p for T_{min}

0.2199

0.4996

Max. ratio h/L_p for T_p

0.0091

0.0091

Min. ratio L/dx for T_{min}

7.0037

8.4975

Min. ratio L/dx for T_p

3.9600

7.2706

Ratio T/dt for T_{min}

60.591

81.6

Ratio T/dt for T_p

34.482

70

Max. Courant Number

0.9994

0.9038

Estimated CPU time (hours)

1.4741

10.072

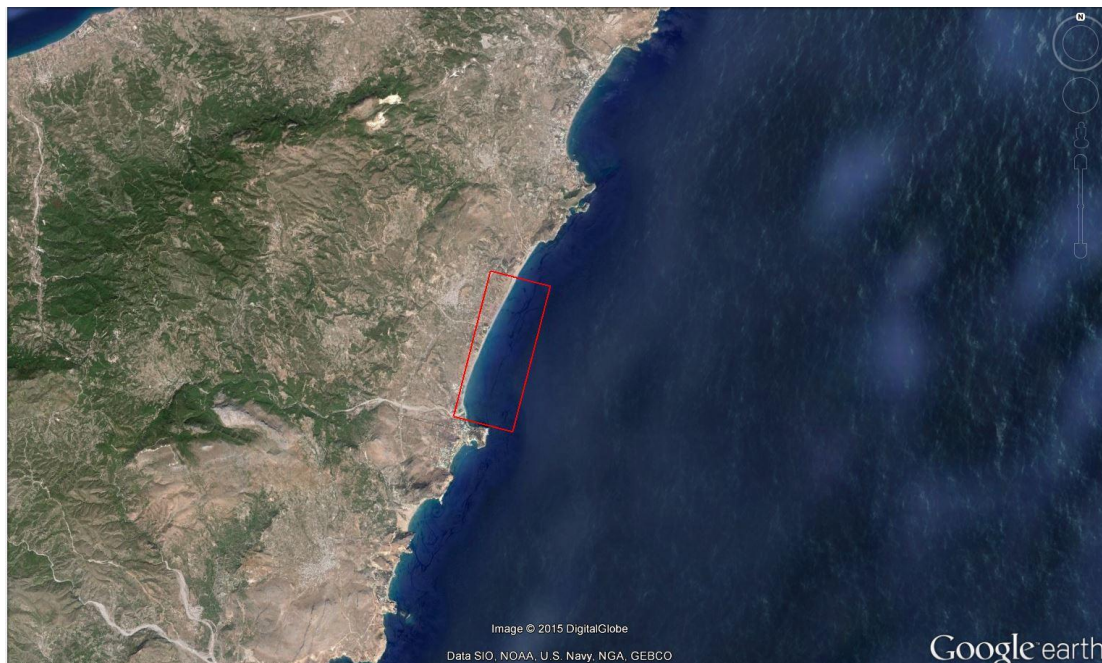
Estimated RAM (MB)

46.286

141.60

Εικόνα 6.3.1: Τελικές επιλογές setup planner

Επιλέχθηκε έτσι περιοχή μοντελοποίησης διαστάσεων 4700x2000m, που καλύπτει το νότιο τμήμα της παραλίας. Μάλιστα, για να περιληφθεί το μεγαλύτερο δυνατό τμήμα διαθέσιμων δεδομένων βαθυμετρίας, το πλέγμα της τελικής βαθυμετρίας στράφηκε κατά 10° ως προς τον βορρά. Η περιστροφή έγινε ακόμη για να επιτευχθεί η μικρότερη δυνατή μεταβολή του βάθους επί του ανατολικού συνόρου της τελικής περιοχής, καθώς εκεί θα τοποθετούταν η γραμμή διάδοσης κυματισμών, η οποία προϋποθέτει σχετικά μικρές μεταβολές βάθους κατά μήκος της. Στην εικόνα 6.3.2 φαίνεται γεωγραφικά τοποθετημένο το πλαίσιο που αποτελεί την τελική περιοχή μελέτης. Σε αυτή εφαρμόστηκε το χωρικό πλέγμα με βάση τη διαμέριση $dx=dy=2.5m$ και έγινε η αντιστοίχιση των τιμών βάθους στα σημεία του πλέγματος, με βάση τα πρωτογενή δεδομένα με τη μέθοδο τριγωνικής παρεμβολής, για την οποία υπάρχει αναλυτικότερη περιγραφή στο παράρτημα Α. Η περιοχή μελέτης τελικώς συντίθεται από 1504000 σημεία διαμέρισης, εκ των οποίων τα 1164455 (περίπου το 80%) αφορούν στο κομμάτι βαθυμετρίας που ενδιαφέρει τη μελέτη. Το αρχείο που προκύπτει είναι ένα αρχείο της μορφής .dfs2, που αποτελεί το αρχείο βαθυμετρίας που θα μπορεί να εισαχθεί στην συνέχεια κατά την εκτέλεση του μοντέλου.



Εικόνα 6.3.2: Περιοχή μοντελοποίησης (Google Earth)

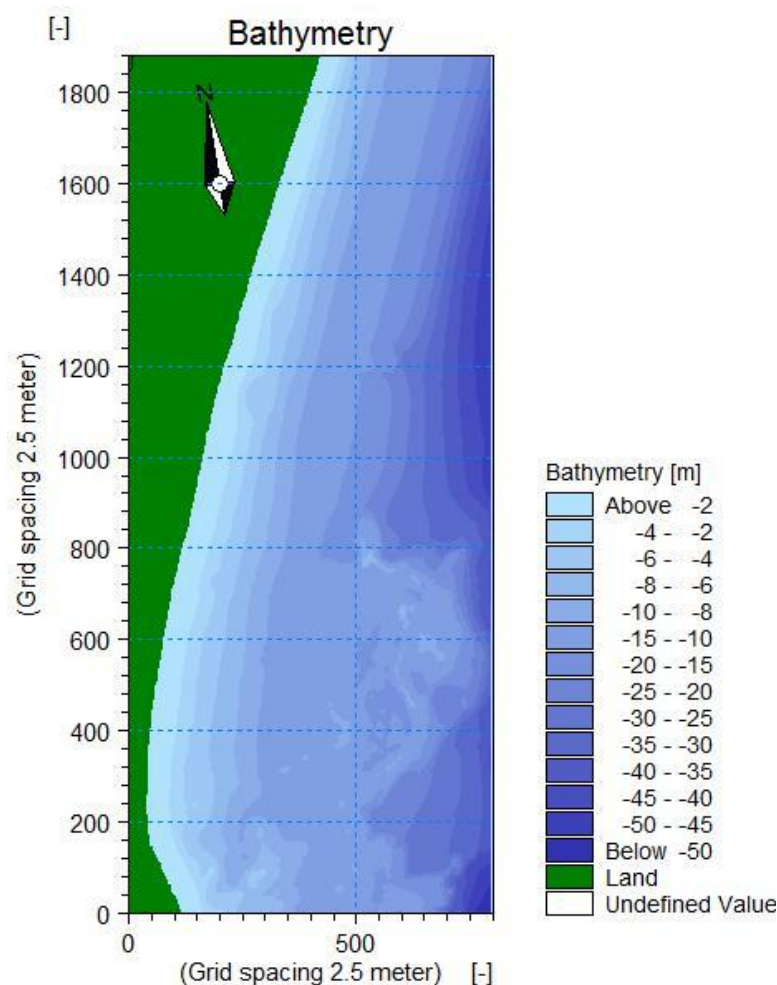
Το αρχείο αυτό, δεν αποτελεί ωστόσο το τελικό αρχείο βαθυμετρίας που χρησιμοποιείται. Για να ληφθεί το τελικό αρχείο, γίνεται μια τελευταία επεξεργασία της βαθυμετρίας, στο αρχείο που εξήχθη από το Bathymetry Editor.

Όπως προαναφέρθηκε και φαίνεται και στην εικόνα 6.3.1, το ελάχιστο βάθος που επιλέχθηκε είναι τα 0.7m, δηλαδή η εφαρμογή του μοντέλου θα στηριχτεί σε ένα σετ δεδομένων στο οποίο έχει ληφθεί υπόψη ως ελάχιστο βάθος τα 0.7m. Το πρωτογενές και κατ'επέκταση το αρχείο βαθυμετρίας που προέκυψε από το Bathymetry Editor περιέχει ωστόσο μικρότερες τιμές βαθών. Για λόγους αξιοπιστίας

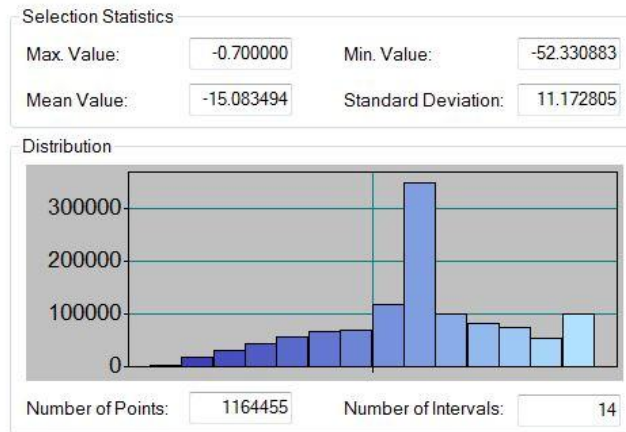
αποτελεσμάτων και με βάση το σκεπτικό που περιγράφηκε προηγουμένως για τη δημιουργία της βαθυμετρίας, εξισώνονται οι τιμές βαθών των σημείων του πλέγματος που είναι μικρότερες του 0.7 (έως τα 0m) με την τιμή 0.7m. Με αυτόν τον τρόπο υπάρχει συνέπεια σε σχέση με το ελάχιστο βάθος χωρίς να αλλοιώνεται η πραγματική γεωγραφική θέση της ακτογραμμής, η οποία θα αποτελέσει στην συνέχεια τον οδηγό πάνω στον οποία θα τοποθετηθεί το στρώμα απορρόφησης. Η ζώνη βάθους των 0.7m έχει πλάτος περίπου 20 σημείων πλέγματος, οριοθετώντας μια περιοχή πλάτους περίπου 50m κατά μήκος της ακτής και προς την θάλασσα, όπου το βάθος είναι 0.7m.

Το αρχείο που προκύπτει είναι το τελικό αρχείο βαθυμετρίας που θα χρησιμοποιηθεί σε όλες τις προσομοιώσεις που θα εκτελεστούν. Η απεικόνιση της φαίνεται στην εικόνα 6.3.3.

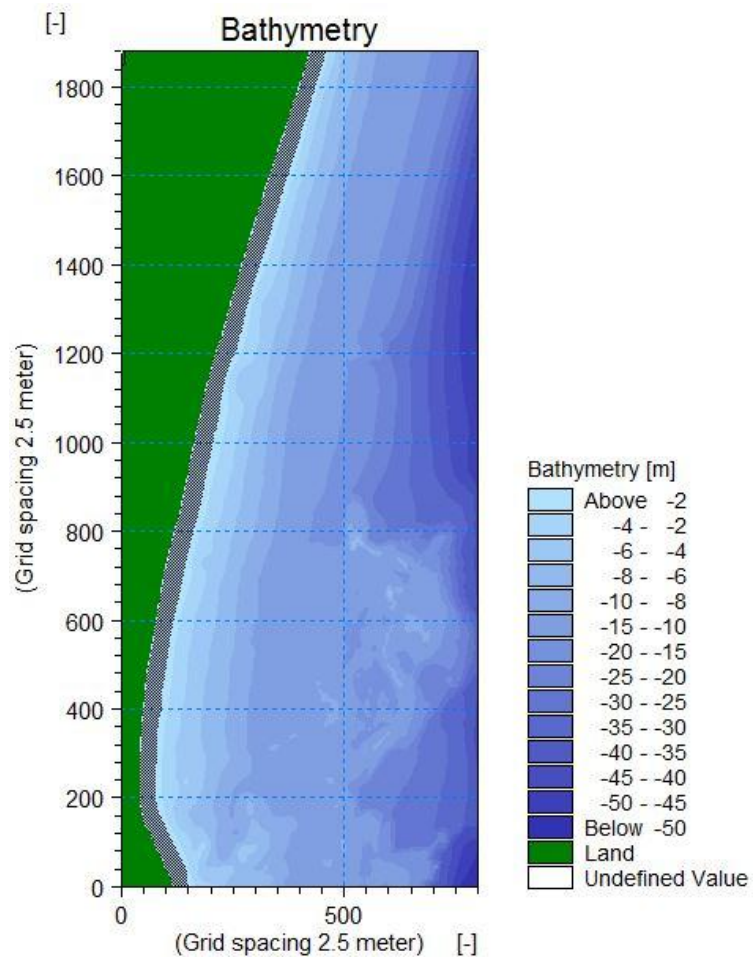
Ακόμη, ακολουθεί η εικόνα 6.3.4 με βασικά στατιστικά στοιχεία της βαθυμετρίας, όπως προέκυψαν από διαθέσιμη επιλογή του grid editor του MIKE για το αρχείο της βαθυμετρίας, ενώ παρουσιάζεται και η ζώνη που έγινε ομογενοποίηση των τιμών βάθους στα 0.7m (γραμμοσκιασμένη περιοχή στην εικόνα 6.3.5).



Εικόνα 6.3.3: Βαθυμετρία μοντέλου



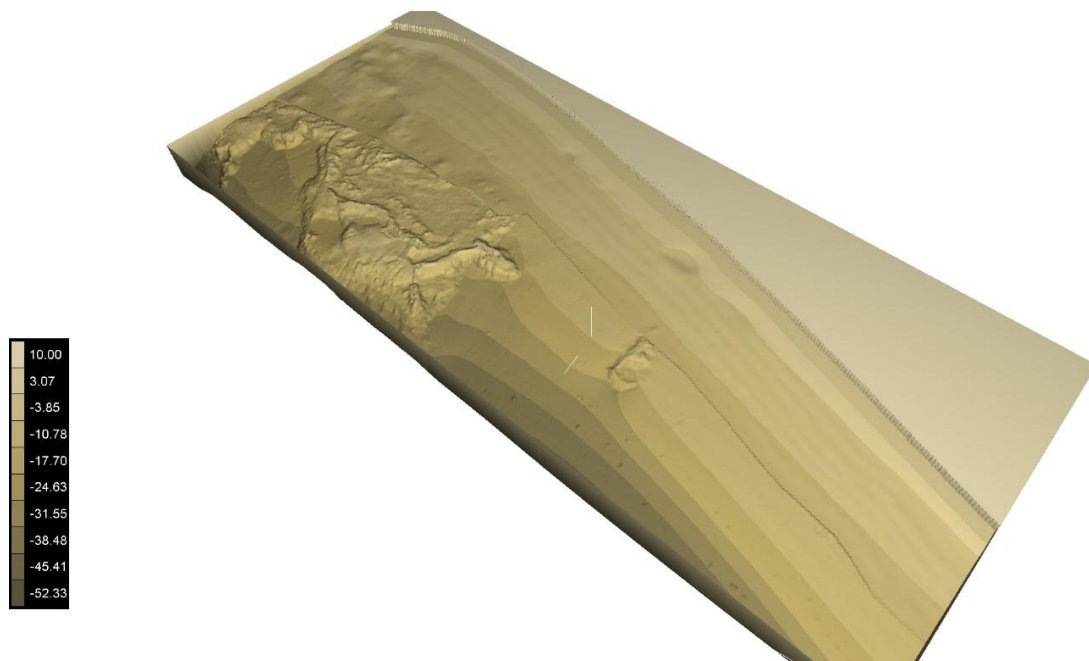
Εικόνα 6.3.4: Στατιστικά στοιχεία βαθυμετρίας μοντέλου



Εικόνα 6.3.5: Ζώνη βαθών έως και 0.7m

Όπως φαίνεται από την εικόνα 6.3.3 της βαθυμετρίας και σε συνδυασμό με τα στοιχεία της εικόνας 6.3.4, είναι ευδιάκριτες αρκετές ανομοιομορφίες και απότομες βαθυμετρικές αλλαγές σε διάφορα σημεία της περιοχής. Σε κάποιες περιοχές εστιασμένα η κλίση του πυθμένα έχει μεγάλες τιμές, κυρίως στις θέσεις που συμβαίνει σταδιακή ρήγωση από τα βαθύτερα νερά στα ανατολικά του πεδίου προς τα μέσα καταγεγραμμένα βάθη, περίπου στα 15m, αλλά και σε έναν αριθμό ανωμαλιών του πυθμένα που εμφανίζονται κεντρικά και νότια στο πεδίο. Αυτό το νοτιότερο τμήμα της παραλίας, γνωστό και ως 'Ξέρα Κολυμπίων', είναι ένα βραχώδες ύψωμα με τραχύ ανάγλυφο και κλίσεις που, κυρίως στο τμήμα της προς τα ανοιχτά, παρουσιάζει μεγάλες κλίσεις. Αυτά είναι πιθανά σημεία που αναμένουμε να επηρεάσουν τη διάδοση των κυματισμών και κατά συνέπεια τη κατανομή της ενέργειας και των πιέσεων που ασκούνται στον πυθμένα.

Στο βόρειο τμήμα η κατανομή των βαθών γίνεται σχεδόν παράλληλα με την ακτογραμμή, ενώ τα βάθη αυξάνονται σημαντικά προς τα ανοιχτά. Οι τιμές των βαθών ελαττώνονται βαθμιαία ομαλά από τα 10m και κάτω, μέχρι το όριο της ακτογραμμής. Τα παραπάνω φαίνονται και στην εικόνα 6.3.6 που ακολουθεί, που αποτελεί τρισδιάστατη απεικόνιση της βαθυμετρίας της περιοχής, όπως προέκυψε από το MIKE Animator Plus, με τις χαρακτηριστικές ανωμαλίες πυθμένα του βραχώδους υφάλου και μίας περιοχής απότομων μεταβολών βάθους που είναι εστιασμένη περίπου κεντρικά του πεδίου.



Εικόνα 6.3.6: 3-D βαθυμετρία

Η τοποθέτηση του στρώματος απορρόφησης στην τελική περιοχή μελέτης, έγινε κατά μήκος της ακτογραμμής καθώς και στο άνω, δεξί και κάτω σύνορο του χωρίου. Όπως περιγράφηκε αναλυτικότερα στο κεφάλαιο 4.4, τα στρώματα απορρόφησης χρησιμοποιούνται για την σταδιακή απόσβεση των κυμάτων, απορροφώντας κύματα διαφόρων περιόδων. Στο 4.4 περιγράφηκε επίσης η προετοιμασία ενός τέτοιου αρχείου, με βάση το τελικό αρχείο βαθυμετρίας του μοντέλου. Στην περίπτωση της εφαρμογής της εργασίας, επιλέχθηκε απορροφητική ζώνη πάχους 10 στρωμάτων, οι τιμές των οποίων, όπως προέκυψαν από το εργαλείο του MIKE, παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

1	5.00000095
2	2.23606873
3	1.49534988
4	1.22284555
5	1.10582387
6	1.05158210
7	1.02546728
8	1.01265407
9	1.00630760
10	1.00314939

Πίνακας 6.3.1: Τιμές στρώματος απορρόφησης

Η τιμή 5 αφορά το στρώμα που είναι κοντινότερο στην ακτή, με σταδιακή μείωση καθώς αυξάνεται το βάθος.

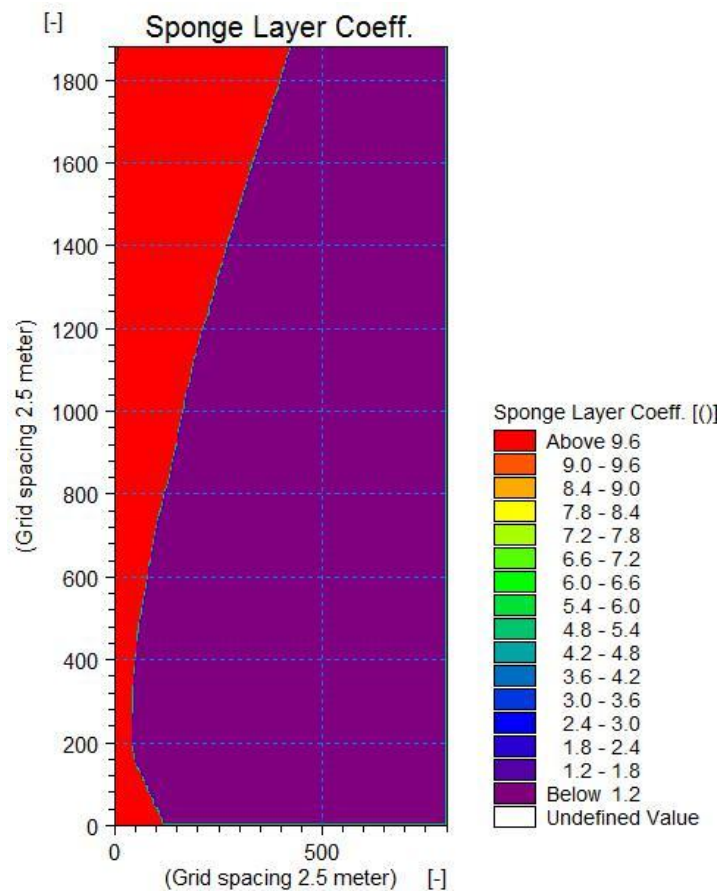
Η επιλογή 10 στρωμάτων βασίστηκε σε προσομοιώσεις με δοκιμές διαφόρων παχών και στόχο είχε η απορρόφηση να είναι ικανοποιητική, αποφεύγοντας ταυτόχρονα φαινόμενα ανακλάσεων των κυμάτων από το στρώμα, οι οποίες πιθανών να αλλοιώνουν (γύρω από την περιοχή που εκτείνονται) τα αποτελέσματα που θα υπολογιστούν.

Ο χάρτης με τους κατάλληλους συντελεστές που προέκυψε από το MIKE 21 Tool Generate Sponge and Porosity Layer Map, παρουσιάζεται στην εικόνα 6.3.7.

Το πάχος του στρώματος απορρόφησης αντιστοιχεί σε 10 σημεία επί 2.5m, δηλαδή 25m. Επομένως, εκτείνεται κατά μήκος της ακτογραμμής (που ορίστηκαν τα σημεία εφαρμογής του) και με πλάτος 25m προς τη θάλασσα. Αυτό το μέρος καλύπτει στην ουσία κατά προσέγγιση την μισή έκταση της ζώνης κοινού βάθους των 0.7m, όπως ορίστηκε προηγουμένως. Επίσης, αυτή είναι η έκταση για την οποία τα αποτελέσματα καταγράφονται μεν, δεν θα θεωρηθούν πλήρως αξιόπιστα δε, καθώς η ύπαρξη του στρώματος επηρεάζει τους υπολογισμούς.

Με βάση τα παραπάνω, τα αποτελέσματα που θα προκύψουν στην συνέχεια για τη περιοχή μελέτης και θα αξιολογηθούν στην εξαγωγή συμπερασμάτων,

αφορούν το υδάτινο μέρος μέχρι ενός νοητού ορίου στα 25m παράλληλα την ακτή και προς τη θάλασσα, σε ενιαίο κοινό βάθος 0.7m.



Εικόνα 6.3.7: Χάρτης στρώματος απορρόφησης

Σημειώνεται, τέλος, ότι στην παρούσα εργασία δεν λαμβάνεται υπόψη η δράση της μόνιμης κυκλοφορίας στην περιοχή. Κύρια αιτία αποτελεί η απουσία δεδομένων ρεύματος στην περιοχή και η αδυναμία λήψης μετρήσεων κατά την περίοδο εκπόνησης της εργασίας. Ακόμη και αν υπήρχαν δεδομένα, ωστόσο, ο απαιτούμενος χρόνος μελέτης και παράλληλης χρήσης ενός υδροδυναμικού μοντέλου θα ξέφευγε από τα πλαίσια αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας.

