



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF
ATHENS

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ DEPARTMENT OF WATER RESOURCES AND
ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ENVIRONMENTAL ENGINEERING
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΛΙΜΕΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ LABORATORY OF HARBOUR WORKS

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ
ΕΝΤΑΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ
ΔΡΑΣΗΣ ΣΤΑ ΚΑΤΑΝΤΗ ΜΟΛΟΥ ΛΙΜΕΝΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΑΦΕΝΤΟΥΛΗΣ

Επιβλέπων: Κ.Ι. Μουτζούρης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Συνεπιβλέπουσα: Β. Τσουκαλά, Επίκουρος Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2013



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF
ATHENS

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ
ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ
ΛΙΜΕΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF WATER RESOURCES AND
ENVIRONMENTAL ENGINEERING
LABORATORY OF HARBOUR WORKS

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ
ΕΝΤΑΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ
ΔΡΑΣΗΣ ΣΤΑ ΚΑΤΑΝΤΗ ΜΟΛΟΥ ΛΙΜΕΝΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΑΦΕΝΤΟΥΛΗΣ

Επιβλέπων: Κ.Ι. Μουτζούρης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Συνεπιβλέπουσα: Β. Τσουκαλά, Επίκουρος Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Το περιεχόμενο της ανά χείρας διπλωματικής εργασίας αποτελεί προϊόν της δικής μου πνευματικής προσπάθειας. Η ενσωμάτωση σε αυτήν υλικού τρίτων, δημοσιευμένου ή μη, γίνεται με δόκιμη αναφορά στις πηγές, που δεν επιτρέπει ασάφειες ή παρερμηνείες.

Αθήνα, Μάρτιος 2013

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί το τελευταίο στάδιο των προπτυχιακών σπουδών μου στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Για το λόγο αυτό, αισθάνομαι τυχερός για το γεγονός ότι έλαβε χώρα σε ένα περιβάλλον τόσο δραστήριο και παραγωγικό όσο αυτό του Εργαστηρίου Λιμενικών Έργων, το οποίο αποτέλεσε για εμένα την ιδανική μετάβαση από τη θεωρητική εκπαίδευση στην εφαρμογή και διεύρυνση των γνώσεών μου, δίνοντάς μου την ευκαιρία να έρθω σε επαφή με υποδομές, εξοπλισμό και τεχνογνωσία που μόνο με ερευνητικά ιδρύματα του εξωτερικού μπορούν να αντιστοιχιστούν. Οι γνώσεις και οι προσλαμβάνουσες που άντλησα κατά την εργασία μου στο Εργαστήριο εμπλουτίζουν ανεκτίμητα τα εφόδια που αποκόμισα από την ως τώρα φοίτησή μου στο Πολυτεχνείο.

Σε αυτό το σημείο, οφείλω να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Κωνσταντίνο Μουτζούρη, ο οποίος με εμπιστεύτηκε με την ανάθεση της εργασίας και ανέλαβε την επίβλεψή της.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερος την κα Βίκυ Τσουκαλά, Επίκουρο Καθηγήτρια Ε.Μ.Π., για την προσωπική επικοινωνία και την πάντα πρόθυμη διάθεση του χρόνου και του ενδιαφέροντός της στην παρακολούθηση και καθοδήγηση της προόδου της εργασίας αυτής, καθώς και το διδακτορικό φοιτητή Μιχάλη Χονδρό για τις εύστοχες παρατηρήσεις του., αλλά και όλα τα υπόλοιπα μέλη του Ε.Λ.Ε. για την εξαιρετική επικοινωνία και το ενδιαφέρον τους.

Τέλος, δε θα μπορούσα να παραλείψω πως η ομαλή ολοκλήρωση της εργασίας δε θα νοούταν χωρίς την άνευ όρων στήριξη και υπομονή της μητέρας μου.

Με εκτίμηση,
Αφεντούλης Βασίλειος
Αθήνα, Μάρτιος 2013

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρατήρηση της διάβρωσης αμμωδών ακτών, ύστερα από την κατασκευή μολών ή κυματοθραυστών σε αυτές, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η παρουσία τους αυξάνει την κυματική δράση στην περιοχή κατάντη αυτών. Η παρούσα διπλωματική εργασία διερευνά με μαθηματικά ομοιώματα την εμφάνιση του φαινομένου αυτού σε φυσικό ομοίωμα λιμένα και μεταβαλλόμενου αμμώδη πυθμένα, το οποίο κατασκευάστηκε σε κλίμακα 1:100 στην τρισδιάστατη δεξαμενή δοκιμών του Εργαστηρίου Λιμενικών Έργων της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Κατά την αριθμητική διαδικασία, ελέγχθηκαν τρεις διατάξεις λιμένα με μεταβλητή παράμετρο το μήκος του προσήνεμου μόλου και μία διάταξη χωρίς έργα, για δύο διευθύνσεις πρόσπτωσης κυμάτων, με γωνίες 45° και 90° ως προς την ακτή. Παράχθηκαν τυχαίοι κυματισμοί με χαρακτηριστικό ύψος H_s εύρους από 1,36 m έως 3,20 m και περίοδο αιχμής T_p κυμαινόμενη από 5,69 sec έως 8,53 sec. Για τον προσδιορισμό των δυναμικών συνθηκών πραγματοποιήθηκε προσομοίωση με το πρόγραμμα MIKE 21 και συγκεκριμένα με τα μοντέλα Parabolic Mild-Slope (PMS), Hydrodynamic (HD) και Non-Cohesive Sediment Transport (ST) και για τα σενάρια που περιγράφηκαν. Επίσης, υπολογίσθηκε ο συντελεστής μετάδοσης ως ο λόγος του μεταδιδόμενου προς τον προσπίπτοντα κυματισμό. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με τη μορφή πινάκων και διαγραμμάτων και γίνεται προσπάθεια ποσοτικής ερμηνείας τους, για την τεκμηρίωση των εξαγόμενων συμπερασμάτων.

Σε κάθε περίπτωση κυματικών συνθηκών και διατάξεων του έργου που εξετάστηκαν, διαπιστώθηκε ενίσχυση της κυματικής διαταραχής σε μια περιοχή στα κατάντη αυτού. Η επιμήκυνση του προσήνεμου μόλου συνεπάγεται τη μετάδοση του φαινομένου της κυματικής εντατικοποίησης προς τα κατάντη του έργου, ενώ η εμφάνιση του φαινομένου αυτού στις θέσεις πλησίον της ακτής ευθύνεται αναμφίβολα για τη διάβρωσή που προκύπτει από την ανάλυση των αριθμητικών αποτελεσμάτων. Διαπιστώθηκε ότι γενικώς υπάρχει δυναμικό μεταφοράς ιζήματος, από το ανάντη τμήμα της ακτής προς το κατάντη, η οποία δείχνει όμως να παρεμποδίζεται σε μεγάλο βαθμό από του μολούς του υφιστάμενου έργου.

ABSTRACT

The observation of erosion in sandy beaches, after the construction of jetties or breakwaters in them, leads to the conclusion that their presence increases the wave action in the downstream thereof. The present diploma thesis explores experimentally the occurrence of this phenomenon in an arithmetic set-up simulating a typical harbour, on a 1:100 scale, constructed on a sandy mildly sloping bathymetry, in the 3-D wave basin of the Laboratory of Harbour Works of the School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens.

During the arithmetic simulation procedure, four different experimental layouts were tested by varying the length of the windward breakwater. Irregular waves of characteristic height H_s ranging from 1.36 m to 3.20 m and periods T_p varying from 5.7 sec to 8.53 sec were tested for all the experimental layouts and for two different wave directions, forming an angle of 45° and 90° with the shoreline.

The dynamic conditions were simulated with the use of the program MIKE 21 and specifically with Parabolic Mild-Slope (PMS), Hydrodynamic (HD) and Non-Cohesive Sediment Transport (ST) modules, for all scenarios.

The arithmetic results are being presented in the form of tables and diagrams, together with an attempt of a quantitative interpretation of them, in order to justify the conclusions drawn. In any case of the wave conditions and layouts of the harbour layouts that were examined, it was concluded that the wave action amplification occurs in a region downstream of the structure. The elongation of the windward breakwater implies the displacement of the wave intensification downstream of the structure, while the occurrence of the phenomenon in question close to the shore is undoubtedly responsible for its erosion.

It was found that generally there is transmission capacity precipitate, from the upstream part of the coast to the downstream, which is seriously hampered by the piers of existing work.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1) Αντικείμενο και σκοπός της διπλωματικής εργασίας	1
1.2) Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Η ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΤΗΣ ΑΚΤΟΓΡΑΜΜΗΣ.....	3
2.1) Οι μηχανισμοί υποχώρησης της ακτογραμμής.....	3
2.2) Οι ελληνικές ακτές.....	4
2.3) Γενική επισκόπηση του φαινομένου της διάβρωσης	6
2.4) Θεωρητικό υπόβαθρο	9
2.5) Βιβλιογραφική επισκόπηση	12
2.6) Προηγούμενες πειραματικές παρατηρήσεις	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΚΥΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ - MIKE21 PARABOLIC MILD SLOPE MODULE (PMS).....	17
3.1) Γενικά χαρακτηριστικά του μοντέλου	17
3.2) Παραβολική προσέγγιση.....	18
3.3) Βασική εξίσωση.....	18
3.4) Οριακές συνθήκες	20
3.5) Θραύση κυματισμών.....	21
3.6) Υπολογισμός κυματικών παραμέτρων	22
3.7) Εφαρμογή μοντέλου	23
3.8) Γραφική απεικόνιση των τεσσάρων διατάξεων προσομοίωσης με το μοντέλο MIKE21-Parabolic Mild Slope Module (PMS).....	24
3.9) Ανάλυση αριθμητικών δεδομένων.....	28
3.10) Αποτελέσματα αριθμητικών μετρήσεων με τη μορφή διαγραμμάτων για γωνία πρόσπτωσης 90° ..	29
3.11) Αποτελέσματα αριθμητικών μετρήσεων με τη μορφή διαγραμμάτων για γωνία πρόσπτωσης 45° ..	32

3.12) Συμπεράσματα από τα αποτελέσματα των αριθμητικών μετρήσεων με τη μορφή διαγραμμάτων για γωνία πρόσπτωσης 45° και 90°	35
3.13) Ποσοτική ερμηνεία των αποτελεσμάτων	36

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ MIKE 21 PMS (PARABOLIC MILD-SLOPE)..... 38

4.1) Αποτελέσματα αριθμητικών και πειραματικών μετρήσεων με τη μορφή διαγραμμάτων και συμπεράσματα για γωνία πρόσπτωσης 90°	38
4.2) Αποτελέσματα αριθμητικών και πειραματικών μετρήσεων με τη μορφή διαγραμμάτων και συμπεράσματα για γωνία πρόσπτωσης 45°	44
4.3) Συμπεράσματα από τα αποτελέσματα αριθμητικών και πειραματικών μετρήσεων για γωνία πρόσπτωσης 45° και 90°	49
4.4) Αποτελέσματα αποκλίσεων αριθμητικών και πειραματικών μετρήσεων με τη μορφή διαγραμμάτων και συμπεράσματα για γωνία πρόσπτωσης 90°	50
4.5) Αποτελέσματα αποκλίσεων αριθμητικών και πειραματικών μετρήσεων με τη μορφή διαγραμμάτων και συμπεράσματα για γωνία πρόσπτωσης 45°	54
4.6) Αποτελέσματα αποκλίσεων πειραματικών και πειραματικών μετρήσεων με τη μορφή συγκριτικών διαγραμμάτων για δύο γωνίες πρόσπτωσης και συμπεράσματα.....	59

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ-MIKE21 FLOW MODEL HYDRODYNAMIC MODULE (HD)..... 64

5.1) Βασικές εξισώσεις	64
5.2) Οριακές συνθήκες	65
5.3) Εφαρμογή μοντέλου	66
5.4) Αποτελέσματα του υδροδυναμικού μοντέλου MIKE 21 HD από την προσομοίωση της παράκτιας κυματογενούς κυκλοφορίας για γωνία πρόσπτωσης 90°	68
5.5) Αποτελέσματα του υδροδυναμικού μοντέλου MIKE 21 HD από την προσομοίωση της παράκτιας κυματογενούς κυκλοφορίας για γωνία πρόσπτωσης 45°	72
5.6) Συμπεράσματα από την προσομοίωση της παράκτιας κυματογενούς μεταφοράς.....	76

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΤΕΡΕΟΜΕΤΑΦΟΡΑΣ - MIKE21 NON - COHESIVE SEDIMENT TRANSPORT MODULE (ST)..... 77

6.1) Θεωρίες στερεομεταφοράς σε συνθήκες αμιγούς ρεύματος	77
6.2) Θεωρίες στερεομεταφοράς σε συνθήκες ρεύματος-κύματος.....	79

6.3)	Εφαρμογή μοντέλου	81
6.4)	Αποτελέσματα μοντέλου στερεομεταφοράς MIKE 21 ST	82
6.5)	Συμπεράσματα από την προσομοίωση της παράκτιας στερεομεταφοράς	90
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ		91
7.1)	Σύνοψη συμπερασμάτων	91
7.2)	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	92
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ		93
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....		95
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....		112

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:Εισαγωγή

1.1) Αντικείμενο και σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται το φαινόμενο της εντατικοποίησης της κυματικής δράσης στα κατάντη λιμένα, με μεταβλητό μήκος προσήνεμου μόλου και διερευνά τις κυματικές συνθήκες κάτω από τις οποίες αυτό εμφανίζεται και σε ποιες περιπτώσεις είναι περισσότερο ή λιγότερο έντονο. Η παρούσα έρευνα βασίστηκε σε μία σειρά παρατηρήσεων διάβρωσης ακτών μετά από κατασκευή μόλου ή κυματοθραύστη σε αμμώδεις ακτές και ακολουθεί την πειραματική διερεύνηση σε κατασκευασμένα έργα, καθώς και την αριθμητική προσομοίωση του ίδιου φαινομένου. Εκπονήθηκε στο πλαίσιο βασικής έρευνας του Εργαστηρίου Λιμενικών Έργων του Ε.Μ.Π. και περιλαμβάνει την πρώτη σειρά αριθμητικών μετρήσεων της ευρύτερης αυτής διερεύνησης. Για τη διεξαγωγή της μαθηματικής προσομοίωσης ψηφιοποιήθηκε το φυσικό ομοίωμα λιμένα που προέβλεπε τρία διαφορετικά μήκη προσήνεμου μόλου και μία διάταξη χωρίς έργα κατά μήκος της ακτής. Στο μοντέλο ελέγχθηκαν κυματισμοί με ποικίλες χαρακτηριστικές παραμέτρους και γωνίες πρόσπτωσης 45ο και 90ο ως προς την ακτή, με στόχο τον προσδιορισμό των συνθηκών γένεσης και ενίσχυσης του υπό μελέτη φαινομένου και τελικά, την εύρεση του βέλτιστου μήκους μόλου για την προστασία της παρακείμενης ακτής. Για τον προσδιορισμό των δυναμικών συνθηκών πραγματοποιήθηκε προσομοίωση με το πρόγραμμα MIKE 21 και συγκεκριμένα με τα μοντέλα Parabolic Mild-Slope (PMS), Hydrodynamic (HD) και Non-Cohesive Sediment Transport (ST).

1.2) Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας

Στις σελίδες που ακολουθούν αναπτύσσονται τα επόμενα κεφάλαια της εργασίας ως εξής:

- Στο 2^ο Κεφάλαιο γίνεται μια γενική παρουσίαση του φαινομένου και του προβλήματος της διάβρωσης των ακτών, διατυπώνονται τα απαραίτητα θεωρητικά στοιχεία και η βιβλιογραφική επισκόπηση σε μελέτες που αφορούν στο εν λόγω θέμα και περιγράφονται οι πειραματικές εγκαταστάσεις του Εργαστηρίου Λιμενικών Έργων, όπου διεξήχθησαν τα πειράματα, καθώς και τα όργανα μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν για τη συλλογή των πειραματικών δεδομένων.
- Στο 3^ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται κυματικό μοντέλο - mike21 parabolic mild slope module (pms) και συγκεκριμένα τα γενικά χαρακτηριστικά του μοντέλου, οι βασικές εξισώσεις λειτουργίας του, οι οριακές συνθήκες καθώς και τα αποτελέσματα των αριθμητικών μετρήσεων με τη μορφή διαγραμμάτων
- Στο 4^ο Κεφάλαιο γίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων του πειράματος και του κυματικού μοντέλου mike21 parabolic mild slope υπό μορφή πινάκων και διαγραμμάτων.
- Στο 5^ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται το υδροδυναμικό μοντέλο MIKE 21 (HD), και συγκεκριμένα τα γενικά χαρακτηριστικά του μοντέλου, οι βασικές εξισώσεις λειτουργίας του, οι οριακές συνθήκες, η γραφική απεικόνιση και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων.
- Στο 6ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται το μοντέλο μεταφοράς ιζήματος MIKE 21 (ST), και συγκεκριμένα τα γενικά χαρακτηριστικά του μοντέλου, οι βασικές εξισώσεις

λειτουργίας του, οι οριακές συνθήκες ,η γραφική απεικόνιση και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων.

- Στο 7^ο Κεφάλαιο διατυπώνονται τα τελικά συμπεράσματα, καθώς και ορισμένες προτάσεις για επέκταση της έρευνας.
- Στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α παρουσιάζονται τα σχήματα μαθηματικών προσομοιώσεων για τα ύψη κύματος.
- Στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β παρουσιάζονται τα σχήματα μαθηματικών προσομοιώσεων για τις τάσεις ακτινοβολίας

Κεφάλαιο 2: Η μετακίνηση της ακτογραμμής

Οι ακτές αναλογικά με τα φυσικά χαρακτηριστικά τους την κλίση τους (την κλίση της υφαλοκρηπίδας τους), τη γεωλογική σύσταση του εδάφους (αμμώδεις ή βραχώδεις ακτές) και την ένταση των φυσικών θαλάσσιων φαινομένων, αντιδρούν στην άνοδο της στάθμης της θάλασσας και διαβρώνονται σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό. Η μετακίνηση ποσοτήτων άμμου (διάβρωση/ απόθεση) είναι μία φυσική διαδικασία η οποία προκαλείται από τον συνδυασμό διαφόρων φυσικών

2.1) Οι μηχανισμοί υποχώρησης της ακτογραμμής.

Η σημασία κατανόησης των διαδικασιών υποχώρησης των ακτών είναι ιδιαίτερα μεγάλη για τον άνθρωπο λόγω της σημαντικής αξίας που έχουν οι περιοχές αυτές για την ανθρώπινη ζωή. Έτσι, η συμπεριφορά και οι τρόποι αντίδρασης των ακτών σε αλλαγές στα χαρακτηριστικά των κυμάτων, στις αποθέσεις των υλικών (ιζηματογενή πετρώματα) και στις ανθρώπινες δραστηριότητες, αποτελούν θέματα που πρέπει να μελετηθούν διεξοδικά καθώς

- a) Οι παραλίες είναι ιδιαίτερα δημοφιλείς περιοχές αναψυχής.
- b) Οι παραλιακές ζώνες αποτελούν τα «αμορτισέρ» των παράκτιων περιοχών, καθώς προστατεύουν τους υδροβιότοπους, τις παράκτιες καλλιέργειες και οικοσυστήματα από τη δράση των κυμάτων
- c) Πολλοί άνθρωποι κατοικούν σε παραθαλάσσιες περιοχές παγκοσμίως.
- d) Κάθε χρόνο ξοδεύονται μεγάλα ποσά από πολλά παράκτια κράτη για τον σχεδιασμό προστασίας και την τεχνητή θρέψη των ακτών
- e) Τα αποθέματα των ιζημάτων, των υλικών εναπόθεσης και συνεπώς η ισορροπία της κάθε παραλίας επηρεάζονται άμεσα από τα ανθρώπινα κατασκευαστικά έργα
- f) Η άμμος αποτελεί φυσικό πόρο μεγάλης οικολογικής σημασίας για τις περισσότερες παραλιακές περιοχές, καθώς έχει συγκεκριμένα φυσικά χαρακτηριστικά ανά τόπο και βρίσκεται σε έλλειψη

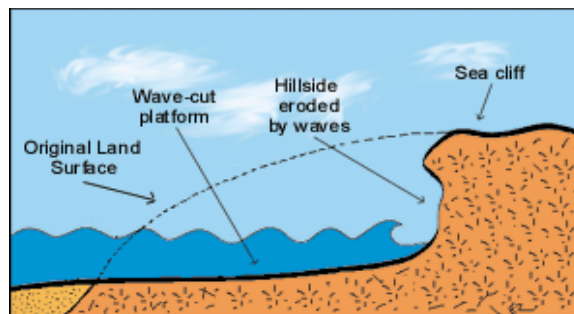
Όσον αφορά τη μεταβολή της ακτογραμμής, αυτή επέρχεται ως το αθροιστικό αποτέλεσμα δράσης όλων των παρακάτω παραγόντων:

- **Οι πλημμύρες :** Η οπισθοχώρηση της ακτογραμμής επέρχεται εξαιτίας της ανόδου της στάθμης της θάλασσας. Ειδικότερα, οι παράκτιες περιοχές μικρής κλίσης (ομαλού ανάγλυφου) αντιμετωπίζουν το φαινόμενο διείδυσης θαλάσσιων υδάτων ίσως και χιλιόμετρα στο εσωτερικό της στεριάς. Οι καταστροφές σε οικισμούς, καλλιέργειες και στα παράκτια οικοσυστήματα είναι τεράστια.
- **Η ιστορική οπισθοχώρηση της ακτογραμμής :** Οι ακτές αντιδρούν ιστορικά στις όποιες αλλαγές κλιματικών συνθηκών και στην άνοδο της στάθμης της θάλασσας με το πέρασμα των χρόνων. Έτσι, παράλληλα με την άνοδο του επιπέδου των ωκεανών και των θαλασσών, εξελίσσονται και οι παραλίες, οπισθοχωρώντας.
- **Το φαινόμενο της διάβρωσης :** Οι ακτές ανάλογα με την κλίση τους (την κλίση της υφαλοκρηπίδας τους), τη γεωλογική σύσταση του εδάφους (αμμώδεις ή βραχώδεις ακτές) και την ένταση των φυσικών θαλάσσιων φαινομένων, αντιδρούν στην άνοδο της στάθμης της θάλασσας και διαβρώνονται σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό.

Η μετακίνηση ποσοτήτων άμμου (διάβρωση) μακριά από την παραλία είναι μία φυσική διαδικασία η οποία προκαλείται από τον συνδυασμό διαφόρων φυσικών δυνάμεων όπως:

- a) Η αλληλεπίδραση των κυμάτων με τα υποθαλάσσια ρεύματα και τις αποθέσεις υλικών στον πυθμένα της θάλασσας.
- b) Τα θαλάσσια ρεύματα που δημιουργούνται εξαιτίας ισχυρών ανέμων μακριά από την ακτή.
- c) Τα βίαια θαλάσσια ρεύματα.
- d) Τα ρεύματα της παλίρροιας.
- e) Οι κυματικές καταγίδες.
- f) Τα ρεύματα που δημιουργούνται και κατευθύνονται από δυνάμεις της βαρύτητας.
- g) Η παροδική άνοδος και κάθοδος της στάθμης της θάλασσας εξαιτίας του αέρα και των κυμάτων.
- h) Η μετακίνηση υλικών εξαιτίας των δυνάμεων της βαρύτητας.

Μεγάλη σημασία στην όλη διαδικασία της διάβρωσης και την μεταφορά των ιζημάτων προς μεγαλύτερα βάθη, έχει και η κλίση του βυθού της θάλασσας. Μια μικρή κλίση μπορεί να επιβραδύνει την εγκάρσια μετακίνηση υλικού, διαχωρίζοντας έτσι την άνοδο της στάθμης της θάλασσας από την διάβρωση των ακτών, σαν φαινόμενα. Αντίθετα, μια μεγάλη, απότομη κλίση επιφέρει συχνά την επιτάχυνση του φαινομένου της διάβρωσης αλλά και της ανόδου της στάθμης της θάλασσας



Εικόνα 2.1 Διάβρωση ακτής με απότομη κλίση. Η διακεκομμένη γραμμή συμβολίζει το αρχικό σχήμα της ακτής

2.2) Οι ελληνικές ακτές

Πως επηρεάζονται οι παράκτιες περιοχές στην Ελλάδα από την άνοδο της στάθμης της θάλασσας.

Όσον αφορά την άνοδο της στάθμης της θάλασσας στη λεκάνη της Μεσογείου, οι επιστημονικές προβλέψεις περιγράφουν μια άνοδο της τάξης του ενός μέτρου ή ακόμα και παραπάνω μέχρι το έτος 2100. Από αυτήν την αναμενόμενη άνοδο είναι δεδομένο ότι θα επηρεαστούν όλες οι παράκτιες και νησιωτικές περιοχές της Ελλάδας, οι ευαίσθητες περιοχές στα δέλτα ποταμών όπως είναι ο Έβρος, ο Στρυμόνας και ο Νέστος, όπως επίσης και περιοχές μικρής κλίσης και ιδιαίτερα χαμηλού υψομέτρου γύρω από το Μεσολόγγι, στην Θράκη και στην Κρήτη. Επίσης, πρόβλημα θα αντιμετωπίσουν και περιοχές που εμφανίζουν έντονη καθίζηση εξαιτίας γεωλογικών φαινομένων και μετακινήσεων όπως είναι και η Θεσσαλονίκη.



Εικόνα 2.2



Εικόνα 2.3

Εικόνες 2.2 και 2.3 : Στις εικόνες αυτές φαίνονται τμήματα των δέλτα των ποταμών Αχελώου και Νέστου. Οι συγκεκριμένες περιοχές είναι βιότοποι μεγάλης οικολογικής σημασίας.

Αιτίες της μετακίνησης της ακτογραμμής στον ελληνικό χώρο.

Η ακτογραμμή υπόκειται συνεχώς σε μεταβολές που προκαλούνται από τη συνεχή δράση της θάλασσας πάνω στη στεριά. Έτσι, έχουμε την υποχώρηση της ακτογραμμής και την απώλεια γης εξαιτίας του φαινομένου της παράκτιας διάβρωσης. Η διάβρωση που συντελείται στις ακτές είναι αποτέλεσμα ατμοσφαιρικών διεργασιών που προκαλεί ο άνεμος, οι ισχυρές βροχοπτώσεις και οι καταιγίδες στις ακτές, επίδρασης θαλασσίων παραγόντων (κύματα, παλίρροια, θαλάσσια ρεύματα) ή ακόμα και της επίδρασης των θαλασσίων οργανισμών.

Για την περίπτωση του ελλαδικού χώρου, η υποχώρηση - μετακίνηση της ακτογραμμής σε διάφορες περιοχές οφείλεται και σε φαινόμενα όπως :

- a) Οι σεισμογενείς καταβυθίσεις παράκτιων περιοχών μέχρι βάθους 200 μέτρων. Πρόσφατο παράδειγμα η περιοχή της Αιγιαλείας της Ν. Αχαΐας το 1962
- b) Η διάβρωση των ακτών από φυσικά αίτια, όπως οι αμμώδεις παραλίες της Κω.
- c) Οι διαβρώσεις των ακτών λόγω τεχνικών έργων. Κλασικό παράδειγμα οι αμμοληψίες των Γερμανών το 1942 στην περιοχή του αεροδρομίου του Μάλεμε των Χανίων και η αναπόφευκτη διάβρωση σε παρακείμενη ακτή.
- d) Η διάβρωση από βραδεία καταβύθιση ακτής, όπως σε περιοχή της Ανατολικής Κρήτης που κατακλύζεται από τη θάλασσα.
- e) Οι προσχώσεις από φυσικά αίτια, π.χ. από ποταμό. Κλασικό παράδειγμα η περιοχή των Θερμοπυλών και της Θεσσαλονίκης.
- f) Οι προσχώσεις από τεχνητά αίτια, όπως μπαζώματα.

Με βάση τα παραπάνω αναδεικνύεται η εύθραυστη σχέση μεταξύ της παράκτιας ζώνης και των φυσικών (γεωλογικών) εν γένει φαινομένων που συμβάλλουν στην ανακατανομή του υλικού της ακτής. Από αυτές τις μετακινήσεις υλικού της παραλίας ή την αλλαγή της εικόνας του ανάγλυφου (καθιζήσεις, καταβυθίσεις) μπορεί να έχουμε υποχώρηση ή και εξάπλωση της ξηράς. Πάντως, εξίσου σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της κάθε παραλιακής ζώνης και στη μετακίνηση της ακτογραμμής έχει και ο ίδιος ο άνθρωπος με τις δραστηριότητες τις οποίες αναπτύσσει. Όπως φαίνεται από τα παραπάνω παραδείγματα, συχνά στην ιστορία της Ελλάδος, η κατασκευή τεχνικών έργων σε παράκτιες περιοχές ή η ανάπτυξη άλλων

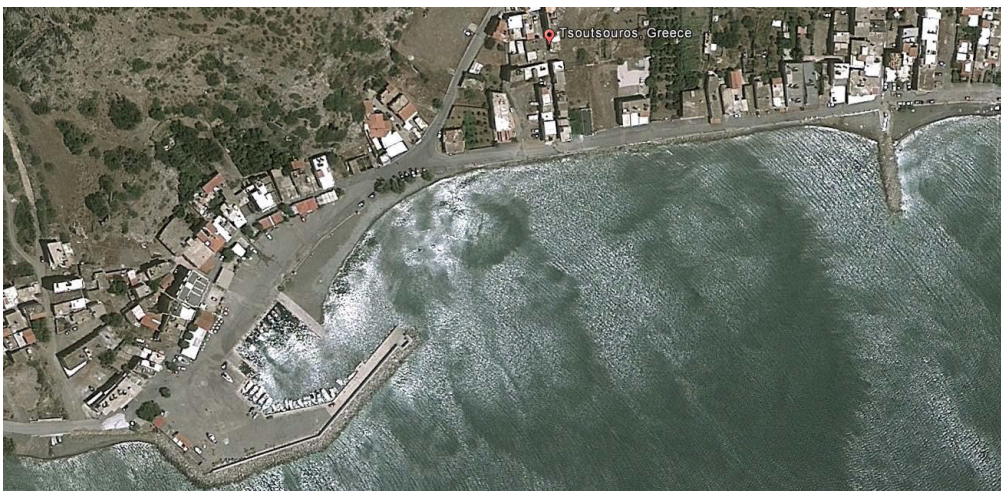
δραστηριοτήτων, διατάραξε τις φυσικές ισορροπίες και επιτάχυνε τις διαδικασίες διάβρωσης και υποχώρησης της ακτογραμμής. Για αυτό ακριβώς θα πρέπει όλα τα αναπτυξιακά έργα (συμπεριλαμβανομένων και των έργων προστασίας) να επιτελούνται αφού ληφθούν σοβαρά υπόψη όλες οι φυσικές τάσεις και ιδιαιτερότητες της κάθε παράκτιας περιοχής της Ελλάδας.

2.3) Γενική επισκόπηση του φαινομένου της διάβρωσης

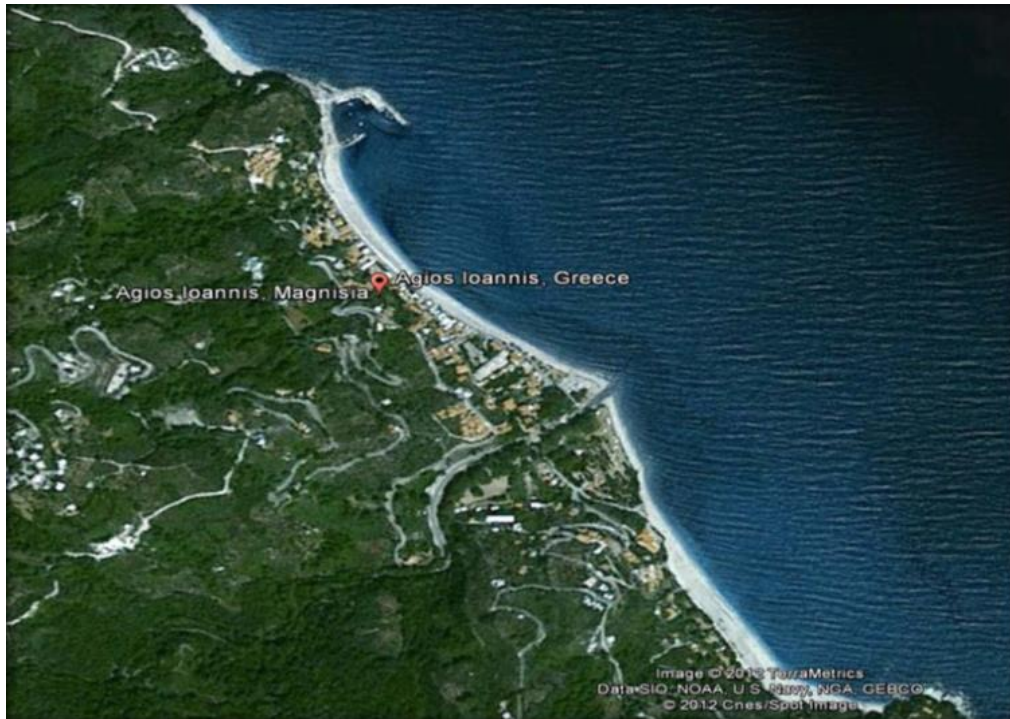
Σειρά παρατηρήσεων διάβρωσης αμμωδών ακτών, ύστερα από κατασκευή μόλων ή κυματοθραυστών σε αυτές, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η ύπαρξη ή εισαγωγή οποιουδήποτε στερεού μετώπου, υπό τη μορφή λιμενικών έργων (μόλοι και κυματοθραύστες), έργων παράκτιας προστασίας (πρόβολοι και κυματοθραύστες), αλλά και φυσικών σχηματισμών επί της ακτής, στο πεδίο ροής θαλασσίων κυμάτων διαταράσσει τη μετάδοσή τους και μεταβάλλει τη δυναμική ισορροπία μεταξύ του υγρού στοιχείου και του διακινούμενου ιζήματος. Η μεταβολή αυτή έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση/ μείωση της κυματικής διαταραχής και λόγω αυτής, τη διάβρωση/ απόθεση ιζήματος σε θέσεις όπου, πριν την εισαγωγή του έργου, δεν υπήρχαν.

Στην περίπτωση βραχώδους ακτής στα κατάντη του στερεού μετώπου, αναμένεται, με δυσμενή θεώρηση, η πιθανή αύξηση της κυματικής υπερπήδησης, λόγω της αυξημένης προσπίπτουσας ενέργειας. Αντίθετα, σε αλλοιώσιμες ακτές, όπως οι αμμώδεις, δημιουργείται πρόβλημα διάβρωσής τους με την κυματογενή απομάκρυνση υλικού. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται συνήθως στο συνδυασμό των μηχανισμών εντατικοποίησης της κυματικής δράσης στα αμέσως κατάντη έργων όπως οι μόλοι και οι κυματοθραύστες και συγκράτησης της στερεομεταφοράς στα ανάντη τους. Σημειώνουμε πως το ενδιαφέρον της παρούσας διπλωματικής εργασίας εστιάζεται στην εξέταση του πρώτου μηχανισμού.

Στην Ελλάδα, έχει παρατηρηθεί πληθώρα παραδειγμάτων διάβρωσης ακτών στα αμέσως κατάντη λιμένων με μόλους, όπως έχουν καταγραφεί από τον Μουτζούρη (2010) και παρουσιάζονται ενδεικτικά στις Εικόνες 2.1, 2.2 και 2.3.



Εικόνα 2.4 Λιμένας Τσούτσοιρου Ηρακλείου Πηγή: Μουτζούρης (2010).