Τελευταία παραδοχή για όλα τα ακόλουθα σενάρια που προσομοιώθηκαν, είναι ότι δεν έγινε εισαγωγή δεδομένων τριβής στον πυθμένα και ιζώδους διών, καθώς δεν υπήρχαν διαθέσιμες σχετικές μετρήσεις ή παρατηρήσεις στην περιοχή.

6.4. Παρουσίαση σεναρίων που μελετήθηκαν

6.4.1. Σύνοψη βασικού υποβάθρου για όλα τα σενάρια

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται περιγραφή των τελικών σεναρίων που μελετήθηκαν στην εργασία. Αυτά προέκυψαν από τη διερεύνηση που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο και παρουσιάζονται εδώ αναλυτικότερα. Βασικό άξονα για αυτό αποτελεί η προσέγγιση και τα βασικά στοιχεία που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 4.1, ενώ γίνεται λόγος και για τις συγκεκριμένες επιλογές εργαλείων του MIKE, βάσει της γενικής περιγραφής τους στο κεφάλαιο 4.4 και της τελικής σύνθεσης, κατά το κεφάλαιο 4.5.

Τα σενάρια αφορούν μέσες και ακραίες κυματικές συνθήκες, οι οποίες καθορίζονται και αναγνωρίζονται, ουσιαστικά, από το μοντέλο από τα αρχεία διάδοσης κυματισμών, που παράγονται με τη βοήθεια του εργαλείου MIKE 21 Toolbox Regular και Random Wave Generation. Εκτός από αυτά τα συγκεκριμένα στοιχεία, που θα περιγραφούν παρακάτω, όλα τα υπόλοιπα απαιτούμενα αρχεία και επιλογές που έχουν να κάνουν με τη σύνθεση του μοντέλου είναι ίδια για όλα τα σενάρια και περιγράφονται ακολούθως, κατά την διαδικασία που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3.5 για την σύνθεση του τελικού αρχείου προσομοίωσης.

Η βαθυμετρία του δισδιάστατου μοντέλου είναι η τελική βαθυμετρία, όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 6.3 και απεικονίζεται στην εικόνα 6.3.3. Επιλέχθηκε η επίλυση των βελτιωμένων εξισώσεων Boussinesq, ώστε να ληφθούν υπόψη όροι για βαθύ νερό, με παράγοντα γραμμικής διασποράς 0.067. Ως προς τις αριθμητικές παραμέτρους επίλυσης, επιλέχθηκε η μέθοδος 'quadratic unwinding with simple unwinding at steep gradients and near land' και για τη χρονική διακριτοποίηση των cross-όρων των εξισώσεων Boussinesq ο παράγοντας 1, με εξαρτώμενο από το βάθος παράγοντα 0.5 για βάθη μεγαλύτερα των 5m. Σύνορα για το χωρίο θεωρήθηκαν τα σύνορα του αρχείου της βαθυμετρίας, χωρίς να εισάγεται κάποιο τεχνητό ή ανοικτό σύνορο. Ο χρόνος προσομοίωσης ορίστηκε στη μία ώρα, ώστε να προσδιοριστεί, ανά περίπτωση, ο χρόνος στον οποίο επικρατεί σταδιακά ισορροπία των κυματικών διαταραχών. Το χρονικό βήμα των 0.1s, που προέκυψε από το τελικό setup planner (εικόνα 6.3.1), οδηγεί τελικά σε 36000 χρονικά στιγμιότυπα προσομοίωσης. Όπως φαίνεται και στον χάρτη βαθυμετρίας, η τιμή που αντιστοιχεί σε ξηρά ορίστηκε να έχει την τιμή 10, ενώ η ανύψωση επιφάνειας επιλέχθηκε σταθερή στο αντίστοιχο πεδίο. Τα πεδία της τριβής πυθμένα, ιξώδους, φίλτρου, θραύσης κύματος και κινούμενης ακτογραμμής δεν ενεργοποιήθηκαν, σύμφωνα με τα στοιχεία και τη σύνθεση που επιλέχθηκαν, όπως αναφέρεται και στο κεφάλαιο 4. Στο πεδίο στρώματος απορρόφησης εισήχθη το αρχείο του οποίου η παραγωγή περιγράφηκε στο 6.3 και απεικονίζεται στην εικόνα 6.3.7.

Τέλος, για όλα τα σενάρια επιλέχθηκαν τα παραχθούν τα ίδια αποτελέσματα. Η ανύψωση της επιφάνειας επιλέχθηκε ως ντετερμινιστική παράμετρος, για όλο το χωρίο μελέτης και με καταγραφές με διάστημα 600 χρονικών βημάτων. Στις παραμέτρους μέσης φάσης επιλέχθηκαν το σημαντικό ύψος κύματος, η χρονικά μέση και ολοκληρωμένη στο βάθος ροή για την οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση και η χρονικά μέση τιμή της ολοκληρωμένης στο βάθος ταχύτητας για την οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση, επίσης για όλο το χωρίο και με διάστημα

600 χρονικών βημάτων. Όλα τα παραπάνω αποτελέσματα έχουν τη μορφή δισδιάστατων πινάκων, με διαστάσεις αυτές του αρχείου βαθυμετρίας

Τα παραπάνω συνθέτουν τα στοιχεία επί των οποίων θα εξετασθούν τα τελικά σενάρια. Υπάρχει επομένως, η κοινή βάση της βαθυμετρίας μαζί με το στρώμα απορρόφησης, ο ίδιος χρόνος και χρονικό βήμα προσομοίωσης, ίδια μέθοδος αριθμητικής επίλυσης αλλά και επιλογή εξαγόμενων αρχείων. Το μόνο που διαφοροποιεί τις προσομοιώσεις, όπως προαναφέρθηκε, είναι οι κυματικές συνθήκες που θα περιγραφούν ανά περίπτωση στην συνέχεια.

6.4.2. Σενάρια μέσω κυματικών συνθηκών

Με βάση βασική σύνθεση που περιγράφηκε, παράγονται και προσομοιώνονται δύο σενάρια μέσω κυματικών συνθηκών. Για τον προσδιορισμό των συνθηκών αυτών, αξιοποιούνται τα κυματικά δεδομένα που διατέθηκαν, όπως αναφέρεται και στο κεφάλαιο 5. Σύμφωνα με την ανάλυση των χρονοσειρών, βρέθηκε η μέση τιμή του σημαντικού ύψους κύματος και έπειτα της μέγιστης περιόδου, με τις αντίστοιχες τιμές του άλλου μεγέθους. Οι τιμές στρογγυλοποιήθηκαν και προέκυψαν τα εξής σενάρια κυματικής διάδοσης:

# Σεναρίου	Hs (m)	Tp (s)	Θ (°)
1 (κανονικοί κυματισμοί)	0.8	3.4	100 ⁰
2 (κατευθυντικοί κυματισμοί)	0.8	3.4	100 ⁰
3 (κατευθυντικοί κυματισμοί)	1	4	125 ⁰

Πίνακας 6.4.1: Σενάρια μέσω κυματικών συνθηκών

Από την ανάλυση των δεδομένων, προέκυψαν ακόμη οι αντίστοιχες διευθύνσεις ανέμου για τα παραπάνω. Στην προκειμένη περίπτωση των μέσω κυματικών συνθηκών, ωστόσο, όπως περιγράφηκε και στο κεφάλαιο 5, οι επικρατούσες κυματικές διευθύνσεις είναι βορειοδυτικές. Για λόγους πρακτικής εφαρμογής της διάδοσης στο MIKE και κυρίως για την εν συνεχεία σύγκριση των αποτελεσμάτων των παρόντων σεναρίων με τα ακραία σενάρια που θα περιγραφούν παρακάτω, επιλέγονται οι διευθύνσεις που φαίνονται στον πίνακα 6.4.1.

Το σενάριο 1 αφορά διάδοση κανονικών κυματισμών, που διαδίδονται κάθετα προς την ακτή (το μέτωπο του κύματος περίπου παράλληλα προς την ακτή). Το κατάλληλο αρχείο δημιουργήθηκε με τη βοήθεια του MIKE 21 Toolbox Regular Wave Generation, που περιγράφηκε αναλυτικότερα στο κεφάλαιο 4.4. Για το σημαντικό ύψος και την μέγιστη περίοδο που αναφέρθηκαν, επιλέχθηκε θεωρία Boussinesq τρίτης τάξης, με μέσο βάθος διάδοσης να επιλέγονται τα 42m. Η χρονική περίοδος και το χρονικό βήμα επιλέγονται να είναι ίδια με αυτά του σετ προσομοίωσης ($\Delta t=0.1s$ για 1h).

Το σενάριο 2 βασίζεται στα ίδια κυματικά στοιχεία του σεναρίου 1, αφορά όμως σε διάδοση κατευθυντικών κυματισμών. Το κατάλληλο αρχείο δημιουργήθηκε με τη βοήθεια του MIKE 21 Toolbox Random Wave Generation, που περιγράφηκε αναλυτικότερα στο κεφάλαιο 4.4. Στο εργαλείο, πέραν των τιμών σημαντικού ύψους κύματος και μέγιστης περιόδου που ορίστηκαν, επιλέγεται σαν φάσμα συχνοτήτων το φάσμα JONSWAP, για το οποίο αναφέρονται περισσότερα στο παράρτημα Β, οι προεπιλεγμένες τιμές παραμέτρων σχήματος ($\gamma=3.3$, $\sigma_a=0.07$, $\sigma_b=0.09$) και οι συντεταγμένες που ορίζουν τη γεωγραφική θέση της γραμμής επί της οποίας θα διαδοθούν οι κυματισμοί. Εκτός της ίδιας χρονικής περιόδου και χρονικής διαμέρισης με αυτά του μοντέλου, επιλέγεται ακόμη ίδια χωρική διαμέριση ($dx=dy=2.5m$). Τέλος, για την κατανομή διευθύνσεων επιλέγεται η κύρια διεύθυνση των 100° με μέγιστη απόκλιση τις 30° (ορίζοντας ένα εύρος $70^\circ-130^\circ$) και αντίστοιχη επιλογή του συντελεστή ανεξάρτητης από τη συχνότητα κατανομής διευθύνσεων ίσο με 3 (άρα τύπου \cos^3). Τα παραπάνω αφορούν μετεωρολογικό σύστημα μέτρησης γωνιών (ως προς τον πραγματικό βορρά και δεξιόστροφα) και συμπεριλαμβάνουν την περιστροφή 10° του χωρίου ως προς τον βορρά.

Το σενάριο 3, χρησιμοποιεί τα κυματικά δεδομένα που φαίνονται στον πίνακα 3.2.1. Το αρχείο διάδοσής τους περιλαμβάνει όλες ακριβώς τις ρυθμίσεις και επιλογές που έγιναν για την παραγωγή του αρχείου του σεναρίου 2, με μόνη διαφορά την επιλογή κύριας διεύθυνσης στις 125° .

6.4.3. Σενάρια ακραίων κυματικών συνθηκών

Εκτός των σεναρίων μέσω κυματικών συνθηκών, εξετάζονται σενάρια ακραίων κυματικών συνθηκών, με βάση τα κυματικά δεδομένα. Όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 5, αυτά τα σενάρια ενδιαφέρουν ιδιαίτερα την συγκεκριμένη εργασία, καθώς η επίδραση ακραίων κυματικών συνθηκών στο πεδίο ταχυτήτων είναι καίριας σημασίας. Ακόμη, όπως αναφέρθηκε, τα σενάρια αυτά ισχύουν για διευθύνσεις διάδοσης νοτιοανατολικού προσανατολισμού, έτσι οι τιμές της γωνίας διάδοσης θ που συμπεριλαμβάνουν είναι πλήρως ρεαλιστικές. Με βάση αυτό το εύρος διευθύνσεων, επιλέχθηκαν τα σενάρια που παρουσιάζονται στον πίνακα 6.4.2.

# Σεναρίου	Hs (m)	Tp (s)	θ ($^\circ$)
1 (κανονικοί κυματισμοί)	4.2	7	100°
2 (κατευθυντικοί κυματισμοί)	4	6.75	70°
3 (κατευθυντικοί κυματισμοί)	4.2	7	100°
4 (κατευθυντικοί κυματισμοί)	4.4	7.3	125°
5 (κατευθυντικοί κυματισμοί)	4.6	7.56	150°

Πίνακας 6.4.2: Σενάρια ακραίων κυματικών συνθηκών

Το σενάριο 1, αφορά τη διάδοση κανονικών κυματισμών, που διαδίδονται κάθετα προς την ακτή, με τα κυματικά χαρακτηριστικά που φαίνονται στον πίνακα 6.4.2. Τα υπόλοιπα σενάρια αφορούν στη διάδοση κατευθυντικών κυματισμών, με τα κυματικά χαρακτηριστικά και διευθύνσεις διάδοσης που φαίνονται στον πίνακα 6.4.2. Η παραγωγή των κατάλληλων αρχείων έγινε με τη βοήθεια των εργαλείων MIKE 21 Toolbox Regular και Random Wave Generation, ακολουθώντας διαδοχικά τις επιλογές που περιγράφηκαν στο 3.2.1 και μόνες διαφορές το ύψος κύματος, την μέγιστη περίοδο και τη κύρια διεύθυνση διάδοσης.

Τα αρχεία κυματικής διάδοσης που αντιστοιχούν στο κάθε σενάριο και παρήχθησαν όπως περιγράφηκε στα 6.4.1 και 6.4.2, συμπληρώνουν τα υπόλοιπα στοιχεία και επιλογές, όπως περιγράφηκαν στο 6.4.1, συνθέτοντας τα τελικά αρχεία MIKE21 Boussinesq Waves (.bw) που θα προσομοιωθούν. Στο επόμενο κεφάλαιο, δίνονται τα αποτελέσματα των οκτώ σεναρίων, συνοδευόμενα με κατάλληλη παρουσίαση, με βάση τα οποία στο κεφάλαιο 8.1 καταγράφονται τα τελικά αριθμητικά αποτελέσματα συνοδευόμενα από κατάλληλο σχολιασμό, ενώ στο κεφάλαιο 8.2 παρουσιάζεται η προσέγγιση σύνδεσης των παραπάνω με την επίδραση στους παράκτιους οικότοπους.

7. Αριθμητικά αποτελέσματα

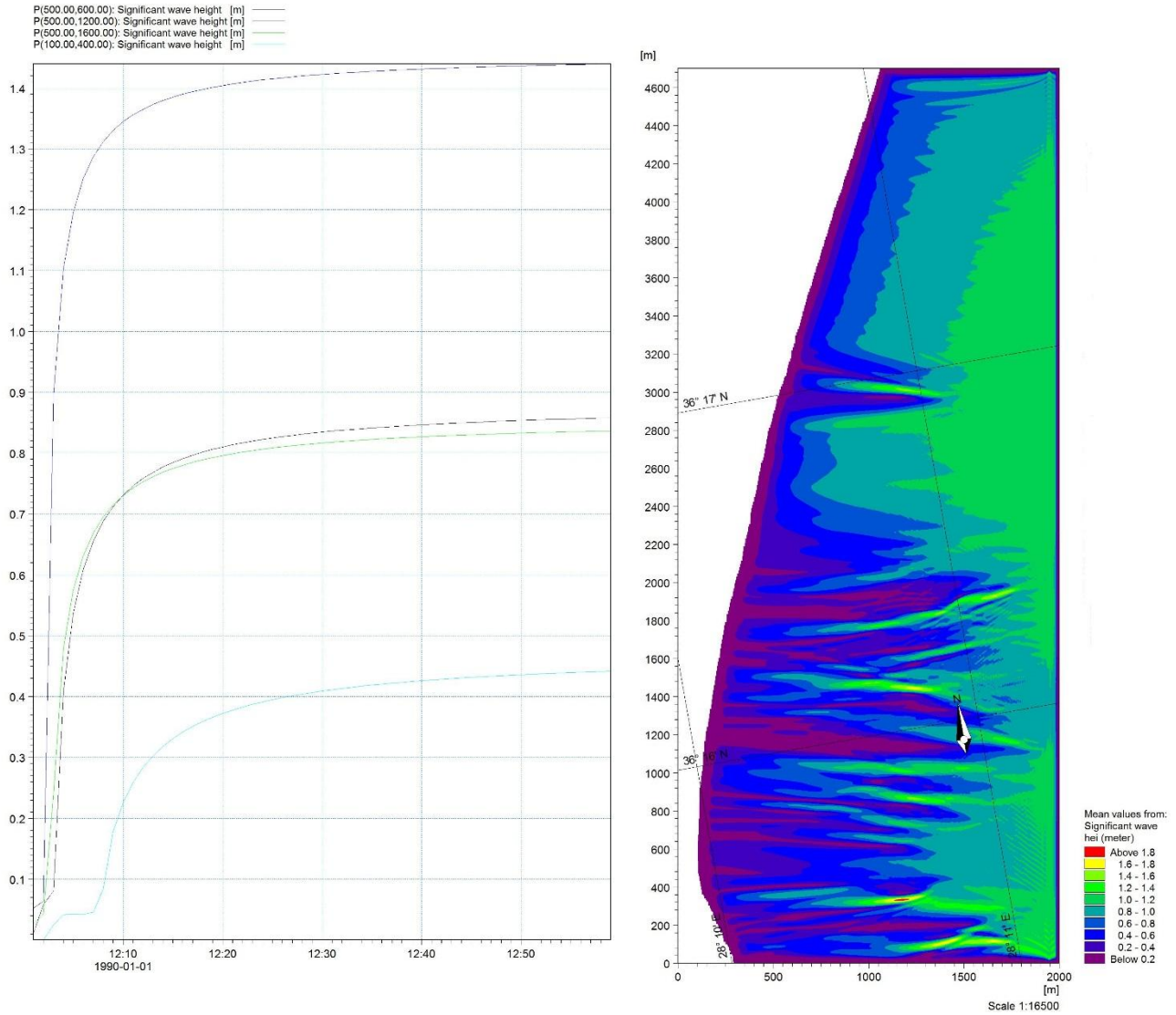
Όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4.5 υπάρχει πληθώρα δυνατών αποτελεσμάτων που μπορούν να παραχθούν για το μοντέλο, εκ των οποίων επιλέγονται συγκεκριμένα, που ενδιαφέρουν περισσότερο την εργασία, τα οποία αναφέρονται στο κεφάλαιο 6.4.1. Στο ίδιο κεφάλαιο, σημειώνεται ότι αυτή η ρύθμιση των παραγόμενων δεδομένων είναι η ίδια για όλα τα σενάρια που προσομοιώθηκαν και επομένως αποτελούν ένα κοινό παρανομαστή για την παρουσίαση και τη μετέπειτα σύγκρισή τους.

Με βάση τα παραπάνω, τα αποτελέσματα που θα ακολουθήσουν στη συνέχεια αποτελούν την παρουσίαση των δεδομένων των αρχείων που προέκυψαν από την εκτέλεση του MIKE, που δημιουργήθηκαν με χρήση των ίδιων εργαλείων και με ίδιες ή αντίστοιχες επιλογές κατά την εφαρμογή τους, για όλες τις περιπτώσεις. Πιο συγκεκριμένα, το .dfs2 αρχείο του σημαντικού ύψους κύματος χρησιμοποιήθηκε στο MIKE Zero tool: extraction time series from 2D data, ώστε να εξαχθούν οι χρονοσειρές του μεγέθους για επιλεγμένα σημεία του δισδιάστατου πλέγματος (συγκεκριμένα τα: (500,600), (500,1200), (500,1600), (100,400)). Το αρχείο που προκύπτει παρουσιάζεται με το MIKE Zero Plot composer, με επιλογή γραφικής παράστασης χρονοσειρών. Προσδιορίζεται έτσι, γραφικά κατά προσέγγιση, η χρονική περίοδος μετά την οποία επικράτησε ισορροπία των θαλάσσιων συνθηκών, ώστε να επιλεγεί η αντίστοιχη χρονική περίοδος για την οποία θα ληφθούν υπόψη τα επιμέρους εξαγόμενα δεδομένα και θα γίνει περεταίρω επεξεργασία τους. Αυτή η διαδικασία επιλογής μέρους των εξαγόμενων δεδομένων για κάποιο μέγεθος, βάσει μιας συγκεκριμένης χρονικής περιόδου από την συνολική περίοδο προσομοίωσης, έγινε με τη βοήθεια του MIKE 21 Toolbox statistics. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε αρχείο των μεγεθών που επιλέχθηκαν να παραχθούν (σημαντικό ύψος κύματος, ταχύτητες U,V, ρεύμα P,Q), με αυτό το εργαλείο υπολογίζονται οι μέσες τιμές για την προαναφερθείσα επιλεγμένη χρονική περίοδο. Τα δεδομένα που προκύπτουν, χρησιμοποιούνται για την τελική απεικόνιση μέσω του MIKE Zero Plot composer, δίνοντας έτσι για την περίοδο ισορροπίας τις μέσες τιμές των επιμέρους μεγεθών (για την ταχύτητα σωματιδίων νερού και το ρεύμα απεικονίζονται οι συνισταμένες τιμές των x και y συνιστωσών που εξήχθησαν).

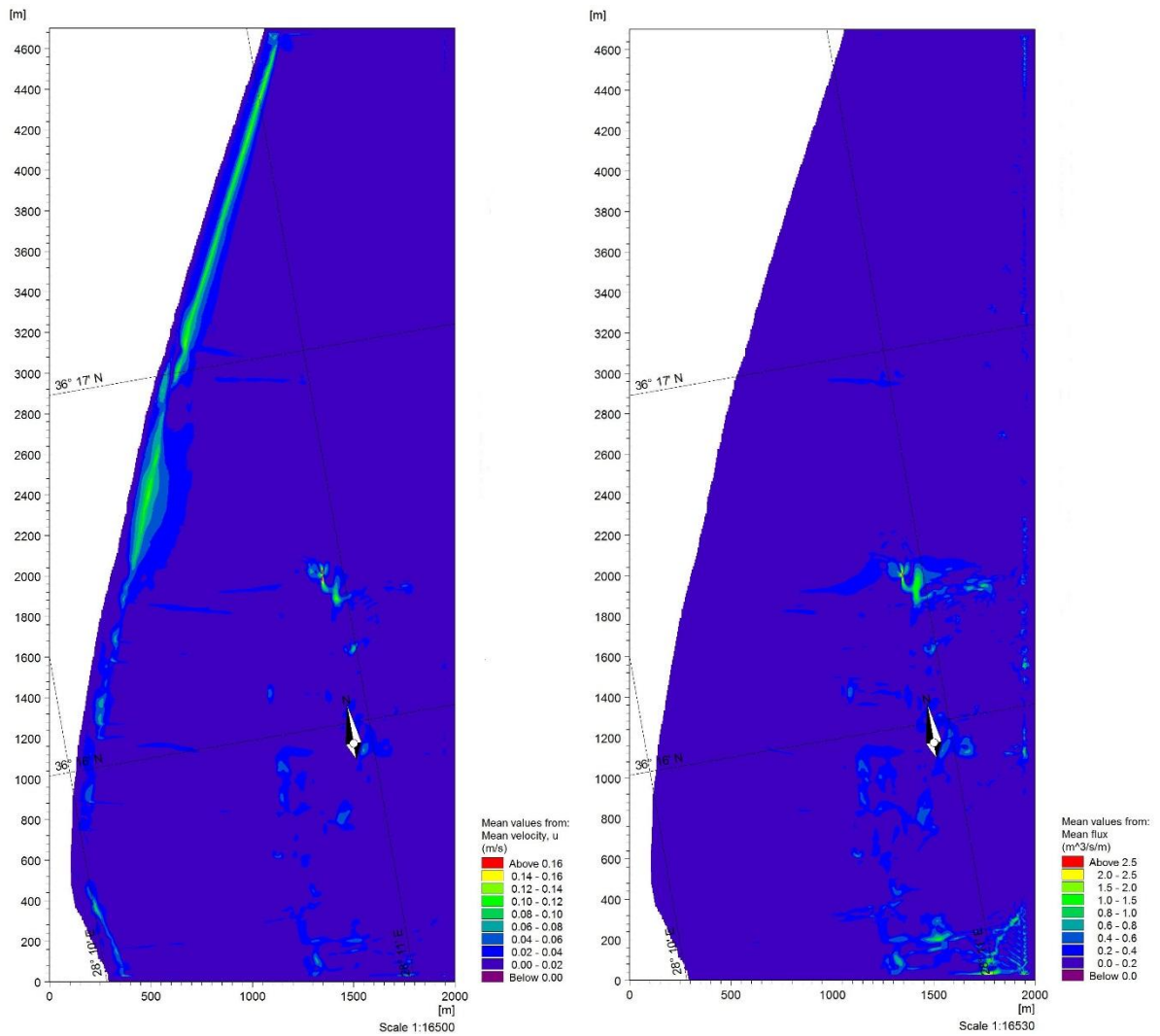
Με βάση τα παραπάνω, ακολουθούν τα τελικά γραφήματα για κάθε σενάριο. Για αυτά τα τέσσερα γραφήματα ανά σενάριο, σημειώνεται ακόμη -για κάθε περίπτωση- η χρονική περίοδος μετά την οποία προσεγγιστικά επικράτησε ισορροπία και συνεπώς στην οποία βασίζεται η δημιουργία των γραφήματων. Ανάλυση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων για κάθε σενάριο, αλλά και γενικότερη προσέγγιση των δυναμικών συνθηκών της περιοχής με βάση αυτά, γίνεται στο επόμενο κεφάλαιο.