Εικόνα 2.5 Λιμένας Αγ. Ιωάννη Πηλίου Πηγή: Μουτζούρης (2010)



Εικόνα 2.6 Αλυκές Λευκίμης Κέρκυρας Πηγή: Μουτζούρης (2010)

Για την προστασία της κατάντη ακτής από τη διάβρωση αυτού του είδους εφαρμόζονται οι εξής τύποι έργων παράκτιας προστασίας. Θωράκιση του μετώπου της ακτής με φυσικούς λίθους και ογκολίθους (Εικόνα 2.4)

- a) Αποσπασμένοι κυματοθραύστες από φυσικούς ογκολίθους, κατά μήκος της ακτής (Εικόνα 2.5)
- b) Κυματοθραύστες πρόβολοι από σκυρόδεμα και φυσικούς ογκολίθους, κάθετοι στην ακτή (Εικόνες 2.5, 2.6)

Ο τύπος του έργου που επιλέγεται σε κάθε περίπτωση εξαρτάται από αρκετές μεταβλητές, οι κυριότερες των οποίων είναι, ενδεικτικά, η μορφολογία, το μήκος και οι χρήσεις της ακτής υπό

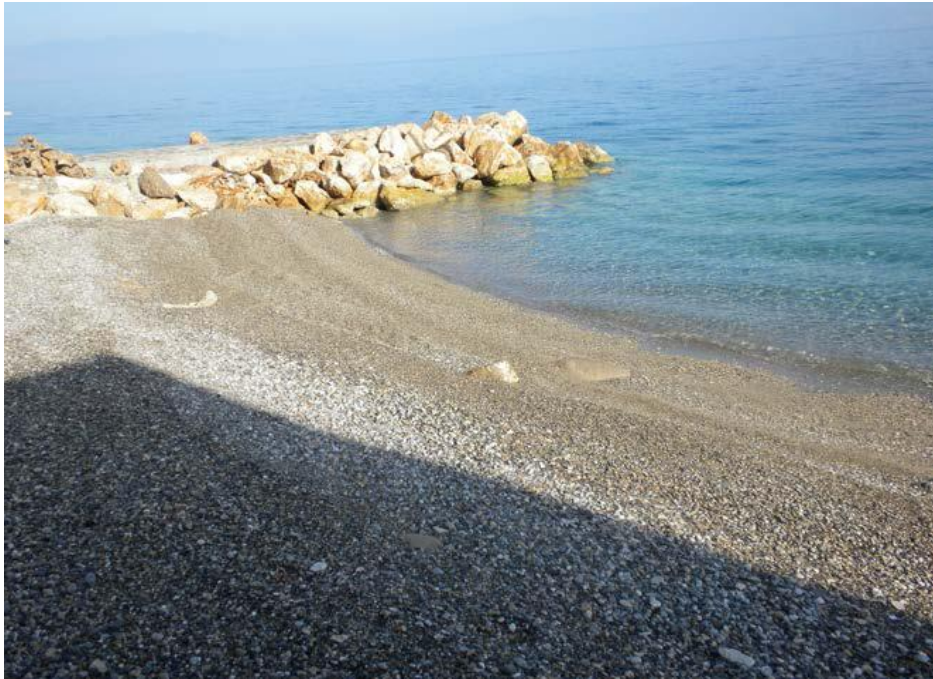
διάβρωση, η βυθομετρία, το ίζημα στο θαλάσσιο πυθμένα, το κυματικό κλίμα και η ναυσιπλοΐα. Οι προαναφερθείσες μέθοδοι παράκτιας προστασίας παρουσιάζουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Ειδικότερα, η πρώτη ενδείκνυται για απότομες βαθυμετρίες και μικρές λιμενολεκάνες και είναι οικονομική και εύκολα εφαρμόσιμη, αλλά επιβαρύνει οπτικά την ακτή και καθιστά σχεδόν απαγορευτική τη χρήση της για αναψυχή. Αντίθετα, οι δύο επόμενες έχουν μεγαλύτερο κόστος και απαιτούν πολύ εξειδικευμένη μελέτη. Αποτελούν, όμως, αποδεκτή λύση από τους λουόμενους, αφού εξασφαλίζουν συνθήκες ήρεμης θάλασσας, με την απόσβεση των κυμάτων στους κυματοθραύστες.



Εικόνα 2.7 Θωράκιση με φυσικούς ογκολίθους, Λατσί Κύπρου



Εικόνα 2.8 Αποσπασμένοι κυματοθραύστες και κυματοθραύστες πρόβολοι, Κάτω Πύργος Κύπρου

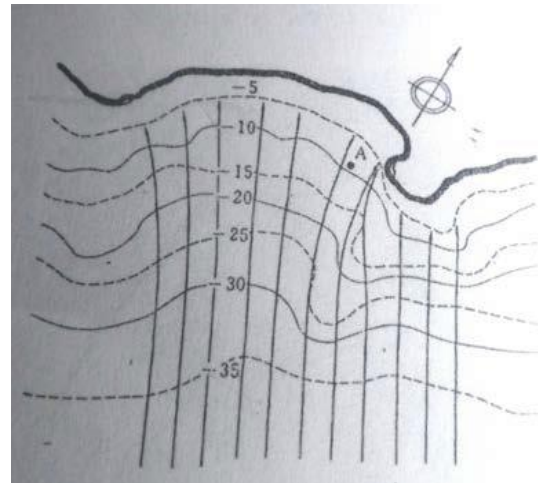
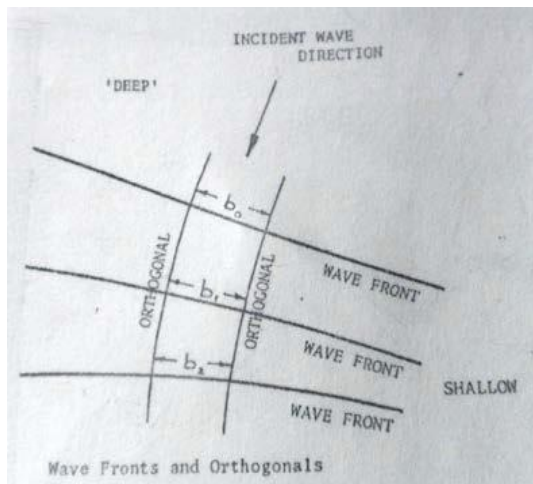


Εικόνα 2.9 Κυματοθραύστης πρόβολος από φυσικούς ογκολίθους, Κορινθιακός Κόλπος

Συχνά, η κατασκευή λιμενικών έργων μικρής κλίμακας, όπως αλιευτικά καταφύγια και λιμένες σκαφών αναψυχής, συνεπάγονται την αναπόφευκτη κατασκευή πρόσθετων έργων προστασίας των παρακείμενων ακτών, το κόστος των οποίων είναι πιθανό να υπερβαίνει αυτό του αρχικού έργου, χωρίς εντέλει να διασφαλίζεται η προστασία των ακτών. Για το λόγο αυτό, τα τελευταία χρόνια, εξετάζεται το ερώτημα για τον αν ενδείκνυται η κατασκευή ανάλογων έργων σε αμμώδεις ακτές ή αν θα πρέπει να περιορίζεται εντός των ήδη 7 υπαρχουσών λιμενικών εγκαταστάσεων ή σε περιοχές με βραχώδεις ακτές, όπου το φαινόμενο μετακίνησης ιζημάτων περιορίζεται στο ελάχιστο.

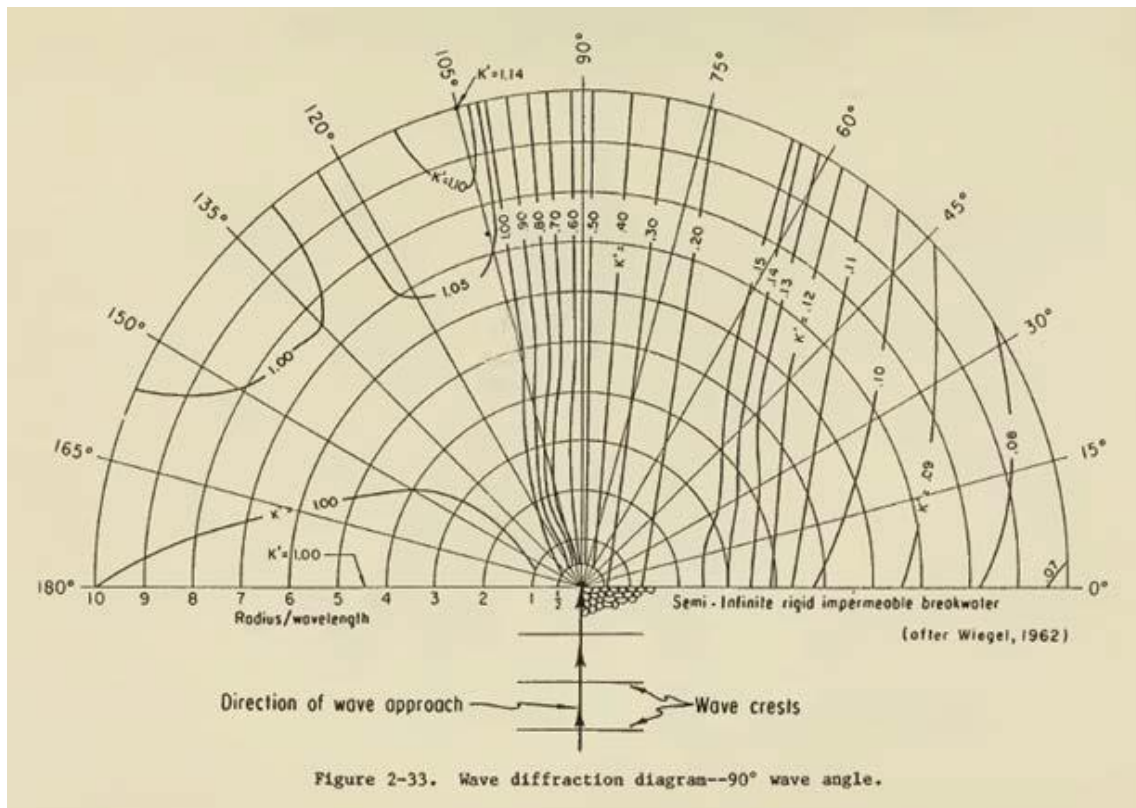
2.4) Θεωρητικό υπόβαθρο

Όπως σημειώθηκε νωρίτερα, η παρουσία στερεών ορίων στο θαλάσσιο πεδίο προκαλεί μεταβολή στο πεδίο μετάδοσης του κυματισμού, τόσο όσον αφορά τη διεύθυνση, όσο και τα χαρακτηριστικά του. Αυτό οφείλεται στα φαινόμενα της διάθλασης, όταν συνοδεύεται από αντίστοιχη μεταβολή της βυθομετρίας κοντά στο στερεό όριο, και της περίθλασης. Από τη Θαλάσσια Υδραυλική, είναι γνωστό ότι η πύκνωση των ορθογωνικών των προσπίπτοντων κυματισμών λόγω διάθλασης επιφέρει αύξηση του ύψους κύματος H . Η διάθλαση οφείλεται αποκλειστικά στη μορφή των ισοβαθών και άρα, στην τοπογραφία της θαλάσσιας περιοχής. Η πύκνωση υπολογίζεται από την απόσταση b δύο διαδοχικών ορθογωνικών (Σχήμα 2.1α). Εάν σε μία θέση 2 η απόσταση $b_2 < b_1$ από μία άλλη θέση 1, προκαλείται πύκνωση των ορθογωνικών, με αποτέλεσμα $H_2 > H_1$, οπότε η προσπίπτουσα στην ακτογραμμή κυματική ενέργεια αυξάνει. Η περίπτωση αυτή απεικονίζεται στο Σχήμα 2.1β, όπου παρατηρείται πύκνωση στα αριστερά της εδαφικής προεξοχής, η οποία θα μπορούσε να αποτελεί έναν προσήνεμο μόλο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της κυματικής διαταραχής στα αμέσως κατάντη της προεξοχής, σε σύγκριση με δυτικότερα. Η πύκνωση των ορθογωνικών οφείλεται αποκλειστικά και μόνο στην βυθομετρία της περιοχής, σε συνδυασμό με την επίδραση του στερεού ορίου, εν προκειμένω ενός προσήνεμου μόλου.

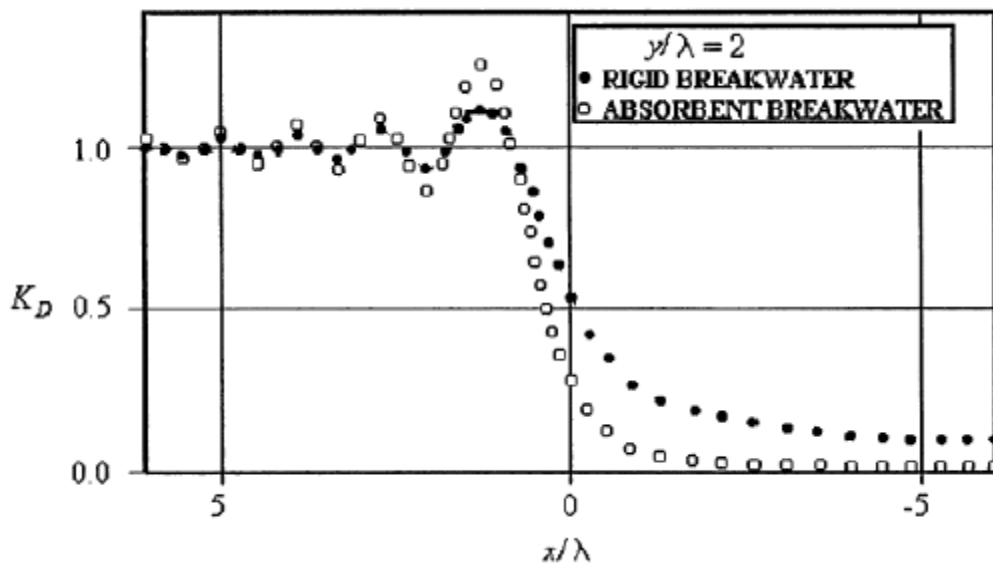


Σχήμα 2.1: Αύξηση κυματικής ενέργειας λόγω διάθλασης των κυμάτων Πηγή: Μουτζούρης (2010)

Πέραν της διάθλασης, όταν οι κυματισμοί προσπίπτουν σε προσήνεμο μόλο υπό ορισμένες γωνίες, υφίστανται περίθλαση, η οποία προκαλείται αποκλειστικά από την ύπαρξη του έργου. Για γραμμικούς και μονοχρωματικούς κυματισμούς ο μηχανισμός του φαινομένου αυτού είναι γνωστός. Ο Sommerfeld (1896) πρώτος παρουσίασε την περίθλαση του φωτός και οι Penny & Price (1952) εφάρμοσαν τη θεωρία αυτή για κανονικούς κυματισμούς υδάτινης επιφάνειας, οι οποίοι προσπίπτουν σε ημίπειρο κυματοθραύστη, υπό διάφορες γωνίες, για σταθερό βάθος πυθμένα. Η επίλυση των εξισώσεων αυτών, που περιλαμβάνουν τα λεγόμενα ολοκληρώματα Fresnel, είναι αρκετά περίπλοκη και γίνεται με αριθμητικές μεθόδους. Ο Weigel (1962) συνέταξε πίνακες και χάραξε εύχρηστα διαγράμματα περίθλασης για κανονικούς κυματισμούς, στα οποία εντοπίζονται περιοχές αυξημένης κυματικής δράσης στα κατάντη ενός προσήνεμου μόλου, σε σχέση με τα βαθιά $H > H_0$. Πιο συγκεκριμένα, με βάση τα διαγράμματα αυτά, αναμένεται ενίσχυση της κυματικής δράσης για προσπίπτοντες κυματισμούς με διεύθυνση ίση ή μεγαλύτερη των 75° σε μη απορροφητικό κυματοθραύστη έως και 15%, όπως παρουσιάζεται στο διάγραμμα του Σχήματος 2.2. Η αύξηση αυτή, για απορροφητικό κυματοθραύστη, κυματισμούς με διεύθυνση πρόσπτωσης κάθετη στον άξονά του και απόσταση από αυτόν διπλάσια του μήκους κύματος, ανέρχεται, κατά τους Penny & Price (1952), στο 30% του προσπίπτοντος κυματισμού (Σχήμα 2.3).

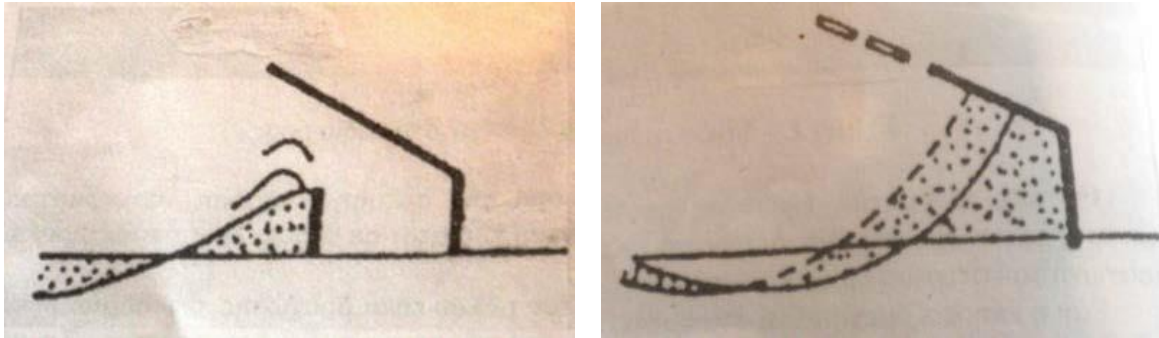


Σχήμα 2.2: Αύξηση κυματικής ενέργειας λόγω περίθλασης των κυμάτων, κατά Wiegel (1962)



Σχήμα 2.3: Συντελεστές περίθλασης κατάντη απορροφητικού και μη απορροφητικού κυματοθραύστη, σε απόσταση $y/\lambda=2$ από τον άξονά του Πηγή: Κατσαρδή κ.ά. (2011)

Πιο πρόσφατα, οι McCormick & Kraemer (2000), βασιζόμενοι σε προτάσεις των Abramowitz & Stegun (1964), προσέγγισαν τα δυσεπίλυτα ολοκληρώματα Fresnel με πολυώνυμα, πετυχαίνοντας εξαιρετική ακρίβεια και δίνοντας, έτσι, τη δυνατότητα στους μηχανικούς να αποφεύγουν τη δύσκολη επίλυσή τους ή τη μικρής ακρίβειας γραμμική παρεμβολή μεταξύ των γνωστών διαγραμμάτων περίθλασης. Ο μηχανισμός της διαβρωτικής δράσης ενός μόλου στην αμέσως κατάντη αμμώδη ακτή περιγράφεται σχηματικά στα επόμενα σχήματα. Στο Σχήμα 2.4α υπάρχει υπήνεμος μόλος, ενώ στο 2.4β δεν υπάρχει. Και στις δύο περιπτώσεις, εμφανίζεται υποχώρηση της ακτογραμμής, δημιουργώντας προβλήματα στις χρήσεις της παραλίας, αλλά και σε κτήρια πλησίον της ακτογραμμής. 4α 4β



Σχήμα 2.4: Σχηματική παρουσίαση κατάντη διάβρωσης. Πηγή: Μουτζούρης (2010)

2.5) Βιβλιογραφική επισκόπηση

Ο Filianoti (2000) εισήγαγε στο πρόβλημα της περίθλασης γύρω από στερεά όρια μη κανονικούς γραμμικούς κυματισμούς εστιασμένης ενέργειας, και μάλιστα την πιθανότερη μορφή μεγάλου τυχαίου κυματισμού σύμφωνα με τους Tromans *et al.* (1991) (focused NewWave). Οι κυματισμοί αυτοί προσπίπτουν κάθετα σε αποσπώμενο κυματοθραύστη και μεταδίδονται σε σταθερό βάθος. Filianoti (2000) εξέτασε κυματισμούς με πολύ μεγάλη κατευθυντικότητα και διαπίστωσε ότι, ενώ η κυματική δράση είναι μεγαλύτερη στη σκιά του κυματοθραύστη σε σχέση με τους μονοχρωματικούς κυματισμούς, κατάντη αυτού δεν παρουσιάζεται ενίσχυσή της, όπως συμβαίνει στην περίπτωση των μονοχρωματικών κυματισμών.

Αντίστοιχες προσπάθειες έχουν γίνει και με μη γραμμικά αριθμητικά μοντέλα που χρησιμοποιούν phase-averaged εξισώσεις (Booij *et al.*, 1999). Μία σειρά τέτοιων αριθμητικών πειραμάτων έγινε από τους Enet *et al.* (2006), στην προσπάθειά τους να εισάγουν το φαινόμενο της περίθλασης στα προαναφερθέντα μοντέλα (Holthuijsen *et al.*, 2003). Η περίθλαση των κυματισμών εξετάζεται υπό την επίδραση τυχαίων μη γραμμικών κυματισμών με μικρή και μεγάλη κατευθυντικότητα που μεταδίδονται σε σταθερό βάθος. Στην περίπτωση των κυματισμών με μεγάλη κατευθυντικότητα, δεν εμφανίζεται αύξηση της κυματικής δράσης στα κατάντη του κυματοθραύστη, όπως και στον Filianoti (2000). Αντίθετα, στην περίπτωση της μικρής κατευθυντικότητας, η εν λόγω κυματική δράση εντείνεται κατά 5-10%. Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να αναφερθεί ότι η κατευθυντικότητα σε 10 περιοχές μη βαθέων υδάτων, όπου κατασκευάζονται τα παράκτια έργα, αναμένεται να είναι μικρή, λόγω του φαινομένου της διάθλασης. Σε κάθε περίπτωση, όμως, οι κυματικές συνθήκες έχουν πρωτεύοντα ρόλο στην εξέλιξη του εξεταζόμενου φαινομένου.

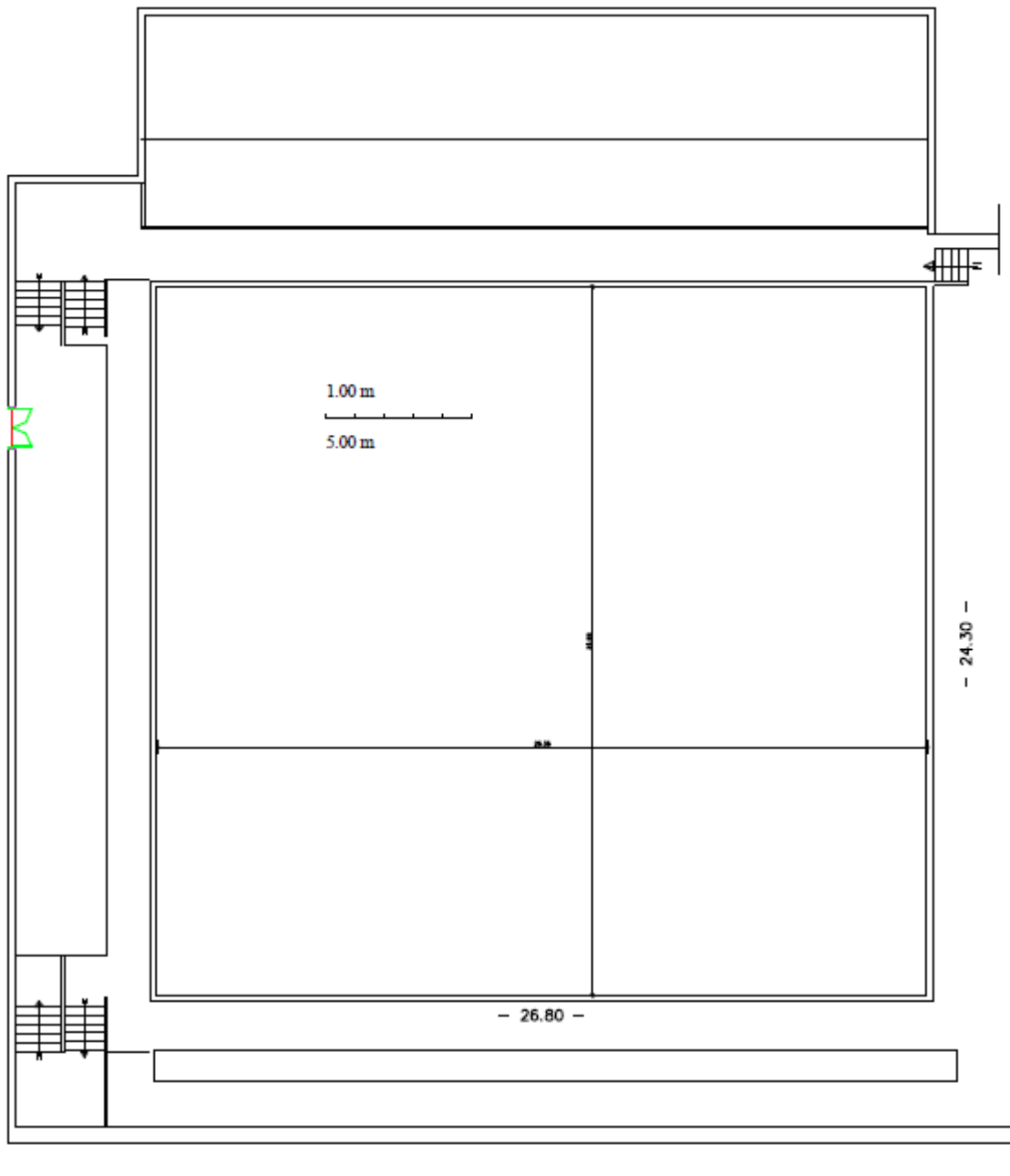
2.6) Προηγούμενες πειραματικές παρατηρήσεις

Για την επαλήθευση της θεωρητικής πρόβλεψης της εντατικοποίησης της κυματικής δράσης στα αμέσως κατάντη ενός λιμένα υπό την επίδραση της βυθομετρίας και ενός προσήνεμου μόλου εκτελέστηκαν ειδικές πειραματικές μετρήσεις σε τρισδιάστατη δεξαμενή του Εργαστηρίου Λιμενικών Έργων Ε.Μ.Π.

Η δεξαμενή, η οποία παρουσιάζεται στην ακόλουθη Εικόνα 3.1, έχει εξωτερικές διαστάσεις 26,80 x 24,30 m, όπως απεικονίζονται στην κάτοψη του Σχήματος 3.1, βάθος 1,00 m και εντός αυτής είναι εγκατεστημένο σύστημα παραγωγής τυχαίων κυματισμών. Για την απορρόφηση των προσπιπτόντων κυμάτων, έχουν κατασκευασθεί στα τοιχώματά της αποσβεστικές επενδύσεις από λιθορριπή με κλίση πρανών 1:2 και κοκκομετρία τέτοια ώστε να εξασφαλίζεται πολύ χαμηλός συντελεστής ανάκλασης, ενώ στην περιοχή των κυματογεννητριών, τμήμα των αποσβεστικών επενδύσεων έχει καλυφθεί με γεώφασμα. για την ενίσχυση της απορρόφησης των προσπιπτόντων εκεί κυματισμών.



Εικόνα 2.10 Δεξαμενή Δοκιμών Δ1 του Εργαστηρίου Λιμενικών Έργων του Ε.Μ.Π.



Σχήμα 2.4: Δεξαμενή Δοκιμών Δ1 του Εργαστηρίου Λιμενικών Έργων του Ε.Μ.Π.

2.6.1 Σύστημα παραγωγής τυχαίων κυματισμών

Το σύστημα παραγωγής κυματισμών κινείται υδραυλικά και αποτελείται από τα εξής τμήματα:

- i. Υδραυλικό μηχανισμό-κινητήρα
- ii. Υδραυλικά έμβολα
- iii. Τρεις κυματιστήρες
- iv. Σύστημα ελέγχου
- v. Κατάλληλο λογισμικό

Ο υδραυλικός μηχανισμός αποτελείται από μία αντλία και ένα δοχείο λαδιού, το οποίο κινεί τα έμβολα. Τα έμβολα είναι εγκατεστημένα επί των κυματιστήρων και κινούν τους βραχίονες των γεννητριών, οι οποίοι με τη σειρά τους κινούν το κατακόρυφο μέτωπο των κυματιστήρων και παράγονται τα κύματα. Το μέτωπο έκαστου κυματιστήρα έχει πλάτος 6,00 m. Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκαν τρεις κυματιστήρες, τα μέτωπα των οποίων καλύπτουν συνολικό μήκος 18,00m στη δεξαμενή και κινούνται ταυτόχρονα. Το ύψος έκαστου μετώπου είναι 1,20 m. Υπάρχει η δυνατότητα μετατόπισης των κυματιστήρων, ώστε να ελέγχεται το προσομοίωμα με διαφορετικές διευθύνσεις προσπτώσεως κυμάτων. Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης εργασίας, οι διευθύνσεις πρόσπτωσης κυμάτων που εξετάστηκαν είναι η 45ο και 90ο ως προς την ακτή.

Οι εντολές για τη λειτουργία του υδραυλικού συστήματος δίδονται μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή με το κατάλληλο λογισμικό στο σύστημα ελέγχου. Το λογισμικό, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή των κυμάτων είναι το πακέτο “WAVEGEN SD” της Αγγλικής Εταιρίας “H.R. Wallingford”, το οποίο έχει τη δυνατότητα παραγωγής μονοχρωματικών (ημιτονοειδών) κυματισμών και φασματικών διαταραχών διαφόρων μορφών – τυχαίων κυματισμών.

2.6.2 Μετρητές κύματος

Κατά την πειραματική διαδικασία, χρησιμοποιήθηκαν τρεις μετρητές κύματος τύπου αντιστάσεως στα βαθειά νερά και οκτώ μετρητές κύματος με ηχοβολιστικούς αισθητήρες στα ρηχά, οι οποίοι παρουσιάζονται στις Εικόνες 3.2α και 3.2β, αντίστοιχα.



Εικόνα 2.11 Μετρητής τύπου αντίστασης



Εικόνα 2.12 Ηχοβολιστικός μετρητής

Οι μετρητές κύματος τύπου αντιστάσεως αποτελούνται από δύο σύρματα στερεωμένα σε στέλεχος στηριζόμενο σε τρίποδο και μετρούν τη στιγμιαία μεταβολή της στάθμης του ύδατος. Η διαφορετική στάθμη νερού δημιουργεί διαφορά δυναμικού, από την οποία, με κατάλληλη βαθμονόμηση, προκύπτει η μεταβολή της στάθμης. Οι μετρητές είναι συνδεδεμένοι με ενισχυτή σήματος, ο οποίος στη συνέχεια μεταφέρει το σήμα σε ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Η λειτουργία των ηχοβολιστικών μετρητών βασίζεται στη μέτρηση της χρονικής διάρκειας που χρειάζεται το εκπεμπόμενο ηχητικό κύμα για να διανύσει κατά την κατακόρυφο την απόσταση μετρητή – στάθμη ύδατος με επιστροφή. Ο χρόνος αυτός μεταφράζεται αυτομάτως σε απόσταση. Οι μετρητές συνδέονται με καλώδια στον ενισχυτή ULTRALAB_ULS, ο οποίος είναι εξοπλισμένος με οκτώ ανεξάρτητα και συγχρονισμένα κανάλια – εισόδους που επιτρέπουν την ταυτόχρονη καταγραφή δεδομένων και δημιουργείται ένα τοπικό δίκτυο με έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή. Στο σύστημα περιλαμβάνεται και ο υψηλής ακρίβειας αισθητήρας μέτρησης ήχου, ο οποίος εκπέμπει τους ήχους κατά μήκος μίας διόδου ιδανικά παράλληλης στη μετρήσιμη δεξαμενή, σε μία καθορισμένη απόσταση και έτσι πραγματοποιείται η εσωτερική βαθμονόμηση των δεδομένων. Τα πρωτογενή δεδομένα που συλλέγονται από τους μετρητές εμφανίζονται σε έναν πίνακα στην οθόνη του υπολογιστή και καταγράφονται σε αρχεία κειμένου (.txt), όπως παρουσιάζονται στην ακόλουθη Εικόνα 3.3. Η πρώτη στήλη αναφέρεται στην τιμή της σφραγίδας χρόνου, η οποία ορίζεται στην τιμή -1, οι οκτώ επόμενες εμφανίζουν τις μετρήσεις των υψών κύματος που αποδίδουν οι οκτώ μετρητές και η τελευταία παρουσιάζει την ταχύτητα του ήχου, η οποία καταγράφεται από το μετρητή αναφοράς. Η συλλογή των δεδομένων γίνεται με τη βοήθεια του προγράμματος “H.R. Wave data acquisition” της εταιρίας “H.R. Wallingford”.

Το εν λόγω σύστημα έχει δυνατότητα μέτρησης της απόστασης “οφθαλμού” - στάθμη ύδατος από 3 έως 25 εκατοστά, βάθη στα οποία δεν μπορούν να βαθμονομηθούν οι μετρητές αντίστασης και είναι ευαίσθητο σε παρεμβολές του περιβάλλοντος. Σε περιπτώσεις όπου, κατά την καταγραφή των μετρήσεων, διαπιστώθηκαν παρεμβολές “θορύβου”, προέκυψε η ανάγκη η ανάγκη περιορισμού του χρόνου επεξεργασίας του αντίστοιχου πειράματος.

Κεφάλαιο 3: Κυματικό μοντέλο - MIKE21 Parabolic Mild Slope Module (PMS)

3.1) Γενικά χαρακτηριστικά του μοντέλου

Το MIKE21 PMS είναι ένα γραμμικό μοντέλο διάθλασης-περίθλασης το οποίο βασίζεται σε μια παραβολική προσέγγιση της ελλειπτικής εξίσωσης ήπιας κλίσης. Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη τα φαινόμενα της διάθλασης και της ρήχωσης, εξαιτίας της μεταβολής του πυθμένα, της περίθλασης κατά μήκος της καθέτου στην κύρια διεύθυνση των κυματισμών και των ενεργειακών απωλειών, εξαιτίας της τριβής στον πυθμένα και της θραύσης των κυματισμών.

Τα βασικά στοιχεία που προκύπτουν από το μοντέλο είναι ολοκληρωμένες κυματικές παράμετροι, όπως η μέση τετραγωνική ρίζα του ύψους κύματος (H_{rms}), η περίοδος αιχμής (T_p) και η μέση κατεύθυνση των κυματισμών, καθώς επίσης και οι τάσεις ακτινοβολίας (υπεύθυνες για τα κυματογενή ρεύματα). Τόσο οι κυματικές συνθήκες όσο και τα κυματογενή ρεύματα είναι απαραίτητα για τον υπολογισμό της στερεομεταφοράς στην παράκτια ζώνη και έτσι τα αποτελέσματα του κυματικού μοντέλου εισέρχονται ως δεδομένα στο υδροδυναμικό μοντέλο (HD) και εν συνεχεία στο μοντέλο στερεομεταφοράς (ST).

Το MIKE21 PMS χρησιμοποιείται στη μελέτη του κυματικού πεδίου μιας ανοιχτής παράκτιας περιοχής καθώς και σε περιοχές όπου υπάρχουν τεχνικά έργα (π.χ. πρόβολοι, κυματοθραύστες), όταν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα η ανάκλαση των προσπιπτόντων κυματισμών και η περίθλαση είναι κάθετη στην κύρια διεύθυνσή τους. Όπως σε όλες τις παραβολικές προσεγγίσεις έτσι και σε αυτό το μοντέλο δεν περιγράφονται η περίθλαση και η ανάκλαση με ακρίβεια (η περίθλαση κατά τη διεύθυνση x θεωρείται αμελητέα, καθώς επίσης και η διάχυση στη σκιά των έργων (back-scatter)). Επομένως το μοντέλο αυτό δεν πρέπει να χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου η περίθλαση αποτελεί το πιο σημαντικό φαινόμενο στην περιοχή μελέτης, όπως για παράδειγμα στα λιμάνια.

Τα φαινόμενα που λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς αυτού του μοντέλου είναι:

- i. η ρήχωση (shoaling)
- ii. η διάθλαση (refraction)
- iii. η περίθλαση (diffraction)
- iv. η ανάκλαση (reflection)
- v. η τριβή στον πυθμένα (bottom dissipation)
- vi. η θραύση (wave breaking)
- vii. η γένεση των κυματισμών λόγω ανέμου (wind generation)
- viii. η διασπορά συχνοτήτων (frequency spreading)
- ix. η κατευθυντική διασπορά (directional spreading)
- xi. η αλληλεπίδραση κύματος-ρεύματος (wave-current interaction)

3.2) Παραβολική προσέγγιση

Στο MIKE21 PMS μπορούν να εφαρμοστούν τρεις διαφορετικοί τύποι παραβολικής προσέγγισης για την επίλυση του μοντέλου προσομοίωσης, οι οποίοι είναι: το απλό μοντέλο (simple model), το μοντέλο του Pade (Pade's model) και το Minimax μοντέλο (Minimax model).

Το απλό μοντέλο αντιστοιχεί στον απλούστερο τύπο παραβολικής προσέγγισης στο ελλειπτικό μοντέλο ήπιας κλίσης. Το μοντέλο αυτό απαιτεί η γωνία ανάμεσα στη θετική κατεύθυνση του άξονα x και τη διεύθυνση του κυματισμού να είναι πολύ μικρή ($<10^\circ$), ώστε να μην παρουσιαστούν σημαντικά σφάλματα στην επίλυση.

Το μοντέλο του Pade αποτελεί μια βελτίωση του απλού μοντέλου καθώς επιτρέπει μεγαλύτερες γωνίες, μέχρι $\pm 45^\circ$.

Τέλος, το μοντέλο Minimax βασίζεται στην ελαχιστοποίηση του μέγιστου σφάλματος στην παραβολική προσέγγιση για ένα δεδομένο πλάτος ανοίγματος. Έτσι υπάρχουν διαφορετικά μοντέλα Minimax για $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$, κλπ. Για παράδειγμα, χρησιμοποιώντας το μοντέλο αυτό για 60° χρησιμοποιείται μια παραβολική προσέγγιση η οποία ελαχιστοποιεί το σφάλμα που προκύπτει για διάδοση κυματισμών υπό 60° γωνία ως προς τον άξονα x . Ωστόσο, μπορεί να παρουσιαστούν μικρά σφάλματα για κυματισμού που διαδίδονται υπό μικρότερες γωνίες.

3.3) Βασική εξίσωση

Το MIKE21 PMS βασίζεται σε μια παραβολική προσέγγιση της ελλειπτικής εξίσωσης ήπιας κλίσης με την οποία περιγράφονται η διάθλαση, η περίθλαση και η ανάκλαση των γραμμικών αρμονικών κυματισμών σε μια παράκτια περιοχή με ήπια κλίση πυθμένα. Η εξίσωση αυτή παρουσιάστηκε πρώτα από τον Berkhoff το 1972. Η ελλειπτική εξίσωση ήπιας κλίσης γράφεται ως:

$$\nabla(CCg\nabla\varphi) + (k^2CCg + i\omega W)\varphi = 0 \quad (3.1)$$

Όπου:

$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}\right)$ δισδιάστατος τελεστής κλίσης

$C(x,y)$ η φασική ταχύτητα

$C_g(x,y)$ η ταχύτητα ομάδας κυματισμών

$\varphi(x,y)$ το δυναμικό ταχύτητας της μέση ελεύθερης επιφάνειας, το οποίο συνδέεται με το δυναμικό της ταχύτητας με τη σχέση: $\varphi(x,y,z,t) = \frac{g}{\omega}\varphi(x,y) \frac{\cosh k(z+d)}{\cosh k} e^{-i\omega t}$

$W = Ediss/E$ όρος διάχυσης

$Ediss$ ο μέσος ρυθμός διάχυσης της ενέργειας ανά μονάδα χρόνου ανά μονάδα επιφάνειας

E η μέση ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας

$k = 2\pi/L$ ο κυματαριθμός

$\omega = 2\pi/f$ η κυκλική συχνότητα

L το μήκος κύματος

f η συχνότητα

Επίσης να σημειωθεί ότι η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας (η) μπορεί να γραφτεί ως: (Dean & Darymple, 1984)

$$\eta = \frac{1}{g} \frac{\partial \phi}{\partial t} \Big|_{z=0} \quad (3.2)$$

$$\eta = \phi(x, y) e^{-i(\omega t + \frac{\pi}{2})} \quad (3.3)$$

Για διαδιδόμενους κυματισμούς μιας κατεύθυνσης, το δυναμικό της μέση ελεύθερης επιφάνειας εκφράζεται από τη σχέση:

$$\phi = A * (\chi, \gamma) e^{i\psi} \quad (3.4)$$

$$\text{όπου } \psi = \int^x k \cos \theta dx + \int^y k \cos \theta dy$$

και θ η γωνία που σχηματίζει η διεύθυνση διάδοσης των κυματισμών με τον άξονα χ . Θεωρώντας ότι οι επικρατέστεροι κυματισμοί διαδίδονται κατά μήκος του άξονα χ η συνάρτηση ψ μπορεί να γραφτεί $\psi = \int^x k dx$

Μια παραβολική προσέγγιση της ελλειπτικής εξίσωσης (3.1) προκύπτει θεωρώντας ως επικρατούσα διεύθυνση των κυματισμών τη διεύθυνση χ και θεωρώντας αμελητέα τα φαινόμενα της διασποράς (back-scatter) και της περίθλασης κατά μήκος αυτής της διεύθυνσης. Η ελλειπτική εξίσωση μπορεί να μετατραπεί στην

$$(CC_g \phi_x)_x + \{CC_g \phi_y\}_y + (k^2 CC_g + i\omega W) \phi = 0 \quad (3.5)$$

όπου οι δείκτες x, y εκφράζουν παραγώγους ως προς χ και γ αντίστοιχα.

Λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση (3.4) οι όροι κλίσης μπορούν να εκφραστούν ως:

$$\phi \chi = (ikA^* + A^*_x) e^{i\psi} \quad (3.6)$$

$$CC_g \phi_x = (i\omega C_g A^* + CC_g A^*_x) e^{i\psi} \quad (3.7)$$

$$(CC_g \phi_x)_x = [ik(i\omega C_g A^* + CC_g A^*_x) + i\omega C_g A^*_x + i\omega A^*_x (C_g)_x + (CC_g A^*_x)_x] e^{i\psi} \quad (3.8)$$

Ο τελευταίος όρος $(CC_g A^*_x)_x$ της Εξίσωσης 3.8 εκφράζει την επίδραση της διασποράς (back-scatter) και της περίθλασης κατά μήκος της διεύθυνσης x και επομένως παραλείπεται στην παραβολική προσέγγιση. Έτσι,

$$(CC_g \phi_x)_x = [ik(i\omega C_g + i\omega (C_g)_x)] A^* + 2i\omega C_g A^*_x e^{i\psi} \quad (3.9)$$

Τελικά, χρησιμοποιώντας την εξίσωση της μέσης ελεύθερης στάθμης (3.4) προκύπτει:

$$(CC_g \phi_y)_y = (CC_g A^*_y) e^{i\psi} \quad (3.10)$$

Αντικαθιστώντας τις δύο τελευταίες εξισώσεις στην (3.5) προκύπτει εξίσωση

$$A^*_x - i/2\omega C_g = (CC_g A^*_y)_y + A^* ((C_g)_x) / 2C_g + A^* W / 2C_g = 0 \quad (3.11)$$

Τώρα γίνεται η υπόθεση ότι:

$$\phi = A(x, y) e^{ik_0 x} \quad (3.12)$$

όπου k_0 είναι ένας κυματαριθμός αναφοράς και $A(x, y)$ μια σύνθετη μεταβλητή.

Από τα παραπάνω συνάγεται ότι :

$$A^*(x, y) = A(x, y) e^{i\vartheta} \quad (3.13)$$

$$\text{όπου } \vartheta = k_0 x - \int^x k dx \quad (3.14)$$

Έτσι η εξίσωση (3.11) γράφεται

$$A_x - i(k - ko)A - A \frac{(cg)_x}{2cg} - \frac{i}{2\omega cg} (CCgAy)y + A \frac{W}{2cg} = 0 \quad (3.15)$$

Η παραπάνω εξίσωση αποτελεί την απλούστερη παραβολική προσέγγιση της ελλειπτικής εξίσωσης ήπιας κλίσης και ισχύει για διάδοση κυματισμών κατά μήκος μιας επικρατούσας διεύθυνσης (θετικός ημιάξονας χ) ή υπό μικρή γωνία ως προς τον άξονα χ .

Ο Kirby (1986) τροποποίησε την τελευταία εξίσωση ώστε να ισχύει και στην περίπτωση διάδοσης κυματισμών υπό μεγαλύτερη γωνία και παρήγαγε την εξίσωση:

$$A - i(ko - \beta_1 k)A + A \frac{(cg)_x}{2cg} + \frac{\sigma_1}{\omega cg} (CCgAy)y - \frac{\sigma_2}{\omega cg} (CCgAy)y\chi + A \frac{W}{2cg} = 0 \quad (3.16)$$

Όπου $\sigma_1 = i \left(\beta_2 - \beta_3 \frac{K_0}{K} \right) + \beta_3 \left(\frac{K\chi}{K^2} + \frac{(cg)_x}{2Kcg} \right)$ και $\sigma_2 = \beta_3/k$

Οι τιμές των συντελεστών β_1 , β_2 και β_3 δίνονται στον πίνακα 3.1 για διαφορετικές παραβολικές προσεγγίσεις

Πίνακας 3.1: Τιμές συντελεστών β_1 , β_2 και β_3 (DHI, 2007)

Aperture	β_1	β_2	β_3
Simple	1	-0.50	0
Pade	1	-0.75	-0.25
10°	0.999999972	-0.752858477	-0.252874920
20°	0.999998178	-0.761464683	-0.261734267
30°	0.999978391	-0.775898646	-0.277321130
40°	0.999871128	-0.796244743	-0.301017258
50°	0.999465861	-0.822482968	-0.335107575
60°	0.985273164	-0.854229482	-0.383283081
70°	0.994733030	-0.890064831	-0.451640568
80°	0.985273164	-0.925464479	-0.550974375
90°	0.956311082	-0.943396628	-0.704401903

Η Εξίσωση 4.16 ονομάζεται παραβολική εξίσωση ήπιας κλίσης, καθώς αποτελεί μια παραβολική προσέγγιση της εξίσωσης ήπιας κλίσης, και είναι η βασική εξίσωση επίλυσης του MIKE21PMS.

3.4) Οριακές συνθήκες

Το MIKE21 PMS επιλύει μια μερικώς διαφορική εξίσωση και, όπως σε όλες τις διαφορικές εξισώσεις, απαιτείται ο προσδιορισμός των οριακών συνθηκών σε όλα τα ανοιχτά όρια. Οι οριακές συνθήκες χωρίζονται σε κυματικές συνθήκες ανοιχτής θαλάσσης (offshore wave conditions) και σε πλευρικές οριακές συνθήκες (lateral boundary conditions). Ως ανοιχτό όριο (offshore boundary), δηλαδή το όριο μέσω του οποίου εισέρχονται οι κυματισμοί στην περιοχή προσομοίωσης, θεωρείται πάντα το δυτικό. Στο όριο αυτό προσδιορίζονται οι κυματικές

παράμετροι H_{rms} , T_p και η κατανομή της κυματικής ενέργειας στην περίπτωση των σύνθετων κυματισμών (irregular waves), από τα οποία καθορίζεται η εισερχόμενη ενέργεια στην περιοχή προσομοίωσης.

Το βόρειο και το νότιο όριο του μοντέλου συμπληρώνουν τις οριακές συνθήκες του υπολογιστικού πεδίου. Συνήθως δεν υπάρχουν διαθέσιμες πληροφορίες σχετικά με τις κυματικές συνθήκες που επικρατούν στα πλευρικά όρια (lateral boundaries) και θεωρούνται συμμετρικά, με την έννοια ότι η κλίση των κυματικών συνθηκών κατά μήκος τους (d/dy) είναι μηδενική, που σημαίνει ότι γίνεται η υπόθεση πως οι ισοβαθείς τοπικά είναι ευθείες και παράλληλες σε αυτά. Εναλλακτικά τα όρια μπορούν να θεωρηθούν είτε απορροφητικά (absorbing), που σημαίνει ότι στο κατάντη όριο οι κυματισμοί απορροφώνται πλήρως χωρίς ανακλάσεις ενώ στο ανάντη δεν μπορεί να γίνει διάδοση των κυματισμών στην περιοχή προσομοίωσης, είτε ανακλαστικά (reflecting), οπότε οι προσπίπτοντες κυματισμοί ανακλώνται πλήρως.

3.5) Θραύση κυματισμών

Το φαινόμενο της θραύσης οφείλεται στην υδροδυναμική αστάθεια των κυματισμών. Στην ανοιχτή θάλασσα η αστάθεια αυτή εκφράζεται με μια κρίσιμη τιμή της καμπυλότητας (H/L) των κυματισμών, ενώ στα ρηγά νερά με μια κρίσιμη τιμή του λόγου του ύψους κύματος προς το βάθος του νερού (H/d).

Στο MIKE21 PMS η θραύση των κυματισμών βασίζεται στο μοντέλο των Battjes and Janssen (1978), σύμφωνα με το οποίο ο ρυθμός διάχυσης της ενέργειας εξαιτίας της θραύσης των κυματισμών είναι:

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{a}{8\pi} Q \omega H_{max}^2 \quad (3.17)$$

όπου E η συνολική ενέργεια, ω η κυκλική συχνότητα, Q το ποσοστό των θραυόμενων κυματισμών και a μια σταθερά από την οποία ελέγχεται ο ρυθμός διάχυσης της ενέργειας. Στην παραπάνω εξίσωση H_{max} είναι το μέγιστο επιτρεπτό ύψος των κυματισμών και υπολογίζεται από τη σχέση

$$H_{max} = \gamma_1 k^{-1} \tanh\left(\frac{\gamma_2 k d}{\gamma_1}\right) \quad (3.18)$$

όπου $k=2\pi/L$ ο κυματαριθμός, d το βάθος του νερού, γ_1 μια παράμετρος της θραύσης η οποία έχει σχέση με τη συνθήκη της καμπυλότητας και γ_2 μια άλλη παράμετρος που έχει σχέση με τη συνθήκη του οριακού βάθους. Η παραπάνω έκφραση της διάχυσης της ενέργειας των κυματισμών κατά τη θραύση τους χρησιμοποιείται τόσο για μονοχρωματικούς όσο και για τυχαίους κυματισμούς.

Ανάλογα με τον τύπο των κυματισμών γίνεται και ο υπολογισμός του ποσοστού Q των θραυόμενων κυματισμών. Στην περίπτωση των μονοχρωματικών κυματισμών το ποσοστό αυτό είναι 0 όταν θραύονται τα κύματα, δηλαδή όταν $H > H_{max}$ και 1 όταν δεν συμβαίνει θραύση, δηλαδή $H < H_{max}$. Για τυχαίους κυματισμούς το ποσοστό αυτό υπολογίζεται κάνοντας την υπόθεση της κατανομής Rayleigh για το ύψος των κυματισμών, οπότε ισχύει:

$$\frac{1-Q_b}{\ln(Q_b)} = - \left(\frac{H_{rms}}{H_{max}} \right)^2 \quad (3.19)$$

3.6) Υπολογισμός κυματικών παραμέτρων

Από τους υπολογισμούς του μοντέλου προκύπτουν οι τρεις ολοκληρωμένες κυματικές παράμετροι: το ύψος κύματος H_{rms} , η περίοδο αιχμής T_r και η μέση διεύθυνση θ_m του κύματος.

Το μέσο τετραγωνικό ύψος κύματος H_{rms} και το σημαντικό ύψος κύματος H_{m0} ορίζονται αντίστοιχα από τις σχέσεις

$$H_{rms} = 2\sqrt{2E_1} \quad (3.20)$$

$$H_{m0} = 4\sqrt{4E_1} \quad (3.21)$$

Όπου,

$E_1 = \int_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} \int_{f_{min}}^{f_{max}} E(f, \theta) df d\theta$ η ολική κυματική ενέργεια, θ_{max} , θ_{min} τα όρια της διεύθυνσης του κυματισμού και f_{max} , f_{min} το ανώτατο και το κατώτατο όριο αντίστοιχα για την κυματική συχνότητα που χρησιμοποιείται στην παραγωγή του ενεργειακού φάσματος.

Η περίοδος αιχμής T_r ορίζεται ως η περίοδος μέγιστης ενεργειακής πυκνότητας.

Η μέση διεύθυνση κύματος (θ_m) ορίζεται ως:

$$\theta_m = \arctan\left(\frac{b}{a}\right)$$

$$\text{όπου } a = \frac{1}{E_1} \int_0^{2\pi} \cos\theta E(\theta) d\theta \text{ και } b = \frac{1}{E_1} \int_0^{2\pi} \sin\theta E(\theta) d\theta.$$

Από το MIKE21 PMS προκύπτουν επίσης οι τρεις συνιστώσες των τάσεων ακτινοβολίας S_{xx} , S_{yy} και S_{xy} οι οποίες είναι υπεύθυνες για τη δημιουργία των κυματογενών ρευμάτων. Οι τάσεις ακτινοβολίας ορίζονται από τις σχέσεις

$$S_{xx} = \rho \frac{g}{2} (F_u + F_p) \quad (3.22)$$

$$S_{yy} = \rho \frac{g}{2} (F_v + F_p) \quad (3.23)$$

$$S_{xy} = \rho \frac{g}{2} F_{uv} \quad (3.24)$$

όπου

$$F_u = \int_0^{2\pi} \cos^2\theta \cdot (1 + G)E(\theta)d\theta \quad (3.25)$$

$$F_v = \int_0^{2\pi} \sin^2\theta \cdot (1 + G)E(\theta)d\theta \quad (3.26)$$

$$F_{uv} = \int_0^{2\pi} \sin\theta \cdot \cos\theta \cdot (1 + G)E(\theta)d\theta \quad (3.27)$$

$$F_p = \int_0^{2\pi} G \cdot E(\theta)d\theta \quad (3.28)$$

$$\text{και } G = \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \quad (3.29)$$

Τέλος από το μοντέλο αυτό προκύπτουν ως αποτελέσματα οι x και y συνιστώσες ενός διανύσματος $U=(u,v)$ οι οποίες ορίζονται ως

$$u = H_{m0} \cos\theta \quad (3.30)$$

και

$$v = H_{m0} \sin\theta \quad (3.31)$$

Το διάνυσμα αυτό $U=(u,v)$ απεικονίζει τη μέση διεύθυνση του κύματος στην περιοχή μελέτης και το μέγεθός του είναι ανάλογο του ύψους κύματος σε κάθε σημείο.

3.7) Εφαρμογή μοντέλου

Η εισαγωγή των διαφόρων παραμέτρων στο μοντέλο γίνεται σε τρεις βασικές καρτέλες. Στην πρώτη καρτέλα εισάγεται η βαθμμετρία της παράκτιας περιοχής που εξετάζεται, το γεωγραφικό μήκος και πλάτος της, ο προσανατολισμός της, καθώς και η αριθμητική τιμή που ορίζει την ξηρά. Επίσης ορίζονται τα στοιχεία της περιόδου προσομοίωσης, δηλαδή τα χρονικά βήματα και ο τύπος της προσομοίωσης (stationary ή quasi-stationary). Στην περίπτωση που λαμβάνεται υπόψη μόνο ένα κυματικό γεγονός κάθε φορά, όπως στους υπολογισμούς που έγιναν για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, η περίοδος προσομοίωσης χαρακτηρίζεται ως στατική (stationary).

Στη δεύτερη καρτέλα ορίζονται οι οριακές συνθήκες τόσο στο ανοιχτό όριο (κυματικά χαρακτηριστικά, είδος κυματισμών) όσο και στα πλευρικά όρια.

Στην τρίτη καρτέλα εισάγονται οι παράμετροι επίλυσης του μοντέλου, όπως ο τύπος της παραβολικής προσέγγισης, η τριβή στον πυθμένα και οι παράμετροι που αφορούν τη θραύση. Για όλες τις εφαρμογές που έγινε χρήση του κυματικού μοντέλου PMS ορίστηκε ως τύπος παραβολικής προσέγγισης το μοντέλο Minimax. Η τριβή που αναπτύσσεται στον πυθμένα εξαρτάται από το μέγεθος των κόκκων του ιζήματος και η τραχύτητα εκφράζεται με τον αριθμό Nikuradse roughness ο οποίος ορίζεται ως $kN=0.002m$. Τέλος, όσον αφορά τη θραύση ορίστηκαν οι προκαθορισμένες από το μοντέλο τιμές των παραμέτρων $\gamma_1=1.0$, $\gamma_2=0.8$ και $\alpha=1.0$.

Στο πλαίσιο της αριθμητικής διαδικασίας, προσομοιώθηκε η κυματική διαταραχή στις θέσεις των μετρητών για καθέναν από τους παραπάνω παραχθέντες κυματισμούς, στις τέσσερις διατάξεις του έργου, για δύο διευθύνσεις πρόσπτωσης, νότια και νοτιοανατολική, οι οποίες σχηματίζουν αντίστοιχα γωνίες 45° και 90° με την ακτή. Η φυσική προσομοίωση του θαλάσσιου πυθμένα, με ψηφιοποιημένα στοιχεία της δεξαμενής των πειραμάτων, έγινε έως το

βάθος των 18 m. Υπολογίστηκε η μεταβολή των χαρακτηριστικών των κυμάτων από τα βαθειά έως τα -12 m και στη συνέχεια έγινε η φυσική προσομοίωση των κυματισμών.

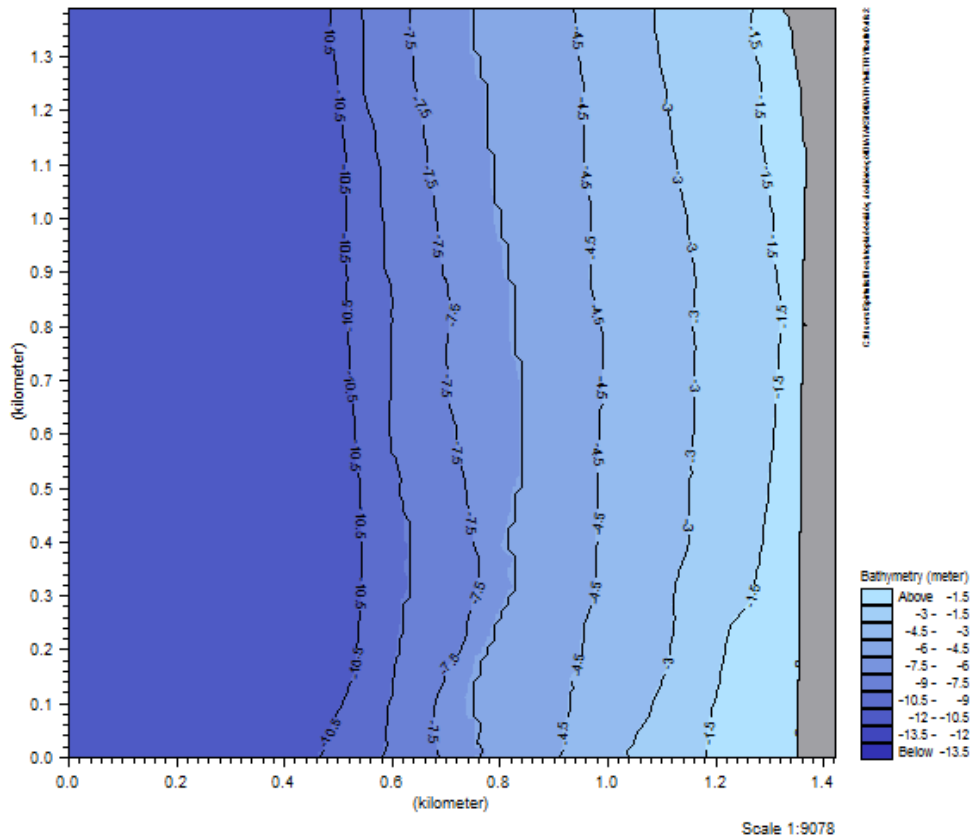
Πίνακας 3.2: Παράμετροι φασμάτων κυμάτων σε πρωτότυπο και προσομοίωμα

ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΠΡΟΣΠΩΣΗΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ	ΑΖΙΜΟΥΘΙΟ	Hs (m)	Tr(s)	f (Hz)
Νότια	90 ⁰	1,36	5,69	0,18
		1,84	6,40	0,16
		2,48	7,88	0,13
		3,20	8,53	0,12
Νοτιοανατολική	45 ⁰	1,36	5,69	0,18
		1,84	6,40	0,16
		2,48	7,88	0,13
		3,20	8,53	0,12

3.8) Γραφική απεικόνιση των τεσσάρων διατάξεων προσομοίωσης με το μοντέλο MIKE21-Parabolic Mild Slope Module (PMS)

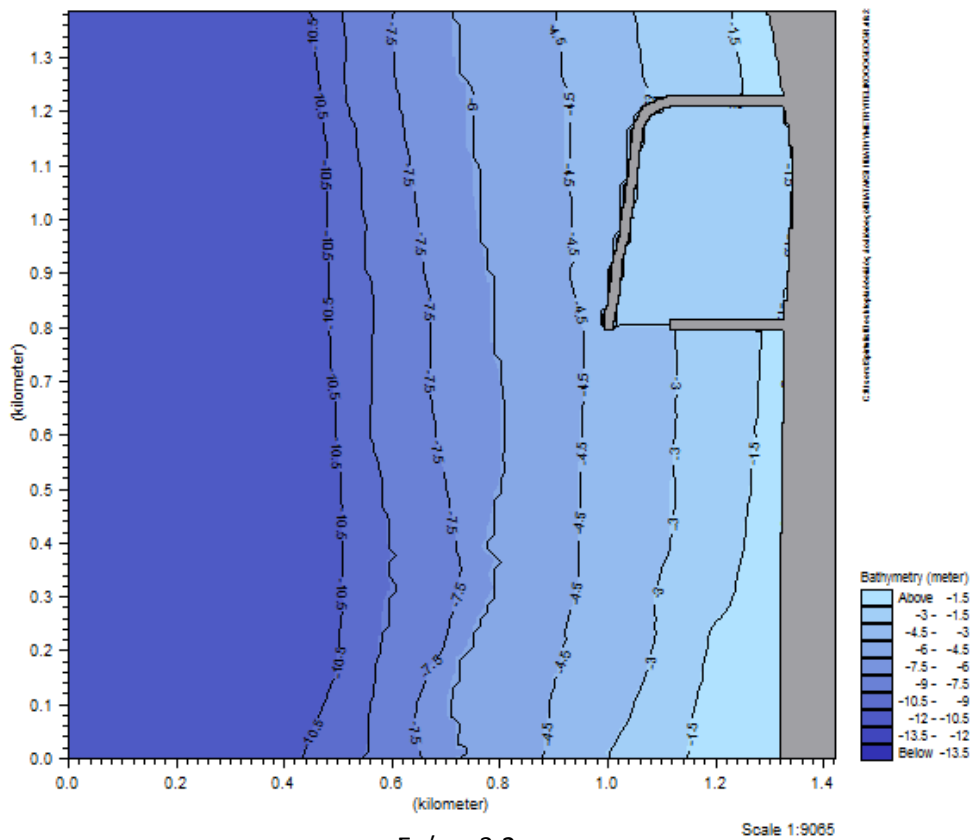
Παρακάτω παρατίθενται γραφικά οι τέσσερις διατάξεις του έργου προσομοίωσης. Με το μοντέλο MIKE 21 PMS καθορίζεται η αντίστοιχη βαθυμετρία που ταυτίζεται με τη βαθυμετρία της δεξαμενής που έγιναν οι πειραματικές μετρήσεις. Σε πρώτο στάδιο σχεδιάστηκε η βαθυμετρία κάθε παράκτιας περιοχής και ο τετραγωνικός κώνναβος διαστάσεων $\Delta X = \Delta Y = 2$ m. Το μέγεθος του καννάβου επιλέχθηκε με κριτήριο την ύπαρξη τουλάχιστον 5-7 σημείων ανά μήκος κύματος ώστε να επιτυγχάνεται επαρκής ανάλυση της βαθυμετρίας και του κυματικού πεδίου. Επιπλέον επειδή τα αποτελέσματα από το κυματικό μοντέλο χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση των κυματογενών ρευμάτων, είναι σημαντικό να χρησιμοποιείται ένας επαρκής αριθμός σημείων του καννάβου στη ζώνη θραύσης (τουλάχιστον 8-10 σημεία). Και τα δύο αυτά κριτήρια πληρούνται στην περίπτωση του μικρότερου κυματισμού ($H=1,36$ m, $T_r=5.69$ s), επομένως και στα υπόλοιπα κυματικά σενάρια που εξετάζονται.

3.8.1 Διάταξη 0(χωρίς έργα)



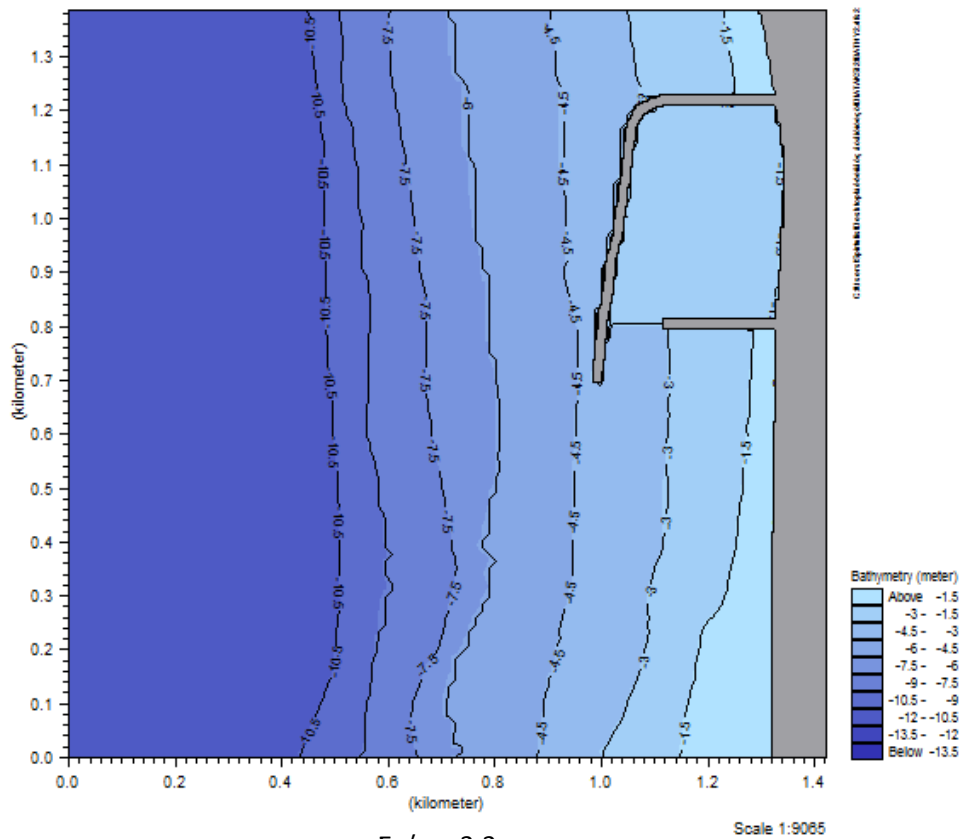
Σχήμα 3.1

3.8.2 Διάταξη 1



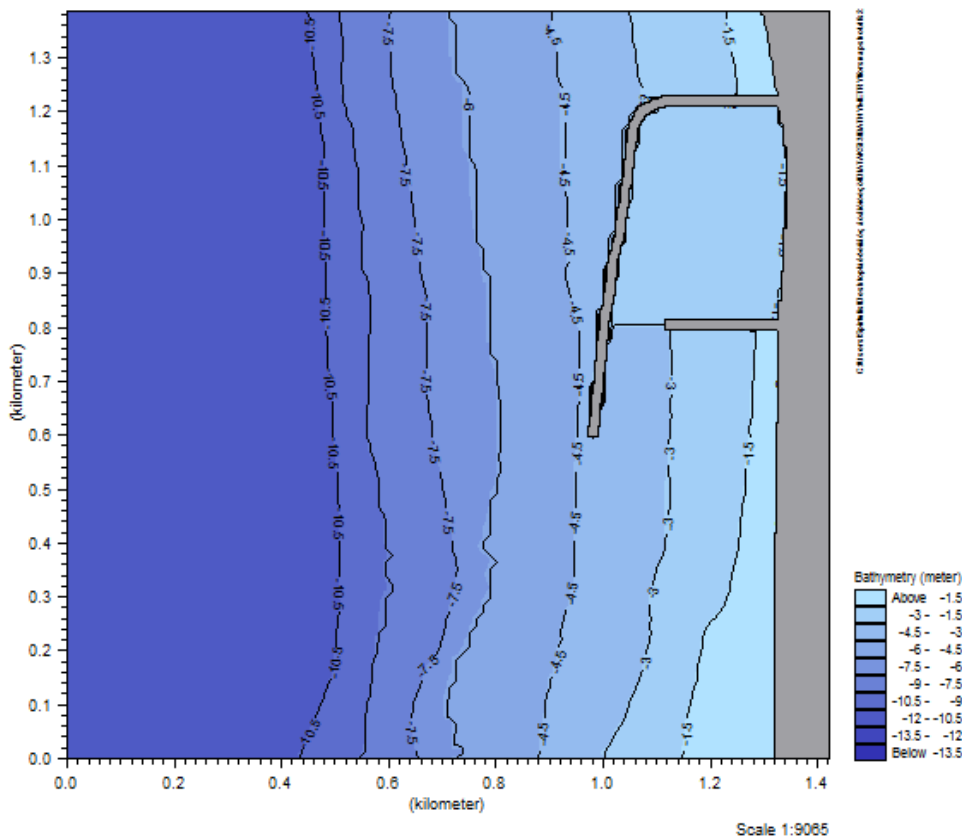
Σχήμα 3.2

3.8.3 Διάταξη 2



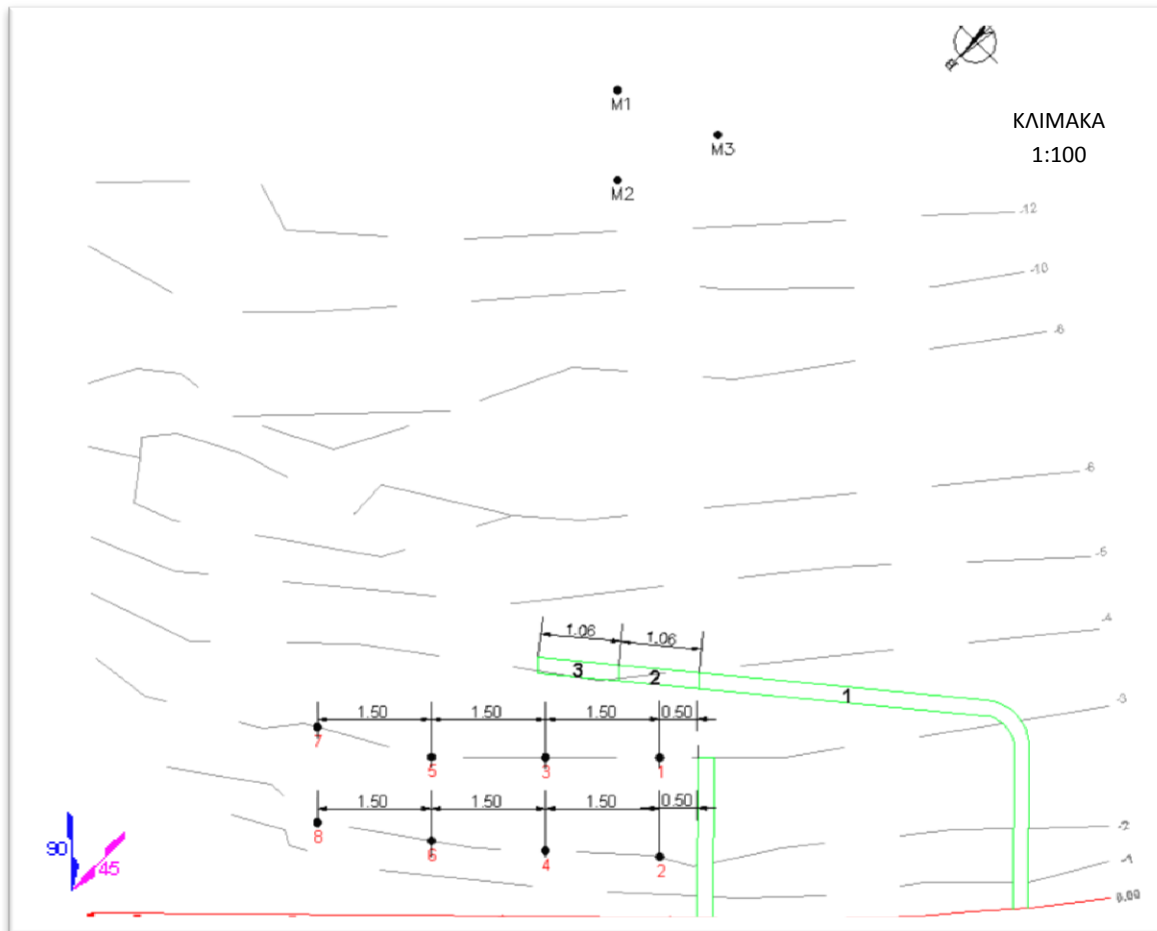
Σχήμα 3.3

3.8.4 Διάταξη 3



Σχήμα 3.4

3.8.5 Θέσεις μετρητών



(Σχήμα 3.5: Διατάξεις έργου 1,2,3 και διάταξη μετρητών A)

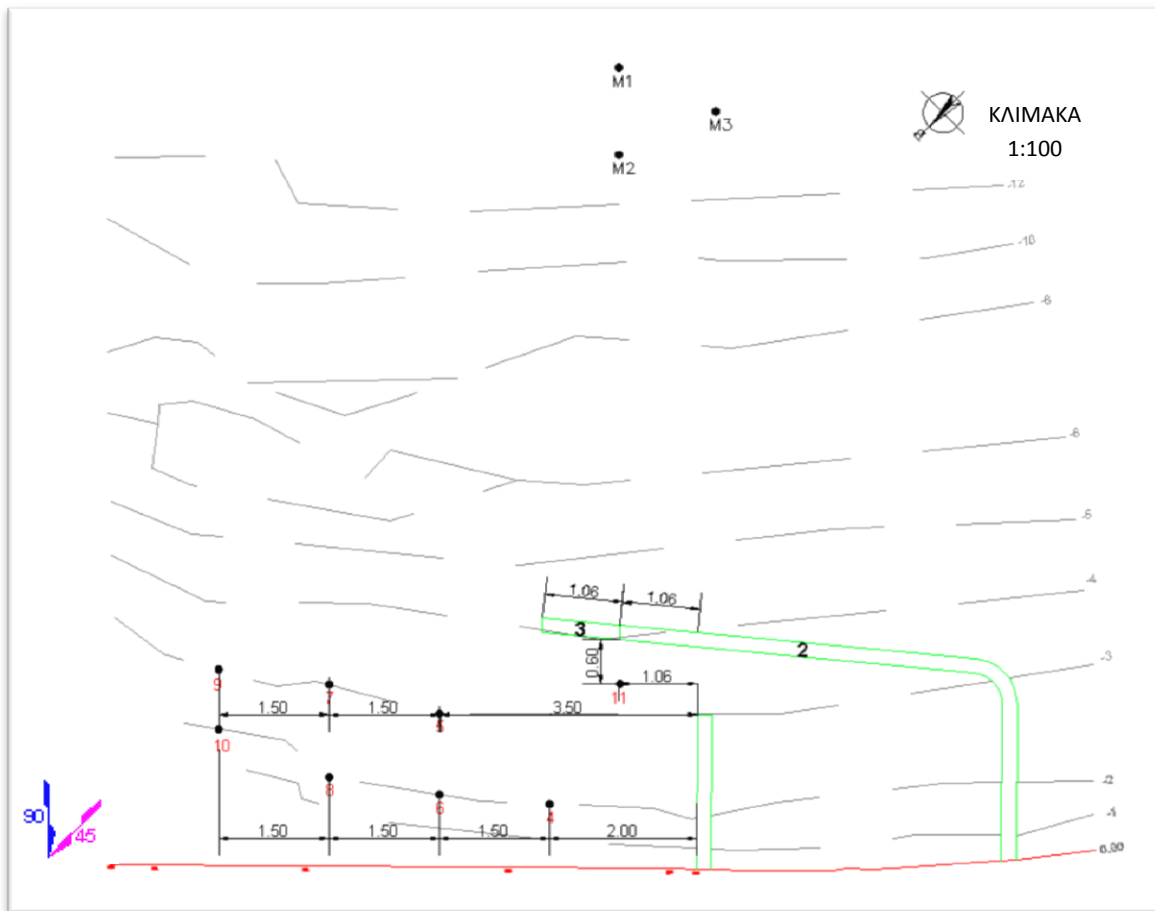
Για την καταγραφή της κυματικής διαταραχής, οι οκτώ μετρητές κύματος με ηχοβολιστικούς αισθητήρες που περιγράφηκαν νωρίτερα, τοποθετήθηκαν κατάντη του έργου σε δύο διαφορετικές διατάξεις A και B, οι οποίες απεικονίζονται στα Σχήματα 3.5 και 3.6 που ακολουθούν.