7.1. Αποτελέσματα σεναρίων μέσω κυματικών συνθηκών

ΣΕΝΑΡΙΟ 1 (Ισορροπία μετά από 20 λεπτά):

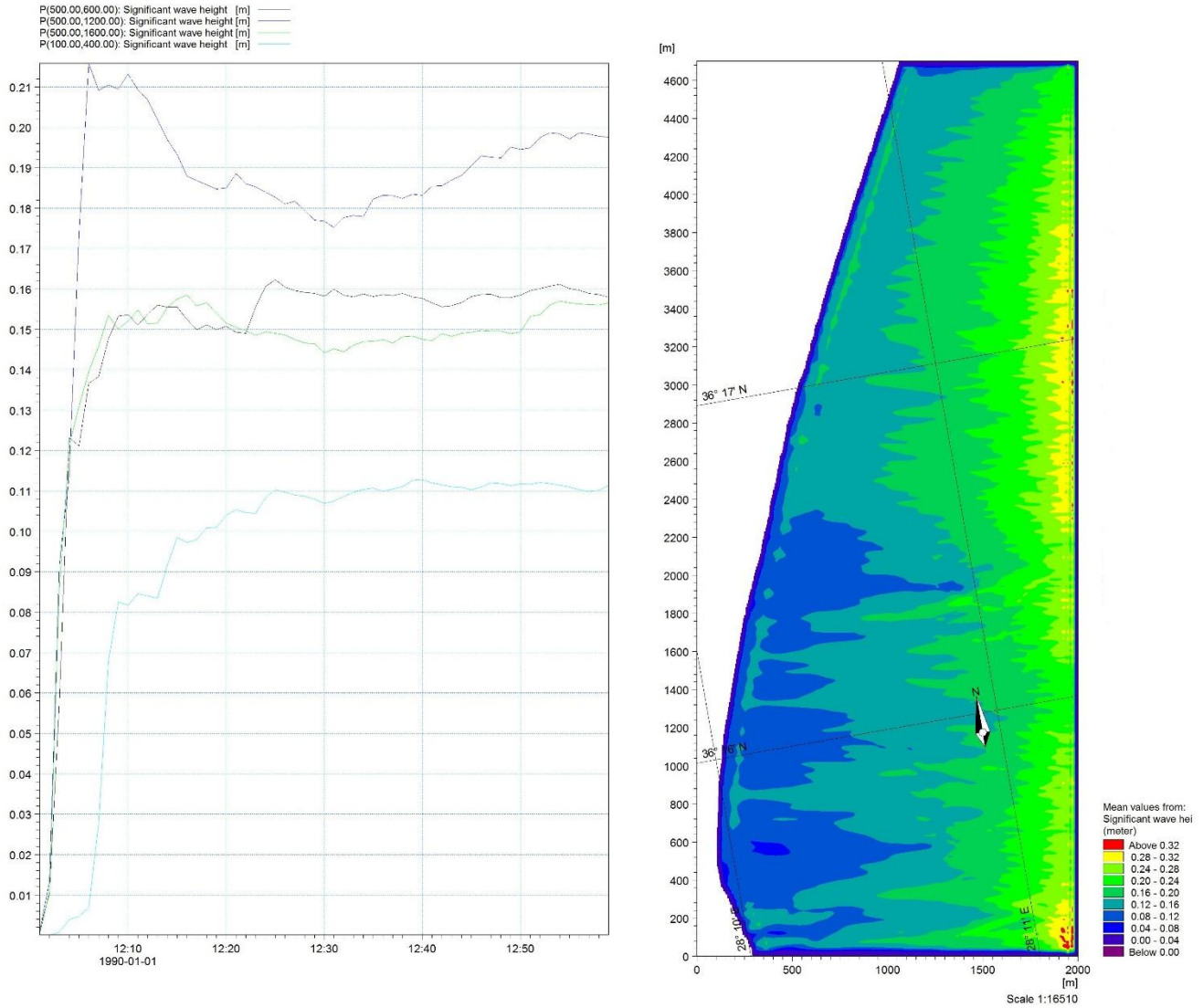


Εικόνα 7.1.1: Σενάριο μέσω κυματικών συνθηκών 1 ($H_s=0.8\text{m}$, $T=3.4\text{s}$, $\Theta=100^\circ$, κανονικοί κυματισμοί). α) Χρονοσειρές σημαντικού ύψους κύματος 5 σημείων του πλέγματος για όλη τη χρονική διάρκεια, β) Χάρτης σημαντικού ύψους κύματος για το χρονικό διάστημα προσομοίωσης 30-60min

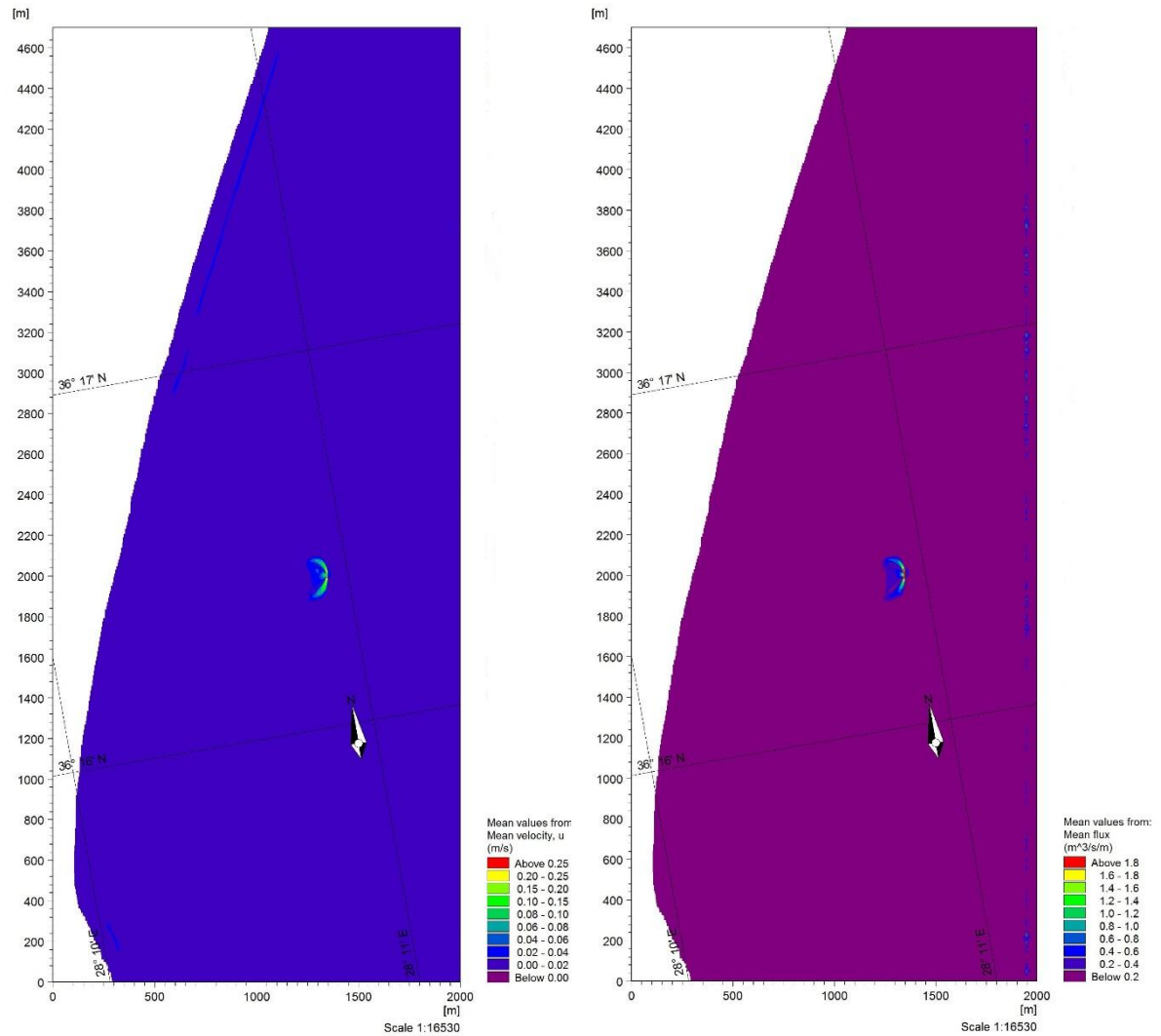


Εικόνα 7.1.2: Σενάριο μέσω κυματικών συνθηκών 1 ($H_s=0.8m$, $T=3.4s$, $\Theta=100^\circ$, κανονικοί κυματισμοί). α) Χάρτης μέσω ταχυτήτων των σωματιδίων νερού και β) Χάρτης μέσης ροής, το χρονικό διάστημα προσομοίωσης 20-60min

ΣΕΝΑΡΙΟ 2 (Ισορροπία μετά από 30 λεπτά):

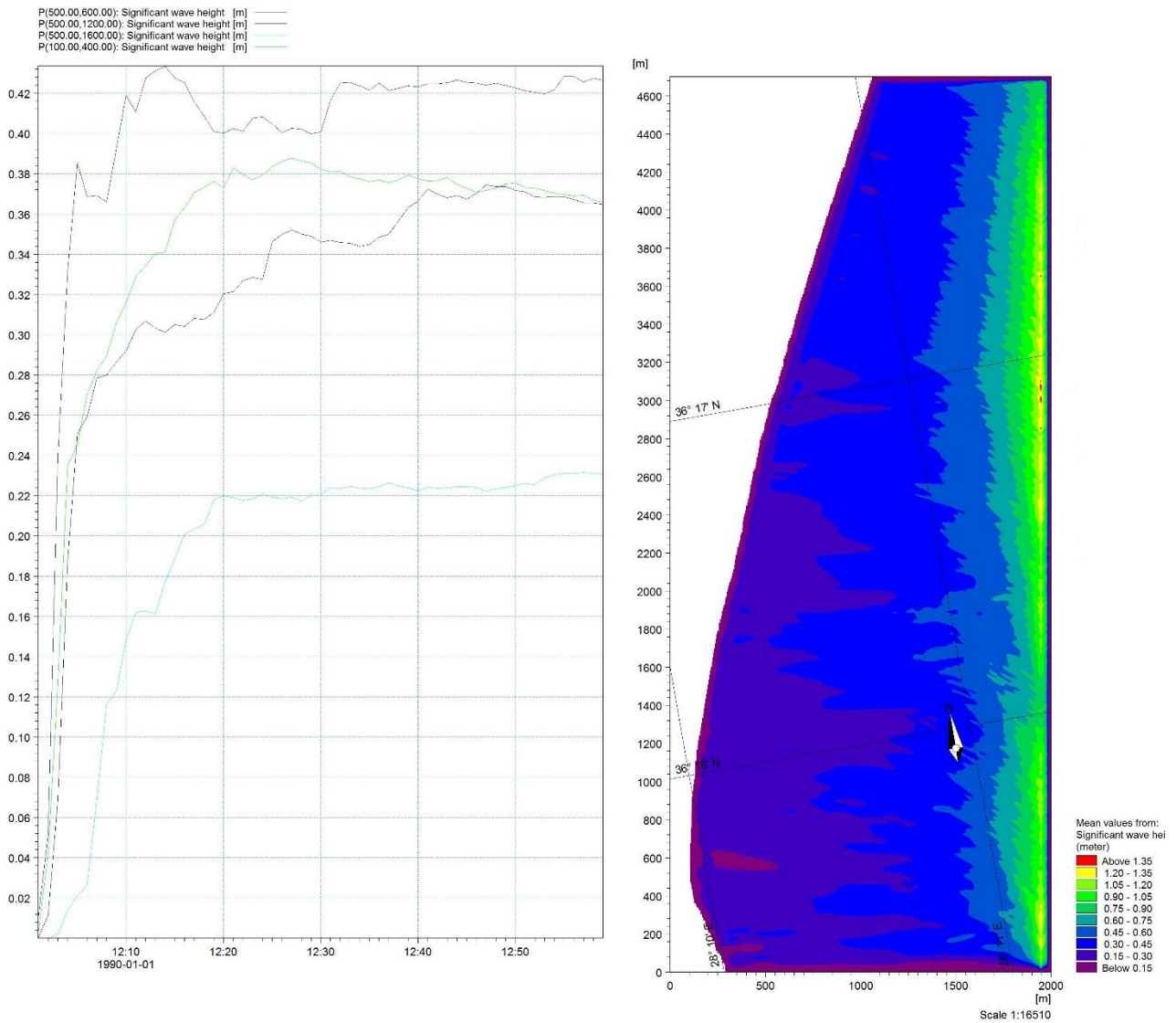


Εικόνα 7.1.3: Σενάριο μέσω των κυματικών συνθηκών 2 ($H_s=4.2\text{m}$, $T=7\text{s}$, $\Theta=100^\circ$, κατευθυντικοί κυματισμοί). α) Χρονοσειρές σημαντικού ύψους κύματος 5 σημείων του πλέγματος για όλη τη χρονική διάρκεια, β) Χάρτης σημαντικού ύψους κύματος για το χρονικό διάστημα προσομοίωσης 30-60min

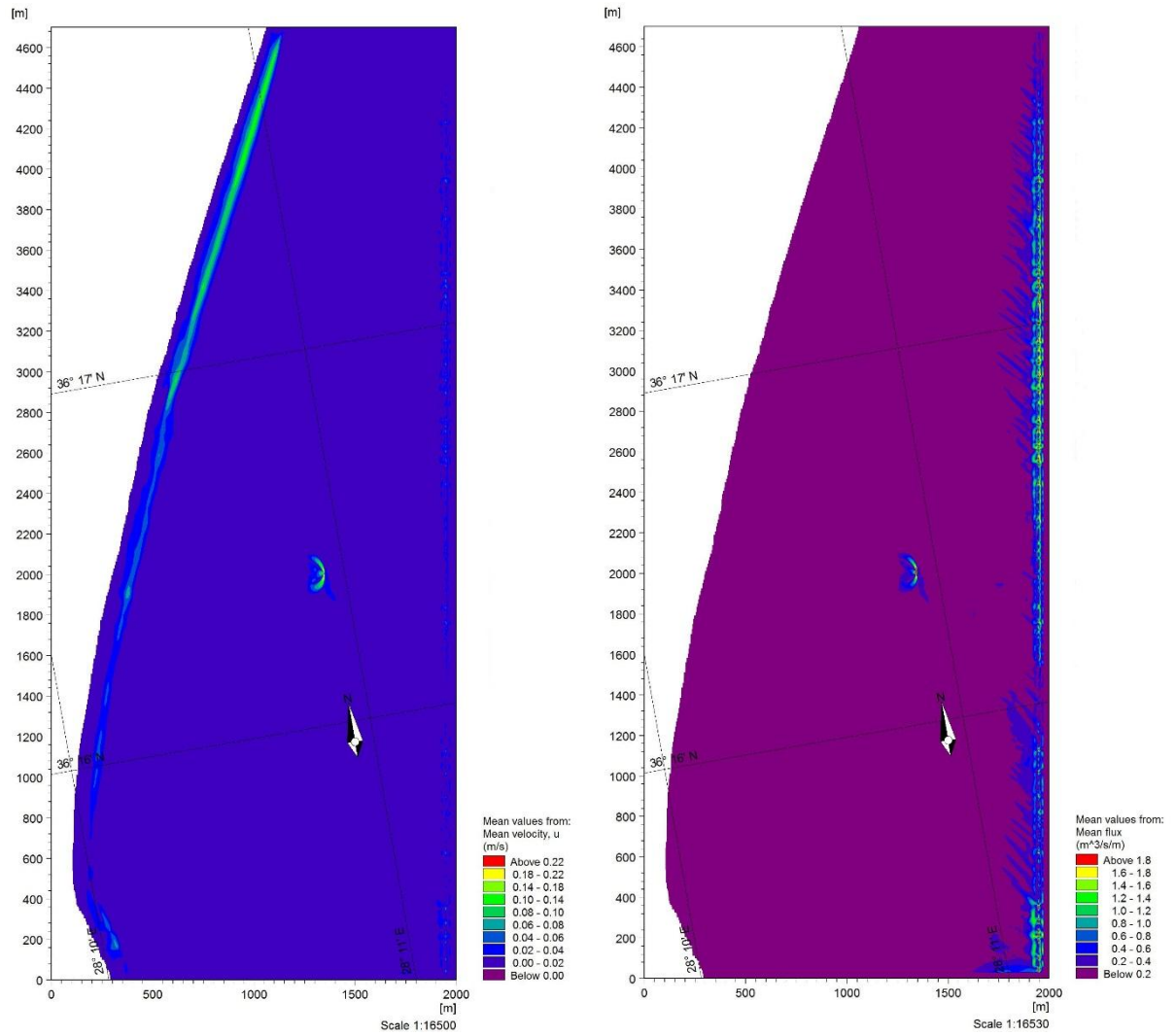


Εικόνα 7.1.4: Σενάριο μέσων κυματικών συνθηκών 2 ($H_s=0.8\text{m}$, $T=3.4\text{s}$, $\Theta=100^\circ$, κατευθυντικοί κυματισμοί). α) Χάρτης μέσων ταχυτήτων των σωματιδίων νερού και β) Χάρτης μέσης ροής, για το χρονικό διάστημα προσομοίωσης 30-60min

ΣΕΝΑΡΙΟ 3 (Ισορροπία μετά από 30 λεπτά):



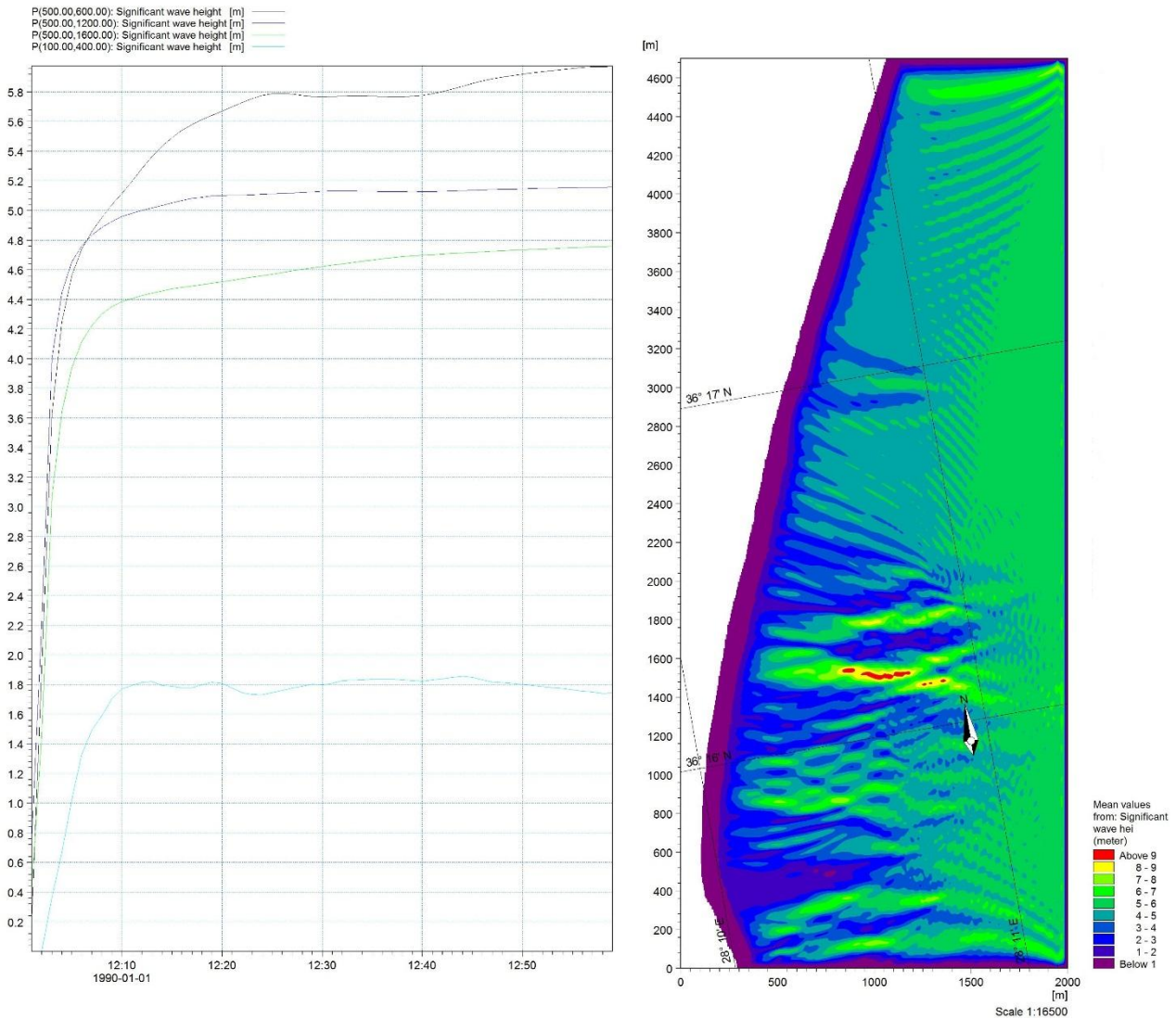
Εικόνα 7.1.5: Σενάριο μέσων κυματικών συνθηκών 3 ($H_s=1\text{m}$, $T=4\text{s}$, $\Theta=125^\circ$, κατευθυντικοί κυματισμοί). α) Χρονοσειρές σημαντικού ύψους κύματος 5 σημείων του πλέγματος για όλη τη χρονική διάρκεια, β) Χάρτης σημαντικού ύψους κύματος για το χρονικό διάστημα προσομοίωσης 30-60min



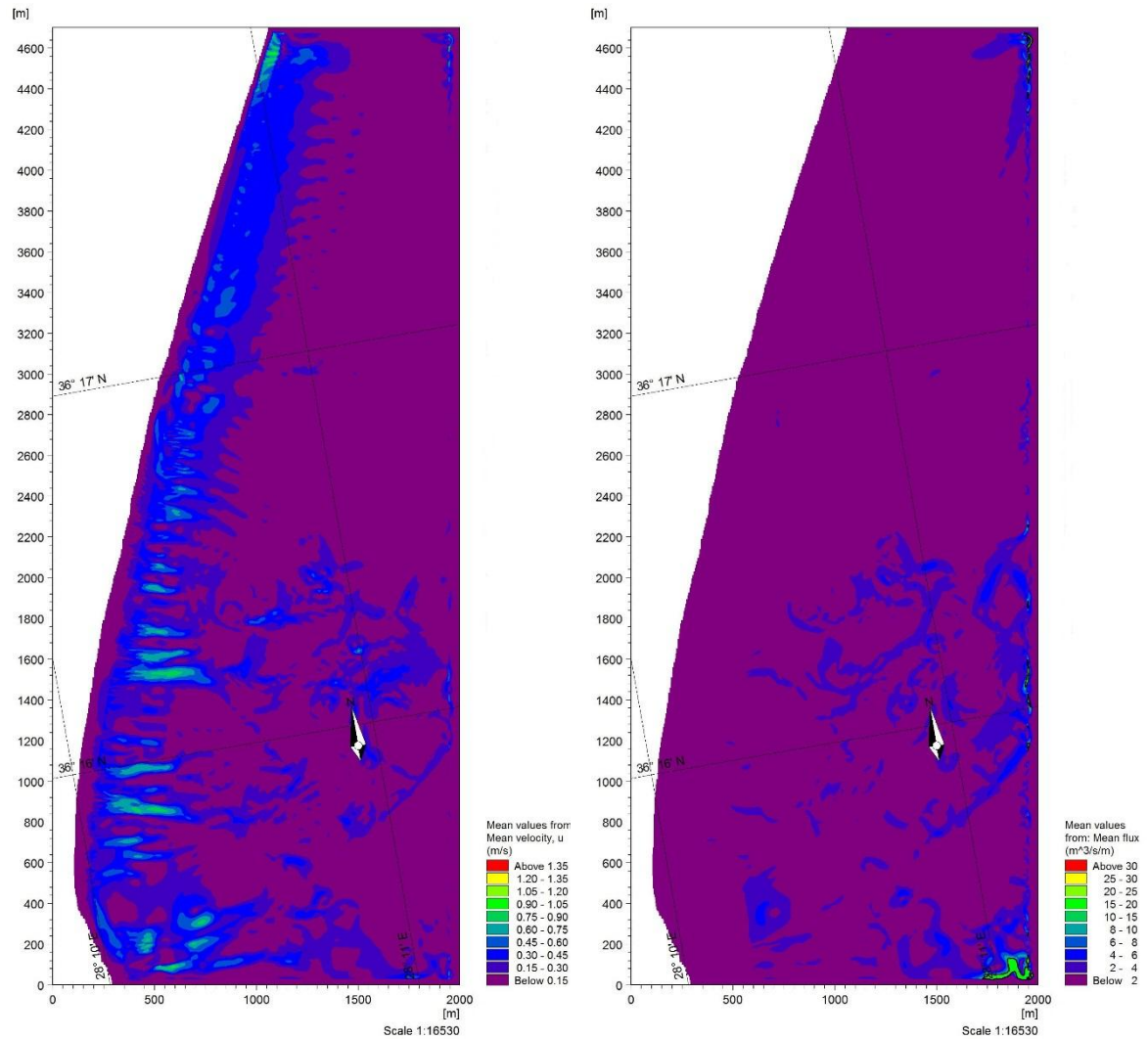
Εικόνα 7.1.2: Σενάριο μέσων κυματικών συνθηκών 3 ($H_s=1m$, $T=4s$, $\Theta=125^\circ$, κατευθυντικοί κυματισμοί). α) Χάρτης μέσων ταχυτήτων των σωματιδίων νερού και β) Χάρτης μέσης ροής, το χρονικό διάστημα προσομοίωσης 30-60min

7.2. Αποτελέσματα σεναρίων ακραίων κυματικών συνθηκών

ΣΕΝΑΡΙΟ 1 (Ισορροπία μετά από 20 λεπτά):

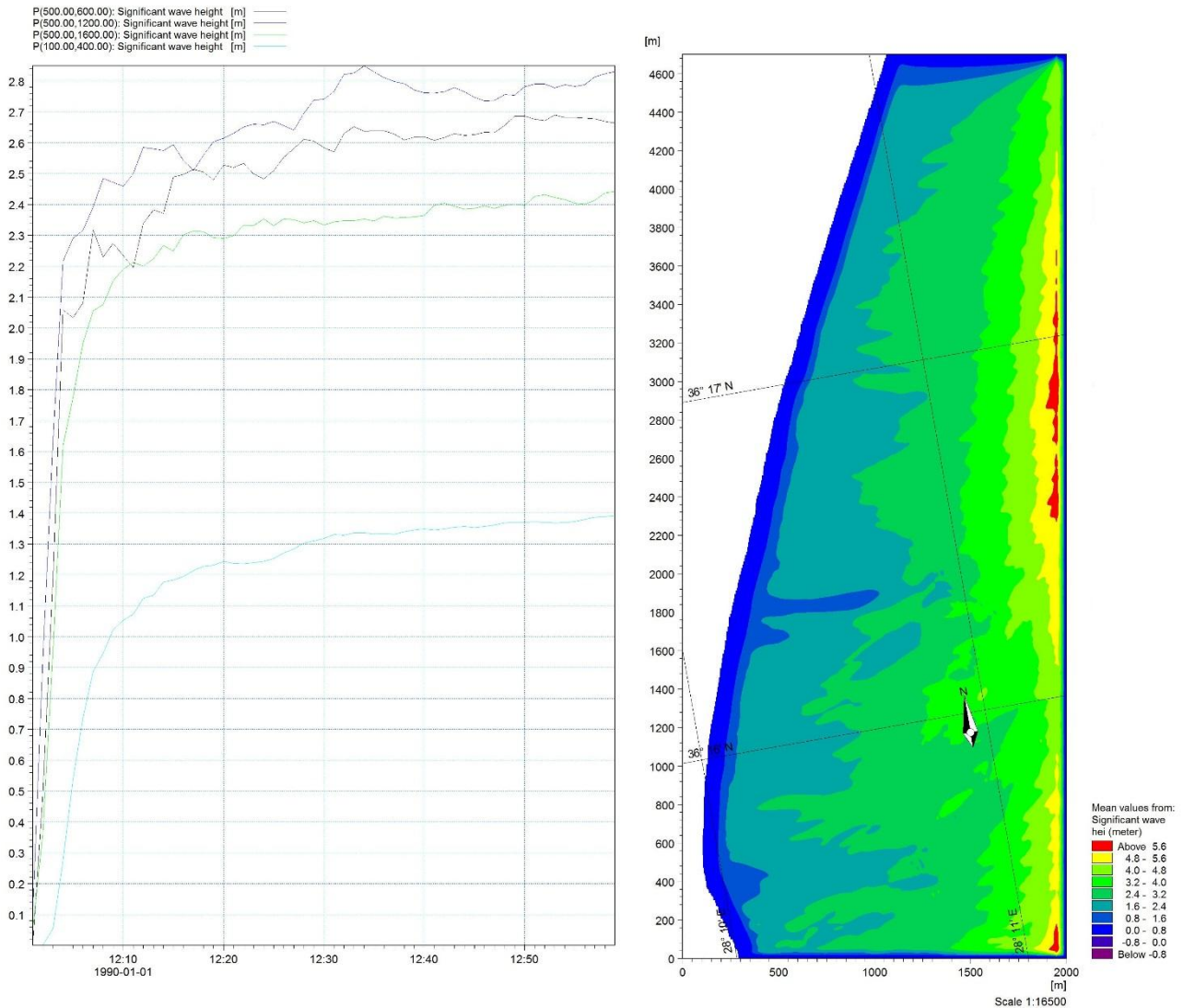


Εικόνα 7.2.1: Σενάριο ακραίων κυματικών συνθηκών 1 ($H_s=4.2\text{m}$, $T=7\text{s}$, $\Theta=1000$, κανονικοί κυματισμοί). α) Χρονοσειρές σημαντικού ύψους κύματος 5 σημείων του πλέγματος για όλη τη χρονική διάρκεια, β) Χάρτης σημαντικού ύψους κύματος για το χρονικό διάστημα προσομοίωσης 20-60min

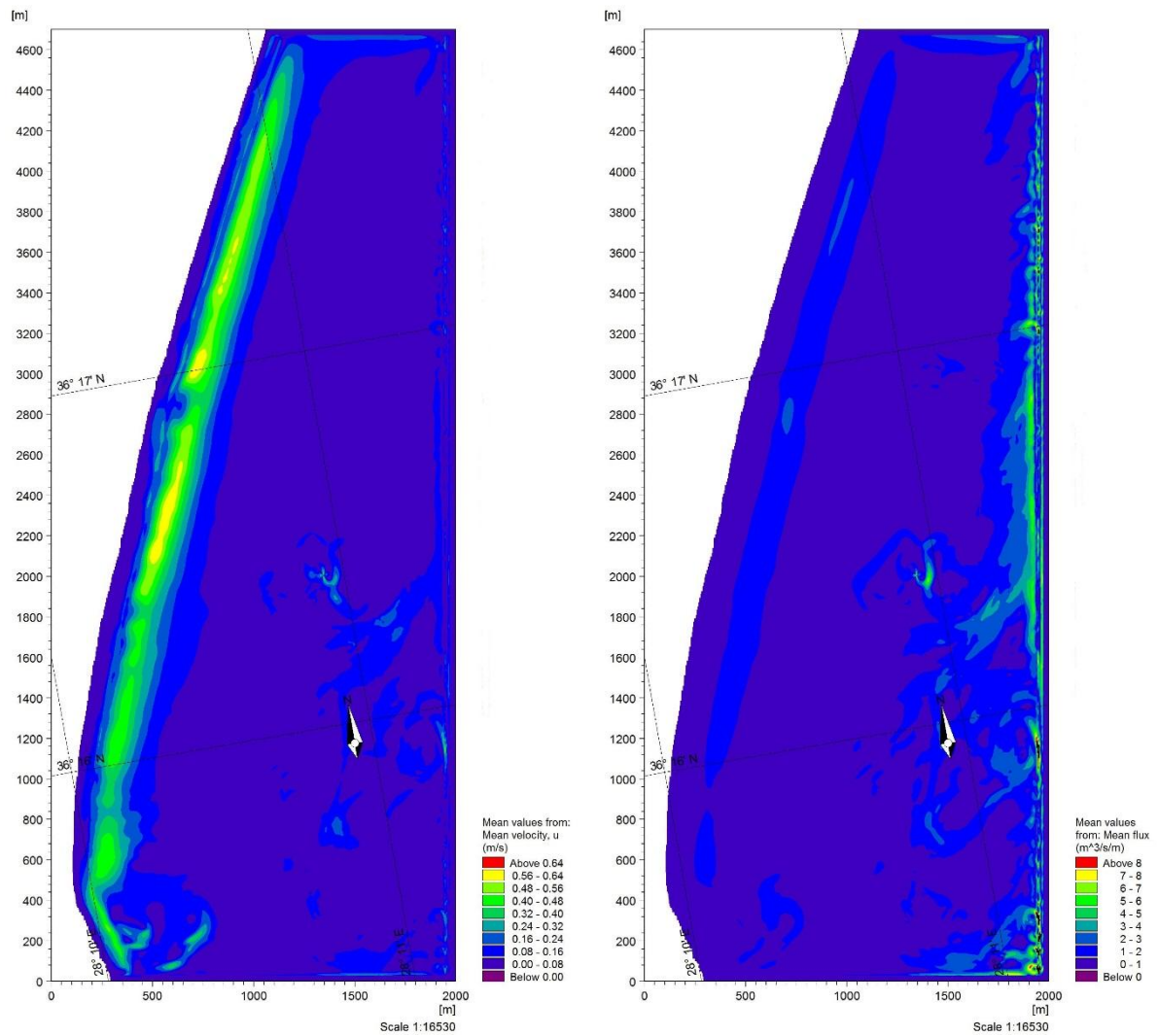


Εικόνα 7.2.2: Σενάριο ακραίων κυματικών συνθηκών 1 ($H_s=4.2\text{m}$, $T=7\text{s}$, $\Theta=1000$, κανονικοί κυματισμοί). α) Χάρτης μέσων ταχυτήτων των σωματιδίων νερού και β) Χάρτης μέσης ροής, για το χρονικό διάστημα προσομοίωσης 20-60min

ΣΕΝΑΡΙΟ 2 (Ισορροπία μετά από 30 λεπτά):

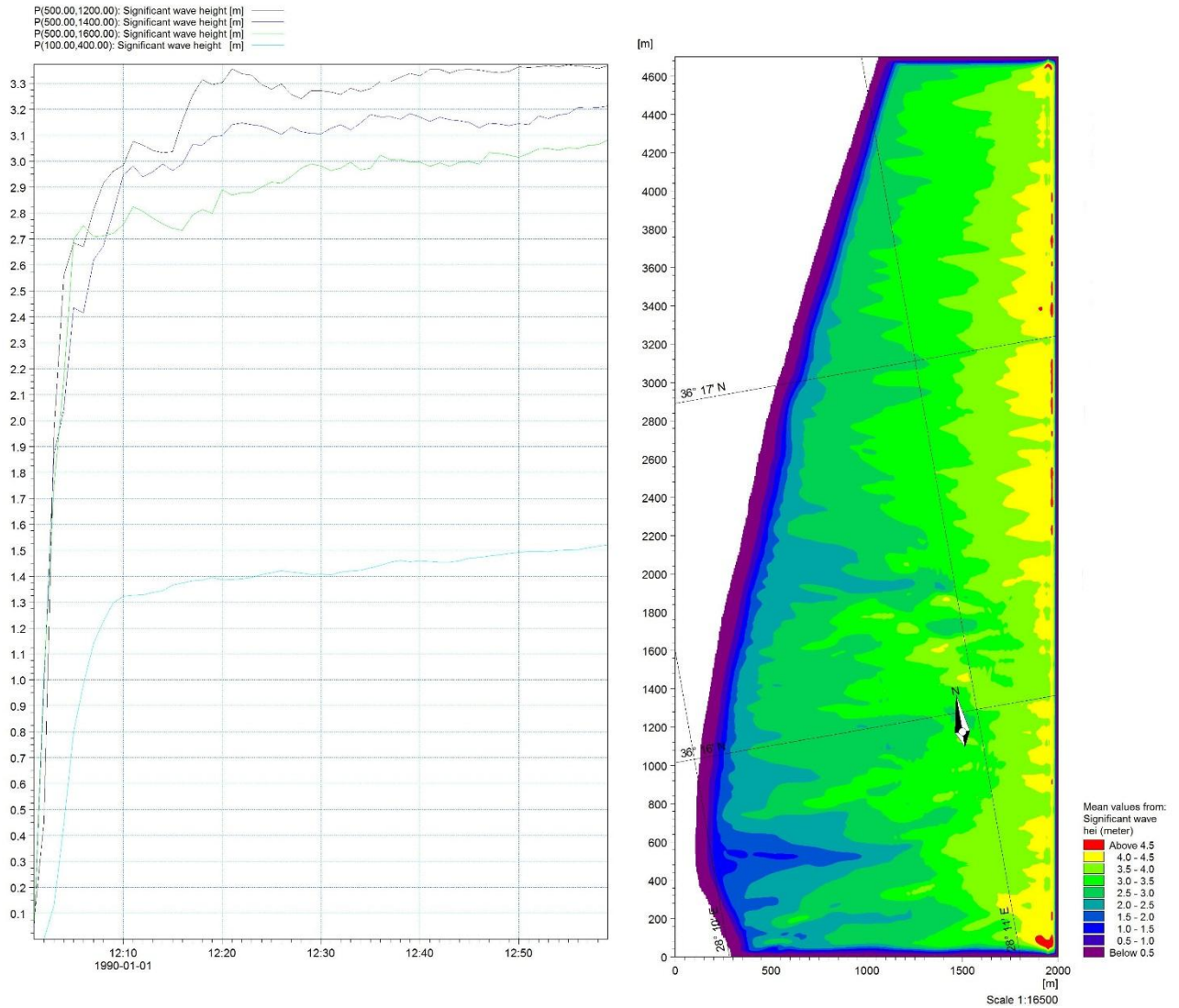


Εικόνα 7.2.3: Σενάριο ακραίων κυματικών συνθηκών 2 ($H_s=4\text{m}$, $T=6.75\text{s}$, $\Theta=70^\circ$, κατευθυντικοί κυματισμοί). α) Χρονοσειρές σημαντικού ύψους κύματος 5 σημείων του πλέγματος για όλη τη χρονική διάρκεια, β) Χάρτης σημαντικού ύψους κύματος για το χρονικό διάστημα προσομοίωσης 30-60min

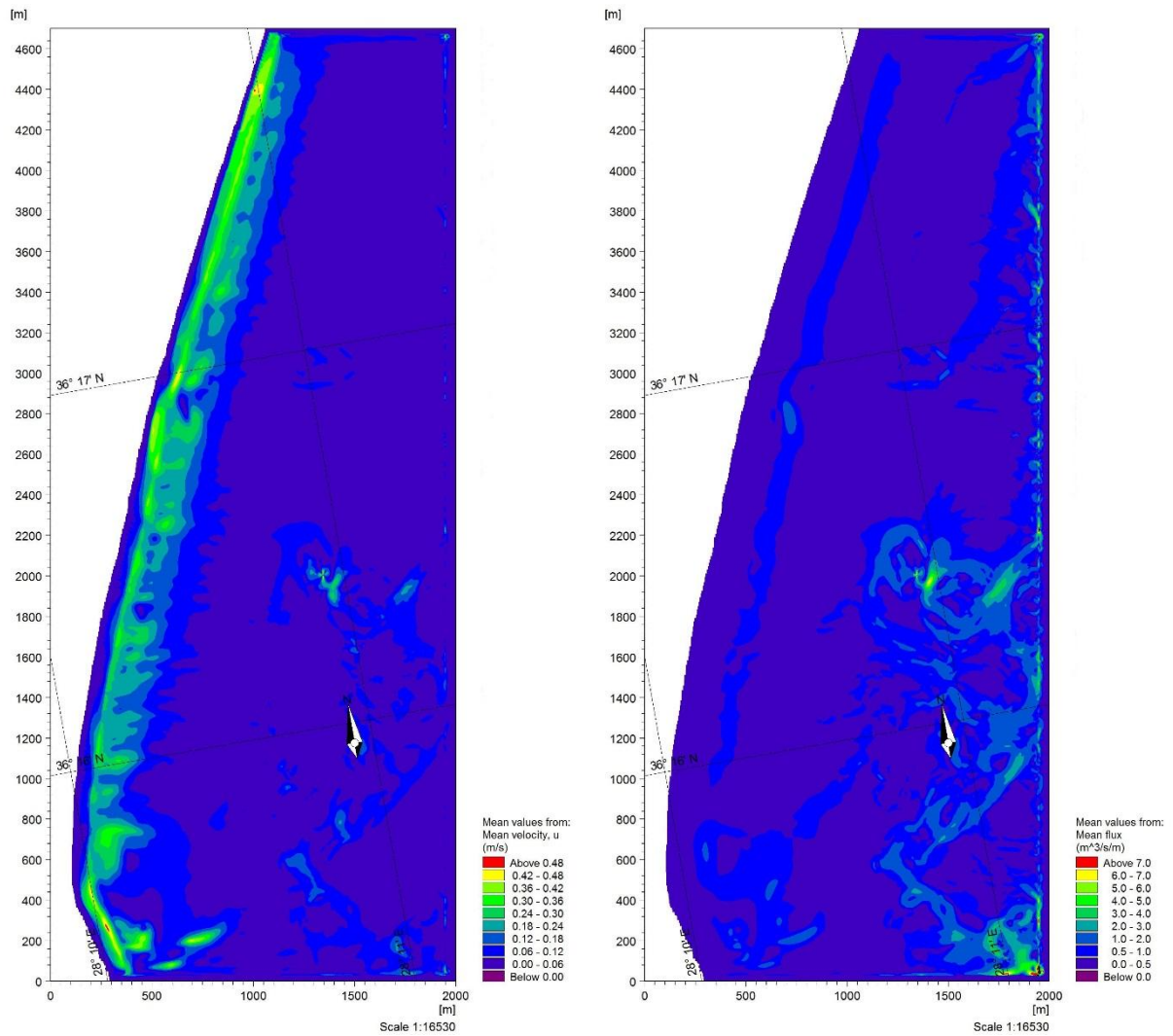


Εικόνα 7.2.4: Σενάριο ακραίων κυματικών συνθηκών 2 ($H_s=4m$, $T=6.75s$, $\Theta=70^\circ$, κατευθυντικοί κυματισμοί). α) Χάρτης μέσω ταχυτήτων των σωματιδίων νερού και β) Χάρτης μέσης ροής, το χρονικό διάστημα προσομοίωσης 30-60min

ΣΕΝΑΡΙΟ 3 (Ισορροπία μετά από 30 λεπτά):

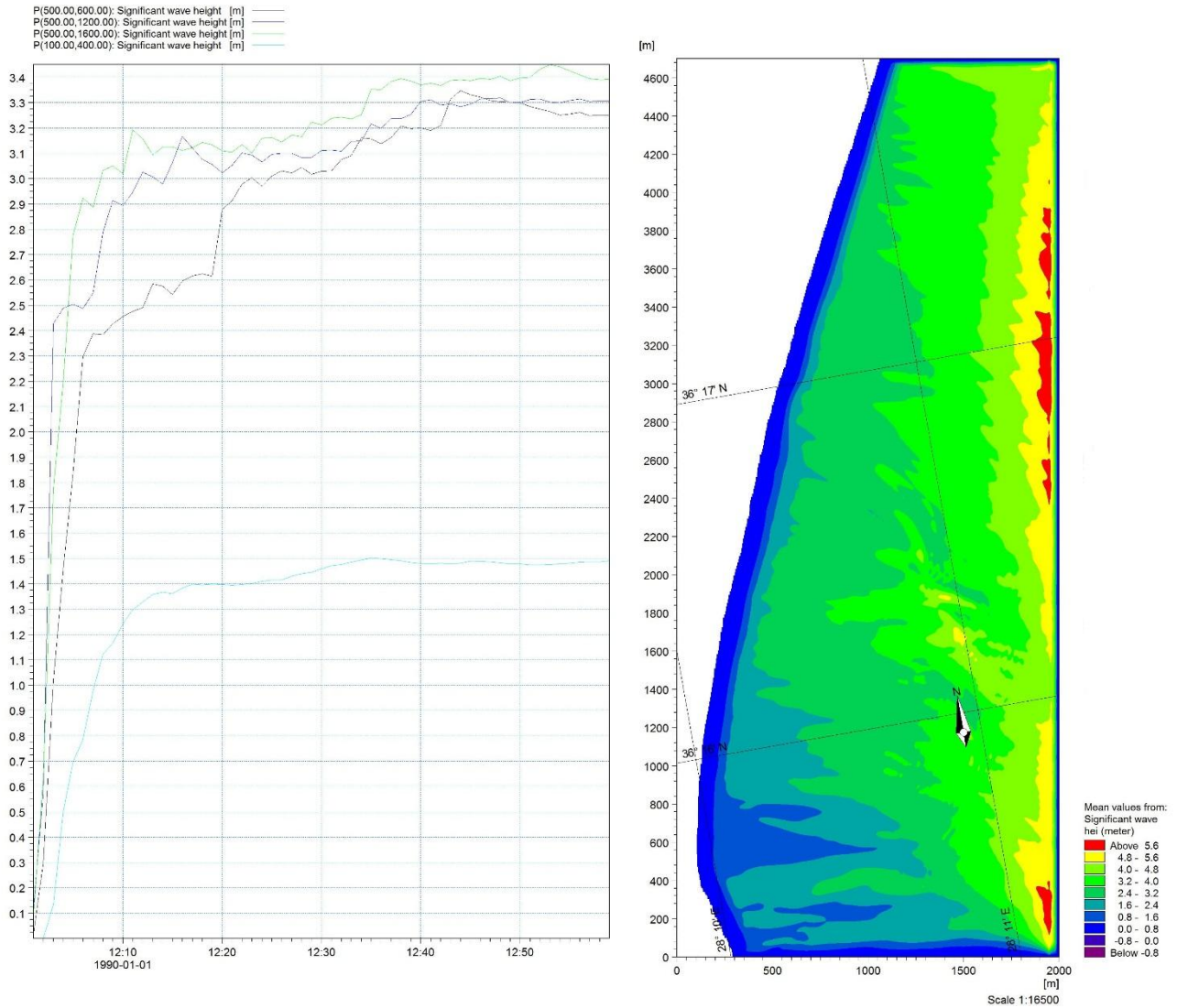


Εικόνα 7.2.5: Σενάριο ακραίων κυματικών συνθηκών 3 ($H_s=4.2\text{m}$, $T=7\text{s}$, $\Theta=100^\circ$, κατευθυντικοί κυματισμοί). α) Χρονοσειρές σημαντικού ύψους κύματος 5 σημείων του πλέγματος για όλη τη χρονική διάρκεια, β) Χάρτης σημαντικού ύψους κύματος για το χρονικό διάστημα προσομοίωσης 30-60min