Πιο συγκεκριμένα, η διάταξη A συνίσταται στα εξής:

- στις θέσεις μετρητών από 1 έως 7, οι οποίες βρίσκονται πάνω στην ισοβαθή καμπύλη των -3 m, με απόσταση 1,50 m μεταξύ τους και με τη θέση 1 τοποθετημένη κατά 0,50 m στα αριστερά της εξωτερικής παρειάς του υπήνεμου μόλου και
- αντίστοιχα, στις θέσεις μετρητών από 2 έως 8, οι οποίες βρίσκονται πάνω στην ισοβαθή καμπύλη των -2 m, με απόσταση 1,50 m μεταξύ τους και με τη θέση 2 τοποθετημένη κατά 0,50 m στα αριστερά της εξωτερικής παρειάς του υπήνεμου μόλου (Σχήμα 3.5).

Στο σημείο αυτό, σημειώνουμε ότι οι δύο διαδοχικές επεκτάσεις του μήκους του προσήνεμου μόλου, αλλά και η αντίστοιχη, υπό διερεύνηση, μετατόπιση της αύξησης της κυματικής δράσης προς τα κατάντη του λιμένα δημιούργησαν την πρακτική ανάγκη για τροποποίηση της θέσης ορισμένων μετρητών. Συνεπώς, προέκυψε η διάταξη μετρητών B, η οποία εφαρμόστηκε στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στις διατάξεις 2 και 3 του έργου και περιλαμβάνει:

- τις θέσεις μετρητών από 5 έως 7, οι οποίες βρίσκονται πάνω στην ισοβαθή καμπύλη των -3 m, με απόσταση 1,50 m μεταξύ τους και με τη θέση 5 να απέχει 3,50 m από την εξωτερική παρειά του υπήνεμου μόλου,
- τις θέσεις μετρητών από 4 έως 8, οι οποίες βρίσκονται πάνω στην ισοβαθή καμπύλη των -2 m, με απόσταση 1,50 m μεταξύ τους και με τη θέση 4 τοποθετημένη κατά 2,00 m στα αριστερά της εξωτερικής παρειάς του υπήνεμου μόλου και
- τη θέση 11, στην οποία ο μετρητής τοποθετείται στην είσοδο του λιμένα και απέχει 0,60 m από την εσωτερική παρειά του προσήνεμου μόλου και 1,06 m από την εξωτερική παρειά του υπήνεμου μόλου (Σχήμα 3.6).



(Σχήμα 3.6: Διατάξεις έργου 2,3 και διάταξη μετρητών B)

3.9) Ανάλυση αριθμητικών δεδομένων

Για τη διερεύνηση του φαινομένου της εντατικοποίησης της κυματικής δράσης στα αμέσως κατάντη του προσομοιώματος του λιμένα, κρίθηκε σκόπιμο να υπολογιστεί για κάθε θέση των μετρητών ο λόγος του χαρακτηριστικού ύψους H_s του προσπίπτοντος σε καθεμία από τις θέσεις 1 έως 11 κυματισμού προς το ύψος H_0 του κυματισμού που προσπίπτει στη θέση βαθέων υδάτων. Ο λόγος H_i/H_0 του μεταδιδόμενου προς τον προσπίπτοντα στα βαθειά κυματισμό πρόκειται για το συντελεστή μετάδοσης K_t και ενδείκνυται για τη σύγκριση αποτελεσμάτων από διαφορετικές πειραματικές και αριθμητικές μετρήσεις, αφού οι τιμές ανάγονται σε αντίστοιχη βάση. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων μελετήθηκαν και παρουσιάζονται παρακάτω υπό τη μορφή πινάκων και διαγραμμάτων, καθώς η έρευνα

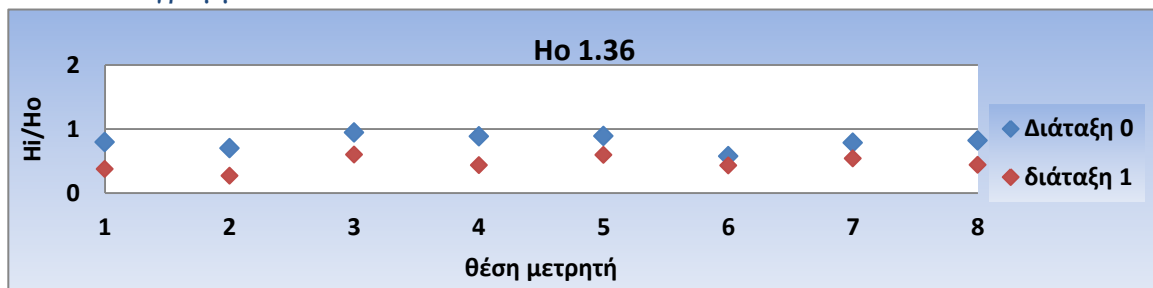
εστίαστηκε στη μεταβολή του ύψους του προσπίπτοντος κυματισμού κατά τη διεύθυνση των διαδοχικών προεκτάσεων του προσήνεμου μόλου του λιμένα.

3.10) Αποτελέσματα αριθμητικών μετρήσεων με τη μορφή διαγραμμάτων για γωνία πρόσπτωσης 90°

Ακολουθεί η διαγραμματική απεικόνιση των τιμών του λόγου H_i/H_0 σε κάθε θέση των ηχοβολιστικών μετρητών, Όπου συγκρίνουμε τα αποτελέσματα του λόγου H_i/H_0 της διάταξης 0(χωρίς έργα) με τις υπόλοιπες διατάξεις. Τα διαγράμματα διατάσσονται ανά κοινή τιμή της μέγιστης περιόδου φάσματος T_p και κατά αύξουσα τιμή του ύψους Ηθεωρητικό(H_s) του κυματισμού που παράχθηκε σε κάθε αριθμητική δοκιμή, για τέσσερα σενάρια κυματισμών.

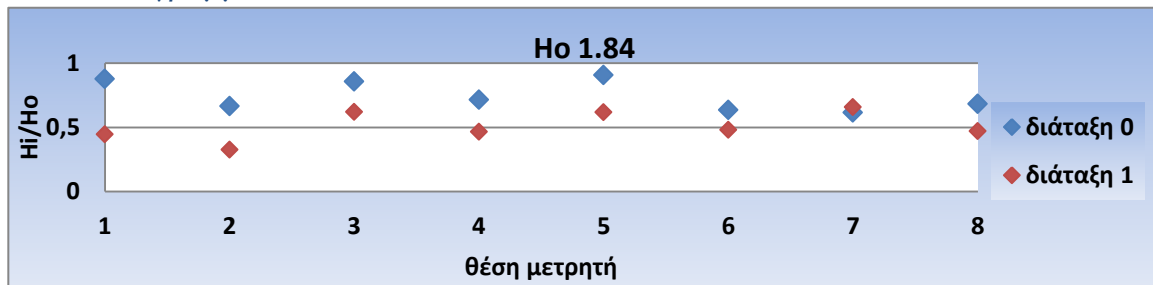
3.10.1 Διάταξη 1

Διάγραμμα 3.1



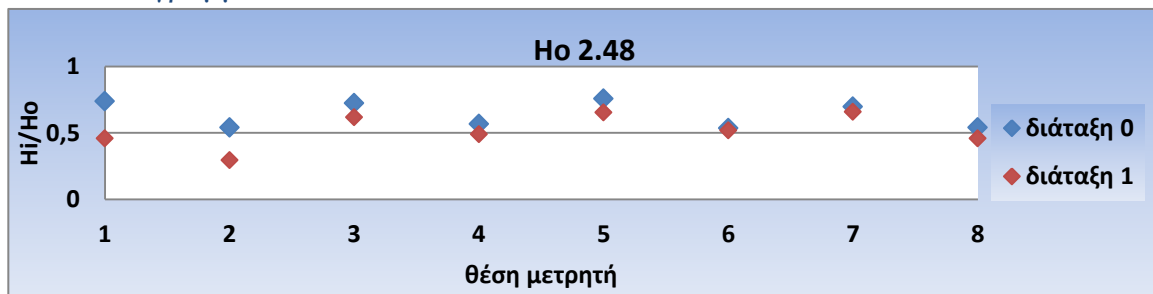
(Ho 1.36, T_p 5.69)

Διάγραμμα 3.2



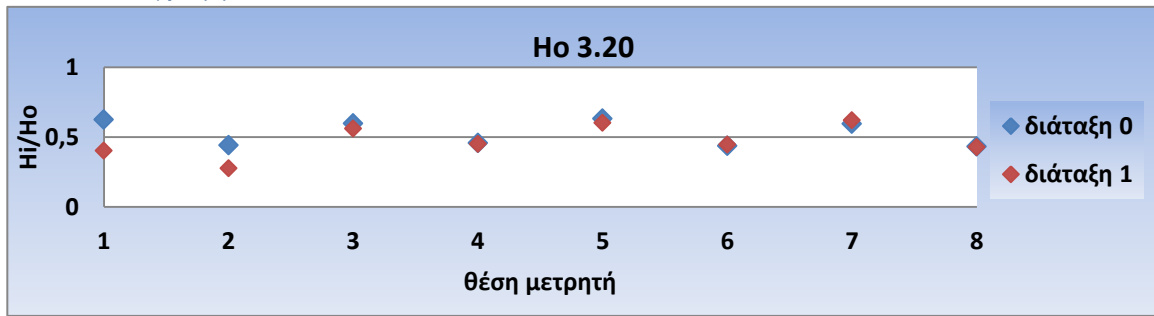
(Ho 1.84, T_p 6.40)

Διάγραμμα 3.3



(Ho 2.48, T_p 7.31)

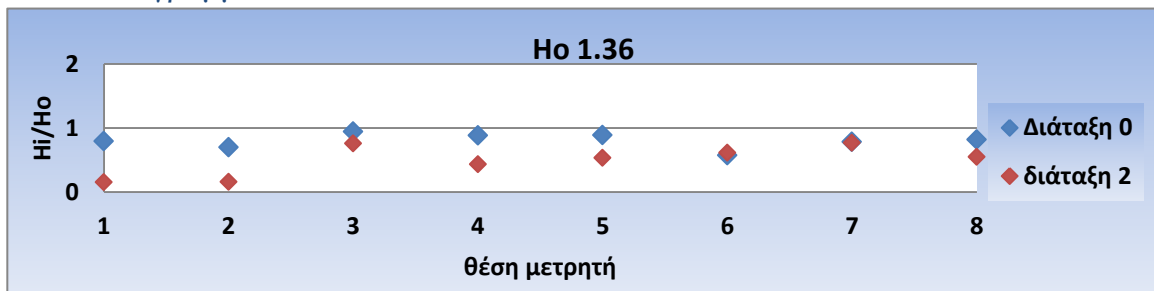
Διάγραμμα 3.4



(Ho 3.20, Τρ 8.53)

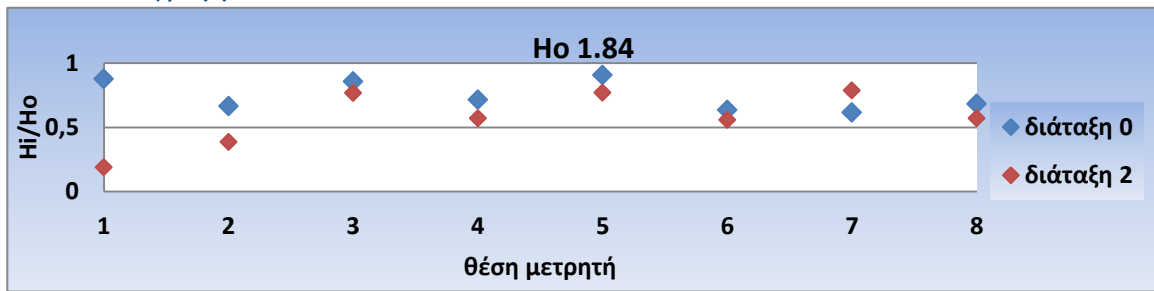
3.10.2 Διάταξη 2

Διάγραμμα 3.5



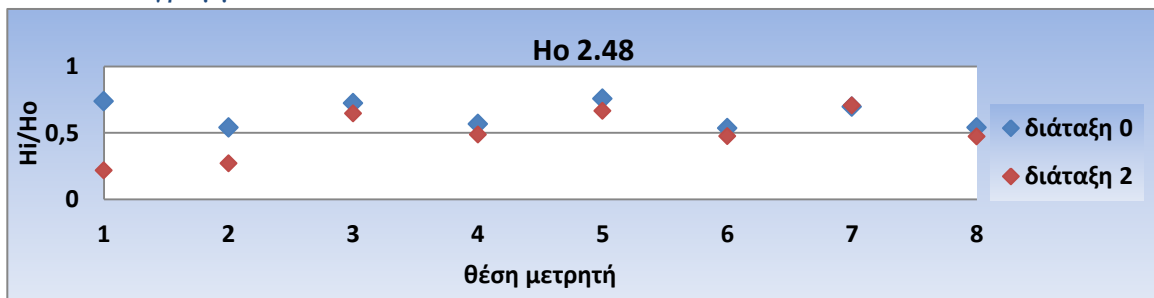
(Ho 1.36, Τρ 5.69)

Διάγραμμα 3.6



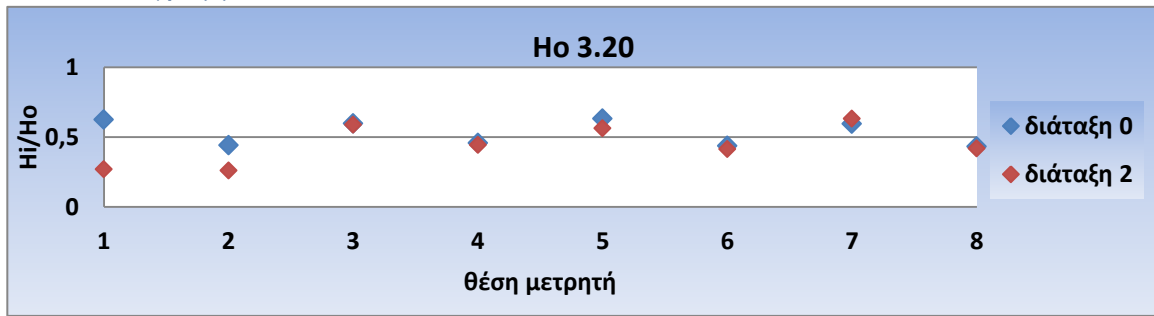
(Ho 1.84, Τρ 6.40)

Διάγραμμα 3.7



(Ho 2.48, Τρ 7.31)

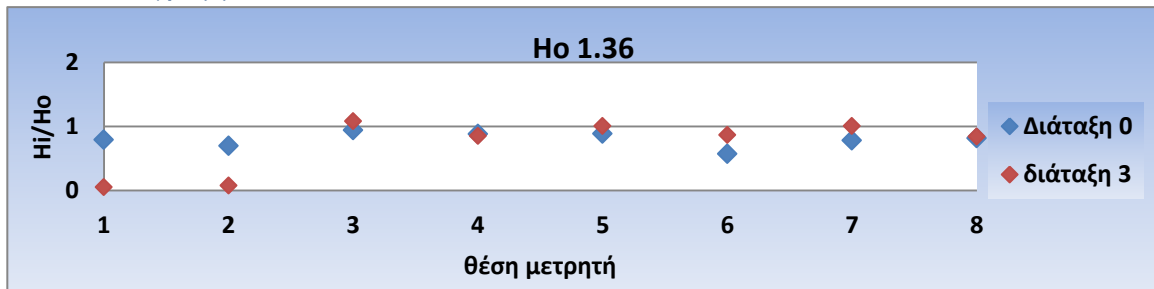
Διάγραμμα 3.8



(Ho 3.20, Τρ 8.53)

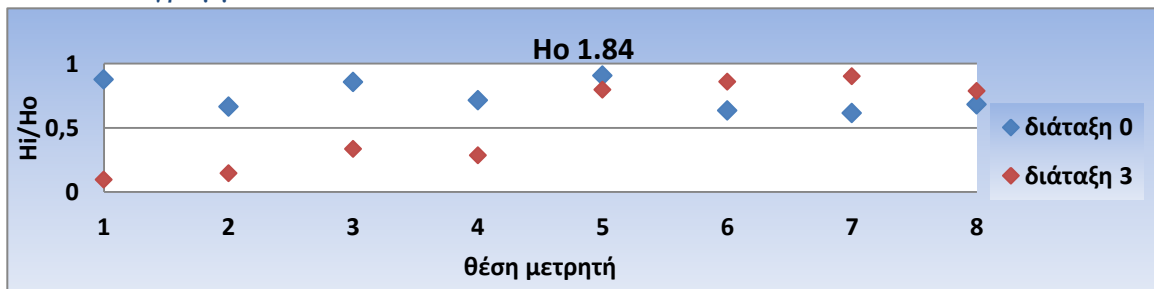
3.10.3 Διάταξη 3

Διάγραμμα 3.9



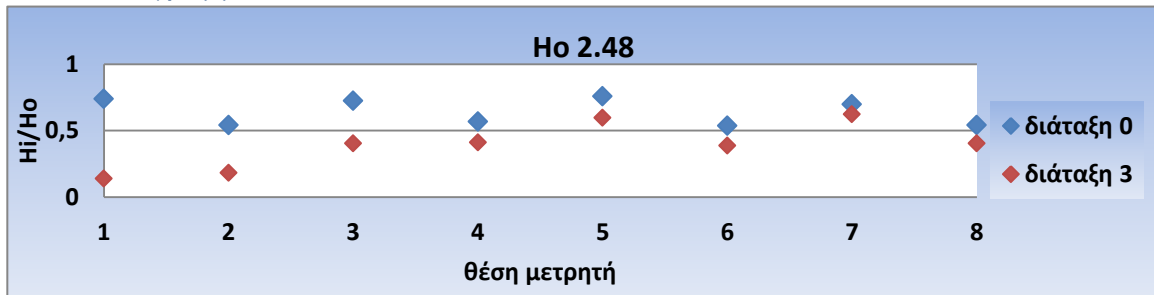
(Ho 1.36, Τρ 5.69)

Διάγραμμα 3.10



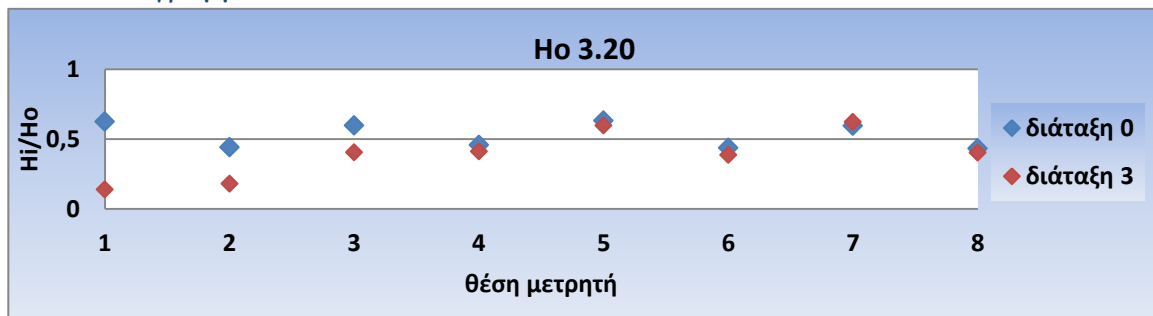
(Ho 1.84, Τρ 6.40)

Διάγραμμα 3.11



(Ho 2.48, Τρ 7.31)

Διάγραμμα 3.12



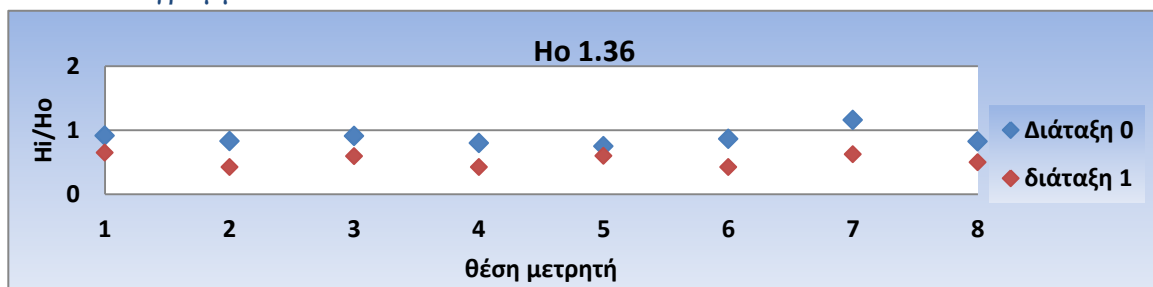
(Ho 3.20, Τρ 8.53)

3.11) Αποτελέσματα αριθμητικών μετρήσεων με τη μορφή διαγραμμάτων για γωνία πρόσπτωσης 45°

Ακολουθεί η διαγραμματική απεικόνιση των τιμών του λόγου H_i/H_0 σε κάθε θέση των ηχοβολιστικών μετρητών, Όπου συγκρίνουμε τα αποτελέσματα του λόγου H_i/H_0 της διάταξης 0(χωρίς έργα) με τις υπόλοιπες διατάξεις. Τα διαγράμματα διατάσσονται ανά κοινή τιμή της μέγιστης περιόδου φάσματος T_p και κατά αύξουσα τιμή του ύψους Ηθεωρητικό(H_s) του κυματισμού που παράχθηκε σε κάθε αριθμητική δοκιμή, για τέσσερα σενάρια κυματισμών.

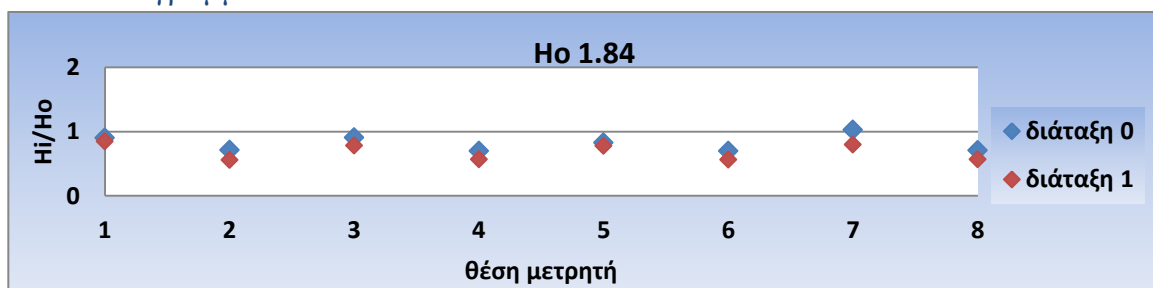
3.11.1 Διάταξη 1

Διάγραμμα 3.13



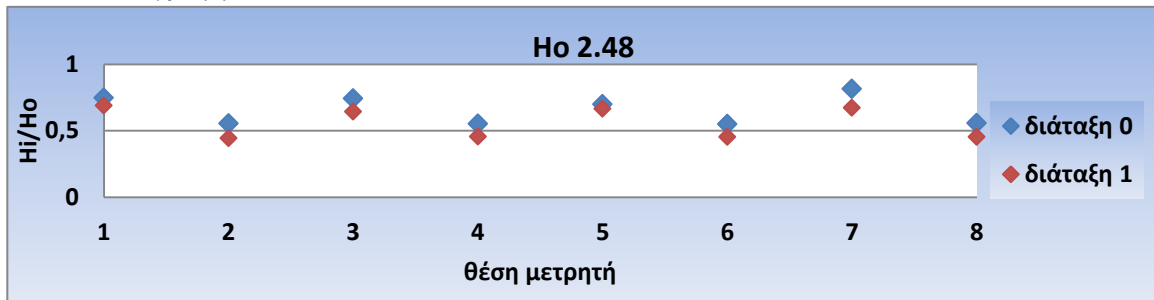
(Ho 1.36, Τρ 5.69)

Διάγραμμα 3.14



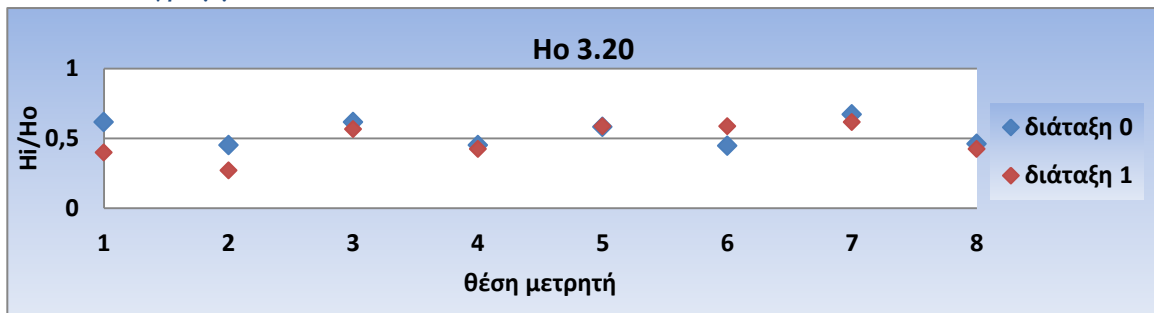
(Ho 1.84, Τρ 6.40)

Διάγραμμα 3.15



(Ho 2.48, Τρ 7.31)

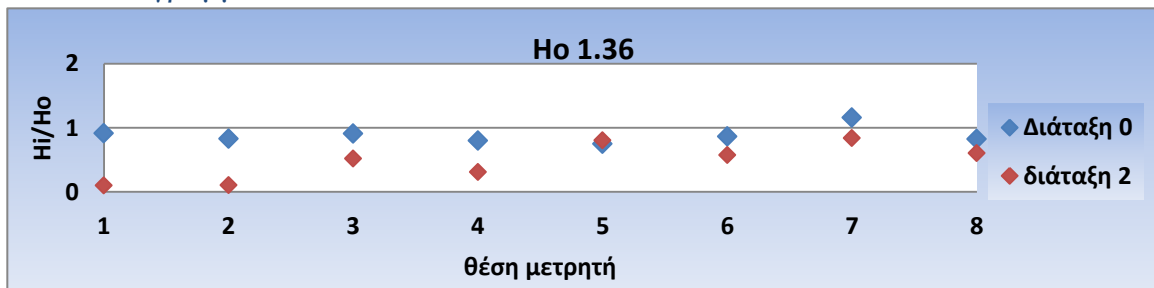
Διάγραμμα 3.16



(Ho 3.20, Τρ 8.53)

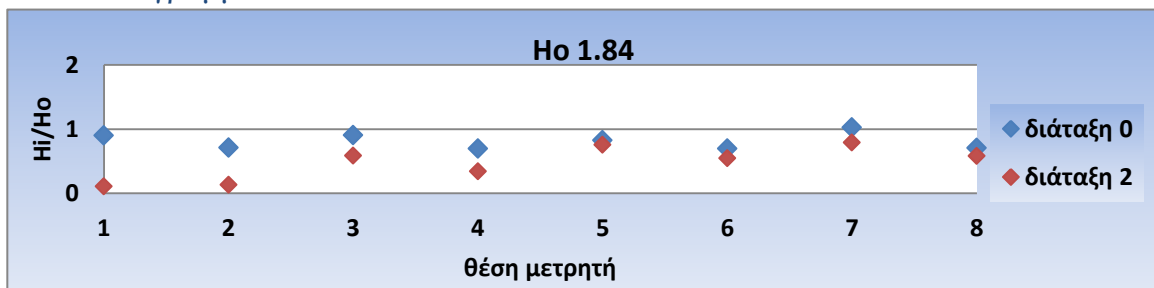
3.11.2 Διάταξη 2

Διάγραμμα 3.17



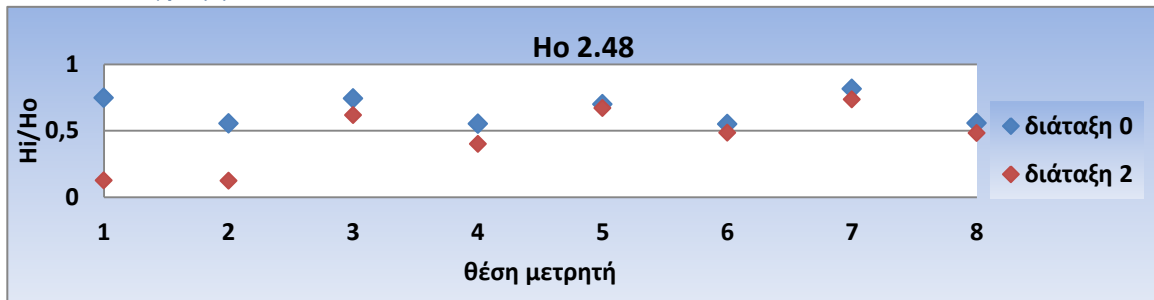
(Ho 1.36, Τρ 5.69)

Διάγραμμα 3.18



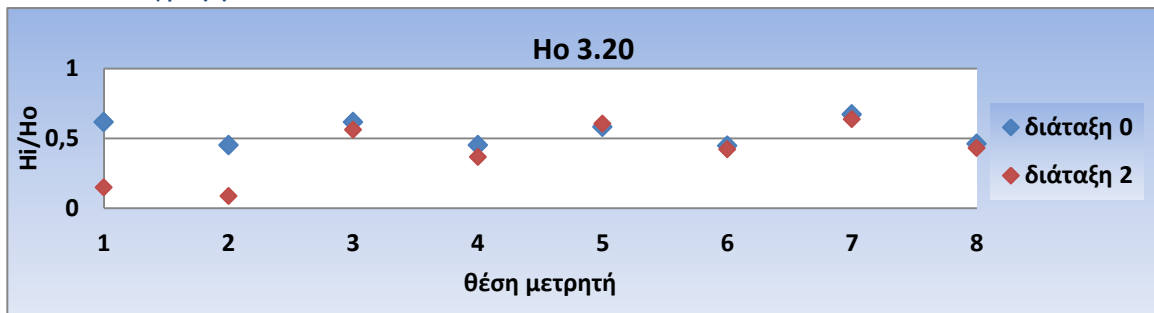
(Ho 1.84, Τρ 6.40)

Διάγραμμα 3.19



(Ho 2.48, Τρ 7.31)

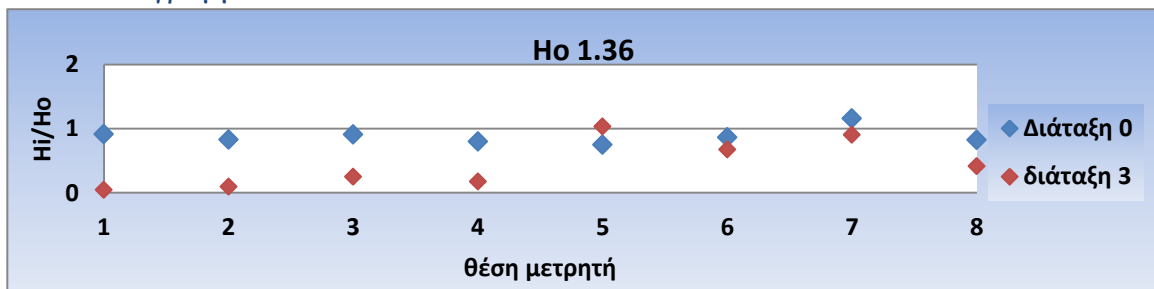
Διάγραμμα 3.20



(Ho 3.20, Τρ 8.53)

3.11.3 Διάταξη 3

Διάγραμμα 3.21



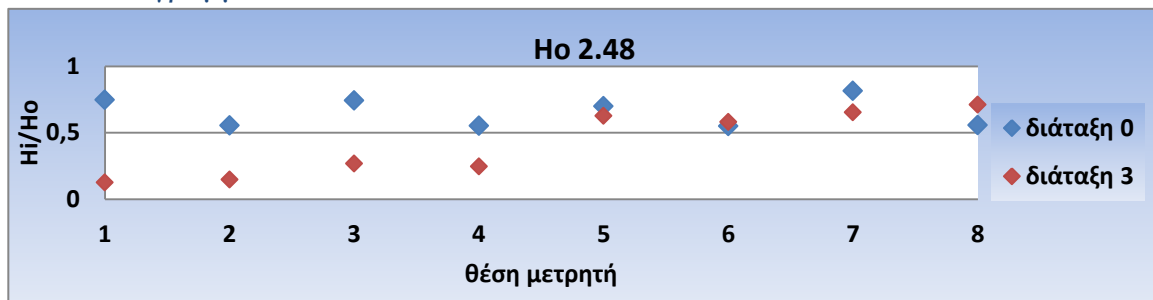
(Ho 1.36, Τρ 5.69)

Διάγραμμα 3.22



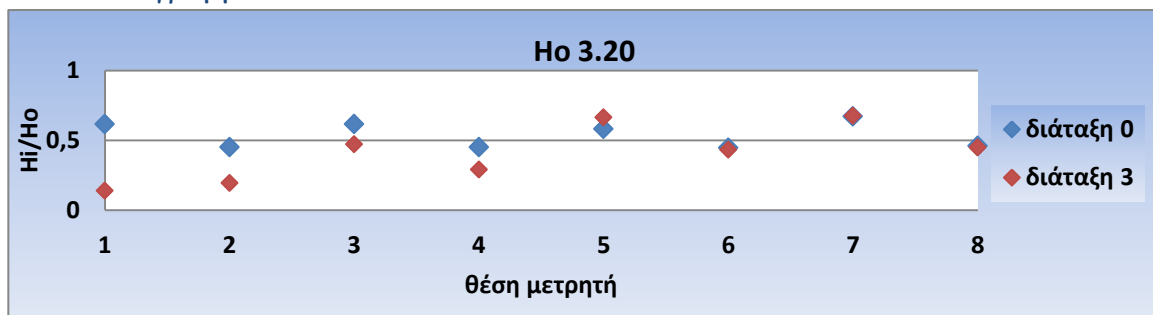
(Ho 1.84, Τρ 6.40)

Διάγραμμα 3.23



(Ho 2.48, Τρ 7.31)

Διάγραμμα 3.24



(Ho 3.20, Τρ 8.53)

3.12) Συμπεράσματα από τα αποτελέσματα των αριθμητικών μετρήσεων με τη μορφή διαγραμμάτων για γωνία πρόσπτωσης 45° και 90°

Από τα διαγράμματα 3.1- 3.24 είναι δυνατό να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα:

- Ο συνδυασμός των αντίστοιχων αριθμητικών δεδομένων του προγράμματος MIKE 21-PMS για δεδομένο ύψος και μέγιστη περίοδο φάσματος και γωνία πρόσπτωσης του παραγόμενου κυματισμού για τις τρεις διαφορετικές διατάξεις του έργου που εξετάστηκαν καθιστά περισσότερο εμφανή τη μετατόπιση των μέγιστων τιμών του λόγου H_i/H_0 προς τα κατάντη του λιμένα, δηλαδή στις θέσεις 5 έως 7 και 6 έως 8 για βάθη νερού για βάθη νερού -3 m και -2 m αντίστοιχα, ως αποτέλεσμα των διαδοχικών προεκτάσεων του προσήνεμου μόλου προς την ίδια κατεύθυνση. Το φαινόμενο αυτό διακρίνεται σαφέστερα σε βάθος νερού -3 m, για γωνία πρόσπτωσης $\varphi=45^\circ$ (ενδεικτικά Διαγράμματα 3.13-3.24).
- Όπως ήταν άλλωστε αναμενόμενο, οι τιμές του λόγου H_i/H_0 διατηρούνται χαμηλές στις θέσεις των μετρητών οι οποίες βρίσκονται υπό την προστασία του προσήνεμου μόλου, δηλαδή στις θέσεις 1-6 για τις διατάξεις έργου 1,2 και 3 (ενδεικτικά Διαγράμματα 3.1-3.24).
- Ειδικότερα στην περίπτωση των θέσεων 7,8, σημειώνεται απότομα μεγάλη άνοδος του λόγου H_i/H_0 στις θέσεις μετρητών 7,8, και για τις δύο διευθύνσεις πρόσπτωσης των κυματισμών που εξετάστηκαν (Διαγράμματα 3.1-3.24). Οι δυσανάλογα υψηλές αυτές τιμές, ιδιαίτερα για τα μεγαλύτερα ύψη των παραγόμενων κυματισμών, οφείλονται στη σύνθεση του προσπίπτοντος κυματισμού που φτάνει στις θέσεις των περισσότερο απομακρυσμένων από το λιμένα μετρητών με τον μερικώς ανακλώμενο όριο, στην αριστερή παρειά του φυσικού προσομοιώματος. Ο ανακλώμενος κυματισμός έχει διεύθυνση διάδοσης σχεδόν κάθετη σε αυτή που δημιουργούν οι κυματιστήρες.