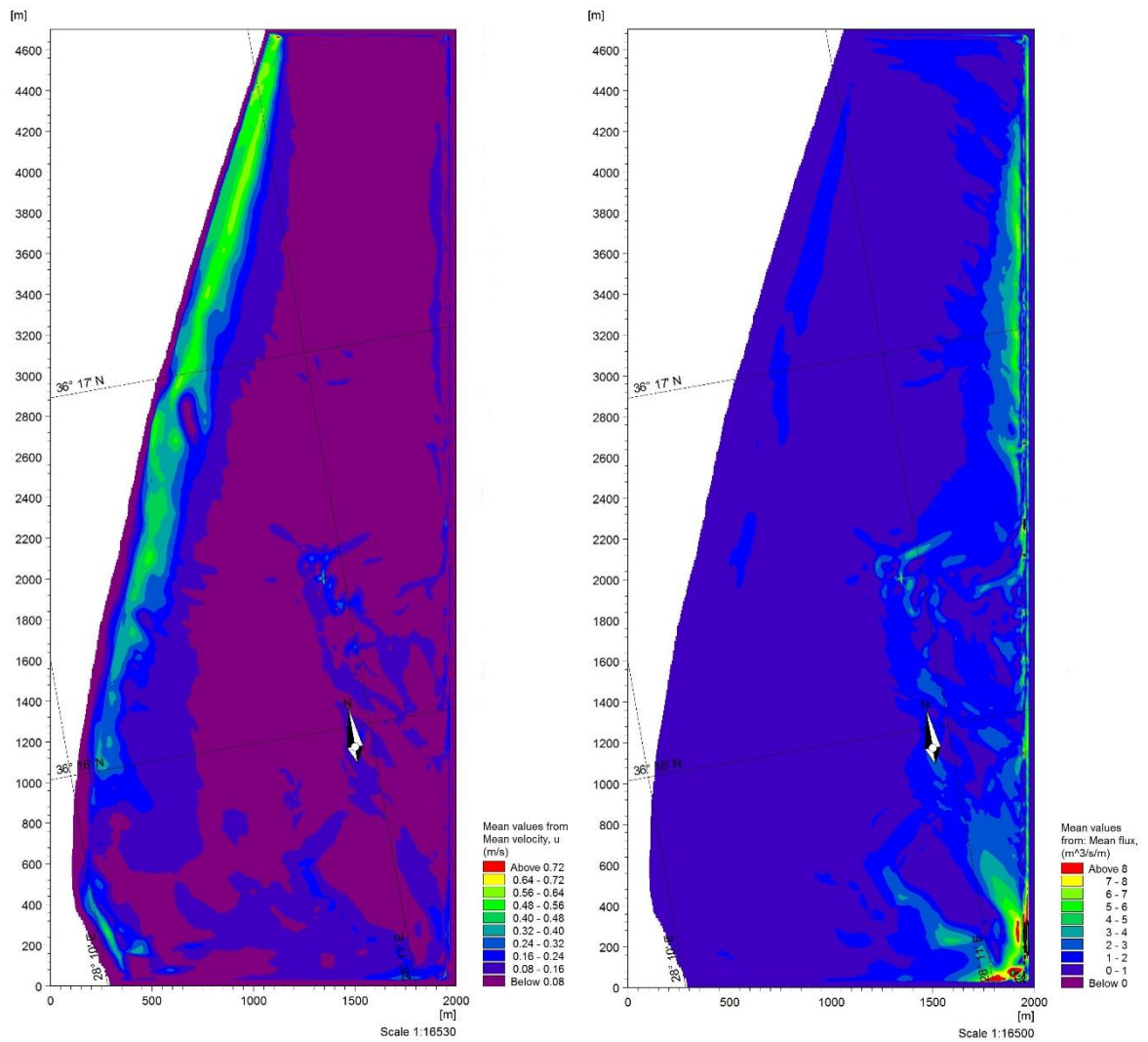


Εικόνα 7.2.6: Σενάριο ακραίων κυματικών συνθηκών 3 ($H_s=4.2m$, $T=7s$, $\Theta=100^\circ$, κατευθυντικοί κυματισμοί). α) Χάρτης μέσω ταχυτήτων των σωματιδίων νερού και β) Χάρτης μέσης ροής, για το χρονικό διάστημα προσομοίωσης 30-60min

ΣΕΝΑΡΙΟ 4 (Ισορροπία μετά από 30 λεπτά):

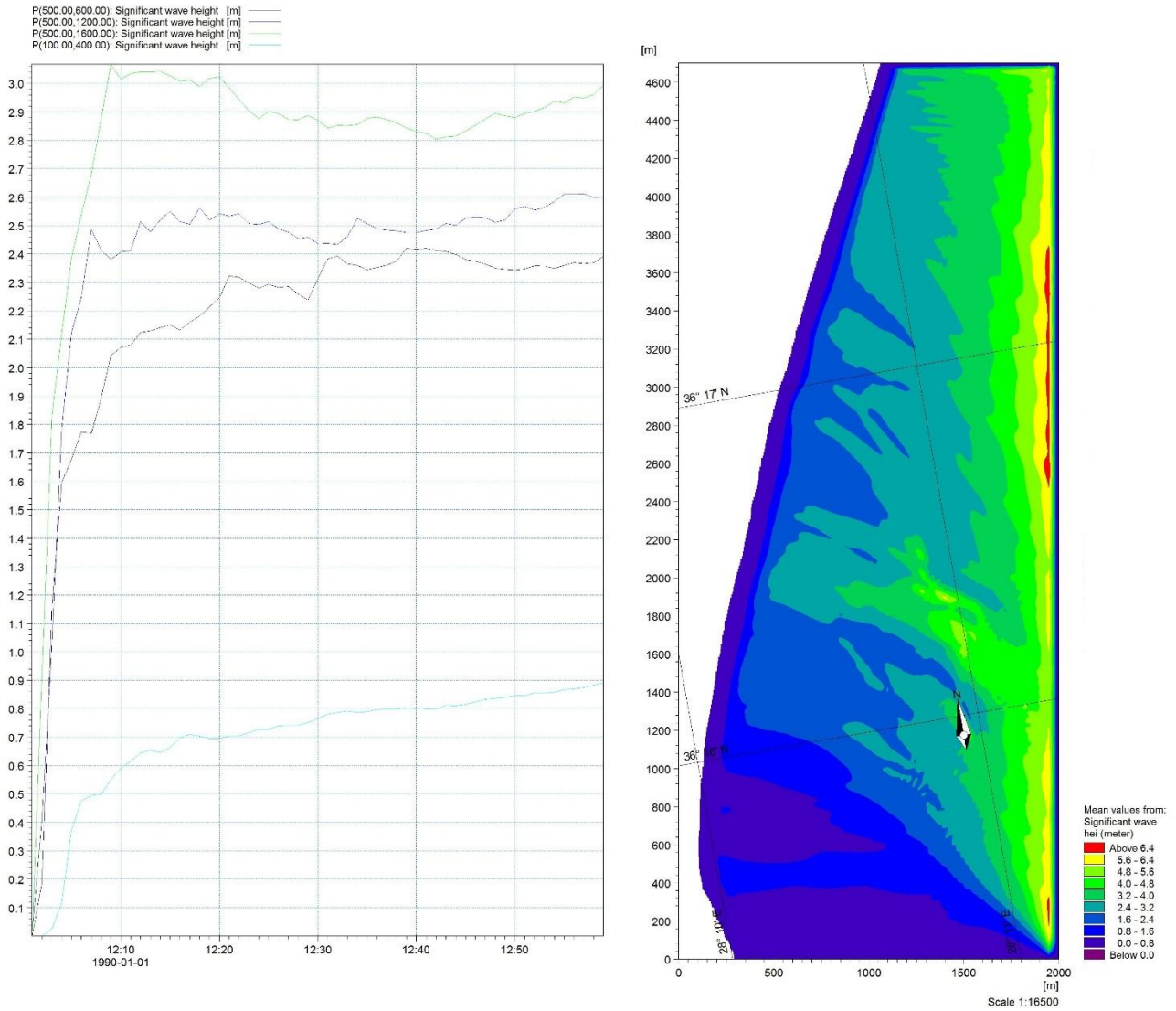


Εικόνα 7.2.7: Σενάριο ακραίων κυματικών συνθηκών 4 ($H_s=4.4\text{m}$, $T=7.3\text{s}$, $\Theta=125^\circ$, κατευθυντικοί κυματισμοί). α) Χρονοσειρές σημαντικού ύψους κύματος 5 σημείων του πλέγματος για όλη τη χρονική διάρκεια, β) Χάρτης σημαντικού ύψους κύματος για το χρονικό διάστημα προσομοίωσης 30-60min

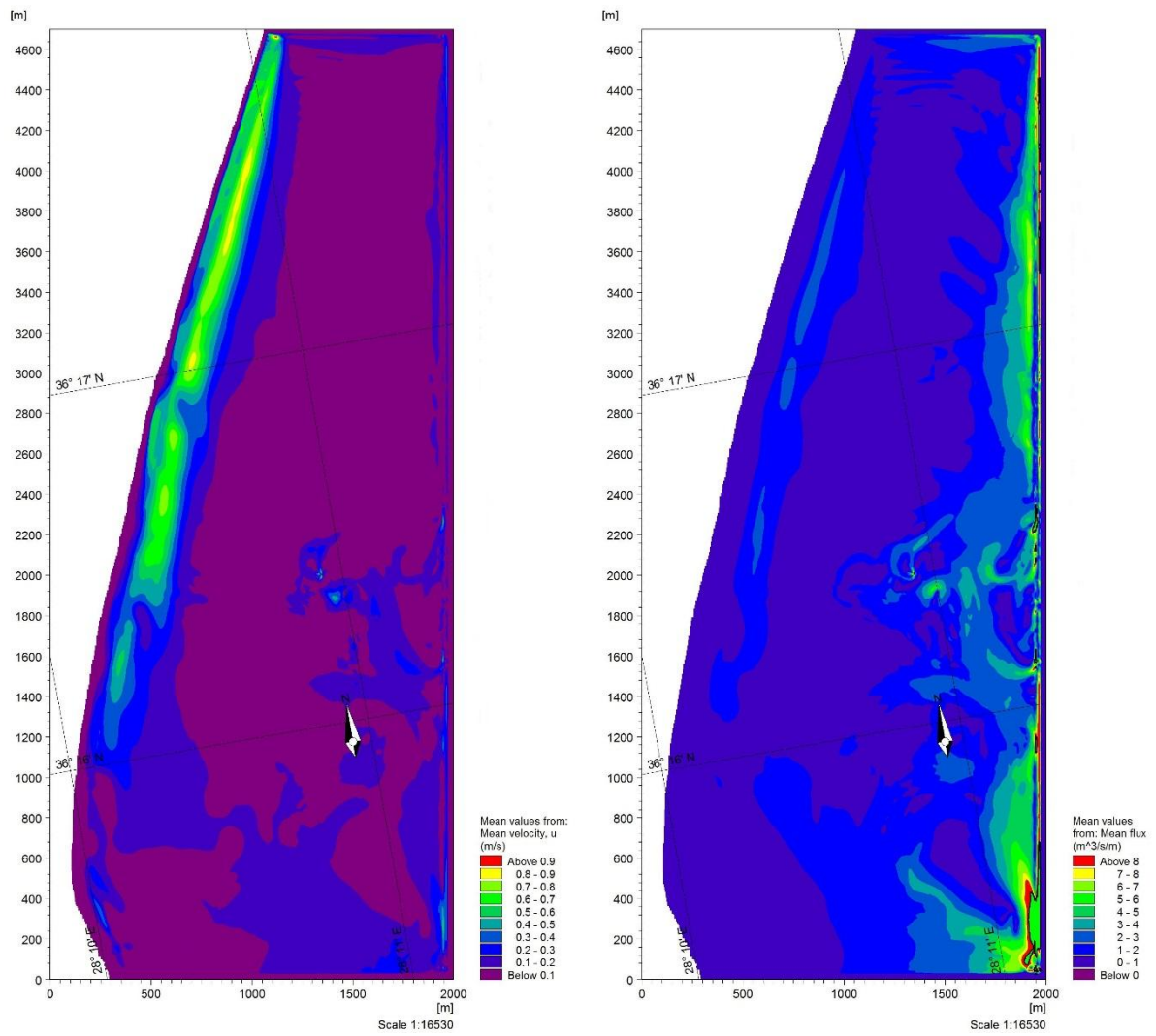


Εικόνα 7.2.8: Σενάριο ακραίων κυματικών συνθηκών 4 ($H_s=4.4\text{m}$, $T=7.3\text{s}$, $\Theta=125^\circ$, κατευθυντικοί κυματισμοί) . α) Χάρτης μέσων ταχυτήτων των σωματιδίων νερού και β) Χάρτης μέσης ροής, για το χρονικό διάστημα προσομοίωσης 30-60min

ΣΕΝΑΡΙΟ 5 (Ισορροπία μετά από 30 λεπτά):



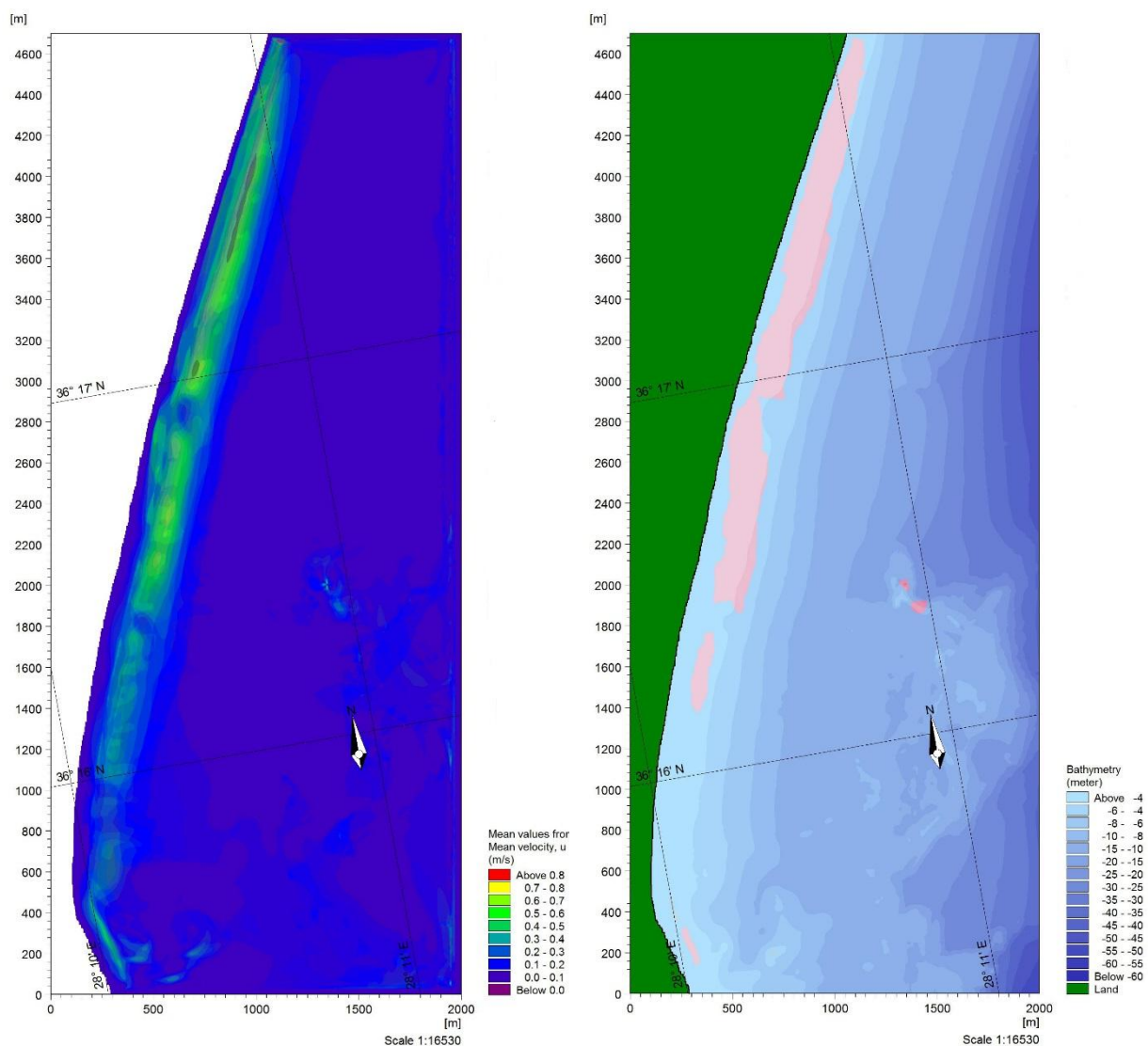
Εικόνα 7.2.9: Σενάριο ακραίων κυματικών συνθηκών 5 ($H_s=4.6\text{m}$, $T=7.56\text{s}$, $\Theta=150^\circ$, κατευθυντικοί κυματισμοί). α) Χρονοσειρές σημαντικού ύψους κύματος 5 σημείων του πλέγματος για όλη τη χρονική διάρκεια, β) Χάρτης σημαντικού ύψους κύματος για το χρονικό διάστημα προσομοίωσης 30-60min



Εικόνα 7.2.10: Σενάριο ακραίων κυματικών συνθηκών 5 ($H_s=4.6m$, $T=7.56s$, $\Theta=1500$, κατευθυντικοί κυματισμοί) . α) Χάρτης μέσων ταχυτήτων των σωματιδίων νερού και β) Χάρτης μέσης ροής, για το χρονικό διάστημα προσομοίωσης 30-60min

7.3. Σύνθεση αριθμητικών αποτελεσμάτων και αξιολόγηση

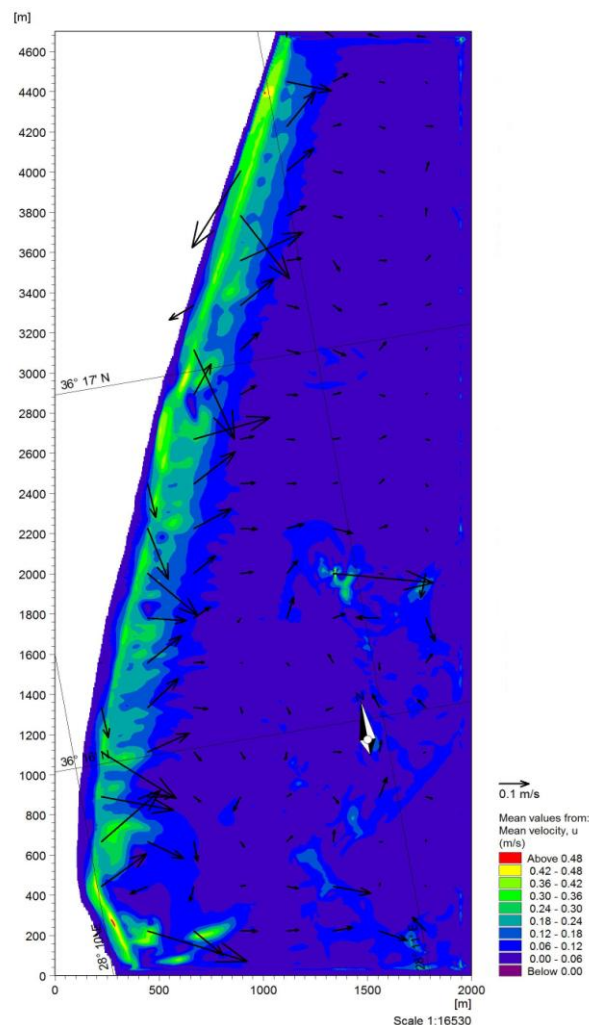
Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη σύνθεση των αρχείων που προέκυψαν για τις μέσες ταχύτητες σωματιδίων νερού, που παρουσιάστηκαν στον κεφάλαιο 7.2. Η σύνθεση αφορά στα προαναφερθέντα αποτελέσματα για τις ακραίες μόνο συνθήκες, αφού το ενδιαφέρον αυτής της μελέτης εστιάζεται σε αυτές ακριβώς τις περιπτώσεις. Στις ακόλουθες εικόνες, φαίνονται οι περιοχές όπου προέκυψαν οι μεγαλύτερες τιμές ταχύτητας των σωματιδίων νερού. Συγκεκριμένα, στην εικόνα 7.3.1.α χρησιμοποιήθηκαν οι εικόνες 7.2.4 (α)- 7.2.10 (α), δηλαδή οι χάρτες του πεδίου ταχυτήτων για καθένα από τα ακραία σενάρια, ώστε (με χρήση κοινών επιλογών χρωματικής αναπαράστασης) να προκύψει ένας χάρτης με το συνδυασμό τους.



Εικόνα 7.3.1: α) Επικάλυψη χαρτών πεδίου μέσων ταχυτήτων σωματιδίων νερού των ακραίων σεναρίων. β) Επικάλυψη τμημάτων περιοχών μέγιστων τιμών ταχύτητας σωματιδίων νερού των ακραίων σεναρίων επί της βαθυμετρίας.

Οριοθετούνται έτσι οι περιοχές των μεγαλύτερων τιμών του πεδίου ταχυτήτων, από την αλληλοεπικάλυψη των χαρτών τεσσάρων ακραίων σεναρίων, δίνοντας μια εικόνα του πεδίου για τις ακραίες συνθήκες της περιοχής. Απομονώνοντας τις περιοχές με τις μέγιστες τιμές ταχυτήτων (μεγαλύτερες της τιμής κατωφλίου που αναφέρεται παρακάτω) ανά ακραίο σενάριο και έπειτα συνδυάζοντας και τοποθετώντας τες πάνω στον χάρτη βαθυμετρίας, λαμβάνουμε την εικόνα 7.3.1.β.

Η εικόνα 7.3.1.β, αποτελεί την τελική σύνθεση των περιοχών όπου παρατηρούνται οι μεγαλύτερες τιμές ταχυτήτων για ακραίες κυματικές συνθήκες (παρουσιάζονται με ημιδιαφανές κόκκινο χρώμα) και που κατά συνέπεια θα υπάρξει πιθανώς η μεγαλύτερη επίδραση στους οικότοπους της περιοχής. Οι τιμές της χρονικά μέσης και ολοκληρωμένης στην κολώνα νερού ταχύτητας σωματιδίων νερού στις περιοχές αυτές όπως προέκυψε από το mike, κυμαίνεται στα 0,5-0,8m/s, καθιστώντας δυνατή υπό συνθήκες την δημιουργία rip currents .



Εικόνα 7.3.2: Διανυσματικό πεδίο ταχύτητας (ακραίο σενάριο 3 - $H_s=4.2m$, $T=7s$, $\Theta=100^\circ$, κατευθυντικοί κυματισμοί)

Αυτό φαίνεται πιθανότερο να συμβεί στο βόρειο τμήμα της περιοχής μελέτης, όπου συγκεντρώνονται κατά κύριο λόγο οι περιοχές μέγιστης πιθανής επίδρασης (και σαν έκταση περιοχής και σαν ένταση επίδρασης). Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο, αφού στο τμήμα αυτό έχουμε την σταδιακή και από μεγαλύτερα βάθη μείωση της βαθυμετρίας μέχρι την -σχεδόν ευθείας τοπογραφίας- ακτή, που ευνοεί την δημιουργία rip currents, όπως έχει περιγραφεί και στο κεφάλαιο 3.1. Από την άλλη, στο νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης, η βαθυμετρία παρουσιάζει ανομοιομορφίες σχεδόν σε όλη του την έκταση, από σχετικά μεγάλα βάθη. Έτσι, αφενός δεν εντοπίζονται περιοχές μεγάλης επίδρασης στην ακτή, αφετέρου υπάρχει πιο ποικίλο πεδίο τιμών ταχυτήτων υπεράκτια, σε αντίθεση με το ενιαίο και μικρού εύρους τιμών πεδίο ταχυτήτων του υπεράκτιου βόρειου τμήματος.