3.13) Ποσοτική ερμηνεία των αποτελεσμάτων

Στην προσπάθεια ποσοτικοποίησης του υπό μελέτη φαινομένου της αύξησης του ύψους των προσπιπτόντων κυματισμών στις θέσεις κατάντη του λιμένα που προσομοιώθηκε, συντάχθηκε ο επόμενος Πίνακας 3.3, στον οποίο σημειώνονται τα εύρη και οι μέσες τιμές του λόγου H_i/H_0 , για τις διάφορες πειραματικές διατάξεις και γωνίες πρόσπτωσης των κυματισμών, αλλά και για τα βάθη νερού που εξετάστηκαν κατά την πειραματική διαδικασία.

Υπολογίζεται, επίσης, η ποσοστιαία διαφορά των μέσων τιμών που μετρήθηκαν στις θέσεις 3 έως 9 και 4 έως 8 από αυτές που καταγράφηκαν στις θέσεις 1 και 2 αντίστοιχα, ως δείκτης της ενίσχυσης της κυματικής δράσης κατάντη των θέσεων αυτών.

(Πίνακας 3.3 Μέσες τιμές και ποσοστιαίες διαφορές του λόγου H_i/H_0)

Γωνία πρόσπτωσης κυματισμών	χ	Hi/H0 (%)				% Διαφορά			
		1	3	5	7	"1-3"	'3-5"	'5-7"	
ΔΙΑΤΑΞΗ 0	$\Phi=45^\circ$	μέση τιμή	79%	79%	71%	92%	0%	8%	21%
	$\Phi=90^\circ$	μέση τιμή	76%	78%	80%	54%	2%	1%	25%
			Hi/H0 (%)				% Διαφορά		
			2	4	6	8	"2-4"	'4-6"	'6-8"
ΔΙΑΤΑΞΗ 1	$\Phi=45^\circ$	μέση τιμή	64%	62%	64%	92%	1%	1%	28%
	$\Phi=90^\circ$	μέση τιμή	59%	66%	54%	62%	7%	11%	7%
			Hi/H0 (%)				% Διαφορά		
			1	3	5	7	"1-3"	'3-5"	'5-7"
ΔΙΑΤΑΞΗ 2	$\Phi=45^\circ$	μέση τιμή	42%	60%	60%	46%	18%	0%	14%
	$\Phi=90^\circ$	μέση τιμή	65%	65%	66%	68%	0%	1%	2%
			Hi/H0 (%)				% Διαφορά		
			2	4	6	8	"1-3"	'3-5"	'5-7"
ΔΙΑΤΑΞΗ 3	$\Phi=45^\circ$	μέση τιμή	29%	46%	47%	45%	17%	1%	2%
	$\Phi=90^\circ$	μέση τιμή	42%	47%	51%	49%	4%	4%	2%
			Hi/H0 (%)				% Διαφορά		
			1	3	5	7	"1-3"	'3-5"	'5-7"
ΔΙΑΤΑΞΗ 4	$\Phi=45^\circ$	μέση τιμή	12%	57%	71%	75%	45%	14%	4%
	$\Phi=90^\circ$	μέση τιμή	21%	69%	63%	72%	48%	6%	9%
			Hi/H0 (%)				% Διαφορά		
			2	4	6	8	"2-4"	'4-6"	'6-8"
ΔΙΑΤΑΞΗ 5	$\Phi=45^\circ$	μέση τιμή	11%	35%	51%	52%	24%	15%	2%
	$\Phi=90^\circ$	μέση τιμή	27%	48%	51%	50%	21%	3%	1%
			Hi/H0 (%)				% Διαφορά		
			1	3	5	7	"1-3"	'3-5"	'5-7"
ΔΙΑΤΑΞΗ 6	$\Phi=45^\circ$	μέση τιμή	13%	49%	59%	64%	36%	10%	4%
	$\Phi=90^\circ$	μέση τιμή	46%	90%	91%	94%	44%	1%	3%
			Hi/H0 (%)				% Διαφορά		
			2	4	6	8	"2-4"	'4-6"	'6-8"
ΔΙΑΤΑΞΗ 7	$\Phi=45^\circ$	μέση τιμή	9%	30%	78%	74%	21%	48%	2%
	$\Phi=90^\circ$	μέση τιμή	13%	23%	58%	54%	9%	36%	4%

Η μελέτη του παραπάνω πίνακα οδηγεί στη διαπίστωση ότι για τις δύο πρώτες πειραματικές διατάξεις που εξετάστηκαν, η κυματική εντατικοποίηση προκύπτει εντονότερη για βάθος νερού -3 m. Επίσης, επιβεβαιώνεται η εξάπλωση του εν λόγω φαινομένου προς τα κατάντη του λιμένα, καθώς επιμηκύνεται ο προσήνεμος μόλος του. Πιο συγκεκριμένα, για τις πειραματικές διατάξεις 2 και 3, η ποσοστιαία διαφορά που υπολογίζεται στον Πίνακα 3.3 αυξάνεται όσο απομακρυνόμαστε από το έργο και φτάνει, ενδεικτικά, το 72 % στη θέση 7 για τη διάταξη 2 και το 94 % στη θέση 7 για τη διάταξη 3, για $\varphi=90^\circ$. Παρατηρούμε ακόμη ότι η μέγιστη αύξηση, για γωνία πρόσπτωσης 45° , εμφανίζεται στη δεύτερη πειραματική διάταξη, στη θέση 7 με βάθος -3 m και ισούται με 75%. Αντίστοιχα, η μέγιστη ποσοστιαία αύξηση του μεγέθους H_i/H_0 , σε σχέση με την τιμή που μετρήθηκε στις πλησιέστερες στο έργο θέσεις, η οποία προέκυψε κατά τις πειραματικές δοκιμές στις οποίες οι παραγόμενοι κυματισμοί είχαν διεύθυνση πρόσπτωσης 90° ως προς την ακτή, ισούται με 91% και αφορά στην τρίτη διάταξη έργου και ειδικότερα, στη θέση 5, με βάθος -3 m. Επίσης όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα υπάρχει έντονη διαφορά μεταξύ των τιμών H_i/H_0 στις θέσεις που βρίσκονται κοντά στο έργο μεταξύ των διατάξεων 1,2 και της διάταξης 0 καθώς στη διάταξη 0 οι θέσεις των μετρητών δεν βρίσκονται υπό την προστασία του προσήνεμου μόλου. Τέλος, ιδιαίτερη σημασία πρέπει να δοθεί στις αυξημένες τιμές που εμφανίζονται στις θέσεις πλησιέστερα στην ακτή και ειδικά για $\varphi=90^\circ$ στις διατάξεις 1,2 και για $\varphi=45^\circ$ στην τρίτη. Η ενίσχυση του κυματισμού στις θέσεις αυτές, η οποία ανέρχεται έως και το 74%, ευθύνεται χωρίς αμφιβολία για τη διάβρωση της παρακείμενης ακτής. Συμπεραίνουμε, λοιπόν ότι ο Πίνακας 3.3 τεκμηριώνει ποσοτικά τις διαπιστώσεις που προέκυψαν από τα διαγράμματα που προηγήθηκαν.

Κεφάλαιο 4: Σύγκριση αποτελεσμάτων πειράματος με το πρόγραμμα MIKE 21 PMS (parabolic mild-slope)

4.1) Αποτελέσματα αριθμητικών και πειραματικών μετρήσεων με τη μορφή διαγραμμάτων και συμπεράσματα για γωνία πρόσπτωσης 90°

Ακολουθεί η διαγραμματική απεικόνιση των τιμών του λόγου H_i/H_0 σε κάθε θέση των ηχοβολιστικών μετρητών. Τα διαγράμματα διατάσσονται ανά κοινή τιμή της μέγιστης περιόδου φάσματος T_p και κατά αύξουσα τιμή του ύψους Ηθεωρητικό(Hs) του κυματισμού που παράχθηκε από τους κυματιστήρες σε κάθε πειραματική και αριθμητική δοκιμή.

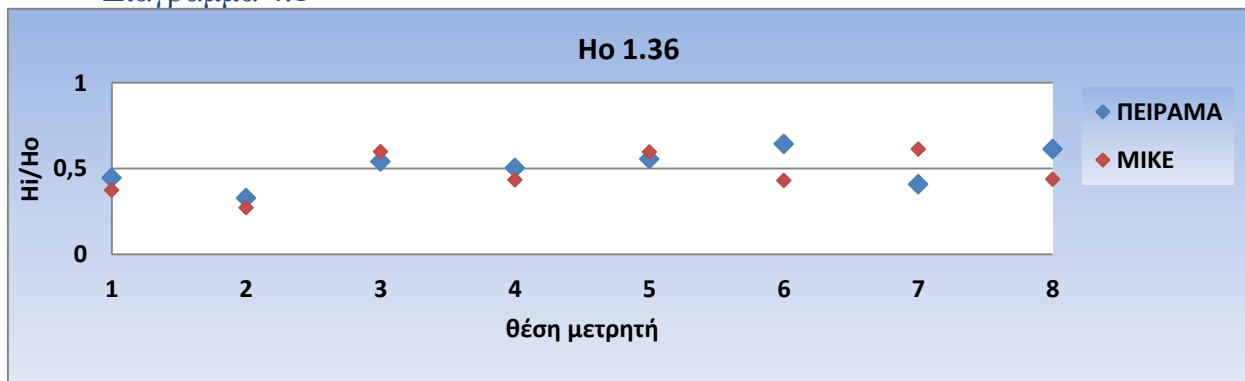
4.1.1 Διάταξη έργου 1

γωνία πρόσπτωσης 90°
(αποτελέσματα υψών κύματος ανά θέση μετρητή)

	Hs	T	M1	M2	M3	1	2	3	4	5	6	7	8
ΠΕΙΡΑΜΑ	1,36	5,69	1,35	1,44	1,40	0,61	0,45	0,74	0,69	0,76	0,88	0,56	0,84
MIKE	1,36	5,69	1,40	1,40	1,40	0,51	0,37	0,82	0,59	0,82	0,59	0,84	0,60
	Hs	T	M1	M2	M3	1	2	3	4	5	6	7	8
ΠΕΙΡΑΜΑ	1,87	6,4	2,02	2,03	1,97	1,18	0,96	1,24	1,34	1,40	1,50	1,15	1,20
MIKE	1,87	6,4	1,99	1,99	1,99	0,92	0,67	1,28	0,96	1,27	0,99	1,36	0,97
	Hs	T	M1	M2	M3	1	2	3	4	5	6	7	8
ΠΕΙΡΑΜΑ	2,48	7,88	2,82	2,42	2,63	1,55	1,05	1,82	1,64	2,02	1,96	1,41	-
MIKE	2,48	7,88	2,90	2,90	2,90	1,27	0,82	1,71	1,36	1,81	1,44	1,83	1,27
	Hs	T	M1	M2	M3	1	2	3	4	5	6	7	8
ΠΕΙΡΑΜΑ	3,28	8,53	3,55	2,72	3,34	1,69	1,18	2,18	1,68	2,23	2,18	1,59	1,52
MIKE	3,28	8,53	3,48	3,48	3,48	1,31	0,90	1,83	1,47	1,96	1,45	2,02	1,39

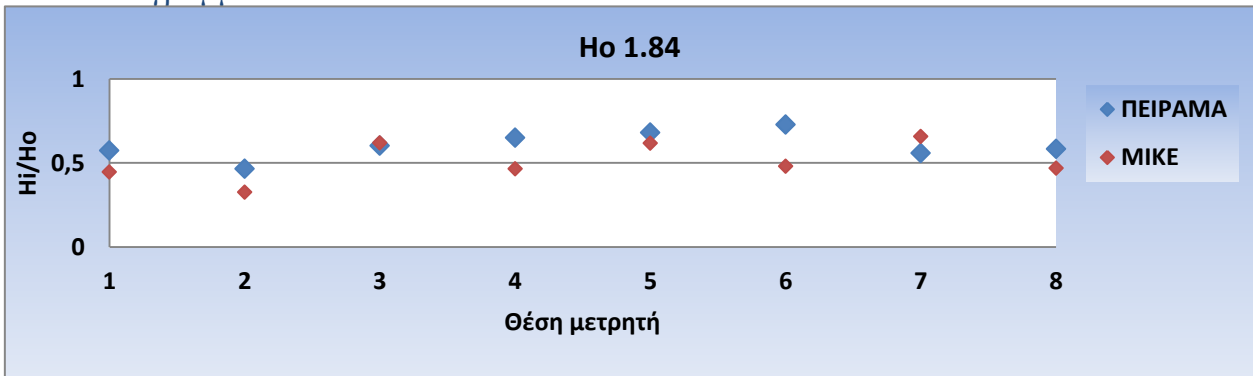
Πίνακας 4. 1

Διάγραμμα 4.1



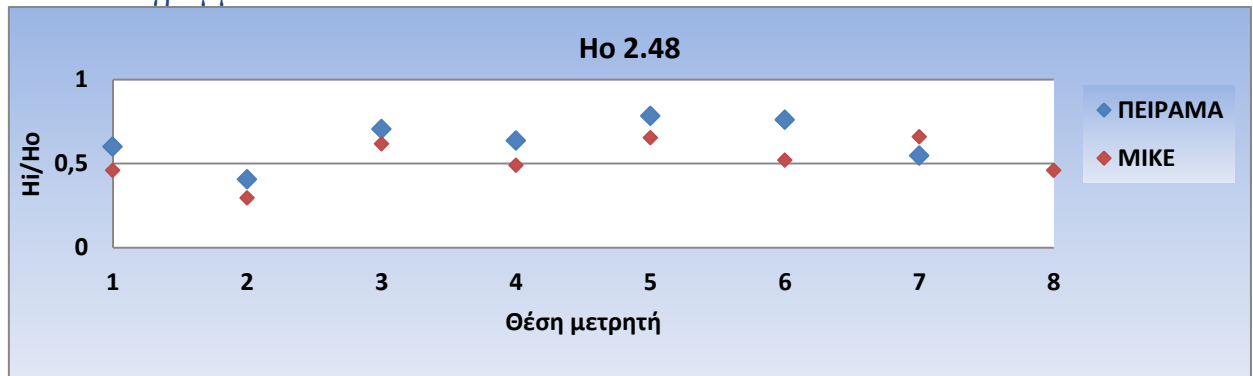
(H₀ 1.36, T_p 5.69)

Διάγραμμα 4.2



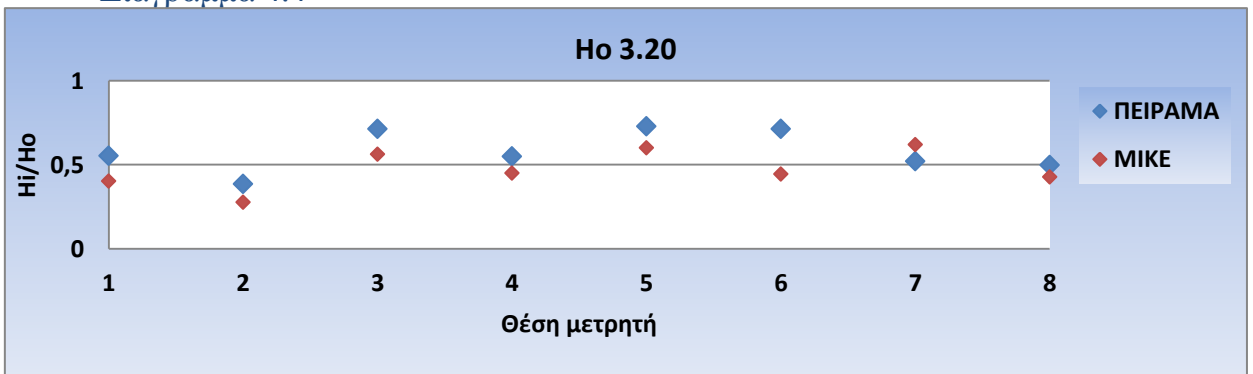
(Ho 1.84, Τρ 6.40)

Διάγραμμα 4.3



(Ho 2.48, Τρ 7.31)

Διάγραμμα 4.4



(Ho 3.20, Τρ 8.53)

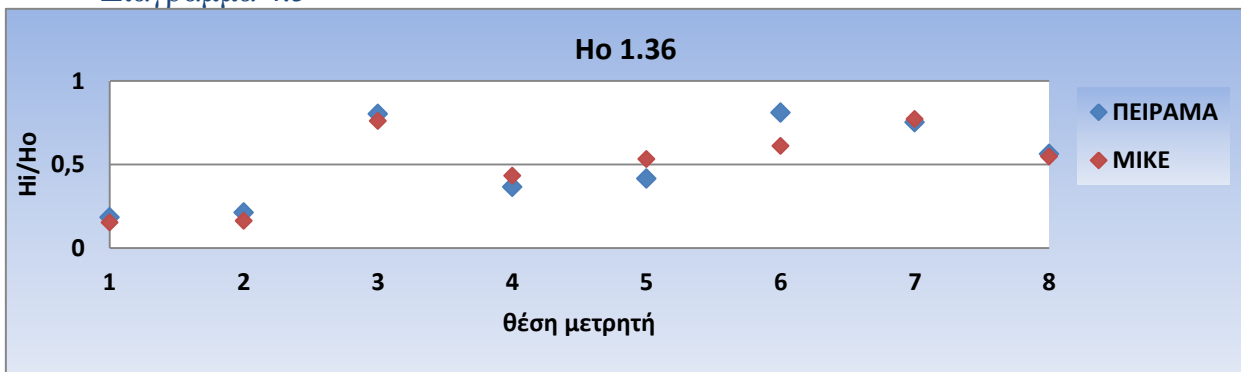
4.1.2 Διάταξη έργου 2

γωνία πρόσπτωσης 90°
(αποτελέσματα υψών κύματος ανά θέση μετρητή)

	Hs	T	M1	M2	M3	1	2	3	4	5	6	7	8
ΠΕΙΡΑΜΑ	1.36	5.69	1.37	1.20	1.31	0.25	0.29	1.10	0.50	0.57	1.11	1.03	0.77
ΜΙΚΕ	1.36	5.69	1.37	1.37	1.37	0.21	0.22	1.04	0.59	0.73	0.84	1.06	0.75
	Hs	T	M1	M2	M3	1	2	3	4	5	6	7	8
ΠΕΙΡΑΜΑ	1.84	6.40	2.06	2.05	2.22	0.48	0.61	1.56	0.97	1.65	1.40	1.70	1.43
ΜΙΚΕ	1.84	6.40	2.05	2.05	2.05	0.39	0.79	1.58	1.17	1.59	1.15	1.62	1.17
	Hs	T	M1	M2	M3	1	2	3	4	5	6	7	8
ΠΕΙΡΑΜΑ	2.48	7.31	2.58	2.88	2.85	0.73	0.87	2.15	1.40	2.14	-	-	-
ΜΙΚΕ	2.48	7.31	2.77	2.77	2.77	0.60	0.75	1.79	1.35	1.84	1.31	1.96	1.31
	Hs	T	M1	M2	M3	1	2	3	4	5	6	7	8
ΠΕΙΡΑΜΑ	3.2	8.53	3.06	3.35	3.48	1.09	0.94	1.75	1.47	2.36	1.62	1.93	1.49
ΜΙΚΕ	3.2	8.53	3.27	3.27	3.27	0.88	0.85	1.92	1.45	1.84	1.35	2.06	1.36

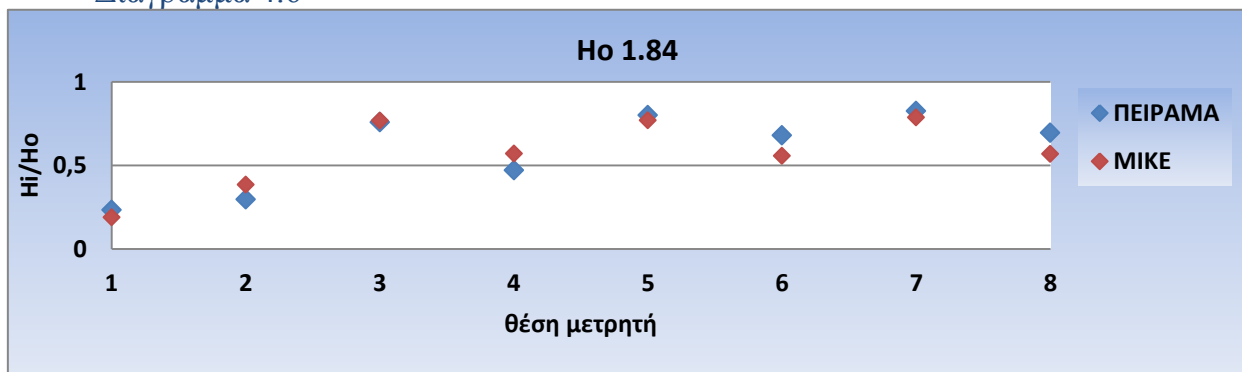
Πίνακας 4. 2

Διάγραμμα 4.5



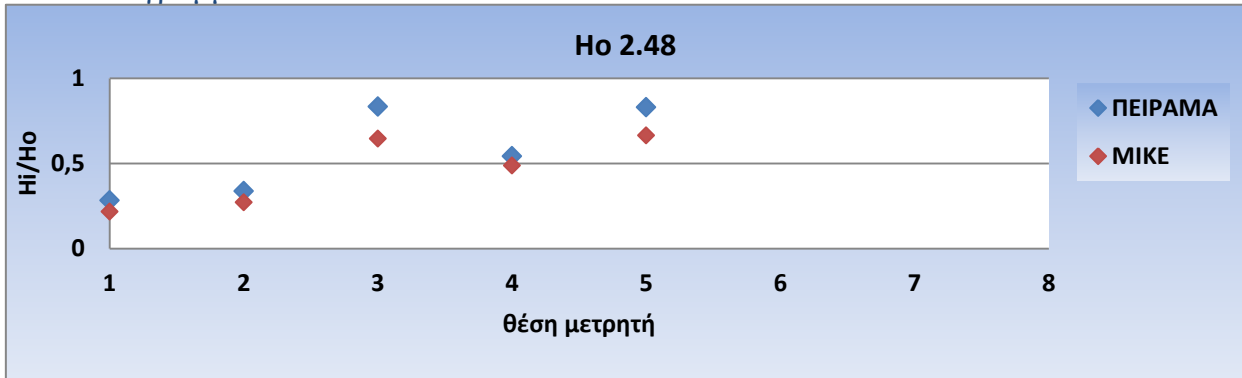
(Ho 1.36, Tp 5.69)

Διάγραμμα 4.6



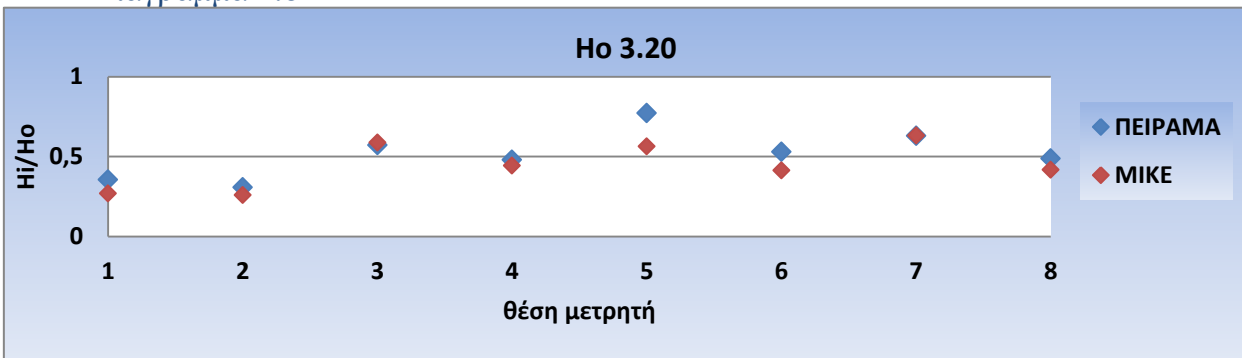
(Ho 1.84, Tp 6.40)

Διάγραμμα 4.7



(Ho 2.48, Τρ 7.31)

Διάγραμμα 4.8



(Ho 3.20, Τρ 8.53)

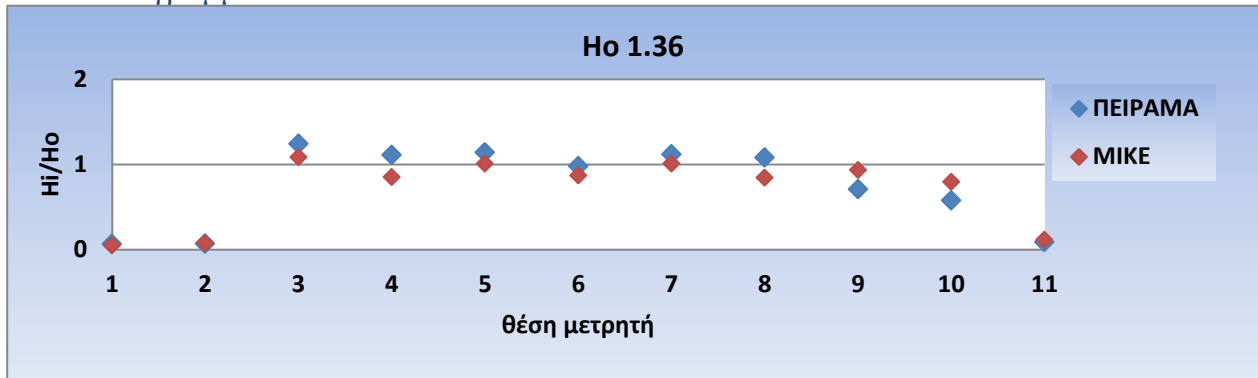
4.1.3 Διάταξη έργου 3

γωνία πρόσπτωσης 90°
(αποτελέσματα υψών κύματος ανά θέση μετρητή)

	Hs	T	M1	M2	M3	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ΠΕΙΡΑΜΑ	1.36	5.69	1.46	1.28	1.36	0.09	0.09	1.70	1.52	1.56	1.34	1.53	1.48	0.97	0.79	0.12
ΜΙΚΕ	1.36	5.69	1.37	1.37	1.37	0.07	0.11	1.48	1.17	1.38	1.19	1.38	1.15	1.28	1.09	0.15
ΠΕΙΡΑΜΑ	1.84	6.40	2.14	2.01	2.05	0.20	0.30	0.69	0.59	1.64	1.77	1.86	1.62	1.72	1.11	0.24
ΜΙΚΕ	1.84	6.40	2.05	2.05	2.05	0.19	0.21	0.77	0.65	1.53	1.38	1.65	1.27	1.61	1.23	0.20
ΠΕΙΡΑΜΑ	2.48	7.31	2.73	2.97	2.73	0.42	0.59	0.99	0.93	2.37	-	2.39	2.52	3.13	1.88	0.63
ΜΙΚΕ	2.48	7.31	2.77	2.77	2.77	0.38	0.46	0.75	1.08	1.95	1.23	1.93	1.89	2.81	1.45	0.52
ΠΕΙΡΑΜΑ	3.20	8.53	3.18	3.35	3.27	0.61	0.78	1.33	1.29	2.62	1.34	2.16	1.53	0.89	0.93	0.17
ΜΙΚΕ	3.20	8.53	3.27	3.27	3.27	0.45	0.59	1.32	1.34	1.95	1.26	2.03	1.31	1.20	1.08	0.21

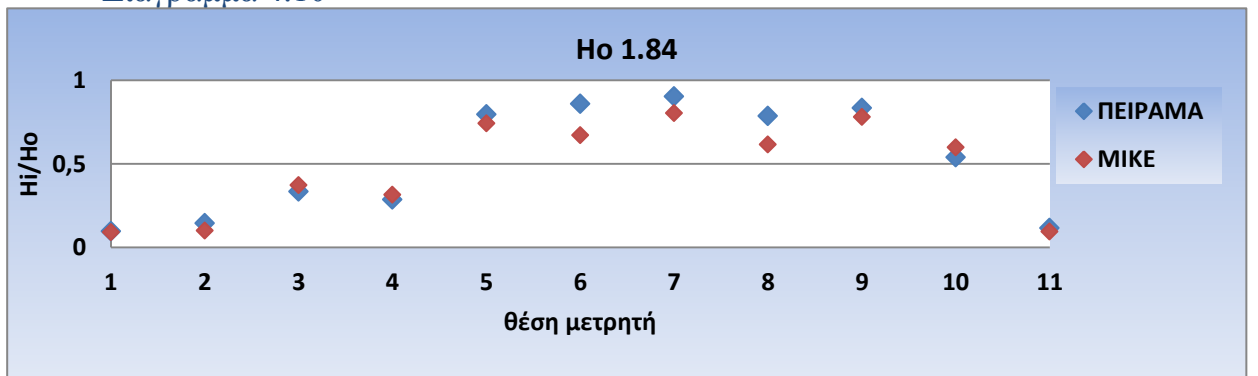
Πίνακας 4. 3

Διάγραμμα 4.9



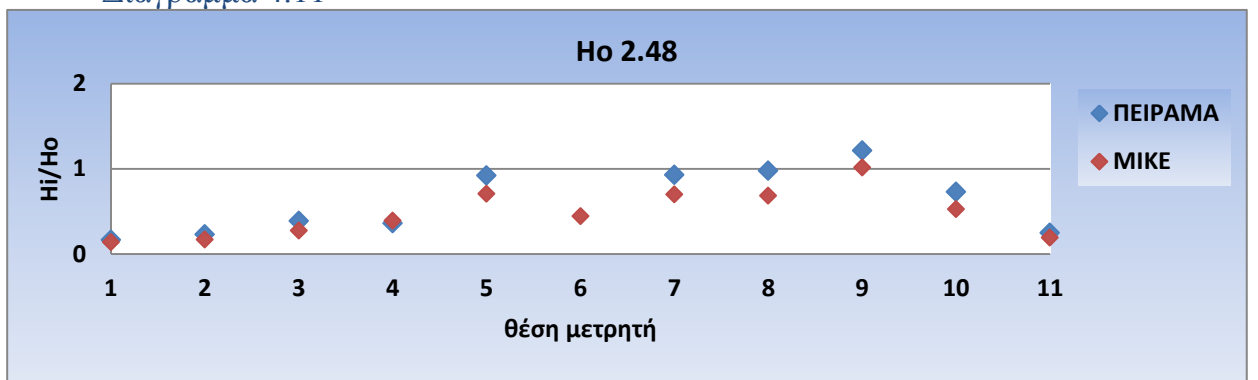
(Ho 1.36, Τρ 5.69)

Διάγραμμα 4.10



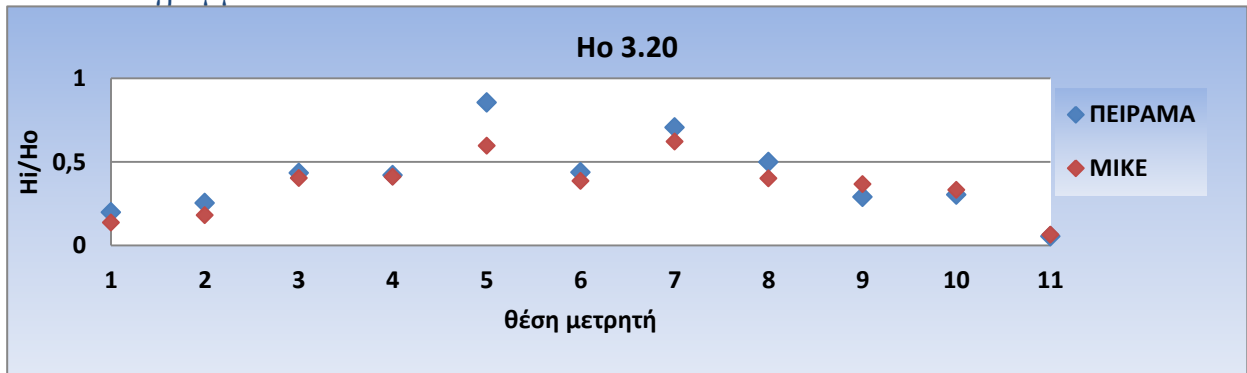
(Ho 1.84, Τρ 6.40)

Διάγραμμα 4.11



(Ho 2.48, Τρ 7.31)

Διάγραμμα 4.12



(Ho 3.20, Τρ 8.53)

4.2) Αποτελέσματα αριθμητικών και πειραματικών μετρήσεων με τη μορφή διαγραμμάτων και συμπεράσματα για γωνία πρόσπτωσης 45°

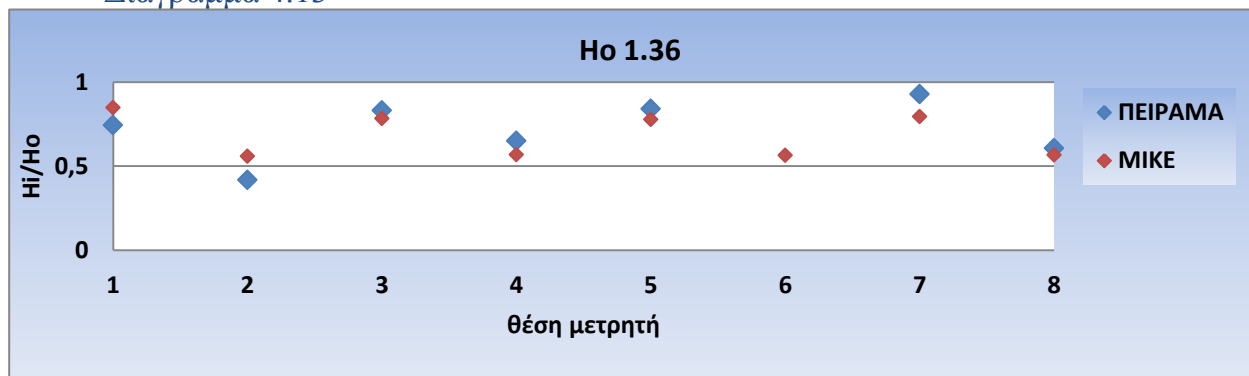
4.2.1 Διάταξη έργου 1

γωνία πρόσπτωσης 45°
(αποτελέσματα υψών κύματος ανά θέση μετρητή)

	Hs	T	M1	M2	M3	1	2	3	4	5	6	7	8
ΠΕΙΡΑΜΑ	1,36	5,69	1,44	1,32	1,44	0,88	0,59	1,01	0,55	0,77	0,53	1,19	0,78
ΜΙΚΕ	1,36	5,69	1,36	1,36	1,36	0,89	0,58	0,81	0,58	0,82	0,58	0,85	0,69
	Hs	T	M1	M2	M3	1	2	3	4	5	6	7	8
ΠΕΙΡΑΜΑ	1,87	6,40	2,00	2,01	2,23	1,53	0,86	1,71	1,34	1,73	-	1,91	1,25
ΜΙΚΕ	1,87	6,40	1,99	2,00	2,00	1,75	1,15	1,61	1,17	1,60	1,16	1,64	1,17
	Hs	T	M1	M2	M3	1	2	3	4	5	6	7	8
ΠΕΙΡΑΜΑ	2,48	7,88	2,53	2,90	2,91	1,75	1,04	2,07	1,45	2,29	1,48	2,03	1,52
ΜΙΚΕ	2,48	7,88	2,90	2,90	2,90	1,91	1,23	1,78	1,26	1,85	1,26	1,86	1,26
	Hs	T	M1	M2	M3	1	2	3	4	5	6	7	8
ΠΕΙΡΑΜΑ	3,28	8,53	3,55	2,72	3,34	1,69	1,18	2,18	1,68	2,23	2,18	1,59	1,52
ΜΙΚΕ	3,28	8,53	3,48	3,48	3,48	1,31	0,90	1,83	1,47	1,96	1,45	2,02	1,39

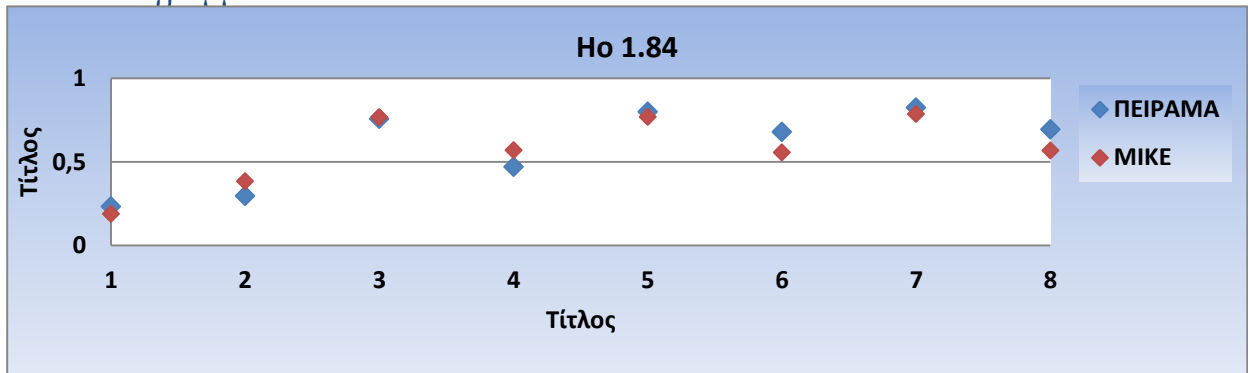
Πίνακας 4. 4

Διάγραμμα 4.13



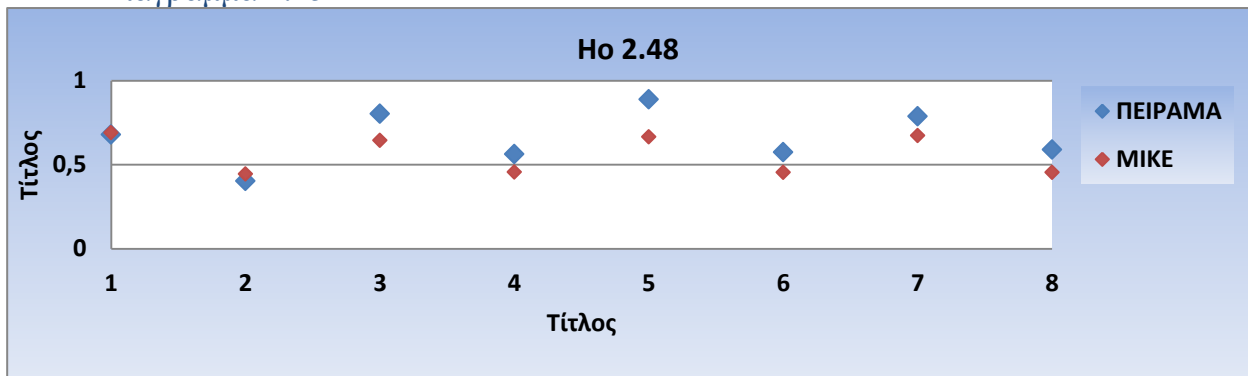
(Ho 1.36, Tr 5.69)

Διάγραμμα 4.14



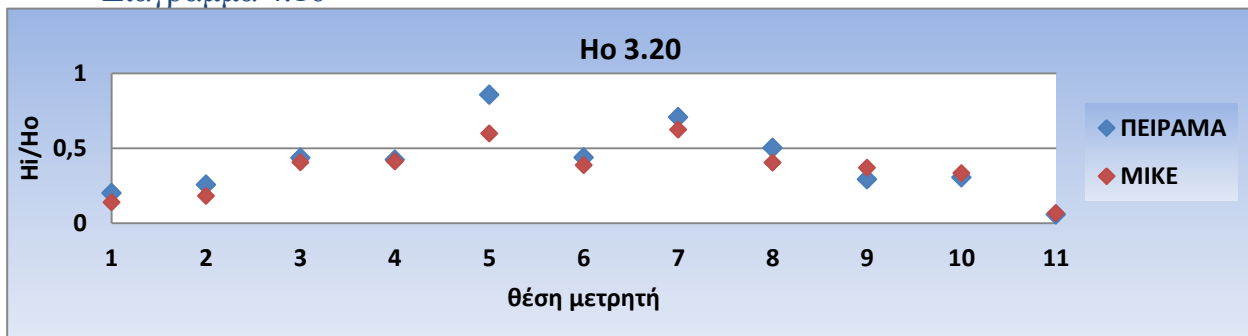
(Ho 1.84, Τρ 6.40)

Διάγραμμα 4.15



(Ho 2.48, Τρ 7.31)

Διάγραμμα 4.16



(Ho 3.20, Τρ 8.53)

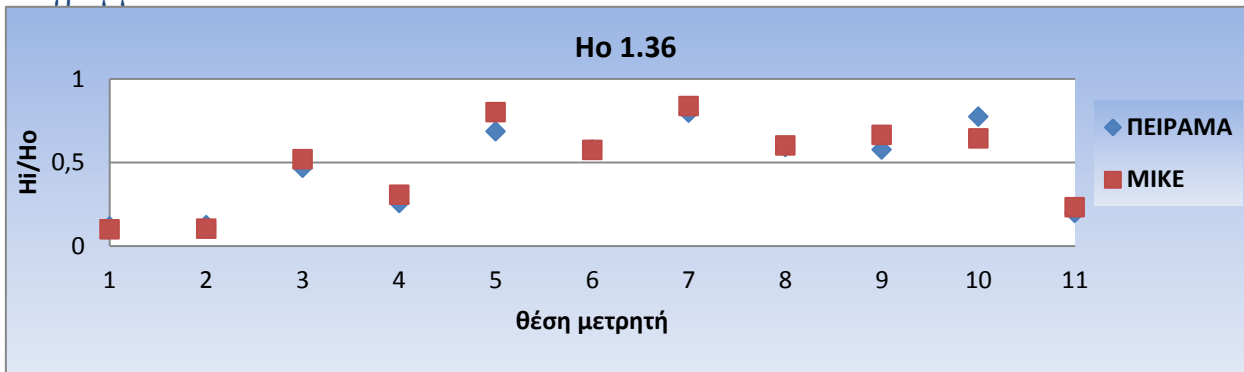
4.2.2 Διάταξη έργου 2

γωνία πρόσπτωσης 45°
(αποτελέσματα υψών κύματος ανά θέση μετρητή)

	Hs	T	M1	M2	M3	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ΠΕΙΡΑΜΑ	1.36	5.69	1.36	1.46	1.47	0.16	0.17	0.64	0.35	0.94	0.79	1.09	0.81	0.79	1.06	0.27
ΜΙΚΕ	1.36	5.69	1.37	1.37	1.37	0.14	0.11	0.98	0.62	1.10	0.79	1.15	0.82	1.08	0.88	0.32
	Hs	T	M1	M2	M3	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ΠΕΙΡΑΜΑ	1.87	6.40	2.04	2.01	2.06	0.25	0.28	0.98	0.62	1.49	1.08	1.55	1.31	1.44	1.31	0.40
ΜΙΚΕ	1.87	6.40	2.05	2.05	2.05	0.22	0.27	1.40	0.89	1.56	1.13	1.63	1.20	1.56	1.29	0.34
	Hs	T	M1	M2	M3	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ΠΕΙΡΑΜΑ	2.48	7.31	2.48	2.29	2.37	0.40	0.40	1.30	1.02	1.87	1.28	1.88	1.48	1.88	1.47	0.64
ΜΙΚΕ	2.48	7.31	2.77	2.77	2.77	0.35	0.34	1.71	1.11	1.86	1.34	2.04	1.34	1.90	1.50	0.54
	Hs	T	M1	M2	M3	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ΠΕΙΡΑΜΑ	3.20	8.53	3.46	2.67	3.03	0.59	0.61	1.76	1.26	2.09	1.36	2.25	1.57	2.07	1.52	0.85
ΜΙΚΕ	3.20	8.53	3.27	3.27	3.27	0.48	0.28	1.83	1.19	1.97	1.37	2.07	1.40	1.99	1.52	0.74

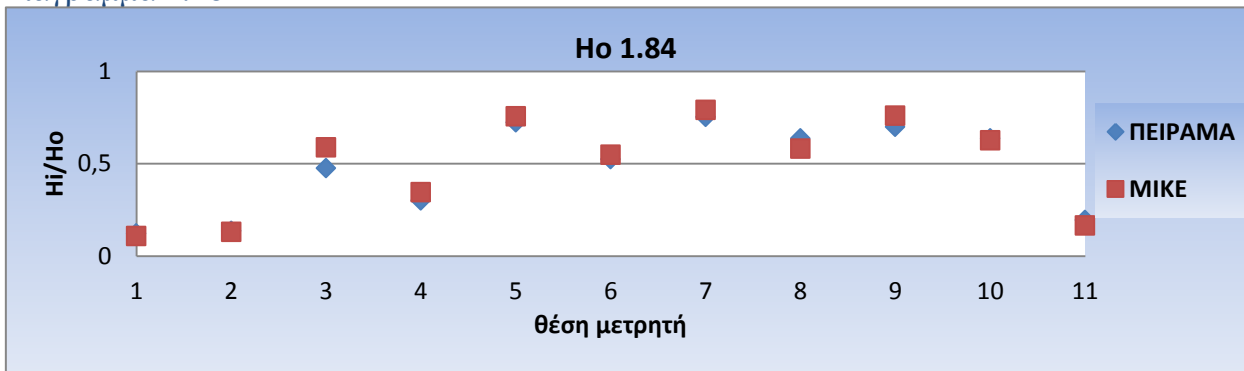
Πίνακας 4. 5

Διάγραμμα 4.17



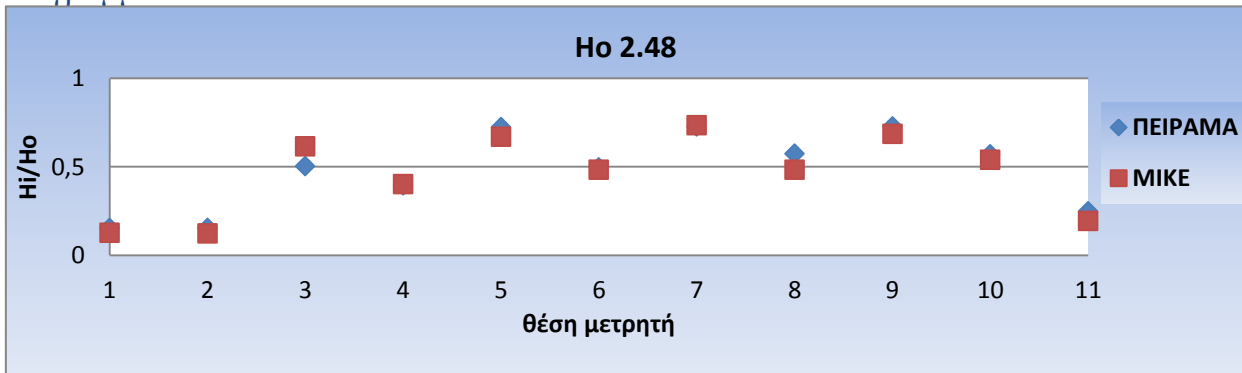
(Ho 1.36, Tp 5.69)

Διάγραμμα 4.18



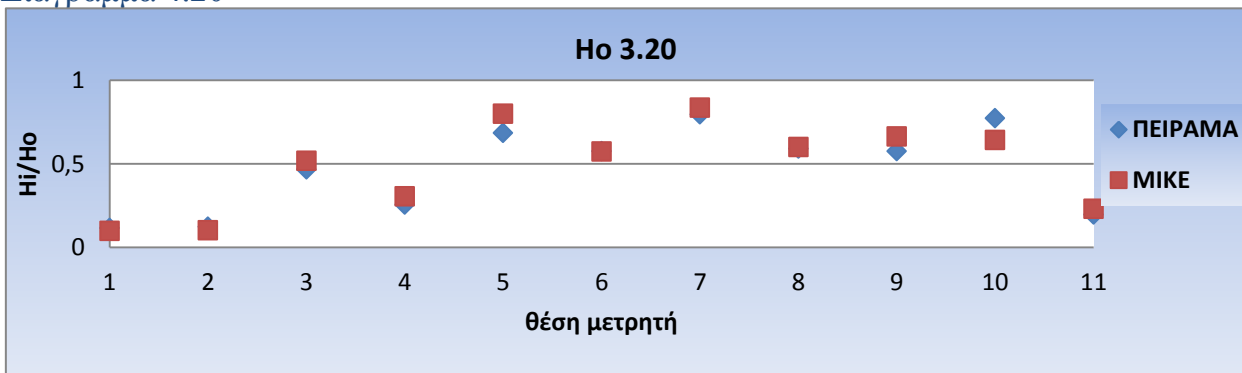
(Ho 1.84, Tp 6.40)

Διάγραμμα 4.19



(Ho 2.48, Τρ 7.31)

Διάγραμμα 4.20



(Ho 3.20, Τρ 8.53)

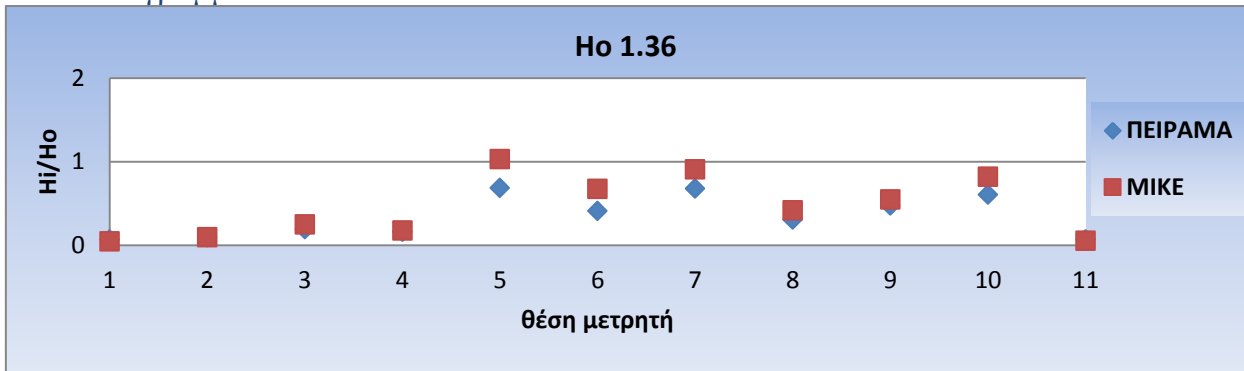
4.2.3 Διάταξη έργου 3

γωνία πρόσπτωσης 45°
(αποτελέσματα υψών κύματος ανά θέση μετρητή)

	Hs	T	M1	M2	M3	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ΠΕΙΡΑΜΑ	1.36	5.69	1.36	1.46	1.40	0.09	0.13	0.26	0.22	0.94	0.56	0.93	0.42	0.65	0.83	0.09
ΜΙΚΕ	1.36	5.69	1.37	1.37	1.37	0.06	0.13	0.34	0.24	1.41	0.92	1.24	0.57	0.75	1.12	0.07
	Hs	T	M1	M2	M3	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ΠΕΙΡΑΜΑ	1.87	6.4	2.14	2.01	2.05	0.20	0.30	0.69	0.59	1.64	1.77	1.86	1.62	1.72	1.11	0.24
ΜΙΚΕ	1.87	6.4	2.05	2.05	2.05	0.14	0.21	0.47	0.42	1.67	1.34	1.69	1.21	1.56	1.30	0.17
	Hs	T	M1	M2	M3	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ΠΕΙΡΑΜΑ	2.48	7.31	2.73	2.97	2.73	0.42	0.59	0.99	0.93	2.37		2.39	2.52	3.13	1.88	0.63
ΜΙΚΕ	2.48	7.31	2.77	2.77	2.77	0.35	0.41	0.75	0.69	1.74	1.61	1.81	1.97	2.32	1.32	0.44
	Hs	T	M1	M2	M3	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ΠΕΙΡΑΜΑ	3.2	8.53	3.18	3.35	3.27	0.61	0.78	1.33	1.29	2.62	1.34	2.16	1.53	1.89	0.93	0.17
ΜΙΚΕ	3.2	8.53	3.27	3.27	3.27	0.45	0.63	1.53	0.95	2.16	1.41	2.20	1.46	2.18	1.25	0.22

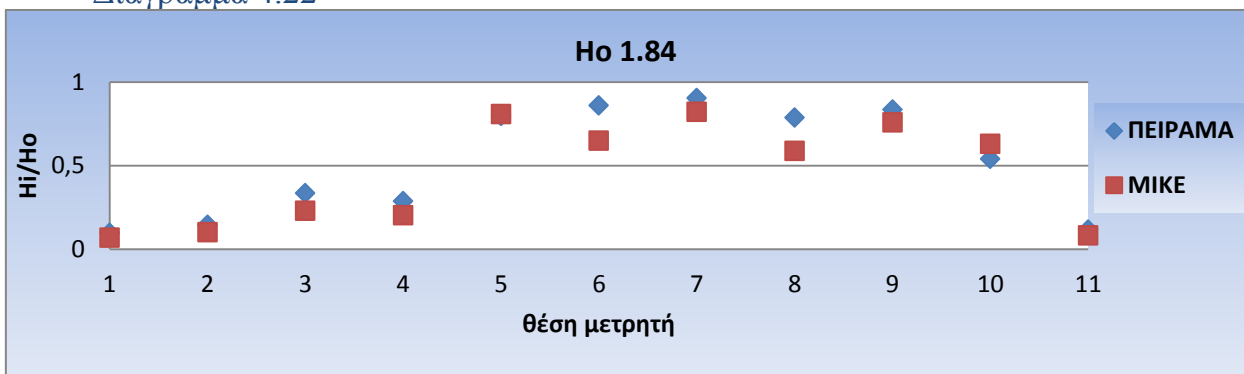
Πίνακας 4. 6

Διάγραμμα 4.21



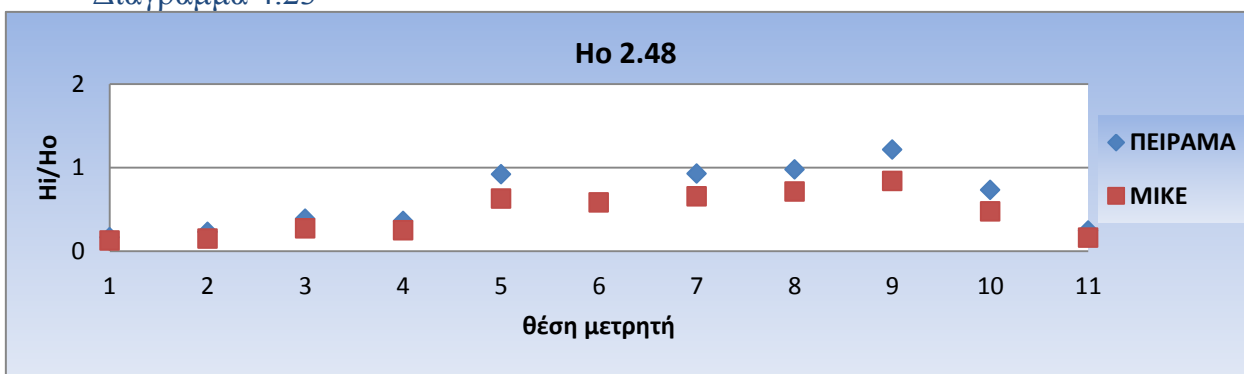
(Ho 1.36, Τρ 5.69)

Διάγραμμα 4.22



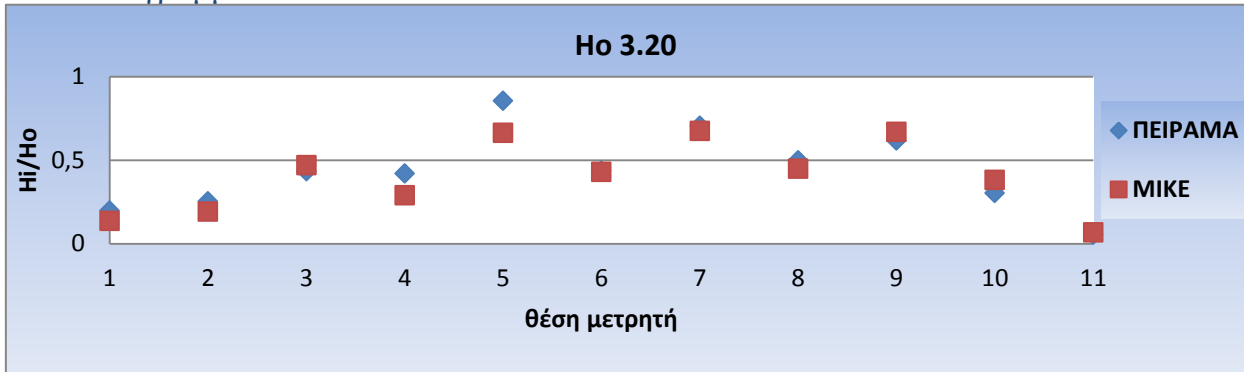
(Ho 1.84, Τρ 6.40)

Διάγραμμα 4.23



(Ho 2.48, Τρ 7.31)

Διάγραμμα 4.24



(Ho 3.20, Τρ 8.53)

4.3) Συμπεράσματα από τα αποτελέσματα αριθμητικών και πειραματικών μετρήσεων για γωνία πρόσπτωσης 45° και 90°

Από τα διαγράμματα 4.1- 4.24 είναι δυνατό να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα:

- i. Παρατηρούμε πως στις θέσεις 1-4 των μετρητών και ιδιαίτερα για γωνία πρόσπτωσης των κυματισμών $\varphi=90^0$ έχουμε υψηλότερες τιμές του αδιάστατου λόγου H_i/H_o στα αποτελέσματα που λαμβάνουμε από την αριθμητική προσομοίωση(διαγράμματα 4.1-4.12). Αυτό συμβαίνει διότι πιθανόν κατά την πειραματική διαδικασία ένα μέρος της κυματικής ενέργειας απορροφάται από τα στερεά όρια της δεξαμενής ,αφού για την απορρόφηση των προσπιπτόντων κυμάτων, έχουν κατασκευασθεί στα τοιχώματά της αποσβεστικές επενδύσεις από λιθορριπή και κοκκομετρία τέτοια ώστε να εξασφαλίζεται πολύ χαμηλός συντελεστής ανάκλασης.
- ii. Όπως αναμενόταν η διαφορά στις τιμές του λόγου H_i/H_o μεταξύ των αποτελεσμάτων του μοντέλου και των πειραμάτων είναι μικρότερη στις θέσεις 1και 11 καθώς η περιοχή αυτή βρίσκεται αμέσως κατάντη του έργου και προστατεύεται από τον προσήνεμο μόλο. και μειώνεται η κυματική δράση.Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα την απόσβεση της κυματικής και την αντίστοιχη μείωση της απόλυτης διαφοράς μεταξύ των αποτελεσμάτων της αριθμητικής και της πειραματικής διαδικασίας.
- iii. Για όλες τις πειραματικές και αριθμητικές μετρήσεις, παρατηρείται συστηματική αύξηση του αδιάστατου λόγου H_i/H_o στις θέσεις των μετρητών 3,5,7,9 οι οποίες βρίσκονται πάνω στην ισοβαθή καμπύλη των -3 m και για τις δύο γωνίες πρόσπτωσης των κυματισμών.Το εύρος διακύμανσης των τιμών της απόλυτης διαφοράς μεταξύ των τιμών για του μετρητές στην ισοβαθή -3 και στην ισοβαθή -2 είναι σταθερό κατά την αριθμητική διαδικασία ενώ μεταβάλλεται σημαντικά στα αποτελέσματα των πειραμάτων.

4.4) Αποτελέσματα αποκλίσεων αριθμητικών και πειραματικών μετρήσεων με τη μορφή διαγραμμάτων και συμπεράσματα για γωνία πρόσπτωσης 90°

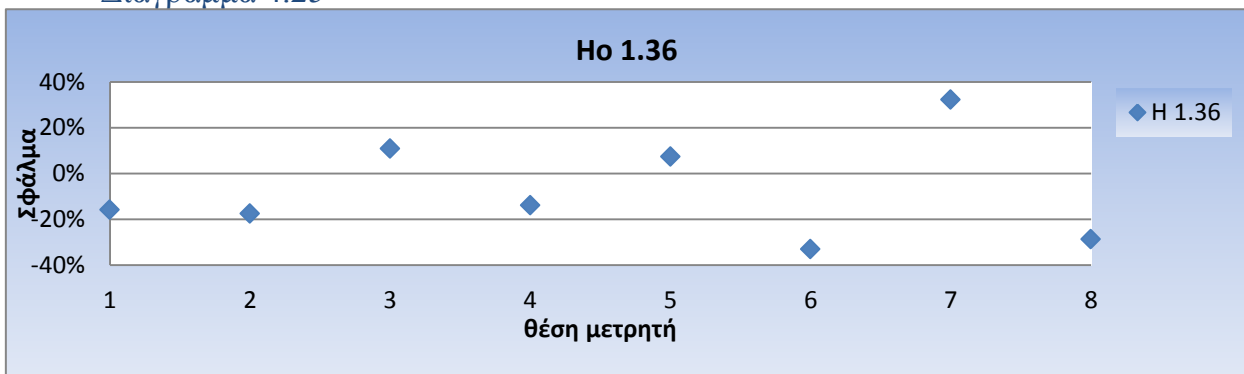
Ακολουθούν τα διαγράμματα σφαλμάτων μεταξύ των μετρήσεων του προκύπτουν από το πρόγραμμα MIKE 21 PMS (parabolic mild-slope) και των αντίστοιχων τιμών από τα πειραματικά δεδομένα σε κάθε θέση των ηχοβολιστικών μετρητών. Τα διαγράμματα διατάσσονται ανά κοινή τιμή της μέγιστης περιόδου φάσματος T_p και κατά αύξουσα τιμή του ύψους Ηθεωρητικό(Hs) του κυματισμού που παράχθηκε από τους κυματιστήρες σε κάθε πειραματική και αριθμητική δοκιμή

Διαγράμματα σφαλμάτων

$$\left(\frac{H_{mike} - H_{πειράματος}}{H_{πειράματος}} \right)$$

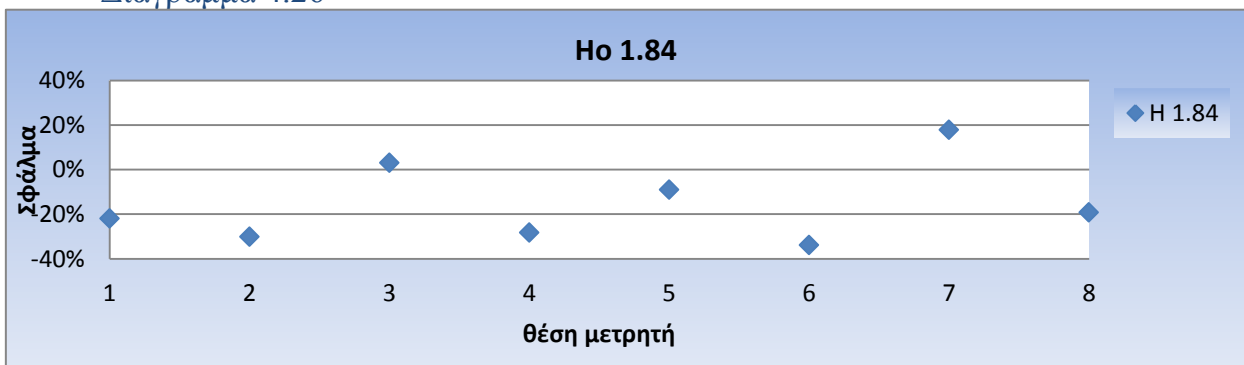
4.4.1 Διάταξη έργου 1

Διάγραμμα 4.25



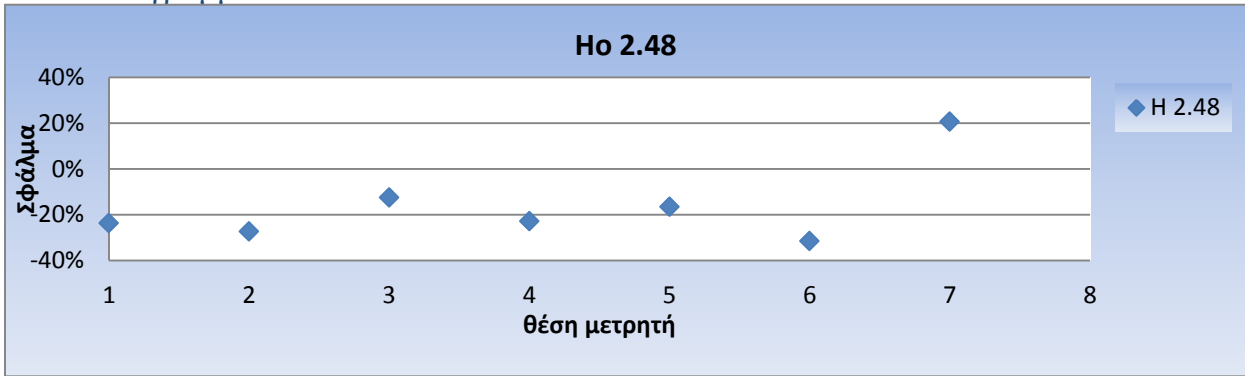
(Ho 1.36, T_p 5.69)

Διάγραμμα 4.26



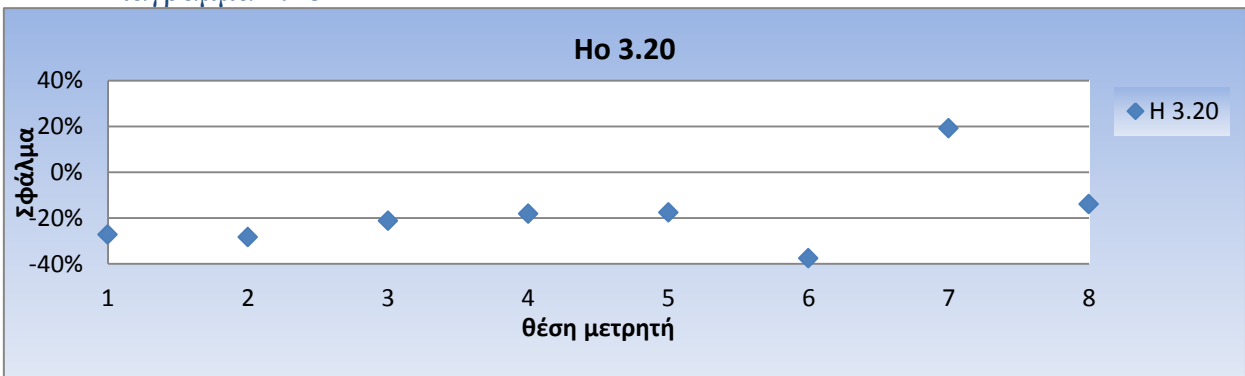
(Ho 1.84, T_p 6.40)

Διάγραμμα 4.27



(Ho 2.48, Tr 7.31)