Η πιθανή ανάπτυξη των rip currents στην περιοχή, ενισχύεται από το αποτέλεσμα που λήφθηκε για το διανυσματικό πεδίο της ταχύτητας για την περίπτωση του τρίτου ακραίου σεναρίου που μελετήθηκε (ως παράδειγμα). Αυτό φαίνεται στην εικόνα 7.3.2, όπου γίνεται φανερός ο προσανατολισμός του πεδίου από την ακτή προς την ανοικτή θάλασσα και μάλιστα σε συνδυασμό με μεγάλες εντάσεις. Τέτοιες κινήσεις είναι που ερμηνεύονται συνήθως ως rip currents.

Η τοποθέτηση των περιοχών μέγιστης επίδρασης πάνω από τη βαθυμετρία της περιοχής (εικόνα 7.3.1.β), καθιστά δυνατή την παρατήρηση και σύγκριση τους ως προς τη τοπική γεωμορφολογία. Επαληθεύονται έτσι οι παρατηρήσεις που αναφέρθηκαν προηγουμένως, σχετικά με την κατανομή του πεδίου στο βόρειο και νότιο τμήμα της περιοχής, τόσο κοντά όσο και μακριά από την ακτή. Χαρακτηριστική ακόμη είναι η περίπτωση ισχυρού πεδίου ταχύτητας και συνεπαγόμενης ισχυρής επίδρασης σε μικρή περιοχή στο κέντρο της περιοχής μελέτης, που συμπίπτει με έντονη έξαρση στη βαθυμετρία.

Αξίζει να σημειωθεί, ότι καταβλήθηκε προσπάθεια συσχέτισης των αριθμητικών αποτελεσμάτων που προέκυψαν με αντίστοιχα αποτελέσματα άλλων εργασιών, τόσο για την επαλήθευση, όσο και για την σύνδεση της παρούσας εργασίας με κάποιο πρόγραμμα χαρτογράφησης του κινδύνου ανάπτυξης οικοτόπων λόγω των υδροδυναμικών επιδράσεων σε αυτά (για τα οποία γίνεται λόγος παρακάτω). Η διερεύνηση όμως δεν απέδωσε κάποιο αξιολογήσιμο πόρισμα, λόγω έλλειψης σχετικής βιβλιογραφίας. Συγκεκριμένα, δεν υπάρχει συγκεκριμένη παραπομπή στην ελληνική αλλά και διεθνή βιβλιογραφία που να αφορά εστιασμένα στα μέτρα ταχυτήτων νερού που είναι απαγορευτικά για την ανάπτυξη παράκτιων θαλάσσιων οικοτόπων και δη του είδους *Posidonia oceanica*. Δεν υπάρχουν συνεπώς κάποιες τιμές κατωφλίου της ταχύτητας μορίων νερού για ευρύ πεδίο εφαρμογών, που να αντιστοιχούν σε ακραίες συνθήκες παράκτιων περιοχών, οι οποίες θα επιδρούν κατά συνέπεια αρνητικά στην ανάπτυξη των οικοτόπων. Έτσι, η σύγκριση των αποτελεσμάτων της εργασίας με τέτοιες τιμές ή η αξιολόγηση τους με γενικούς κανόνες για την επιβεβαίωση της τάξης μεγέθους των ταχυτήτων που βρέθηκαν, δεν κατέστη δυνατή. Ένας πολύ μικρός αριθμός δημοσιευμένων εργασιών ασχολείται με το συγκεκριμένο ζήτημα και αυτό όχι σε ευρύτερα πλαίσια εφαρμογής, αλλά σε τοπική κλίμακα. Βέβαια, αυτό είναι δικαιολογημένο, διότι, όπως περιγράφηκε και στο κεφάλαιο 3.2, η υδροδυναμική επίδραση σε κάθε παράκτια περιοχή εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και άρα είναι δύσκολη ή αδύνατη η εφαρμογή γενικών κανόνων.

Σημαντική εργασία εκ των προαναφερθέντων σχετικών εργασιών που βρέθηκαν, είναι των Eduardo Infantes et al (2009), με θέμα την εύρεση του άνω ορίου ανάπτυξης της ποσειδωνίας με βάση το κυματικό ενεργειακό και τελικά πεδίο ταχυτήτων νερού, σε παράκτια περιοχή του νησιού Μαγιόρκα στη Μεσόγειο. Η εργασία, αν και ακολουθεί διαφορετικό μοντέλο και μέθοδο υπολογισμού των ταχυτήτων, χρησιμοποιεί αραιότερο υπολογιστικό πλέγμα και εφαρμόζεται υπό ηπιότερες κυματικές συνθήκες διάδοσης, έδωσε σαν τιμή κατωφλίου ταχύτητας τα 0.38-0.42m/s. Δηλαδή, αυτό ήταν το όριο στο οποίο δεν εμφανίζονταν πια το υπό μελέτη είδος και άρα για μεγαλύτερες τιμές δεν ευνοείται η ανάπτυξή του (αλλιώς, είναι το άνω όριό του). Σημειώνεται στην ίδια εργασία ότι η τιμή αυτή είναι συμβατή και με όρια τιμών ταχυτήτων για άλλα είδη ποσειδωνίας, ενώ τονίζεται, όπως προαναφέρθηκε και εδώ, ότι οι τιμές πιθανότατα διαφοροποιούνται για άλλες περιοχές. Λαμβάνοντας υπόψη, παρ'όλ'αυτά, το αποτέλεσμα των Infantes et al, βλέπουμε ικανοποιητική συμβατότητα με τις τιμές 0.5-0.8m/s που βρέθηκαν εδώ, ενώ επαρκής συμφωνία υπάρχει και στο βάθος που προσεγγιστικά συμπίπτει με αυτά τα όρια ταχυτήτων (στα 5-6m). Συμφωνία, ακόμη, υπάρχει και με τα αποτελέσματα της εργασίας των Rattray et al (2015), που, αν και αφορά σε διαφορετικό περιβάλλον και συνθήκες και σε κύριο είδος μελέτης το φύκι *Ecklonia radiata* σε υφάλους της νοτιοδυτικής Αυστραλίας (περιοχή στην οποία απαντάται ωστόσο και είδος ποσειδωνίας), διαθέτει αριθμητικά αποτελέσματα των ταχυτήτων μορίων νερού που κυμαίνονται στα 0.54-0.74m/s. Τα παραπάνω μπορούν να ληφθούν υπόψη για την επιβεβαίωση της τάξης μεγέθους των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας, έστω σε πρώτο επίπεδο.

Στο ακόλουθο κεφάλαιο, γίνεται περαιτέρω σχολιασμός των αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν σε αυτό το κεφάλαιο. Γίνεται, έτσι, αναφορά στα αριθμητικά αποτελέσματα για τις ακραίες συνθήκες, τα οποία συνθέτουν το δυναμικό καθεστώς της περιοχής μελέτης. Επιπλέον, περιγράφεται η συσχέτιση των αποτελεσμάτων αυτών με την επίδραση στους παράκτιους οικότοπους της περιοχής και η πιθανή σύνδεσή τους με κάποιο σύστημα κατάταξης της επίδρασης των δυναμικών συνθηκών στους οικότοπους, όπως τα συστήματα που χρησιμοποιούν τα επιστημονικά προγράμματα χαρτογράφησης οικοτόπων.

8. Συμπεράσματα - Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στην παρούσα εργασία, μελετώνται οι θαλάσσιες δυναμικές συνθήκες που δρουν στην παράκτια περιοχή Αφάντου στη Ρόδο. Ιδιαίτερου ενδιαφέροντος είναι η υδροδυναμική στην περιοχή όταν επικρατούν ακραίες κυματικές συνθήκες, αφού αξιοποιούνται στην συνέχεια για τη μελέτη της επίδρασής τους στους παράκτιους θαλάσσιους οικότοπους. Για να προσδιοριστεί το δυναμικό καθεστώς της περιοχής, υπολογίζονται οι μέσες τιμές των ταχυτήτων νερού στην περιοχή μελέτης. Συγκεκριμένα υπολογίζονται οι μέσες χρονικά και ολοκληρωμένες στην υδάτινη στήλη τιμές της ταχύτητας μορίων νερού, με τη χρήση του κυματικού μοντέλου MIKE 21 BW.

Το μοντέλο MIKE 21 BW είναι ένα εξελιγμένο κυματικό μοντέλο, που βασίζεται στην αριθμητική επίλυση των βελτιωμένων εξισώσεων τύπου Boussinesq μέσω ενός πεπλεγμένου αριθμητικού σχήματος πεπερασμένων διαφορών σε έναν έκκεντρο ορθογωνικό κάναβο. Η σύνθεση του περιβάλλοντος προσομοίωσης, περιλαμβάνει πολλούς παράγοντες, ρυθμίσεις και επιλογές, με σκοπό την ρεαλιστικότερη μελέτη της διάδοσης των κυματισμών και το αριθμητικό υπολογισμό επιλεχθέντων μεγεθών. Στην εργασία η μελέτη εστιάστηκε στη εξέταση της διάδοσης κατευθυντικών κυματισμών, για μια σειρά περιπτώσεων ακραίων κυματικών συνθηκών. Μεταξύ των αποτελεσμάτων που προέκυψαν, κύρια θέση έχει η μέση ταχύτητα των μορίων νερού (όπως ορίστηκε παραπάνω), καθώς χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του δυναμικού καθεστώτος της περιοχής υπό την ισχύ ακραίων συνθηκών. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται μέσω χαρτών της μέσης ταχύτητας των μορίων νερού, για χρονικό διάστημα 30 λεπτών πραγματικής διάδοσης (μετά την επικράτηση ισορροπίας), από τους οποίους φαίνεται η χωρική κατανομή της έντασης των ταχυτήτων.

Η σύνθεση των χαρτών που προαναφέρθηκαν, χρησιμοποιήθηκαν για την παρουσίαση της χωρικής κατανομής των ταχυτήτων νερού. Οι περιοχές στις οποίες υπολογίστηκαν οι μεγαλύτερες τιμές, αποτελούν τις περιοχές με την εντονότερη δυναμική συμπεριφορά. Μάλιστα, έγινε περαιτέρω επιλογή των περιοχών με τις πλέον μεγάλες τιμές ταχυτήτων, ως μια επιπλέον κατανομή στο ίδιο πεδίο των ακραίων μηχανισμών. Αυτές οι περιοχές ενδιαφέρουν ιδιαίτερα τη συγκεκριμένη μελέτη, καθώς μπορούν να σχετιστούν άμεσα με την επιβίωση των θαλάσσιων οργανισμών που ζουν σε αυτές. Έτσι, οι τιμές της ταχύτητας που υπολογίστηκαν στις συγκεκριμένες περιοχές, αποτελούν ένα 'κατώφλι' άνω του οποίου η επιβίωση των τοπικών οικοτόπων είναι πιθανώς αδύνατη. Παρόλο που δεν υπάρχουν στη σχετική βιβλιογραφία διαθέσιμες τιμές ταχυτήτων μορίων νερού που να ορίζουν το καθεστώς επιβίωσης παράκτιων οικοτόπων, τα αριθμητικά αποτελέσματα της εργασίας επικυρώθηκαν σε πρώτο επίπεδο, αφού βρίσκονται σε ικανοποιητική συμφωνία με αντίστοιχα αποτελέσματα παρόμοιων μελετών. Η συσχέτιση της επίδρασης των δυναμικών συνθηκών στους παράκτιους οικότοπους περιγράφεται και στη συνέχεια, καθώς αυτή η διαδικασία αποτελεί πεδίο σημαντικών ερευνητικών προγραμμάτων, που σχετίζονται με τη χαρτογράφηση οικοτόπων και του κινδύνου ανάπτυξης και επιβίωσής τους, συνεπώς η συμβολή των αποτελεσμάτων αυτής της εργασίας σε κάποιο τέτοιο πρόγραμμα θα ήταν ιδιαίτερα σημαντική.

8.1. Το δυναμικό καθεστώς της περιοχής μελέτης

Με βάση τα αποτελέσματα του κεφαλαίου 7.2, οι μέσες συνθήκες που εξετάστηκαν συνδέονται με μικρά ύψη κύματος και σχετικά μικρές τιμές μέγιστης περιόδου. Όπως φαίνεται από τις χρονοσειρές του σημαντικού ύψους κύματος, η ισορροπία επέρχεται περίπου μετά από μισή ώρα πραγματικής διάδοσης (πέραν του σεναρίου με κανονικούς κυματισμούς). Οι μέσες τιμές της μέσης ταχύτητας νερού και μέσης ροής, για αυτή τη διάρκεια, είναι μικρές. Πιο συγκεκριμένα, οι τιμές των ταχυτήτων για τα σενάρια ήταν 0.05-0.08m/s με μεγαλύτερες τιμές να εμφανίζονται κατά μήκος του βόρειου τμήματος της ακτογραμμής και να κυμαίνονται μεταξύ 0.08 και 0.15m/s. Οι συνήθεις τιμές για την ροή ήταν μέχρι περίπου 0.5m³/s/m σχεδόν σε όλη την περιοχή, με τις μεγαλύτερες τιμές να εντοπίζονται σε μικρές περιοχές (κυρίως σε περιοχή κεντρικά του πεδίου, όπου οι βαθυμετρικές ανωμαλίες είναι εντονότερες) με τιμή 0.5-1.5m³/s/m.

Οι μεγάλες τιμές σημαντικού ύψους κύματος και μέγιστης περιόδου για την περιοχή, που συνθέτουν τα ακραία σενάρια, αναμενόμενα οδήγησαν σε μεγαλύτερες τιμές για τα αποτελέσματα. Όπως και στις μέσες συνθήκες, η ισορροπία επικράτησε μετά από περίπου μισή ώρα πραγματικής διάδοσης (εκτός του σεναρίου διάδοσης κανονικών κυματισμών). Για την χρονική αυτή διάρκεια, οι συνήθεις τιμές της μέσης ταχύτητας δεν ξεπερνούν τα 0.3m/s, ενώ οι μέγιστες τιμές που παρατηρούνται κατά μήκος της ακτής κυμαίνονται μεταξύ 0.3 και 0.9m/s. Οι τιμές για τη μέση ροή παίρνουν κατά κύριο λόγο τιμές μεταξύ 2 και 4m³/s/m, ενώ οι μέγιστες τιμές μεταξύ 5 και 10m³/s/m. Είναι χαρακτηριστικό ότι καίρια σημασία στα εξεταζόμενα ακραία σενάρια έχει η επικρατούσα διεύθυνση ανέμου, η οποία οδηγεί και σε πιο ποικίλη χωρική κατανομή των τιμών των ταχυτήτων και ροών, σε σχέση με τα μέσα σενάρια.

Σημειώνεται ότι από τη μελέτη του σεναρίου 1, για τη διάδοση κανονικών κυματισμών και για μέσες και ακραίες συνθήκες, προέκυψαν αριθμητικά αποτελέσματα που διέφεραν -ανά περίπτωση- σημαντικά από αυτά της διάδοσης κατευθυντικών κυματισμών. Πιο συγκεκριμένα, οι τιμές των μέσων ταχυτήτων σωματιδίων νερού και της μέσης ροής, ήταν αισθητά μεγαλύτερες συγκριτικά με τις αντίστοιχες για τη διάδοση κατευθυντικών κυμάτων. Συνεπώς, για την εξαγωγή συμπερασμάτων αξιολογούνται μόνο τα αποτελέσματα των σεναρίων διάδοσης κατευθυντικών κυματισμών, αφού η κατανομή της ενέργειας κατά τη διάδοσή τους που περιλαμβάνει γωνιακή διασπορά και μεταβλητότητα των χαρακτηριστικών τους, είναι ρεαλιστικότερη.

Από τα παραπάνω, φαίνεται σε όλες τις περιπτώσεις οι μεγαλύτερες τιμές των ταχυτήτων νερού -που κυρίως ενδιαφέρουν αυτήν την εργασία- συναντώνται σε μικρά βάθη κατά μήκος της ακτογραμμής ή και σε μικρές περιοχές, λόγω κυρίως των διαφοροποιήσεων της βαθυμετρίας. Αυτές οι τιμές για τα ακραία σενάρια, είναι αρκετά μεγαλύτερες συγκριτικά με αυτές των μέσων συνθηκών, με συνέπεια την έντονη κυκλοφορία υπό ακραίες συνθήκες. Στο ακόλουθο κεφάλαιο, γίνεται περεταίρω αναφορά στα αποτελέσματα για τα πεδία των μέσων ταχυτήτων των σωματιδίων νερού που προέκυψαν για τα ακραία σενάρια που μελετήθηκαν, αλλά και στη διασύνδεση των αποτελεσμάτων με σχετικό σχολιασμό για τη συσχέτιση τους με την επίδραση στους θαλάσσιους οικότοπους της περιοχής.

8.2. Πιθανή επίδραση στους θαλάσσιους παράκτιους οικοτόπους

Λαμβάνοντας υπόψη τα στοιχεία από τις παρατηρήσεις και μετρήσεις των πρόσφατων αποστολών στα πλαίσια της πράξης “ΘΑΛΗΣ- ΕΚΠΑ – Υποθαλάσσια κοιτάσματα αδρανών υλικών: Μέθοδοι εντοπισμού και εξόρυξης, περιβαλλοντικές επιπτώσεις και δυνατότητες εκμετάλλευσης – MARE” στον όρμο Αφάντου, σχηματίζεται μια γενική εικόνα του τοπικού οικοσυστήματος. Με βάση την σημαντική διαπίστωση έλλειψης ποσειδωνίας στην περιοχή και γενικά την χαμηλή βιολογική δραστηριότητα, κυρίως στην επιλεγμένη περιοχή μελέτης της εργασίας και μέχρι τα βάθη στα οποία αναφέρεται, φαίνεται ότι το ενεργειακό πεδίο της περιοχής έχει καθοριστικό ρόλο. Η σημασία της επίδρασης αυτής περιγράφηκε εκτενέστερα και στο κεφάλαιο 3.2, όπου έγινε φανερό ότι η υδροδυναμική των μικρών βαθών σε παράκτιους περιοχές καθορίζει σημαντικά την ανάπτυξη των παράκτιων οικοτόπων και ιδιαίτερα της ποσειδωνίας. Η έλλειψη ποσειδωνίας στην περιοχή μελέτης βασίζεται τόσο σε παρατηρήσεις *in situ* των σχετικών αποστολών της ερευνητικής ομάδας του ΕΛΚΕΘΕ, όσο και στην απουσία νεκρών φύλλων στην ακτή, απόδειξη ότι δεν αναπτύχθηκε καθόλου ή παρασύρθηκε κατεστραμμένη σε βαθύτερα νερά λόγω των συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή. Αυτό καθιστά την περιοχή μελέτης συνολικά μια περιοχή υψηλού κινδύνου για τους παράκτιους οικοτόπους, ακόμη και αν δεν προσδιοριστούν ακριβώς τα αριθμητικά όρια του πεδίου ταχυτήτων/ενέργειας που επικρατούν στην περιοχή, πάνω από τα οποία επικρατούν οι συνθήκες που ευθύνονται για την χαμηλή βιολογική δραστηριότητα.

Από τα παραπάνω, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι τα ακραία φαινόμενα που επικρατούν στην περιοχή μελέτης, των οποίων η πιθανότητα να συμβούν προσδιορίζεται περίπου στο 1% με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα, επηρεάζουν σημαντικά τους παράκτιους θαλάσσιους οικοτόπους της περιοχής μελέτης. Όπως προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3, ειδικά για τη βιωσιμότητα των λιβαδιών ποσειδωνίας τα πιο ακραία περιστατικά είναι αυτά που έχουν καθοριστική σημασία, ακόμα και αν η συχνότητά τους είναι πολύ μικρή. Τα σενάρια που μελετήθηκαν και προσομοιώθηκαν στην εργασία (πέραν των μέσων συνθηκών), αφορούν τις ακραίες αυτές περιπτώσεις και δίνουν μια εικόνα του πεδίου ταχυτήτων που υπάρχει στην περιοχή σε τέτοιες περιπτώσεις. Έχοντας υπόψη ότι όλη η περιοχή μπορεί να χαρακτηριστεί, όπως προαναφέρθηκε, περιοχή υψηλού κινδύνου βιωσιμότητας των οικοτόπων, από τα αποτελέσματα του πεδίου ταχυτήτων (και άρα ενέργειας) είναι δυνατό να προσδιοριστούν, επιπλέον, οι επιμέρους περιοχές που θα υπάρχει η μεγαλύτερη επίδραση, βάσει των παραδοχών που έγιναν στην μελέτη. Οι περιοχές αυτές, αν και παρουσιάζουν μια διαφοροποίηση για τα επιλεγμένα σενάρια, αλληλεπικαλύπτονται σε μεγάλο βαθμό και οριοθετούν έτσι κάποιες ευρύτερες περιοχές μέγιστης επίδρασης, με εμφανείς στην εικόνα 7.3.1 τις αντίστοιχες τιμές ταχυτήτων που προέκυψαν από την προσομοίωση.

Οι περιοχές αυτές, όπως παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 7.3, εντοπίζονται κατά μήκος της ακτής, κυρίως στο βόρειο τμήμα της περιοχής μελέτης, αλλά και σε μικρές περιοχές κεντρικά στην περιοχή. Η ανάπτυξη των *rip currents* στις παράκτιες αυτές περιοχές, όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 8.1, αν και δεν είναι επιβεβαιωμένη με άλλη μέθοδο ή σε άλλες μελέτες, είναι πιθανή. Στα πλαίσια της

εργασίας δεν προβλέπεται ο ακριβής προσδιορισμός της τοπικής κυκλοφορίας, λόγω της έλλειψης στοιχείων και των συνδυασμό αριθμητικών μοντέλων που απαιτείται, όμως τα πρώτα αποτελέσματα υποδηλώνουν ότι οι πιθανότητες αυτή να είναι μια πιθανή ερμηνεία της αρνητικής επίδρασης στους παράκτιους οικοτόπους της περιοχής μελέτης αυξάνονται. Αυτό φαίνεται πιθανότερο να συμβεί στο βόρειο τμήμα της περιοχής μελέτης, όπου συγκεντρώνονται κατά κύριο λόγο οι περιοχές μέγιστης πιθανής επίδρασης (σαν έκταση περιοχής και σαν ένταση επίδρασης), καθιστώντας δυνατή υπό συνθήκες την δημιουργία rip currents με καταστροφικά για τους παρακτίους οικοτόπους αποτελέσματα.