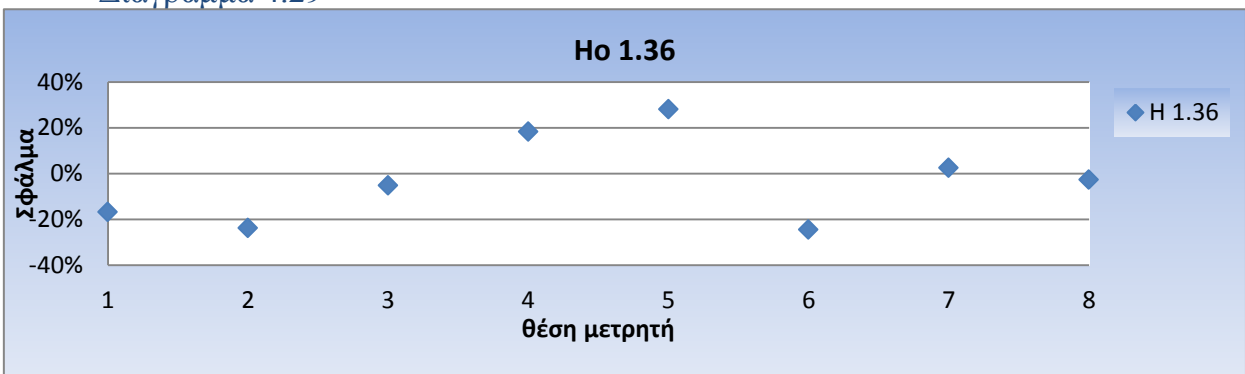
Διάγραμμα 4.28



(Ho 2.48, Tr 7.31)

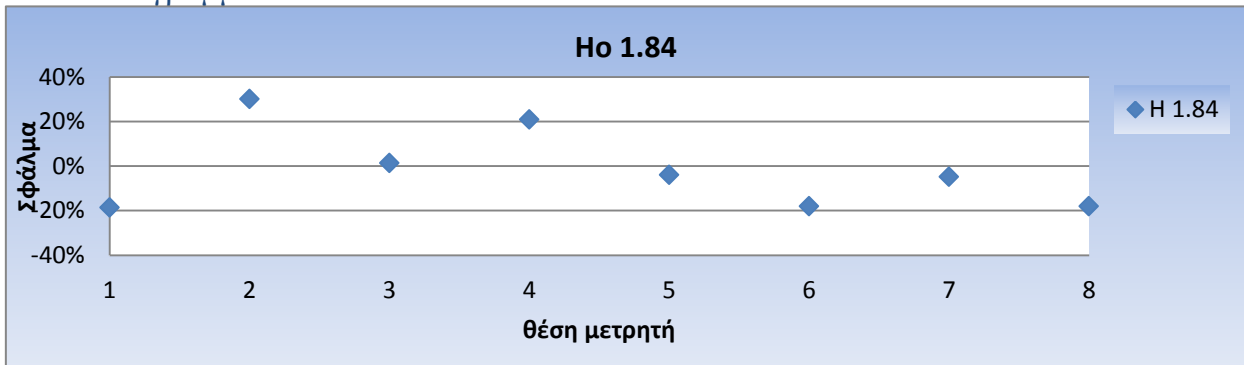
4.4.2 Διάταξη έργου 2

Διάγραμμα 4.29



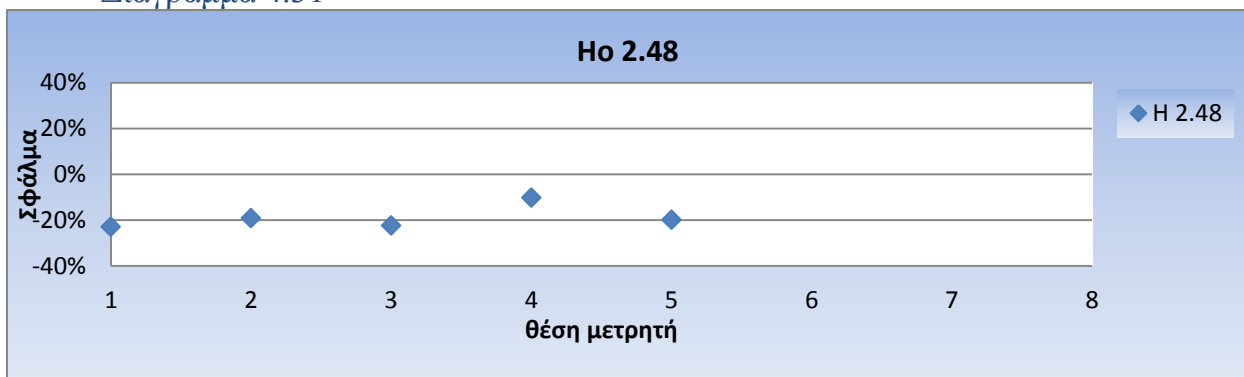
(Ho 1.36, Tr 5.69)

Διάγραμμα 4.30



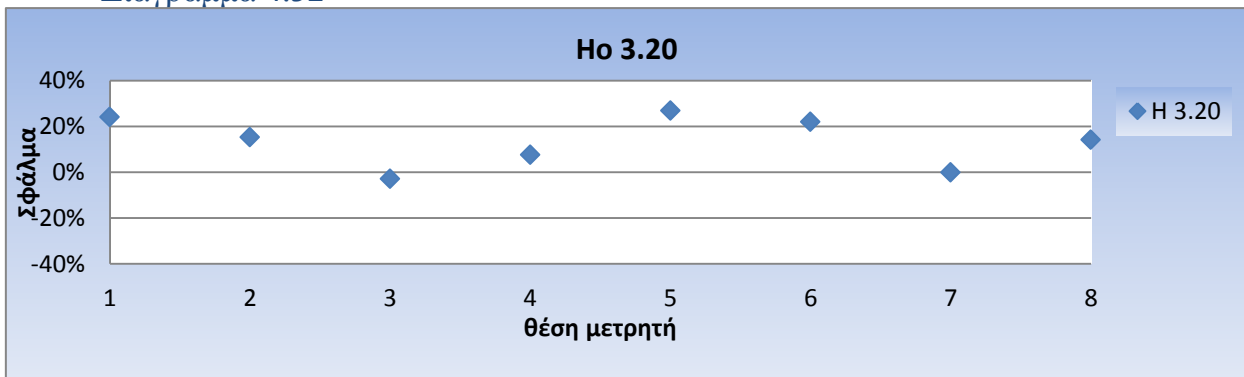
(Ho 1.84, Τρ 6.40)

Διάγραμμα 4.31



(Ho 2.48, Τρ 7.31)

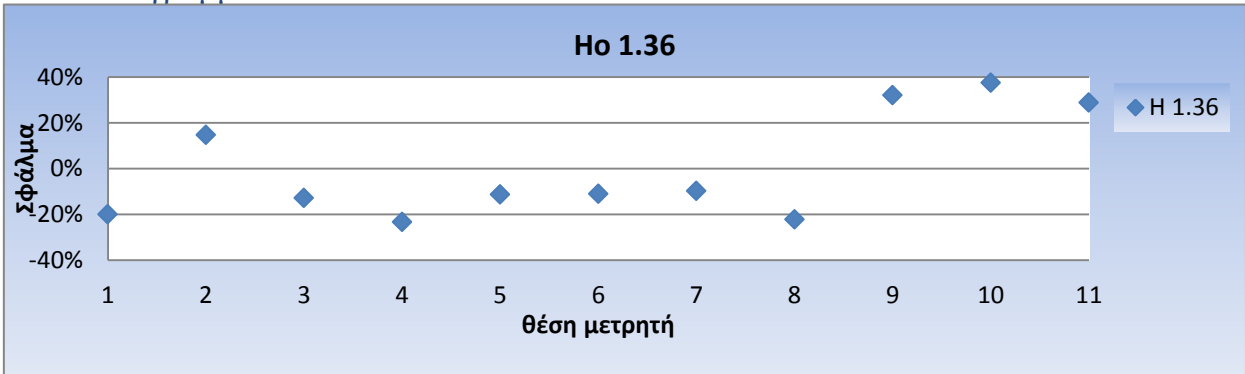
Διάγραμμα 4.32



(Ho 3.20, Τρ 8.53)

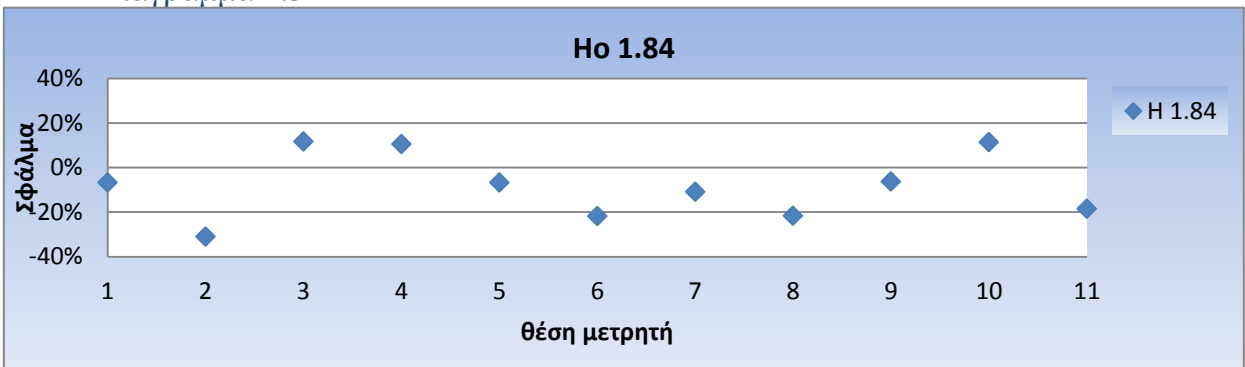
4.4.3 Διάταξη έργου 3

Διάγραμμα 4.33



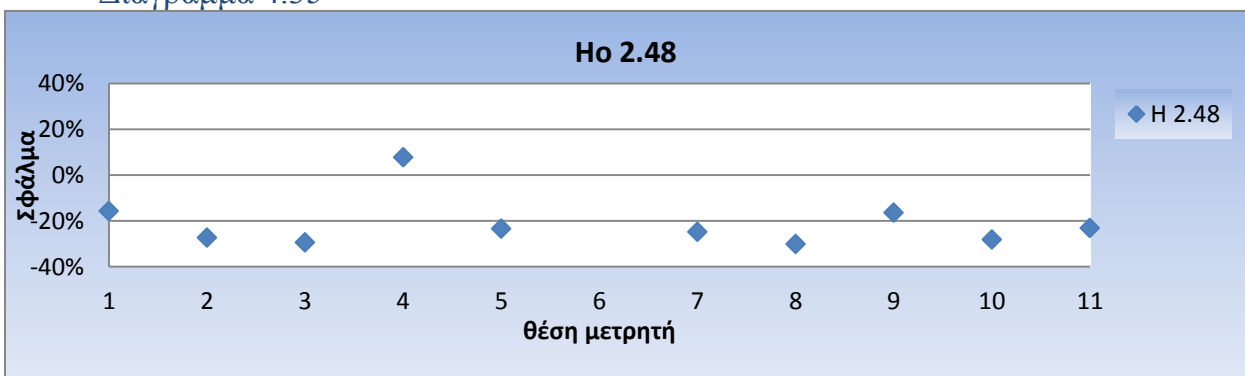
(Ηο 1.36, Τρ 5.69)

Διάγραμμα 4.34



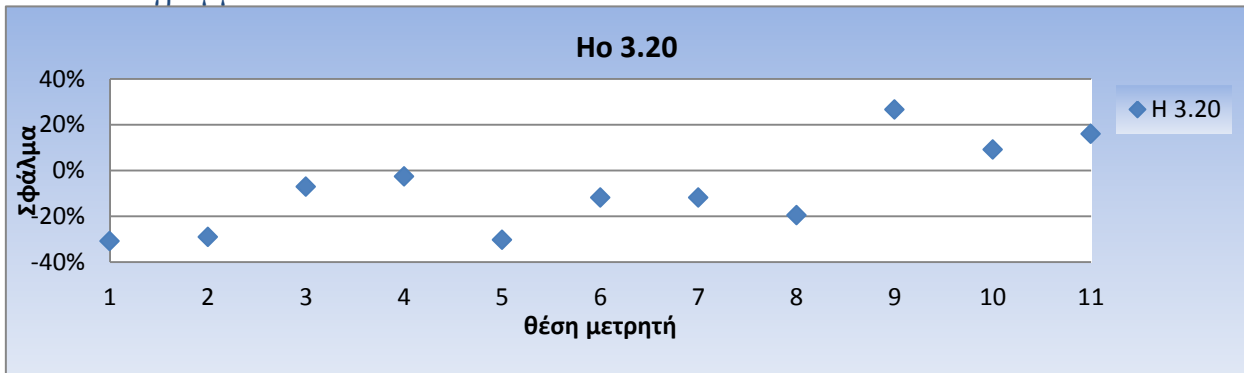
(Ηο 1.84, Τρ 6.40)

Διάγραμμα 4.35



(Ηο 2.48, Τρ 7.31)

Διάγραμμα 4.36



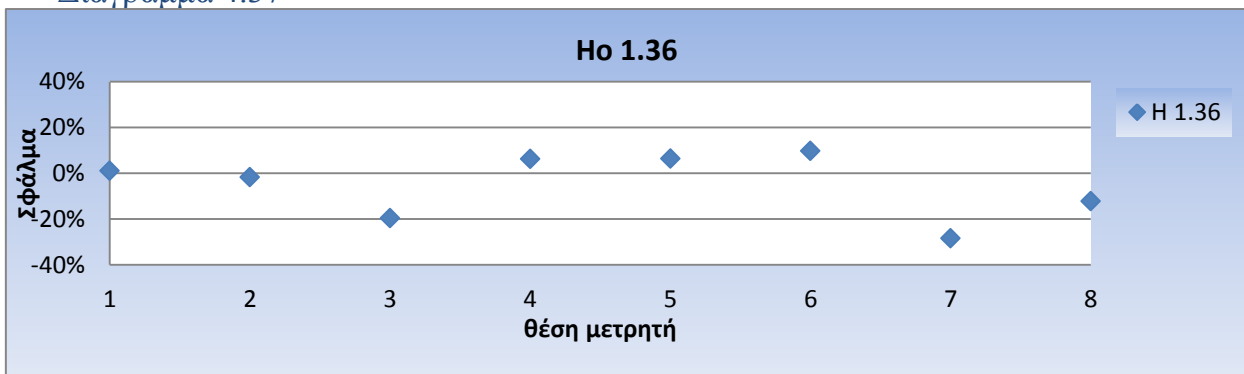
(Ho 3.20, Τρ 8.53)

4.5) Αποτελέσματα αποκλίσεων αριθμητικών και πειραματικών μετρήσεων με τη μορφή διαγραμμάτων και συμπεράσματα για γωνία πρόσπτωσης 45°

$$\frac{\text{Ημικε}-\text{Ηπειράματος}}{\text{Ηπειράματος}}$$

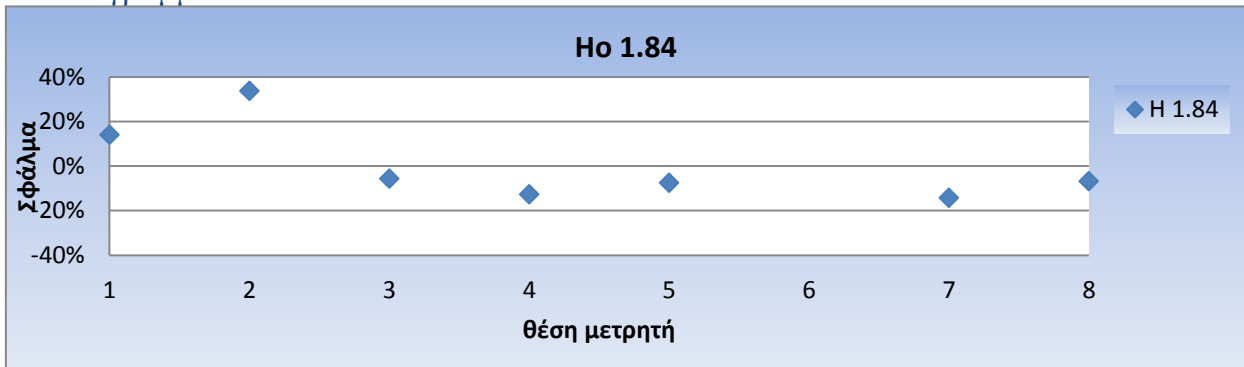
4.5.1 Διάταξη έργου 1

Διάγραμμα 4.37



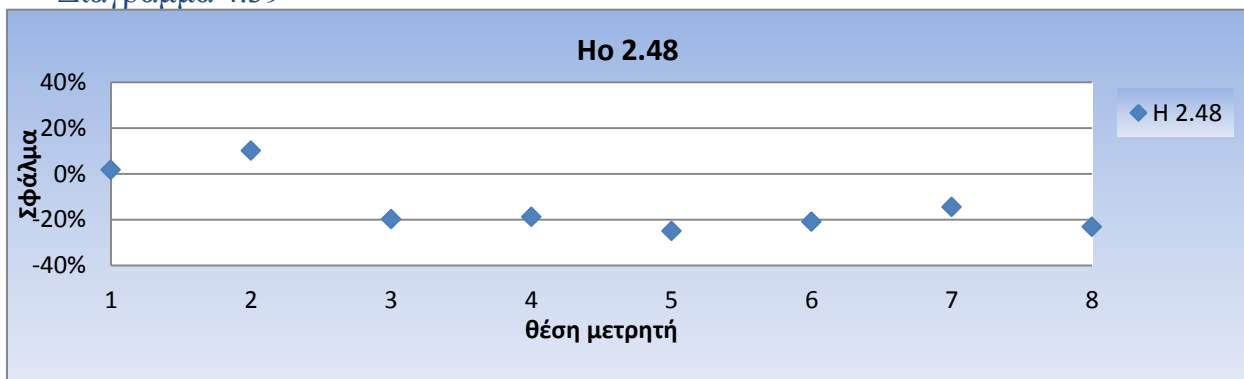
(Ho 1.36, Τρ 5.69)

Διάγραμμα 4.38



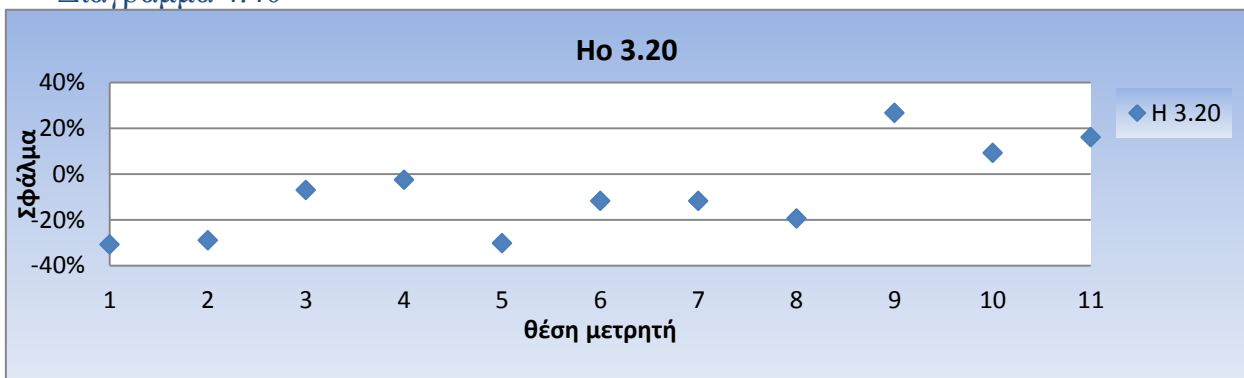
(Ho 1.84, Τρ 6.40)

Διάγραμμα 4.39



(Ho 2.48, Τρ 7.31)

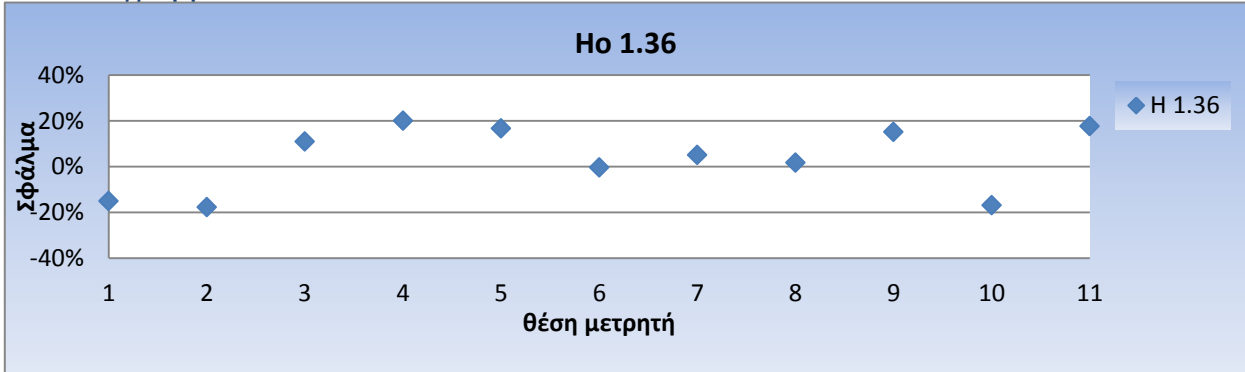
Διάγραμμα 4.40



(Ho 3.20, Τρ 8.53)

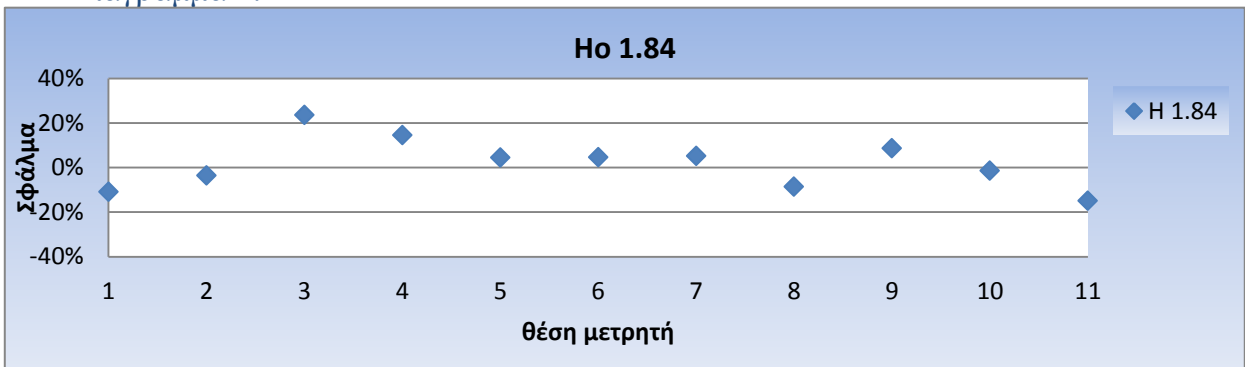
4.5.2 Διάταξη έργου 2

Διάγραμμα 4.41



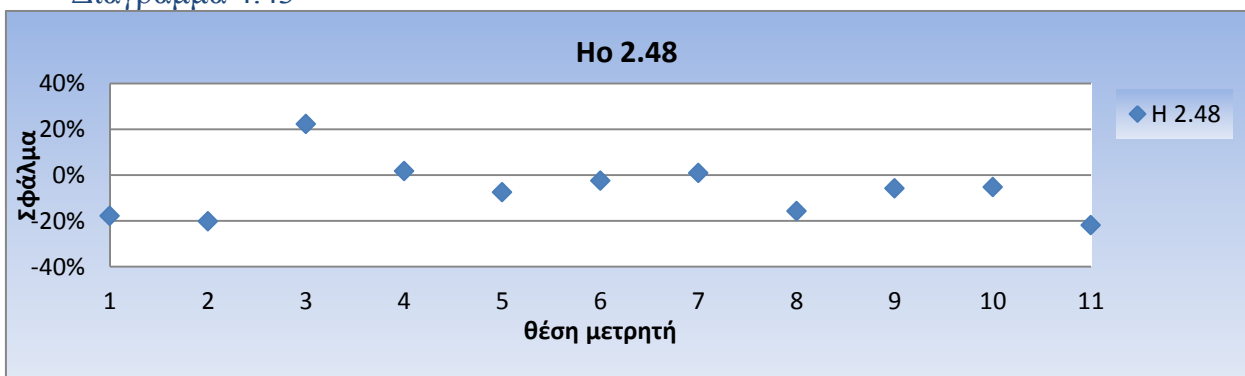
(Ho 1.36, Τρ 5.69)

Διάγραμμα 4.42



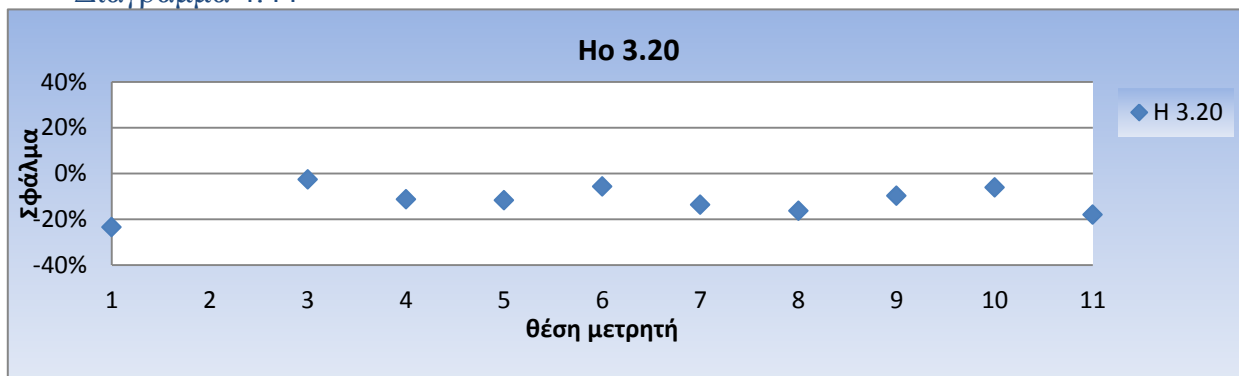
(Ho 1.84, Τρ 6.40)

Διάγραμμα 4.43



(Ho 2.48, Τρ 7.31)

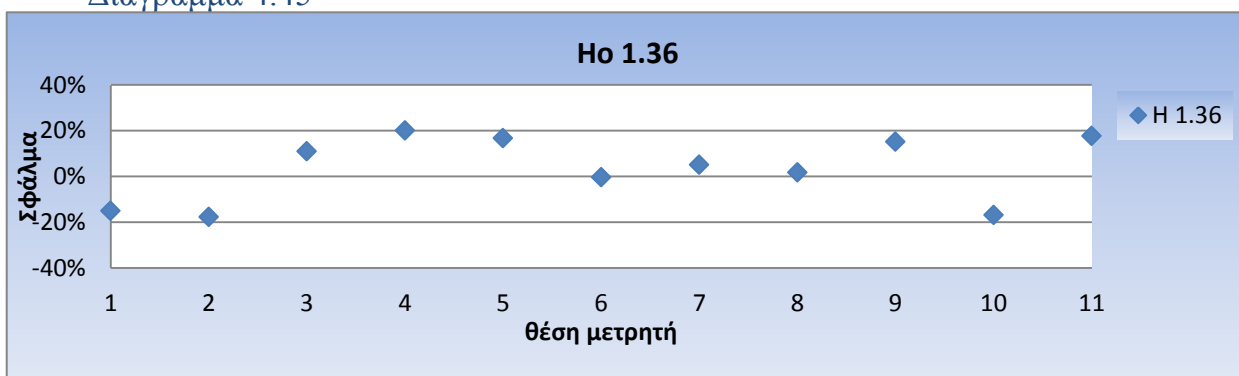
Διάγραμμα 4.44



(Ho 3.20, Τρ 8.53)

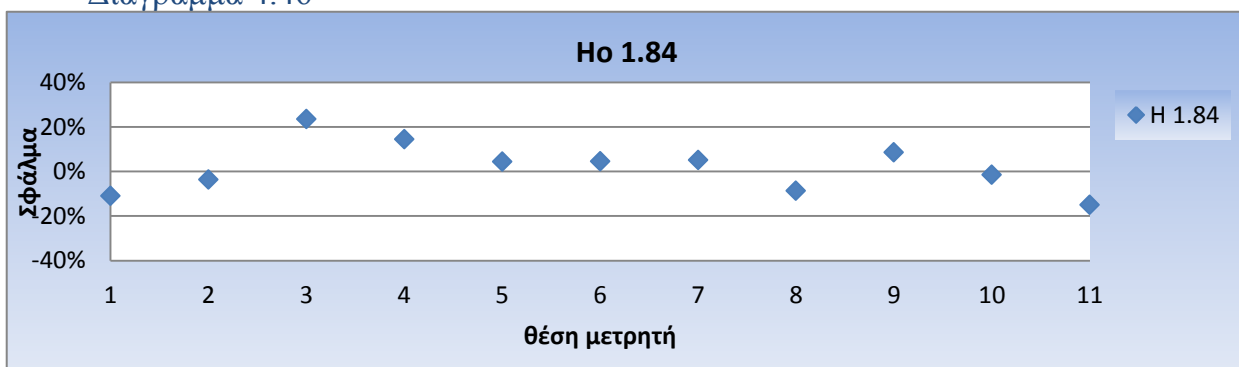
4.5.3 Διάταξη έργου 3

Διάγραμμα 4.45



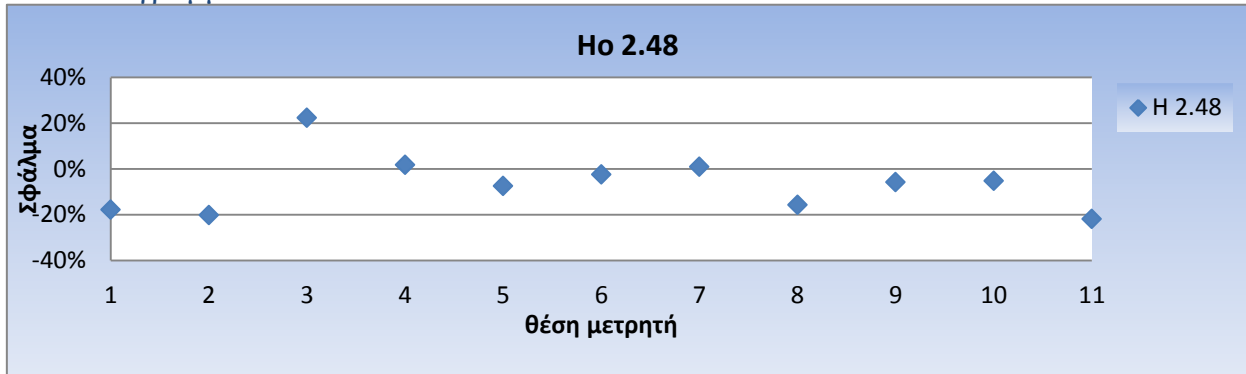
(Ho 1.36, Τρ 5.69)

Διάγραμμα 4.46



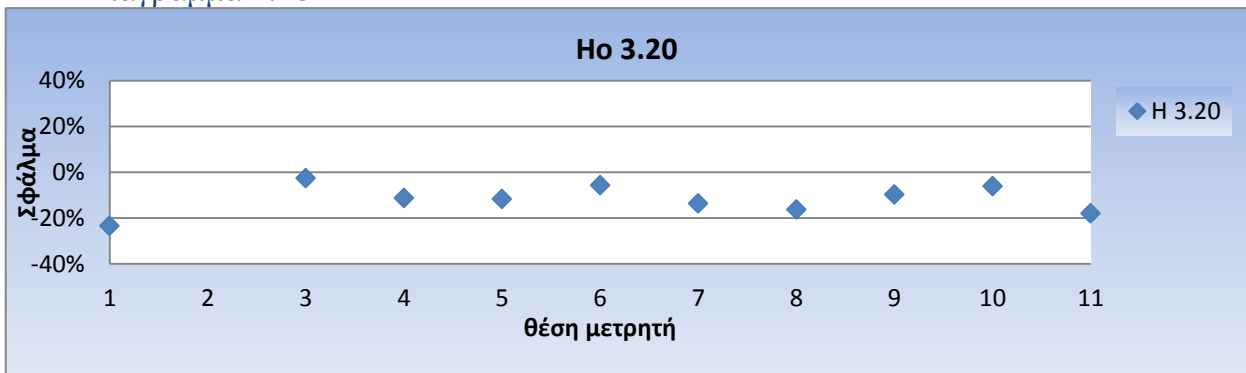
(Ho 1.84, Τρ 6.40)

Διάγραμμα 4.47



(Ho 2.48, Tr 7.31)

Διάγραμμα 4.48



(Ho 3.20, Tr 8.53)

Από τα διαγράμματα 4.25- 4.48 είναι δυνατό να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα:

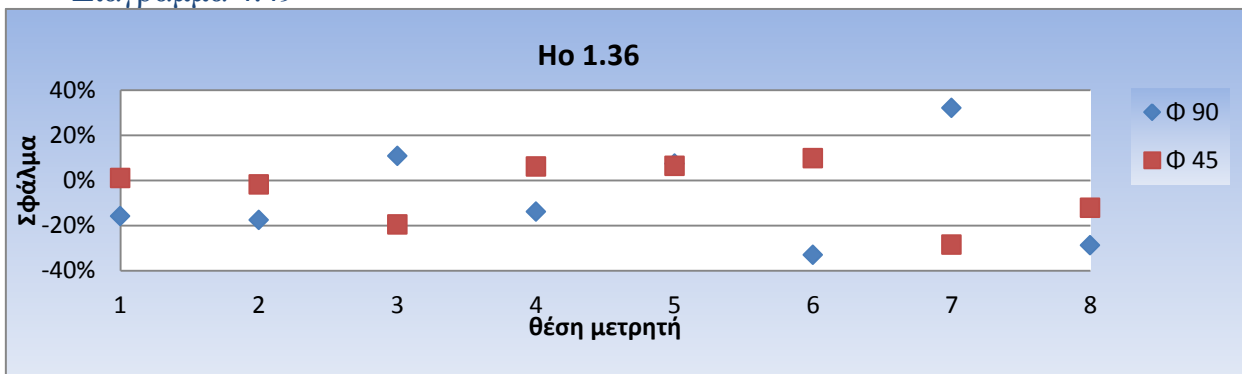
- i. Από τις αριθμητικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για τις διατάξεις του έργου, προκύπτουν ανάλογες παρατηρήσεις με αυτές που διατυπώθηκαν νωρίτερα στην παράγραφο 4.3.
- ii. Το μέγεθος του σφάλματος μεταξύ των μετρήσεων από την πειραματική διαδικασία και της προσομοίωσης της κυματικής διαταραχής με το μοντέλο Mike 21 PMS κυμαίνεται από 0% έως 30% όπως προκύπτει από τα διαγράμματα 4.25 έως 4.48
- iii. Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις παρουσιάζονται στις θέσεις των μετρητών που βρίσκονται κοντά στη γραμμή θραύσης των κυματισμών, όπου έχουμε απότομη μεγάλη αύξηση της καμπυλότητας του κύματος και επομένως μεγαλύτερη περίοδο Tr. Το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα δύσκολο να προσομοιωθεί ακριβώς από το μοντέλο Mike 21 PMS.
- iv. Παρατηρούμε πως οι μεγαλύτερες αποκλίσεις προκύπτουν στη διάταξη 1 του έργου ενώ μειώνονται στη διάταξη 3 του έργου ιδιαίτερα για γωνία πρόσπτωσης κυματισμών 45° όπως προκύπτει από τα διαγράμματα 4.45-4.48. Το γεγονός αυτό ήταν αναμενόμενο αφού στα κατάντη του έργου η περιοχή είναι πλήρως προστατευμένη από τον προσήνεμο μόλο, ενώ δημιουργούνται σταθερές συνθήκες ροής για τον παραπάνω συνδυασμό διάταξης έργου και γωνίας πρόσπτωσης κυματισμών.

4.6) Αποτελέσματα αποκλίσεων πειραματικών και πειραματικών μετρήσεων με τη μορφή συγκριτικών διαγραμμάτων για δύο γωνίες πρόσπτωσης και συμπεράσματα

Ακολουθεί η διαγραμματική απεικόνιση των τιμών των σφαλμάτων του λόγου $\left(\frac{H_{μικε}-H_{πειράματος}}{H_{πειράματος}}\right)$ σε κάθε θέση των ηχοβολιστικών μετρητών. Τα διαγράμματα διατάσσονται ανά κοινή τιμή της μέγιστης περιόδου φάσματος T_p και κατά αύξουσα τιμή του ύψους H θεωρητικό του κυματισμού που παράχθηκε από τους κυματιστήρες σε κάθε πειραματική και αριθμητική δοκιμή.