Συμπερασματικά, η περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται περιοχή υψηλού κινδύνου για την ανάπτυξη και επιβίωση των, βάσει της ανάλυσης που έγινε στον παρόν κεφάλαιο, λόγω της περιοδικής εμφάνισης έντονων για την περιοχή κυματικών συνθηκών. Πιο συγκεκριμένα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση των τεσσάρων επικρατέστερων ακραίων κυματικών σεναρίων που εξετάστηκαν και ο συνδυασμός τους, καθορίζουν τις περιοχές που εστιασμένα υπάρχει πιο ισχυρή επίδραση, με βάση το τοπικό πεδίο ταχυτήτων (εικόνα 7.3.1). Πέραν των κυματικών συνθηκών, καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση του πεδίου έχει η βαθυμετρία της περιοχής μελέτης, που οδηγεί τελικά σε νοητό διαχωρισμό της περιοχής σε βόρειο και νότιο τμήμα, με ξεχωριστή συμπεριφορά στην επίδραση των ακραίων συνθηκών. Οι περιοχές με την μεγαλύτερη επίδραση εμφανίζονται κυρίως παράκτια και στο βόρειο τμήμα, ενώ υπάρχουν εστιασμένα μικρές περιοχές υψηλών τιμών ταχυτήτων. Οι παράκτιες περιοχές μέγιστης επίδρασης αφορούν μια ζώνη βαθών περίπου 1-6m, υποδηλώνοντας ότι οι οικοτόποι που θα πληγούν πρώτα από την επίδραση των μελετώμενων ακραίων συνθηκών βρίσκονται αρκετά κοντά στην ακτή. Ειδικά για την περίπτωση της ποσειδωνίας αυτό είναι λογικό και αναμενόμενο βάσει της σχετικής αναφοράς στο κεφάλαιο 3.2, όπου τονίζεται η ισχυρή επίδραση της υδροδυναμικής στα μικρά βάθη, επαληθεύοντάς την.

Ως προς τα τελικά αριθμητικά αποτελέσματα, οι τιμές που βρέθηκαν διαμορφώνουν ένα κατώφλι μέγιστων τιμών ταχυτήτων και άρα μέγιστης επίδρασης στους οικοτόπους περίπου 0,5m/s. Η τιμή αυτή (και το εύρος των μέγιστων τιμών 0.5-0.8m/s) δεν μπορεί να επικυρωθεί, λόγω έλλειψης ενός επίσημου συστήματος ταξινόμησης τιμών ταχυτήτων των μορίων νερού ευρείας χρήσης, για παρεμφερείς εφαρμογές, όπως και της έλλειψης κάποιων γνωστών τιμών ταχυτήτων κατωφλίου, που καθορίζουν τη μέγιστη επίδραση στους θαλάσσιους παράκτιους οικοτόπους (με αρνητικά αποτελέσματα στην ανάπτυξη και επιβίωσή τους). Ωστόσο, τα αποτελέσματα δημοσιευμένων ερευνών που βρέθηκαν είναι σε συμφωνία με αντίστοιχα αποτελέσματα της μελέτης αυτής, όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 7.3, αποτελώντας μια πρώτη επαλήθευση της ορθότητάς τους.

Τα παραπάνω αποτελέσματα, παρέχουν μια γενική εικόνα της πιθανότητας ανάπτυξης και επιβίωσης των παράκτιων θαλάσσιων οικοτόπων στην περιοχή μελέτης, με βάση την επίδραση των παράκτιων δυναμικών συνθηκών σε αυτά. Αυτή η γνώση, μπορεί να αποτελέσει εφαρμογή για κάποιο επιστημονικό πρόγραμμα χαρτογράφησης οικοτόπων (habitat mapping). Τα προγράμματα αυτά, έχουν σκοπό να χαρτογραφήσουν όχι μόνο τα βιολογικά είδη που ζουν σε μια περιοχή, αλλά και τη πιθανότητα/δυνατότητα αυτά να αναπτυχθούν, βάσει των επιδράσεων που δέχονται από μια σειρά παραγόντων που δρουν τοπικά. Χαρακτηριστικές είναι οι

περιπτώσεις χαρτογράφησης του κινδύνου ανάπτυξης θαλάσσιων οικοτόπων, βάσει των υδροδυναμικών συνθηκών που επικρατούν σε μια περιοχή, παράδειγμα που συνδέεται άμεσα με τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης. Τα προγράμματα αυτά, βασίζονται σε μια κατάταξη για την αξιολόγηση του βαθμού επίδρασης ενός παράγοντα στους οικοτόπους. Ένα τέτοιο, ευρέως χρησιμοποιούμενο σύστημα κατάταξης, είναι το EUNIS. Το EUNIS, εισάγει κανόνες κατάταξης της επίδρασης των υδροδυναμικών συνθηκών στους παράκτιους οικοτόπους, οι οποίοι περιλαμβάνουν χαρακτηριστικές τιμές συγκεκριμένων μεγεθών, όπως η κινητική ενέργεια στον πυθμένα. Αυτές υιοθετούνται από έρευνες μελέτης των δυναμικών συνθηκών που δρουν σε μια παράκτια περιοχή, για παράδειγμα, όπως στην περίπτωση της παρούσας εργασίας και τα τελικά αποτελέσματα αξιοποιούνται από τα προγράμματα χαρτογράφησης οικοτόπων για την τελική σύνθεση των πληροφοριών. Η εφαρμογή, συνεπώς, μιας τέτοιας κατάταξης στα αποτελέσματα αυτής της εργασίας, προϋποθέτει τον υπολογισμό των τιμών των συγκεκριμένων μεγεθών που χρησιμοποιούν τα συστήματα κατάταξης. Σημειώνεται, ωστόσο, ότι τα μεγέθη που χρησιμοποιεί ένα σύστημα κατάταξης, όπως και οι ζώνες τιμών για την εφαρμογή τους σε αποτελέσματα μελετών, είναι δύσκολο να έχουν ευρεία χρήση, λόγω της διακύμανσης των τοπικών συνθηκών ανά τις διάφορες περιοχές. Επομένως, η αξιοποίηση των αποτελεσμάτων της εργασίας για την ένταξή τους στη μελέτη της επίδρασης των δυναμικών συνθηκών στους παράκτιους οικοτόπους για κάποιο πρόγραμμα χαρτογράφησης οικοτόπων είναι δυνατή, λαμβάνοντας υπόψη τη δυνατότητα εφαρμογής στην περιοχή μελέτης. Περισσότερες πληροφορίες για τα ερευνητικά προγράμματα χαρτογράφησης οικοτόπων και το σύστημα κατάταξης EUNIS, υπάρχουν στο παράρτημα Β.

8.3. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η παρούσα εργασία αποτελεί ένα υπόβαθρο για την περαιτέρω μελέτη της υδροδυναμικής της περιοχής και της συσχέτισης της με τη βιωσιμότητα των παράκτιων θαλάσσιων οικοτόπων. Έχοντας λάβει μια σειρά από παραδοχές και με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα, δίνει την εικόνα των κυματικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή ως μέσων και ακραίων περιπτώσεων, καθώς και του πεδίου ταχυτήτων που αντιστοιχούν στις συνθήκες. Το τελευταίο, κρίνει σε σημαντικό βαθμό την επίδραση των συνθηκών στους οικοτόπους στην περιοχή (για ακραίες συνθήκες), με την *Posidonia oceanica* να ενδιαφέρει ιδιαίτερα λόγω της σημασίας της ως προστατευόμενο οικοσύστημα. Το υπόβαθρο αυτό, επιδέχεται μια σειρά από βελτιώσεις και επαληθεύσεις, που περιγράφονται στη συνέχεια.

Τα βαθυμετρικά στοιχεία αποτελούν έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες για την μελέτη, συνεπώς, αν και στα πλαίσια της εργασίας λήφθηκαν τα πιο πρόσφατα διαθέσιμα δεδομένα, πιθανές νεότερες μετρήσεις θα είναι καλό να ληφθούν υπόψη. Σημαντικότερο, ωστόσο, θα ήταν να υπάρξουν μετρήσεις των ρευμάτων στην περιοχή, αφού μέχρι στιγμής δεν υπάρχουν διαθέσιμες. Όπως έγινε φανερό από τα αποτελέσματα, το κυματικό καθεστώς ακραίων συνθηκών και μόνο αρκεί να έχει άμεσες επιπτώσεις στους οικοτόπους. όμως τα δεδομένα ρευματογράφων θα δώσουν μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα του δυναμικού καθεστώτος της περιοχής και θα επιτρέψουν την εφαρμογή -συνδυαστικά με το παρόν- ενός υδροδυναμικού μοντέλου, για τον ακριβή προσδιορισμό της παράκτιας κυκλοφορίας. Στα παραπάνω, μπορεί να ληφθεί υπόψη και η θραύση κύματος (κυρίως για τα ακραία σενάρια), ενώ σε δεύτερο επίπεδο περαιτέρω στοιχεία των ιζημάτων του πυθμένα πιθανώς να καταστήσουν δυνατό τον προσδιορισμό σεναρίων μετακίνησης ιζημάτων και την συνεπαγόμενη επίδραση στους παράκτιους οικοτόπους. Συνεπώς περισσότερες μετρήσεις και παρατηρήσεις στην περιοχή σχετικά με τα παραπάνω είναι επιθυμητές, όπως και οι πόροι να υλοποιηθούν και η αυξημένη υπολογιστική ισχύς που απαιτεί η μετέπειτα επεξεργασία τους.

Σημαντική δράση, για τις παραπάνω πιθανές προεκτάσεις αλλά και για την εργασία αυτή, είναι η περαιτέρω έρευνα πεδίου στην περιοχή μελέτης. Με την έρευνα θα συγκεντρωθούν επιπλέον στοιχεία για την κατανόηση των τοπικών μηχανισμών που επιδρούν στους οικοτόπους και την επικύρωση των σχετικών συμπερασμάτων. Τα βιολογικά στοιχεία που προέκυψαν από την αποστολή στα πλαίσια του προγράμματος Θαλής το 2013, περιλαμβάνουν παρατηρήσεις που αξιοποιήθηκαν στα πλαίσια της εργασίας, ιδιαίτερα για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη βιωσιμότητα των οικοτόπων. Ωστόσο, η πραγματοποίηση και άλλων τέτοιων αποστολών, που δεν θα περιλαμβάνουν απαραίτητα τη χαρτογράφηση και ακουστική διασκόπηση του πυθμένα, αλλά κυρίως βιολογικού ενδιαφέροντος εργασίες, θα ήταν χρήσιμες. Θα συγκεντρωθούν, έτσι, στοιχεία που θα αφορούν μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα και για διαφορετικές εποχιακές περιόδους, ενώ θα μπορούσαν να συνοδεύονται και από αεροφωτογραφίες, για παράδειγμα, για τον προσδιορισμό περιοχών ανάπτυξης (ή όχι) λιβαδιών ποσειδωνίας κλπ, δίνοντας μια πληρέστερη εικόνα της βιολογικής δραστηριότητας στην περιοχή. Αυτό, θα καταστήσει δυνατή και την χαρτογράφηση των θαλάσσιων οικοτόπων, ώστε να γίνει έπειτα η εφαρμογή μελετών όπως η

παρούσα για την παράλληλη χαρτογράφηση της επικινδυνότητας ανάπτυξής τους, βάσει των θαλάσσιων δυναμικών συνθηκών.

Η επιστημονική έρευνα που αφορά στην χαρτογράφηση των οικοσυστημάτων και μάλιστα σε συνδυασμό με την ευνοϊκή ή μη ανάπτυξή τους, με βάση συγκεκριμένους παράγοντες ανά περίπτωση, παρουσιάζει σημαντική ανάπτυξη. Υπάρχουν αρκετά Ευρωπαϊκά αλλά και διεθνή προγράμματα που έχουν αυτό τον στόχο, μερικά εκ των οποίων έχουν ήδη δώσει τέτοια συστήματα κατανομών και χαρτογραφήσεων. Τα αποτελέσματα της εργασίας σχετίζονται άμεσα με μια τέτοια κατάταξη και είτε στο επίπεδο αυτό, είτε σε συνδυασμό με τις περεταίρω ενέργειες των προτάσεων που προαναφέρθηκαν, μπορούν να οδηγήσουν στην ένταξη της περιοχής Αφάντου Ρόδου σε ένα τέτοιο σύστημα. Επιπλέον πληροφορίες για τις προϋποθέσεις ένταξης των αποτελεσμάτων της εργασίας σε ένα τέτοιο πρόγραμμα και για τα ίδια τα προγράμματα και τις κατατάξεις που χρησιμοποιούν, περιγράφονται στο κεφάλαιο 8.2 και στο παράρτημα Γ.

Είναι χαρακτηριστικό ότι σε πρόσφατες εργασίες που σχετίζονται με την επίδραση των παράκτιων υδροδυναμικών συνθηκών στα λιβάδια ποσειδωνίας, περιλαμβάνονται σχόλια για την ανάγκη περεταίρω μελέτης αυτών των παραγόντων και της συσχέτισής τους με την -γεωγραφική- κατανομή ανάπτυξης του είδους. Επίσης, εκφράζεται η ανάγκη ανάπτυξης οικολογικών προγνωστικών μοντέλων, σχετικά με τα παραπάνω, ώστε να γίνει αντιληπτός ο ακριβής μηχανισμός και οι συνθήκες που επιδρούν στην χωρική κατανομή και ανάπτυξη της ποσειδωνίας, αλλά και για τον προσδιορισμό επίδρασης της ανθρωπογενούς δραστηριότητας στην παράκτια ζώνη, την αξιολόγηση και βελτίωση παράκτιων έργων κλπ. Επομένως, γίνεται φανερή η σημασία της συμβολής των αποτελεσμάτων της εργασίας αυτής αλλά και της υλοποίησης των προτεινόμενων επεκτάσεων της στον άξονα που περιγράφηκε και στην πιθανή ένταξή της σε κάποιο πρόγραμμα χαρτογράφησης οικοτόπων.

Τέλος, τονίζεται η ανάγκη χρήσης εξελιγμένων κυματικών μοντέλων διάδοσης στις εφαρμογές των προγραμμάτων χαρτογράφησης οικοτόπων. Η χρήση ενός τέτοιου μοντέλου σε αυτήν την εργασία, απέδειξε ότι μπορεί να λάβει υπόψη (στην εισαγωγή και εξαγωγή δεδομένων και μέθοδο επίλυσης) την ευρύτητα των φαινομένων που συμβαίνουν κυρίως στα μικρά βάθη και να αποδώσει με επαρκή ακρίβεια πληροφορίες που απαιτούνται για περεταίρω αξιοποίηση, όπως η χαρτογράφηση που προαναφέρθηκε. Παρόλα τα προτερήματα της χρήσης τέτοιων μοντέλων για την προσομοίωση και αριθμητική επίλυση στις εφαρμογές που περιγράφηκαν, η διερεύνηση στην σχετική βιβλιογραφία που έγινε στα πλαίσια αυτής της εργασίας, έδειξε ότι, στη συντριπτική πλειοψηφία τους, τα προγράμματα που μελετούν την επίδραση υδροδυναμικών συνθηκών στους παράκτιους οικοτόπους χρησιμοποιούν φασματικά μοντέλα. Προτείνεται, έτσι, η χρήση αριθμητικών κυματικών μοντέλων σε εφαρμογές όπως η παρούσα στο μέλλον.

9. Βιβλιογραφία

- Αθανασούλης Γ.Α., Μπελιμπασάκης Κ.Α., (2007). "Κυματικά φαινόμενα στο θαλάσσιο περιβάλλον", Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Αθήνα.
- Abbott M. B., Petersen H. M. and Skovgaard O., (1978). "On the numerical modelling of short waves in shallow water". *Hydr. Res.*, 16, 173-204.
- Βερυκίου-Παπασπυριδάκου Ε., Μπαθρέλλος Γ., Σκυλοδήμου Χ., (2004). "Φυσικογεωγραφικές παρατηρήσεις της παράκτιας ζώνης της Βορειοανατολικής Ρόδου". *Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας*, 36: 958-967.
- Cameron, A. and Askew, N. (eds.), (2011). *EUSeaMap - Preparatory Action for development and assessment of a European broad-scale seabed habitat map final report*.
- Coltman N. et. al., (2008). "Developing a broadscale predictive EUNIS habitat map for the MESH study area". *JNCC*.
- Dean R. G. & Dalrymple R. A., (2004). "Coastal Processes with Engineering Applications". Cambridge University Press.
- Dingenmanns M. W., (1997). "Water wave propagation over uneven bottoms", *Advanced series on Ocean Engineering* vol. 13.
- Dolan M. and Glaves H., (2011). "Terrain characterization from bathymetry data at various resolutions in European waters – experiences and recommendations". *Geo-Seas*.
- Ellwood H., McBreen F. & Askew N., (2010). *UKSeaMap, Technical Report 6 (Comparison of UKSeaMap 2010 predictive habitat map with other predictive habitat maps and maps derived from surveys)*.
- Evangelopoulos et. al., (2015). "Baseline study of the benthic macrofauna at a potential Marine Aggregate Extraction site (Afantou Bay, Rhodes)". *HCMR 11th symposium, Lesvos island, Greece*.
- Fenton, J. D., (1985). "A fifth-order Stokes theory for steady waves", *J. Waterway Port Coastal and Ocean Engin.*, ASCE vol 111., 216-234.
- Fenton, J. D., (1990). "Nonlinear wave theories", in B. Le Méhauté & D. M. Hanes, eds, *The Sea - Ocean Engineering Science, Part A, Vol. 9*, Wiley, New York, pp. 3-25.

- Galparsoro, I., et al., (2012). "Using EUNIS habitat classification for benthic mapping in European seas: Present concerns and future needs". Mar. Pollut. Bull.
- Holthuijsen L. H., (2007). "Waves in Oceanic and Coastal Waters". Cambridge University Press.
- ICES (2008). Report of the Working Group on Marine Habitat Mapping (WGMHM), 31 March–4 April 2008, Horta, the Azores. CM 2008/MHC:08 Ref. FTC, ACOM. 125 pp.
- Infantes E, Terrados J, Orfila A, Cañellas B, Álvarez-Ellacuría A., (2009). "Wave energy and the upper depth limit distribution of *Posidonia oceanica*". *Botanica Marina* 52: 419-427
- Infantes E, Orfila A, Bouma TJ, Simarro G, Terrados J., (2011) "*Posidonia oceanica* and *Cymodocea nodosa* seedling tolerance to wave exposure". *Limnology and Oceanography* 56(6): 2223-2232.
- Καζάκης Ι., (2014). "Αριθμητική προσομοίωση κυματισμού σε περιοχές μεταβαλλόμενης βαθυμετρίας με χρήση του αριθμητικού κυματικού μοντέλου MIKE 21 by DHI". Διπλωματική εργασία, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα.
- Kapsimalis, V., Rousakis, G., Hatiris, G., Kalogirou, S., Hasiotis, T., Karditsa, A., Petrakis, S., Poulos S. and Stamatakis, M., (2013). "Searching for marine aggregates deposits in the Afantou Bay (Rhodes island, Greece)". In: 40th CIESM Congress, Marseill-France, 28 Oct. to 1 Nov., pp. 87.
- Madsen P. A., Sørensen, O. R and Schaffer, H. A., (1997a). "Surf zone dynamics simulated by a Boussinesq type model". Part 1: Model description and cross-shore motion of regular waves. *Coastal Eng.*, 32, 255-288.
- Madsen P. A., Sørensen, O. R and Schaffer, H. A., (1997b). "Surf zone dynamics simulated by a Boussinesq type model". Part 2: Surf beat and swash zone oscillations for wave groups and irregular waves. *Coastal Eng.*, 32, 289-320.
- Madsen P. A., Sørensen, O. R., (1992). "A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics", Part2: A slowly-varying bathymetry. *Coastal Eng.*, 18, 183-204.
- Madsen P. A., Murray R. and Sørensen, O. R., (1991). " A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics", Part1. *Coastal Eng.*, 32, 371-388.
- Madsen P. A., (1983). "Wave reflection from a vertical permeable wave absorber". *Coastal Eng.*, 7, 381-396.

- Massel S. R. (1989) Hydrodynamics of coastal zones, Elsevier oceanography series vol.48.
- McBreen F., Askew N. & A. Cameron A., (2010). UKSeaMap, Technical Report 4 (energy).
- MIKE 21 by DHI Official Manuals-guides (2014):
- MIKE21 Boussinesq Wave Module, Step-by-step training guide. DHI, 2014.
 - MIKE21 Boussinesq Wave Module, Scientific Documentation. DHI, 2014.
 - MIKE21 Boussinesq Wave Module, User Guide. DHI, 2014.
 - MIKE Zero, The Common DHI User Interface for Project Oriented Water Modelling, User Guide. DHI, 2014.
 - MIKE Zero preprocessing & post processing User Guide, Generic Editors and Viewers. DHI, 2014.
 - MIKE Zero Project Oriented Water Modeling, Step-by-step training guide. DHI, 2014.
 - MIKE Animator Plus - A Powerful Visualisation Tool for DHI 2D & 3D Model Applications, User Guide. DHI, 2014.
- MMO, (2012). "Recommendations on the use of habitats maps in the planning process and requirements for future planning areas". A report produced for the Marine Management Organisation, pp 41. MMO Project No: 1014.
- Moss D., (2008). "EUNIS habitat classification – a guide for users", JNCC (http://eunis.eea.europa.eu/upload/EUNIS_2004_report.pdf).
- Pirazzoli, P.A., Montaggioni, L.F., Saliege, J.F., Segonzac, G., Thommeret, Y., Vergnaud-Grazzini, C., (1989). "Crustal block movements from Holocene shorelines: Rhodes Island (Greece)". *Tectonophysics*, 170, 89-114.
- Pyökäri M., (1997). "The provenance of beach sediments on Rhodes, southeastern Greece, indicated by sediment texture, composition and roundness". *Geomorphology*, 18: 315-332.
- Rattray A., Ierodiamonou D. and Womersley T., (2015) "Wave exposure as a predictor of benthic habitat distribution on high energy temperate reefs". *Front. Mar. Sci.*
- Sørensen, O. R, Schaffer, H. A and Sørensen L. S., (2004). "Boussinesq-type modelling using an unstructured finite element technique". *Coastal Eng.*, 50, 181-198.

Sørensen, O. R, Schaffer, H. A and Madsen P. A., (1998). "Surf zone dynamics simulated by a Boussinesq type model". Part 3: Wave-induced horizontal nearshore circulations. *Coastal Eng.*,33, 155-176.

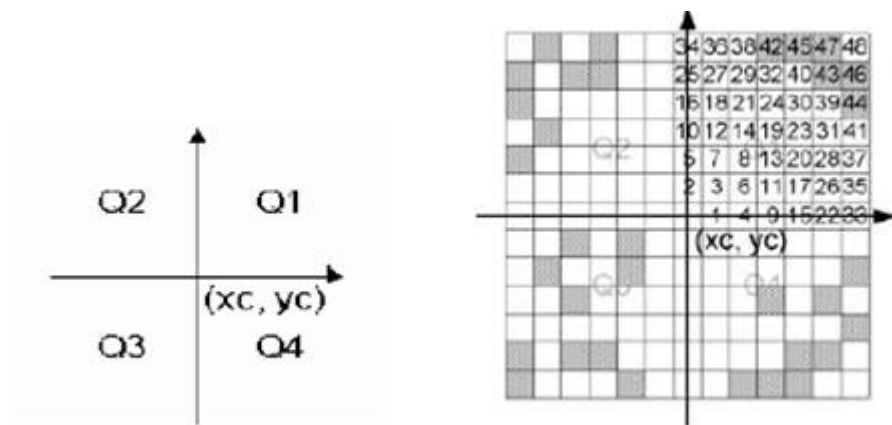
Vacchi M. et. al., (2014). "Towards a predictive model to assess the natural position of the *Posidonia oceanica* seagrass meadows upper limit". *Marine Pollution Bulletin* 83, 458–466.

Vasquez M., (2003). Tutorials: Creating a full coverage broad-scale map of the EUNIS classification habitat types. Ifremer Institute, tutorials.

10. Παραρτήματα

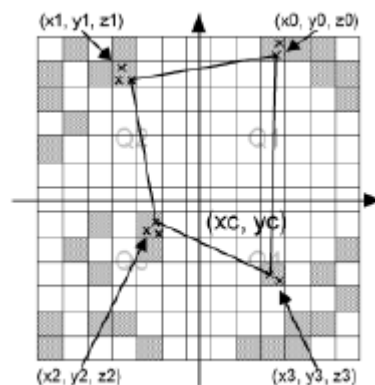
10.1. Παράρτημα Α: Επιστημονικό υπόβαθρο του MIKE Zero tool Bathymetry Editor-μέθοδος συμπλήρωσης κενών

Έστω (x_c, y_c) το σημείο στο οποίο πρέπει να υπολογιστεί το βάθος, βάσει του οποίου ορίζεται η συνάρτηση $z_c=f(x_c, y_c)$ και τα τεταρτημόρια που προκύπτουν στον χώρο (εικόνα 10.1.1).



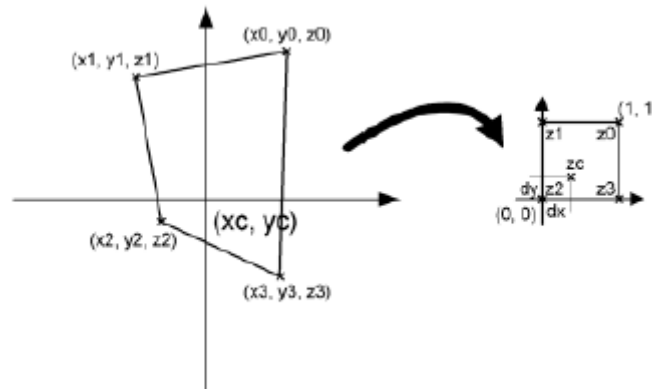
Εικόνα 10.1.1 : Καθορισμός τεταρτημορίων και ταξινόμηση των γειτονικών κελιών του πλέγματος

Σύμφωνα με τη μέθοδο διγραμμικής παρεμβολής, επιλέγονται τέσσερα σημεία, ένα ανά τεταρτημόριο. Αυτό γίνεται ως εξής: δημιουργείται στο τεταρτημόριο μια σειρά δεικτών ανάλογα με την απόσταση, που ταξινομούνται (εξαιρουμένου του ίδιου του σημείου πλέγματος) όπως φαίνεται στην εικόνα 10.1.1. Από τα γραμμοσκιασμένα κελιά, που περιέχουν πρωτογενή σημεία δεδομένων, επιλέγονται τα τέσσερα (συνολικά) που βρίσκονται πιο κοντά στο ζητούμενο σημείο (εικόνα 10.1.2).



Εικόνα 10.1.2 : Τα πιο κοντινά σημεία πρωτογενών δεδομένων ανά τεταρτημόριο

Συντίθεται με αυτόν τον τρόπο ένα -μη κανονικό- τετράπλευρο, στο κεντρικό σημείο του οποίου θα υπολογιστεί το βάθος. Μετατρέποντας το τετράπλευρο σε -κανονικό- τετράγωνο, μπορεί να πραγματοποιηθεί διγραμμική παρεμβολή (εικόνα 10.1.3).



Εικόνα 10.1.3 : Μέθοδος διγραμμικής παρεμβολής

Για να γίνει αυτό, υπολογίζονται οχτώ συντελεστές, ως ακολούθως:

$$A_1 = x_0$$

$$A_2 = y_0$$

$$B_1 = x_1 - x_0$$

$$B_2 = y_1 - y_0$$

$$C_1 = x_3 - x_0$$

$$C_2 = y_3 - y_0$$

$$D_1 = x_2 - x_1 + x_0 - x_3$$

$$D_2 = y_2 - y_1 + y_0 - y_3$$

(A.1)

Αντιστοιχίζεται το (x_c, y_c) στο κανονικοποιημένο τετράγωνο (dx, dy) μέσω της

$$ax^2 + bx + c = 0 \quad , \quad (A.2)$$

όπου

$$a = D_1 B_2 - D_2 B_1$$

$$b = D_2 x_c - D_1 y_c - D_2 A_1 + D_1 A_2 + C_1 B_2 - C_2 B_1$$

$$c = C_2 x_c - C_1 y_c + C_1 A_2 - C_2 A_1$$

(A.3)

Λύνοντας την (2.2) λαμβάνουμε το dx :

$$dx = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad , \quad (A.4)$$

όπου το $0 < dx < 1$ επιλέγεται κατάλληλα για να βρεθεί η λύση. Το dy υπολογίζεται ως:

$$dy = \frac{x_c - A_1 - B_1 dx}{C_1 - D_1 x_c} \quad , \text{ ή} \quad (\text{A.5})$$

$$dy = \frac{x_c - A_2 - B_2 dx}{C_2 - D_2 x_c} \quad (\text{A.6})$$

εκ των οποίων επιλέγεται αυτή που δεν οδηγεί σε μηδενισμό του παρανομαστή. Αφού έχει γίνει η αντιστοίχιση, η διαδικασία ολοκληρώνεται με τον υπολογισμό της τιμής του βάθους με τη μέθοδο διγραμμικής παρεμβολής:

$$z_c = (1 - dx)(1 - dy)z_2 + dx(1 - dy)z_3 + (1 - dx)dy \cdot z_1 + dxdy \cdot z_0 . \quad (\text{A.7})$$

Αν βρεθούν λιγότερα από τέσσερα σημεία (κάποιο τεταρτημόριο είναι άδειο), χρησιμοποιείται σταθμισμένη παρεμβολή αντίστροφης απόστασης, σύμφωνα με τις εξισώσεις:

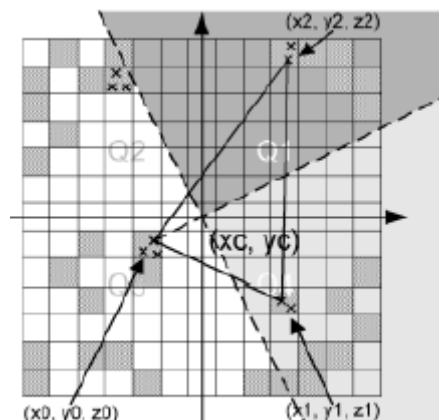
$$w_i = \frac{1}{\sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2}} \quad , \quad (\text{A.8})$$

$$w_s = \sum_{i=1}^N w_i \quad , \quad (\text{A.9})$$

$$z_c = \frac{1}{w_s} \sum_{i=1}^N w_i z_i \quad . \quad (\text{A.10})$$

Η μέθοδος είναι αρκετά αποτελεσματική, ωστόσο έχει το μειονέκτημα ότι εξαρτάται από τον προσανατολισμό της βαθυμετρίας. Έτσι, κατά την αναζήτηση σημείων σε τεταρτημόρια πιθανώς η επιλογή των σημείων να μην είναι λογική, ιδίως για πιο μεγάλες γωνίες περιστροφής.

Το πρόβλημα που τέθηκε προηγουμένως μπορεί να επιλυθεί αν χρησιμοποιηθεί η μέθοδος τριγωνικής παρεμβολής.



Εικόνα 10.1.4: Απεικόνιση τριγωνικής παρεμβολής

Αρχικά, βρίσκεται το κοντινότερο σημείο στο (x_c, y_c) , που στο παράδειγμα είναι το (x_0, y_0, z_0) (εικόνα 10.1.4). Αφού εντοπιστεί, προσδιορίζονται δύο τεταρτημόρια (ανοικτό και σκούρο γκρι στην εικόνα A4) και εντοπίζονται τα δύο σημεία που είναι κοντινότερα σε αυτά (στην εικόνα 10.1.4 τα (x_1, y_1, z_1) και (x_2, y_2, z_2)). Η παρεμβολή πραγματοποιείται σε δύο στάδια. Οι συντελεστές που περιγράφουν το χωρίο βάσει των τριών σημείων είναι:

$$A = \frac{-(y_1 - y_0)(z_2 - z_0) + (y_2 - y_0)(z_1 - z_0)}{(x_1 - x_0)(y_2 - y_0) - (x_2 - x_0)(y_1 - y_0)}, \quad (\text{A.11})$$

$$B = \frac{(x_1 - x_0)(z_2 - z_0) + (x_2 - x_0)(z_1 - z_0)}{(x_1 - x_0)(y_2 - y_0) - (x_2 - x_0)(y_1 - y_0)}, \quad (\text{A.12})$$

$$C = z_0 - Ax_0 - By_0. \quad (\text{A.13})$$

Δευτερευόντως γίνεται η τελική-πραγματική παρεμβολή:

$$z_c = Ax_c + By_c + C, \quad (\text{A.14})$$

Αν βρεθούν λιγότερα από τρία σημεία χρησιμοποιείται η αντίστροφη παρεμβολή σταθμισμένων αποστάσεων (inverse distance weighted interpolation), που βασίζεται στις A.8-A.10, ενώ υπάρχει τέλος και η επιλογή αντίστροφης παρεμβολής σταθμισμένων αποστάσεων όπου χρησιμοποιούνται τα τετράγωνα των αποστάσεων σημείων στα κριτήρια αναζήτησης.

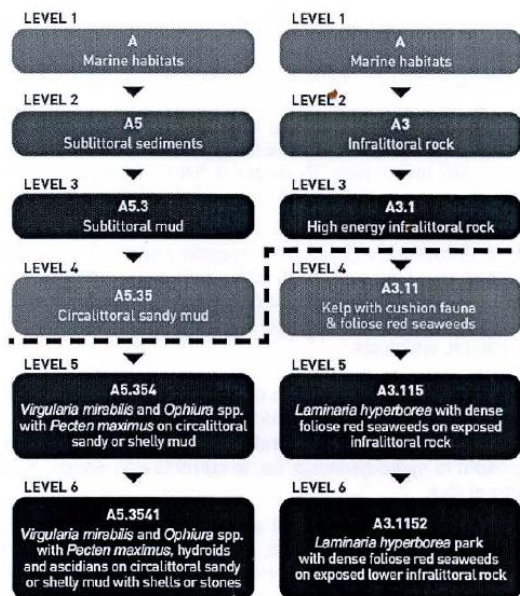
10.2. Παράρτημα Β: Ερευνητικά προγράμματα χαρτογράφησης οικοτόπων (habitat mapping)

Η χαρτογράφηση των οικοτόπων μιας περιοχής σε συνδυασμό με τον προσδιορισμό των περιοχών που ευνοείται ή όχι η ανάπτυξή τους, αποτελεί στόχο πολλών ερευνητικών προγραμμάτων διεθνώς. Το αποτέλεσμα μιας τέτοιας διαδικασίας, είναι συνδυαστικοί χάρτες με τα είδη των οικοτόπων και τοπικών βιοκοινωνιών, τόσο σε ξηρά όσο και σε θάλασσα, που θα δίνουν στον αναγνώστη τη δυνατότητα να βρίσκει εύκολα τα είδη των οικοσυστημάτων αυτών σε μια περιοχή αλλά και τη πιθανότητα ανάπτυξης και επιβιώσής τους. Τα αποτελέσματα είναι ιδιαίτερης σημασίας, μιας που, όπως στις περισσότερες περιπτώσεις, διατίθενται ελεύθερα ως βάση δεδομένων στο διαδίκτυο. Τέτοιες ιστοσελίδες είναι ήδη διαθέσιμες και δίνουν τη δυνατότητα σε επιστήμονες αλλά και όποιον ενδιαφερόμενο, να αναζητήσει στοιχεία βάσει της περιοχής που θα επιλέξει με την πλοήγησή του σε διαδραστικούς χάρτες, ή το είδος οργανισμών και οικοσυστημάτων που θα επιλέξει να εντοπίσει γεωγραφικά. Κάποια σημαντικά προγράμματα που αφορούν κυρίως την Ευρώπη και συνοδεύονται από το σύστημα κατάταξης που υιοθετούν, είναι τα Mesh και EUSeamar. Η εργασία αυτή, ως αναφορά την πιθανότητα αξιοποίησης των αποτελεσμάτων ή και ένταξής τους σε κάποιο πρόγραμμα, ακολούθησε την προσέγγιση της κατάταξης EUNIS, που χρησιμοποιούν τα παραπάνω αλλά και άλλα προγράμματα, για την οποία ακολουθεί μια συνοπτική περιγραφή.

Το σύστημα EUNIS είναι στην ουσία μία μέθοδος κατηγοριοποίησης των οικοτόπων (και) του θαλάσσιου πυθμένα, στην οποία μπορούν να βασιστούν διάφορες σχετικές μελέτες χαρτογράφησης οικοτόπων. Με τη βοήθεια νέων και παλαιότερων δεδομένων, είναι εφικτό με τη βοήθεια της τεχνολογίας GIS να παραχθούν τέτοιοι χάρτες, κλίμακας 1:1000000. Η κατάταξη EUNIS αποτελεί ένα κοινό για τον Ευρωπαϊκό χώρο σύστημα αναφοράς για χερσαίους και θαλάσσιους οικοτόπους, που επιτρέπει την αναφορά και υποβολή στοιχείων οικοτόπων με κοινό τρόπο, για χρήσεις όπως η απογραφή, παρακολούθηση και αξιολόγηση τους και ο προσδιορισμός δεικτών βιοποικιλότητας. Περιλαμβάνει ιεραρχία έξι επιπέδων, ξεκινώντας στο επίπεδο ένα με επιλογή μίας ευρείας κατηγορίας οικοτόπου (από δέκα διαθέσιμες), όπως το θαλάσσιο, στο επίπεδο δύο αρχίζουν και υπεισέρχονται οι διάφοροι φυσικοί παράγοντες κλπ.

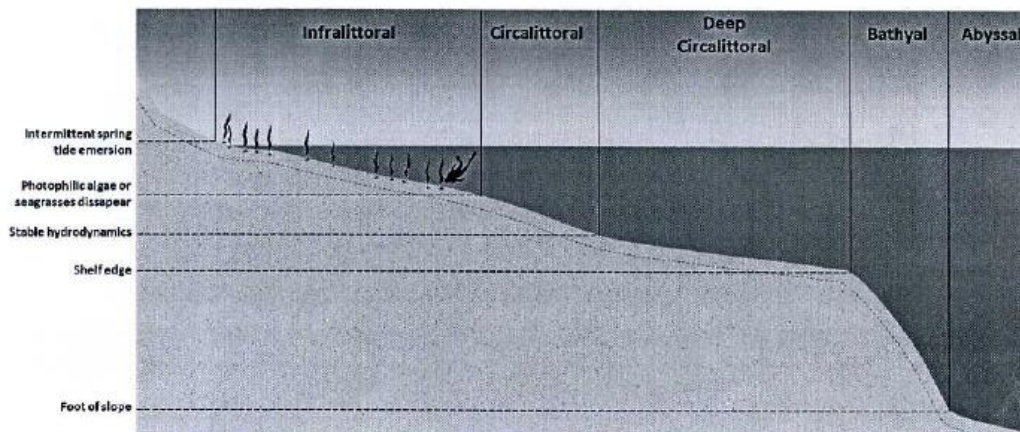
Για ένα φυσικό θαλάσσιο σύστημα, που ενδιαφέρει τη συγκεκριμένη εργασία, η κατάταξη έχει σκοπό να συμπεριλάβει και να συνδυάσει μια σειρά από βασικούς φυσικούς παράγοντες, οι οποίοι αφού χαρτογραφηθούν θα ενσωματωθούν σε τελικό χάρτη με τη βοήθεια εργαλείων GIS. Οι τρεις βάσεις-χάρτες των βασικών φυσικών παραγόντων που εισάγει η κατάταξη, αφορούν στο υπόστρωμα του θαλάσσιου πυθμένα, τις βιολογικές ζώνες και την έκθεση της περιοχής στους υδρομηχανικούς μηχανισμούς.

Στην ακόλουθη εικόνα, φαίνονται δύο παραδείγματα της κατάταξης EUNIS, με την διακεκομμένη γραμμή να οριοθετεί τα ιεραρχικά επίπεδα που σχετίζονται με τους βασικούς φυσικούς παράγοντες από αυτά (κατώτερα) που σχετίζονται με αμιγώς βιολογικούς παράγοντες.



Εικόνα 10.2.1: Παραδείγματα κατάταξης EUNIS

Το υπόστρωμα του θαλάσσιου πυθμένα (πχ βράχος, άμμος κλπ) είναι εφικτό να προσδιοριστεί από υπάρχουσες μελέτες και άρα η δημιουργία του αντίστοιχου χάρτη είναι συνήθως η ευκολότερη, με κατάλληλη σύνθεση των πληροφοριών με GIS. Ως αναφορά τις βιολογικές ζώνες, παρουσιάζονται περισσότερες δυσκολίες, ιδίως στην σύνθεσή τους και την οριοθέτηση των μεγαλύτερου βάθους ζώνες. Η εικόνα 10.2.2 δείχνει τη θεώρηση των βιολογικών ζωνών από την κατάταξη EUNIS, κατά την οποία φαίνεται ότι στην περίπτωση της περιοχής μελέτης της εργασίας ενδιαφέρει κυρίως η infralittoral και circalittoral ζώνη.



Εικόνα 10.2.2: Οι βιολογικές ζώνες κατά την κατάταξη EUNIS

Τέλος, οι υδροδυναμικοί παράγοντες, που σχετίζονται με την ανάδευση και κυκλοφορία των υδάτων, βασίζονται σύμφωνα με την κατάταξη στη δράση των κυμάτων και των ρευμάτων. Η δράση αυτή, επί βραχώδους υποβάθρου, καθορίζει τρία επίπεδα επίδρασής τους: ασθενής, μέτρια, ισχυρή και εκφράζεται μέσω της κινητικής ενέργειας (όπως έχει προκύψει από κατάλληλη επεξεργασία και στατιστική ανάλυση για δεδομένα πολλών ετών). Η κατηγοριοποίηση αυτή

υπολογίζεται τελικά συνδυαστικά για κύμα και ρεύμα, συνθέτοντας τον τελικό χάρτη για αυτούς τους παράγοντες.

Τελικά, οι τρεις παραπάνω χάρτες δεδομένων συνδυάζονται συνθέτοντας τον τελικό χάρτη κατάταξης οικοτόπων. Για την τελική αυτή διαμόρφωση, έτσι, απαιτήθηκαν δεδομένα βαθυμετρίας, υποστρώματος πυθμένα, κινητικής ενέργειας λόγω κυμάτων ή/και ρευμάτων, βιολογικών ζωνών μεγάλου βάθους και εξασθένησης φωτός με το βάθος. Με βάση αυτούς τους παράγοντες και την ιεραρχία επιπέδων, ορίζεται ένα σύστημα κωδικοποίησης από το οποίο προκύπτουν κωδικοί χαρακτηριστικοί μιας σειράς συνθηκών και παραγόντων που θα συνοδεύουν κάθε περιοχή.

Ο τρίτος παράγοντας της υδροδυναμικής επίδρασης που περιγράφηκε, σχετίζεται άμεσα με τη συγκεκριμένη εργασία. Η κινητική ενέργεια που οφείλεται στην επίδραση του κυματικού καθεστώτος μιας περιοχής, συνδέεται άμεσα και κατά αναλογία με το πεδίο ταχυτήτων που προέκυψε για κάθε εξεταζόμενο σενάριο στην εργασία. Με βάση αυτό μπορεί, επομένως, να γίνει επιπλέον μια αντίστοιχη κατηγοριοποίηση επίδρασης του συγκεκριμένου παράγοντα στους οικοτόπους μιας περιοχής. Οι τιμές κατωφλίου κινητικής ενέργειας για τον χαρακτηρισμό του υδροδυναμικού παράγοντα λόγω κυμάτων ανάλογα με την επίδρασή του, δεν μπορούν να έχουν άμεση εφαρμογή στην περίπτωση της εργασίας, αφού δεν έχει προκύψει ακριβές ανάλογο του μεγέθους αυτού. Με μία αντίστοιχη προσέγγιση με αυτή της EUNIS και χρήση των τιμών κατωφλίου, τα δεδομένα που προέκυψαν από την εργασία μπορούν να αξιοποιηθούν, έστω και κατά προσέγγιση, για την κατηγοριοποίηση της επίδρασης των κυματικών συνθηκών με όμοιο τρόπο, καθιστώντας έτσι δυνατή την ένταξη σε αυτό το σύστημα κατάταξης. Η επίδραση των ρευμάτων σε συνδυασμό με τη δράση των κυμάτων που λαμβάνει υπόψη η κατάταξη, δεν αποτελεί απροσπέλαστο πρόβλημα στην περίπτωση της εργασίας, παρόλη την έλλειψη τέτοιων δεδομένων για την περιοχή μελέτης. Αυτό ισχύει διότι η δράση των κυμάτων και μόνο αξιολογείται ισχυρή, όπως περιγράφηκε στο 8.2 και άρα η συνδυαστική επίδραση των ρευμάτων απλά θα διαμόρφωνε τις τιμές κατωφλίου κατά ένα πιθανώς μη αξιολογήσιμο ποσοστό και δεν θα άλλαζε το επίπεδο/χαρακτηρισμό της επίδρασης. Επιπλέον, η συγκεκριμένη κατάταξη έχει χρησιμοποιηθεί κατά κύριο λόγο σε μελέτες που είχαν εφαρμογή σε θάλασσες της βόρειας Ευρώπης, όπου η επίδραση των ρευμάτων είναι καθοριστική. Ωστόσο σε μια περιοχή της Μεσογείου, όπως στην περίπτωση της περιοχής μελέτης, πιθανώς χρειάζεται μια αναθεώρηση της συγκεκριμένης επίδρασης ή των τιμών κατωφλίου. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα εφαρμογής στη Μεσόγειο στα πλαίσια του EUseamar, όπου δεν λήφθηκε καθόλου υπόψη εξαρχής η επίδραση των ρευμάτων, γιατί δεν αξιολογήθηκε ισχυρή για την περιοχή.

Ζητήματα όπως το τελευταίο, δηλαδή της προσαρμογής των διαφόρων παραγόντων για την κατάταξη σε κάθε περιοχή, είναι ιδιαίτερα σημαντικά για το μέλλον τέτοιων προγραμμάτων. Είναι εύκολα κατανοητό ότι ένα τέτοιο εγχείρημα όπως η χαρτογράφηση των οικοτόπων με βάση τόσους παράγοντες, είναι αρκετά πολύπλοκο και κυρίως δύσκολα εφαρμόσιμο ενιαία σε μεγάλες περιοχές. Αξίζει να σημειωθεί ότι μέχρι σήμερα έχουν πραγματοποιηθεί πολλά συνέδρια και μελέτες διεθνώς σχετικά με την επίλυση των θεμάτων που προκύπτουν για την ορθή κατάταξη αλλά και του εύρους χρήσης της. Οι μεγάλες διαφορές στις υδροδυναμικές συνθήκες ανά περιοχή, όπως σχολιάστηκαν προηγουμένως, ή η

διαφορετική προσέγγιση και υπολογισμός των τιμών κατωφλίου για τον χαρακτηρισμό επίδρασης των περιοχών με βάση τις υδροδυναμικές συνθήκες για διάφορα προγράμματα, είναι κάποια από ζητήματα που προκύπτουν. Τα προβλήματα αφορούν τα αποτελέσματα ενός ερευνητικού προγράμματος αλλά και τη συμβατότητα μεταξύ αποτελεσμάτων διαφορετικών προγραμμάτων. Τα επίπεδα ιεραρχίας και η δομή των κατατάξεων, η εφαρμογή κοινών κανόνων σε διαφορετικά γεωγραφικά και βιολογικά περιβάλλοντα, η αύξηση των κλάσεων ενεργειακής/υδροδυναμικής επίδρασης, ο επαναπροσδιορισμός των βιολογικών ζωνών, η δημιουργία νέων κλάσεων και η εισαγωγή ανθρώπινα τεχνητών τύπων περιοχών, είναι μερικά από τα προς συζήτηση θέματα.

Γίνεται επομένως φανερό ότι υπάρχει αρκετός δρόμος για την επίτευξη ενός ενιαίου συστήματος κατάταξης, που θα λαμβάνει υπόψη τοπικούς παράγοντες και θα περιέχει ικανό αριθμό χαρακτηρισμών των οικοτόπων, ενώ θα είναι αναγκαία η τακτική ενημέρωση και διαμόρφωση του συστήματος, όπως συνεχής είναι και η διαμόρφωση των οικοτόπων. Παρόλ'αυτά, η σημασία ενός τέτοιου επιτεύγματος είναι αδιαμφισβήτητη και η έρευνα και πρόοδος για την βελτίωσή του είναι σημαντική.