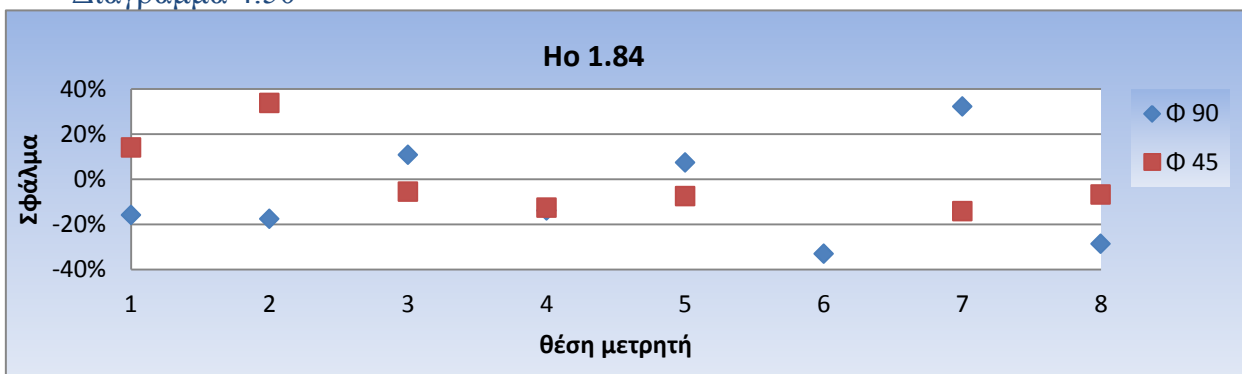
4.6.1 Διάταξη 1

Διάγραμμα 4.49



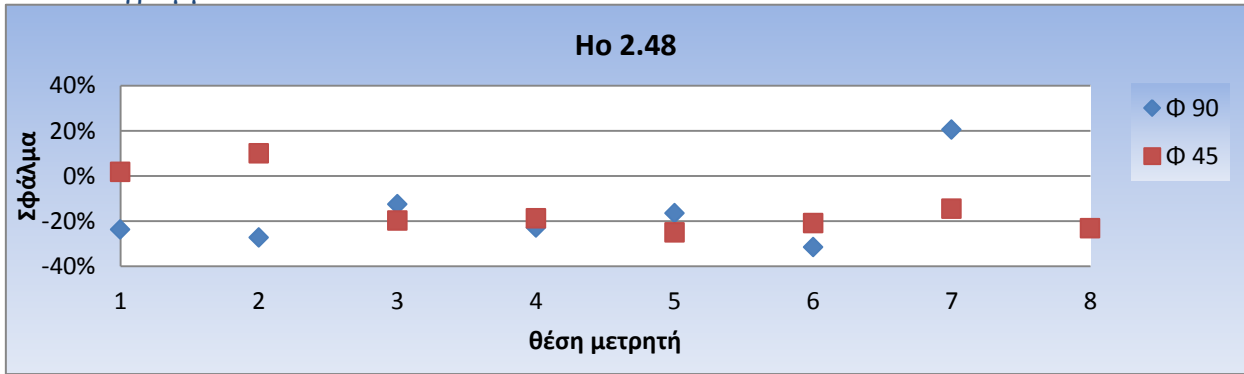
(Ho 1.36, T_p 5.69)

Διάγραμμα 4.50



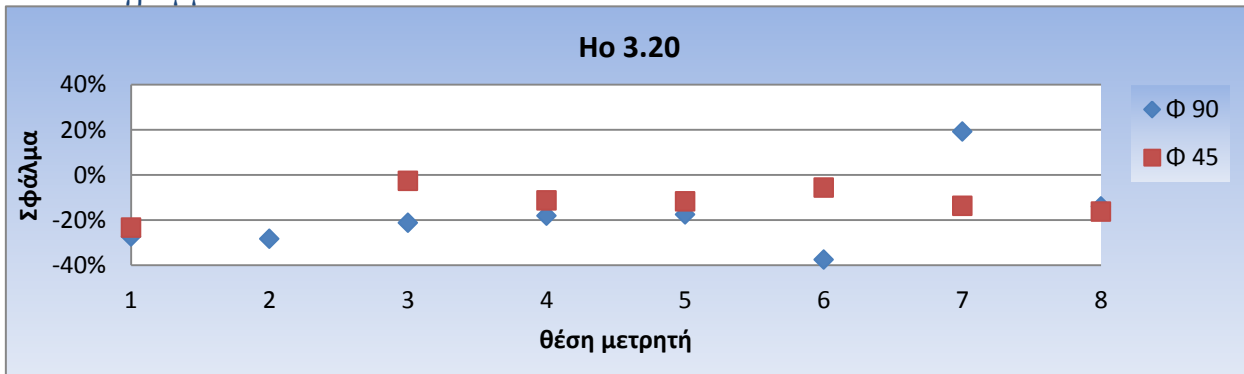
(Ho 1.84, T_p 6.40)

Διάγραμμα 4.51



(Ho 2.48, Τρ 7.31)

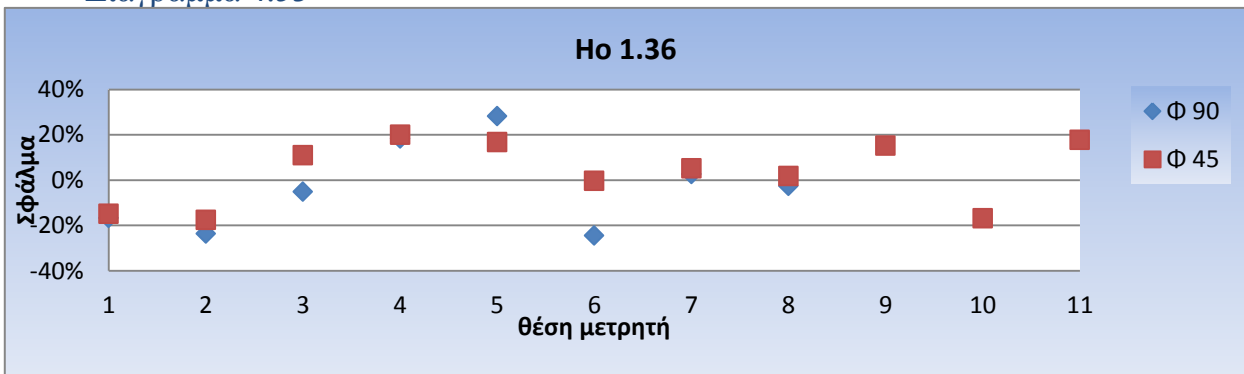
Διάγραμμα 4.52



(Ho 3.20, Τρ 8.53)

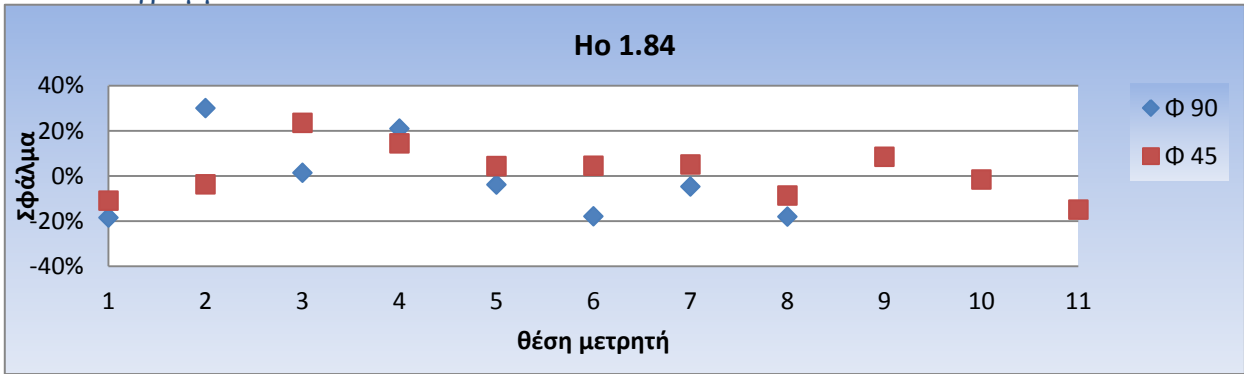
4.6.2 Διάταξη 2

Διάγραμμα 4.53



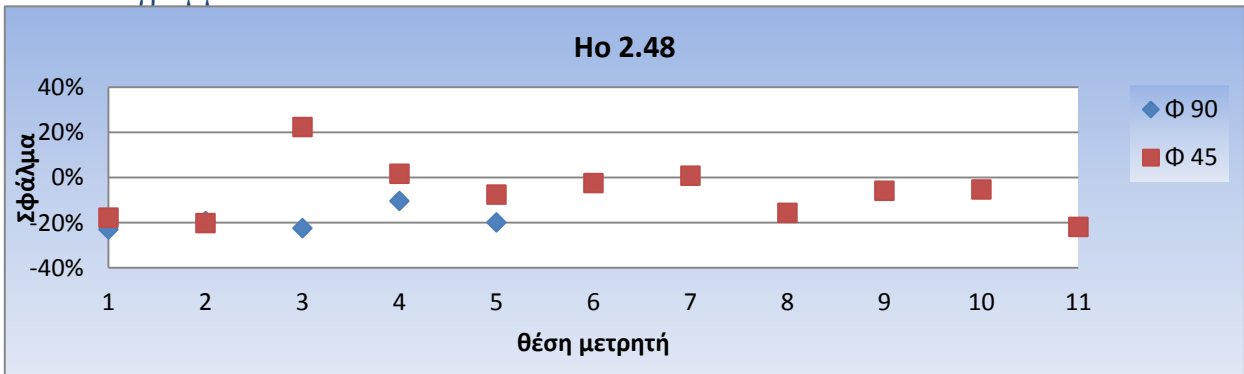
(Ho 1.36, Τρ 5.69)

Διάγραμμα 4.54



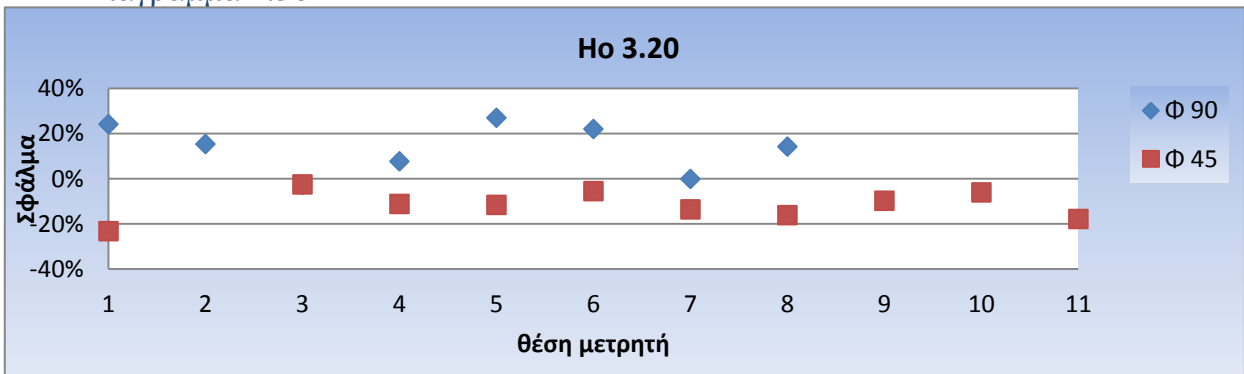
(Ho 1.84, Τρ 6.40)

Διάγραμμα 4.55



(Ho 2.48, Τρ 7.31)

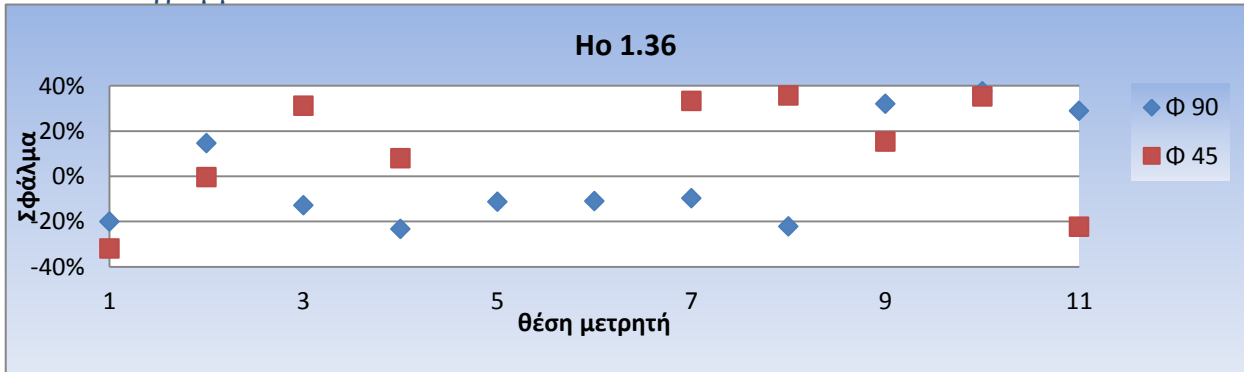
Διάγραμμα 4.56



(Ho 3.20, Τρ 8.53)

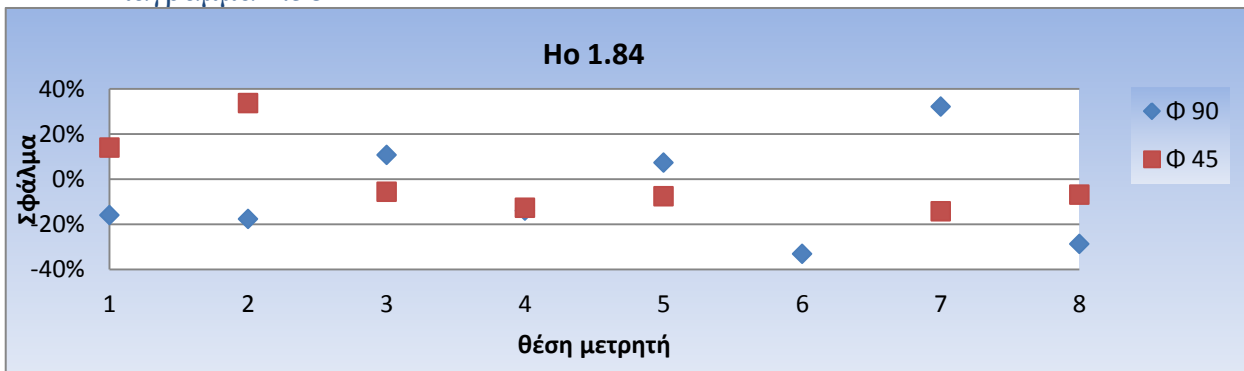
4.6.3 Διάταξη 3

Διάγραμμα 4.57



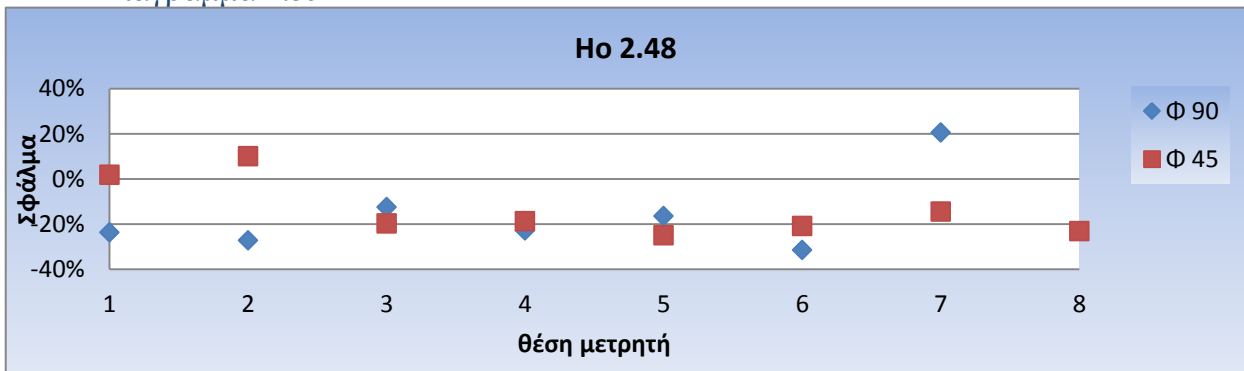
(Ηο 1.36, Τρ 5.69)

Διάγραμμα 4.58



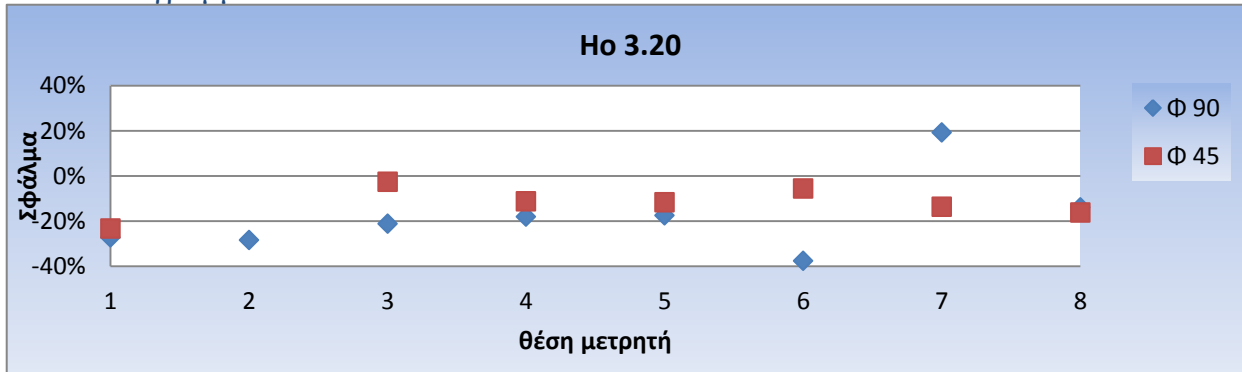
(Ηο 1.84, Τρ 6.40)

Διάγραμμα 4.59



(Ηο 2.48, Τρ 7.31)

Διάγραμμα 4.60



(Ho 3.20, Τρ 8.53)

Από τα διαγράμματα 4.49- 4.60 είναι δυνατό να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα:

- i. Από τις αριθμητικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για τις διατάξεις του έργου, προκύπτουν ανάλογες παρατηρήσεις με αυτές που διατυπώθηκαν νωρίτερα στην παράγραφο 4.5.
- ii. Επαληθεύεται η παρατήρηση αναφορικά με τη μείωση του εύρους του σφάλματος για γωνία πρόσπτωσης των κυματισμών 45⁰ αφού λόγω της επίδρασης του υφιστάμενου έργου που σταθεροποιεί τη κυματική διαταραχή.
- iii. Στις ενδιάμεσες θέσεις των μετρητών στα κατάντη του έργου οι αποκλίσεις του αριθμητικού μοντέλου και της πειραματικής διαδικασίας κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα ενώ το σφάλμα μεταβάλλεται σημαντικά στις ακραίες θέσεις, αμέσως κατάντη του έργου και κοντά στο αριστερό όριο της βυθομετρίας. Είναι σαφές πως στις παραπάνω θέσεις εισάγεται κατά τη μελέτη ο παράγοντας του ποσοστού ανάκλασης των ορίων που δημιουργούν τυχαίες τροχιές στα κυματογενή ρεύματα ενώ μέρος της κυματικής ενέργειας απορροφάται από τη πρόσπτωση στα πρηνή. Οι συνθήκες αυτές είναι σχετικά δύσκολο να προσομοιωθούν στην αριθμητική διαδικασία και χρειάζεται περαιτέρω έρευνα για την εκτίμηση των αρχικών συνθηκών που εισάγονται ως δεδομένα στο μοντέλο.
- iv. Οι μεγαλύτερες διαφορές παρουσιάζονται στη θέση 7 των μετρητών που βρίσκεται πάνω στην ισοβαθή -3m όπως προκύπτει από τα διαγράμματα 4.49 έως 4.60. Η θέση αυτή είναι προστατευμένη από τον προσήνεμο μόλο για γωνία πρόσπτωσης κυματισμών 45⁰, ενώ η κυματική διαταραχή είναι πιο έντονη για γωνία 90⁰. Επομένως δημιουργούνται διαφορετικές συνθήκες ροής στη θέση αυτή κάτι που είναι πολύ πιθανόν να έχει ως αποτέλεσμα την απόκλιση των μετρήσεων για τις δύο γωνίες πρόσπτωσης.

Κεφάλαιο 5: Υδροδυναμικό μοντέλο-MIKE21 Flow Model Hydrodynamic Module (HD)

Το MIKE21 Flow Model είναι ένα μοντέλο υπολογισμού δισδιάστατων ροών με ελεύθερη επιφάνεια, το οποίο βρίσκει εφαρμογή στην προσομοίωση υδραυλικών και περιβαλλοντικών φαινομένων, σε λίμνες, εκβολές ποταμών, παράκτιες περιοχές και στην ανοιχτή θάλασσα. Το υδροδυναμικό μοντέλο (HD) αποτελεί τη βάση στο MIKE21 Flow Model καθώς προσομοιώνει τη μεταβολή της στάθμης του νερού και τη ροή, παράγοντας στοιχεία που αποτελούν δεδομένα για άλλα μοντέλα όπως αυτό της στερεομεταφοράς (ST). Μεταξύ άλλων μπορεί να εφαρμοστεί για τον υπολογισμό των ανεμογενών και κυματογενών ρευμάτων σε μια παράκτια περιοχή, των κυματικών καταιγίδων και τη μοντελοποίηση των παλιρροιών.

Στους υπολογισμούς αυτού του μοντέλου λαμβάνονται υπόψη:

- i.η διατμητική τάση στον πυθμένα
- ii.η διατμητική τάση από τον άνεμο
- iii.η μεταβολές της βαρομετρικής πίεσης
- iv.η δύναμη Coriolis
- v.η διασπορά της ορμής
- vi.οι παροχές εισόδου και εξόδου
- vii.η εξάτμιση
- viii.οι μεταβολές της στάθμης της θάλασσας
- ix.οι τάσεις ακτινοβολίας

5.1) Βασικές εξισώσεις

Το MIKE21 FID είναι ένα αριθμητικό μοντέλο πεπερασμένων διαφορών το οποίο προσομοιώνει διδιάστατες μη μόνιμες ροές (ομογενείς κατά βάθος) σε κάθε σημείο του καννάβου. Οι εξισώσεις συνεχείας και διατήρησης της ποσότητας κίνησης, ολοκληρωμένες στο βάθος, περιγράφουν τη ροή και την ανύψωση της στάθμης της θάλασσας και αποτελούν τη βάση για την επίλυση του υδροδυναμικού μοντέλου.

- Εξίσωση συνεχείας

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = \frac{\partial d}{\partial t}$$

- Εξίσωση διατήρησης της ποσότητας κίνησης κατά x

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{c^2 h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega_q - fVV_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_a) = 0 \quad (4)$$

- Εξίσωση διατήρησης της ποσότητας κίνησης κατά y

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gq\sqrt{p^2+q^2}}{c^2 h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega_p - fVV_y + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} (p_a) = 0 \quad (4.35)$$

$h(x, y, t)$ το βάθος του νερού (=ζ-d, m)

$d(x, y, t)$ χρονικά μεταβαλλόμενο βάθος νερού (m)

$\zeta(x, y, t)$ η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας (m)

$p, q(x, y, t)$ η ορμή στη διεύθυνση x και y αντίστοιχα ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)

$C(x, y)$ ο συντελεστής Chézy ($\text{m}^{1/2}/\text{s}$)

g η επιτάχυνση της βαρύτητας (m/s^2)

$f(V)$ συντελεστής τριβών ανέμου

$V, V_x, V_y(x, y, t)$ η ταχύτητα του ανέμου και οι συνιστώσες της κατά x και y (m/s)

$\Omega(x, y)$ συντελεστής Coriolis, εξαρτώμενος από το γεωγραφικό πλάτος (s^{-1})

$p_a(x, y, t)$ η ατμοσφαιρική πίεση ($\text{kg}/\text{m}/\text{s}^2$)

ρ_w η πυκνότητα του νερού (kg/m^3)

x, y οι χωρικές συντεταγμένες (m)

t ο χρόνος (s)

$\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{xy}$ συνιστώσες ενεργών διατμητικών τάσεων.

Το ΜΙΚΕ21 HD χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο ADI (Alternating Direction Implicit) για την ολοκλήρωση των εξισώσεων συνεχείας και διατήρησης της ποσότητας κίνησης στο χώρο και το χρόνο.

5.2) Οριακές συνθήκες

Το ΜΙΚΕ21 HD επιλύει μερικές διαφορικές εξισώσεις και επομένως είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός των οριακών συνθηκών. Ως δεδομένα στα ανοιχτά όρια του μοντέλου απαιτούνται είτε η στάθμη της επιφάνειας και οι ποσότητες κίνησης (flux densities) παράλληλα στα όρια είτε οι ποσότητες κίνησης κάθετα και παράλληλα προς αυτά. Η στάθμη της επιφάνειας και οι ποσότητες κίνησης κάθετα στα όρια αποτελούν τις αρχικές οριακές συνθήκες και πρέπει να προσδιορίζονται σε όλα τα σημεία του ορίου και για κάθε χρονικό βήμα. Οι ποσότητες κίνησης κατά μήκος των ορίων αποτελούν δευτερεύουσες οριακές

συνθήκες και είναι απαραίτητες καθώς μόνο με τις αρχικές δεν επιλύεται ο αλγόριθμος όταν χρησιμοποιούνται μη γραμμικοποιημένες εξισώσεις. Επιπλέον εισάγονται στο μοντέλο ως δεδομένα η βαθυμετρία, η αντίσταση του πυθμένα, η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου και οι βαρομετρικές πιέσεις.

5.3) Εφαρμογή μοντέλου

Η εισαγωγή των διαφόρων παραμέτρων στο μοντέλο γίνεται σε δύο βασικές καρτέλες. Στην πρώτη καρτέλα επιλέγεται ο τύπος της ανάλυσης (π.χ. υδροδυναμική). Επίσης εισάγεται η βαθυμετρία της παράκτιας περιοχής που εξετάζεται και καθορίζεται αν η προσομοίωση αποτελεί συνέχεια κάποιας προηγούμενης (Hot Start) ή όχι (Cold Start). Επιπλέον, ορίζονται τα ανοιχτά όρια και τα σημεία πιθανών εισροών (π.χ. εκβολές ποταμών) ή εκροών. Αν το μοντέλο βρίσκεται σε μια περιοχή όπου είναι σημαντική η παλίρροια, ρυθμίζεται το ελάχιστο επιτρεπόμενο βάθος του νερού ενός σημείου ώστε αυτό να μην λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς (drying depth), καθώς επίσης και το βάθος του νερού για το οποίο το σημείο θα ληφθεί ξανά υπόψη (flooding depth). Το εύρος των τιμών αυτών είναι 0.1-0.2 m και 0.2-0.4 m αντίστοιχα. Τέλος ορίζονται τα στοιχεία της περιόδου προσομοίωσης της ανάλυσης, δηλαδή το χρονικό βήμα Δt , ο αριθμός των χρονικών βημάτων και η χρονική στιγμή έναρξης της ανάλυσης. Κριτήριο για την επιλογή του χρονικού βήματος αποτελεί ο αριθμός Courant ο οποίος ορίζεται από τη σχέση $C_R = C \frac{\Delta t}{\Delta x}$

(όπου $C = \sqrt{gd}$ η ταχύτητα διάδοσης του κύματος, Δt το χρονικό βήμα και Δx η διάσταση του καννάβου) και δεν πρέπει να ξεπερνά την τιμή 15 στις συνήθεις περιπτώσεις. Ο αριθμός Courant μπορεί να λάβει μεγαλύτερη τιμή ($CR < 20$) όταν η βαθυμετρία της εξεταζόμενης περιοχής είναι ομαλή, χωρίς να δημιουργούνται προβλήματα κατά την ανάλυση. Σε όλα τα κυματικά σενάρια που εξετάστηκαν επιλέγεται χρονικό βήμα $\Delta t = 2$ s και η τιμή του αριθμού Courant κυμαίνεται από 8.3 έως 9.82.

Στη δεύτερη καρτέλα προσδιορίζονται οι υδροδυναμικές παράμετροι του μοντέλου, όπως το ιξώδες ($\nu = 0.5 \text{ m}^2/\text{s}$), η αντίσταση του πυθμένα στη ροή (στη συγκεκριμένη εφαρμογή επιλέχθηκε ο αριθμός Manning) και στοιχεία που αφορούν τα ανοιχτά όρια και τον άνεμο. Επίσης εισάγεται και το αρχείο των αποτελεσμάτων των τάσεων ακτινοβολίας που προέκυψε από το κυματικό μοντέλο PMS. Όσον αφορά την αντίσταση του πυθμένα, αυτή εκφράζεται είτε από τον αριθμό Manning (M) είτε από τον Chezy ($C = Mh^{1/6}$) και ορίζεται από τη σχέση $g|u|/C^2$. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιείται ο αριθμό Manning, ο οποίος αρχικά τίθεται σταθερός ($M = 32 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$) σε όλα τα σημεία της βαθυμετρίας, για χρονική διάρκεια προσομοίωσης ίση με μία ώρα, ενώ στη συνέχεια γίνεται εκ νέου υπολογισμός της τιμής του για κάθε μια ώρα. Έτσι η τιμή του Manning προσαρμόζεται στις υδροδυναμικές συνθήκες της περιοχής. Για τον υπολογισμό της φαινομενικής αντίστασης του πυθμένα και του αριθμού Manning σε κάθε σημείο της βαθυμετρίας χρησιμοποιείται το εργαλείο "Apparent Bed Roughness" της καρτέλας "Hydrodynamics" του MIKE21 Toolbox. Σε αυτό εισάγονται τα αποτελέσματα από την πρώτη ώρα προσομοίωσης του υδροδυναμικού μοντέλου HD και τα κυματικά δεδομένα (περίοδος κυματισμού και αποτελέσματα PMS) και ορίζονται η περιοχή μελέτης, η περίοδος προσομοίωσης και οι ιδιότητες του ιζήματος του πυθμένα (διάμετρος κόκκων και σχετική πυκνότητα). Το αρχείο των αποτελεσμάτων χρησιμοποιείται αρχικά για τον υπολογισμό των κυματογενών ρευμάτων κατά μήκος των ανοιχτών ορίων της περιοχής

μελέτης και εν συνεχεία εισάγεται στο υδροδυναμικό μοντέλο HD για να πραγματοποιηθούν οι υπολογισμοί για την επόμενη μία ώρα.

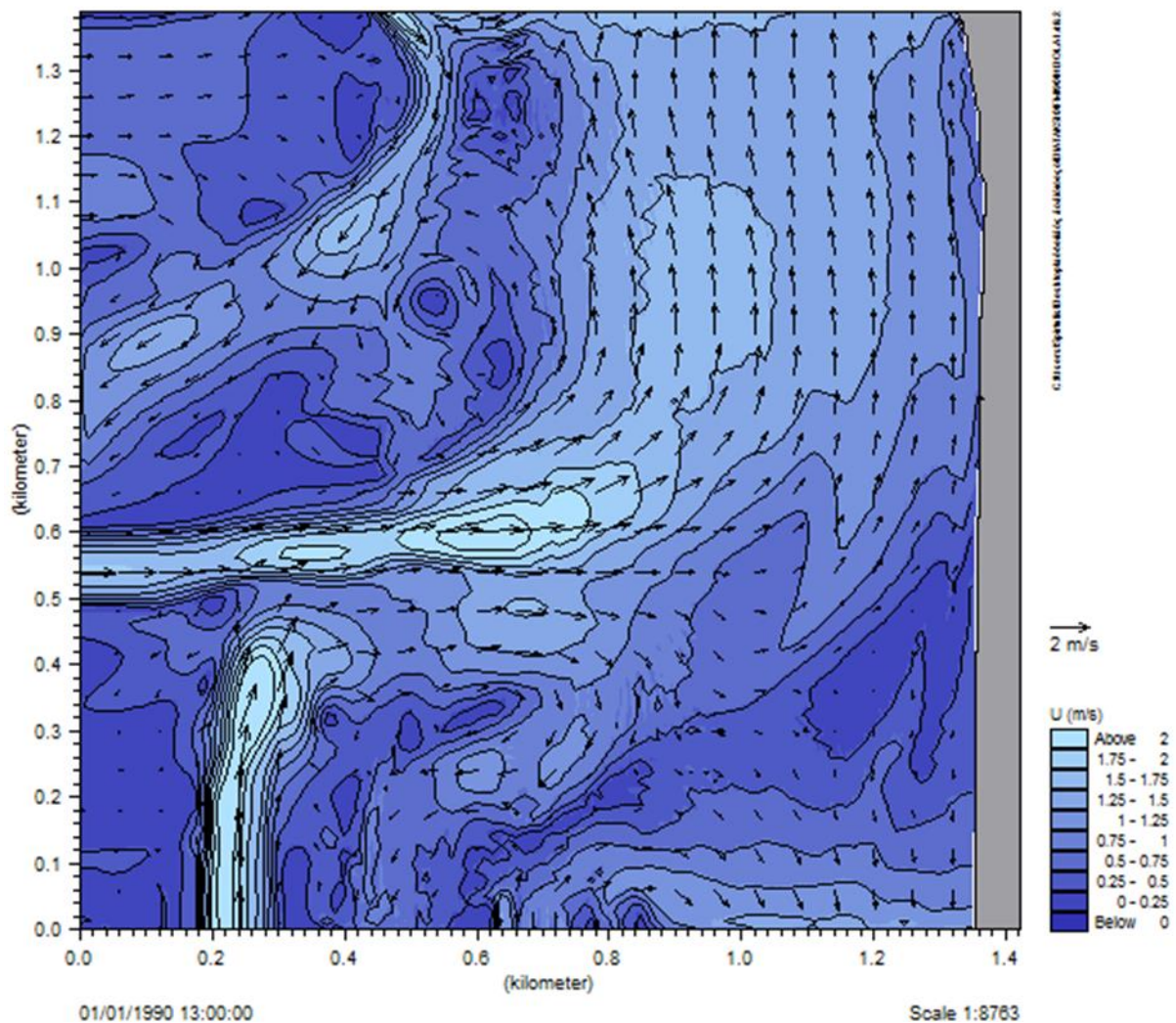
Για τον υπολογισμό των κυματογενών ρευμάτων κατά μήκος των ανοιχτών ορίων χρησιμοποιείται το εργαλείο "Wave Generated and Setup" της καρτέλας "Waves" του ΜΙΚΕ21 Toolbox. Σε αυτό εισάγονται οι τάσεις ακτινοβολίας που υπολογίστηκαν από το κυματικό μοντέλο και ορίζονται η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας, η θέση του ανοιχτού ορίου όπου θα γίνει ο υπολογισμός, το ιξώδες ($\epsilon=0.5\text{m}^2/\text{s}$), ο αριθμός Manning και η περίοδος προσομοίωσης, ίση με αυτή του υδροδυναμικού μοντέλου. Την πρώτη ώρα της προσομοίωσης ο αριθμός Manning λαμβάνει σταθερή τιμή $M=32\text{m}^{1/3}/\text{s}$, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ενώ στις επόμενες ώρες η τιμή μεταβάλλεται στα διάφορα σημεία της βαθυμετρίας ώστε να προσαρμόζεται στις υδροδυναμικές συνθήκες.

Η ανάλυση του υδροδυναμικού μοντέλου γίνεται για χρονική διάρκεια μίας ώρας. Κάθε νέα ώρα υπολογίζονται και πάλι η αντίσταση του πυθμένα και το κυματογενές ρεύμα κατά μήκος των ορίων και εισάγονται στο υδροδυναμικό μοντέλο. Επειδή κάθε νέα ανάλυση του υδροδυναμικού, πέραν της πρώτης, αποτελεί συνέχεια της προηγούμενης, όταν εισάγεται η βαθυμετρία γίνεται η επιλογή "Hot Start". Οι υπολογισμοί αυτοί (υδροδυναμικό μοντέλο, αντίσταση πυθμένα, κυματογενές ρεύμα κατά μήκος των ορίων) επαναλαμβάνονται διαδοχικά έως ότου επιτευχθεί μια κατάσταση ισορροπίας, δηλαδή όταν δεν υπάρχει σημαντική απόκλιση μεταξύ των τιμών των αποτελεσμάτων δύο διαδοχικών αναλύσεων του υδροδυναμικού μοντέλου.

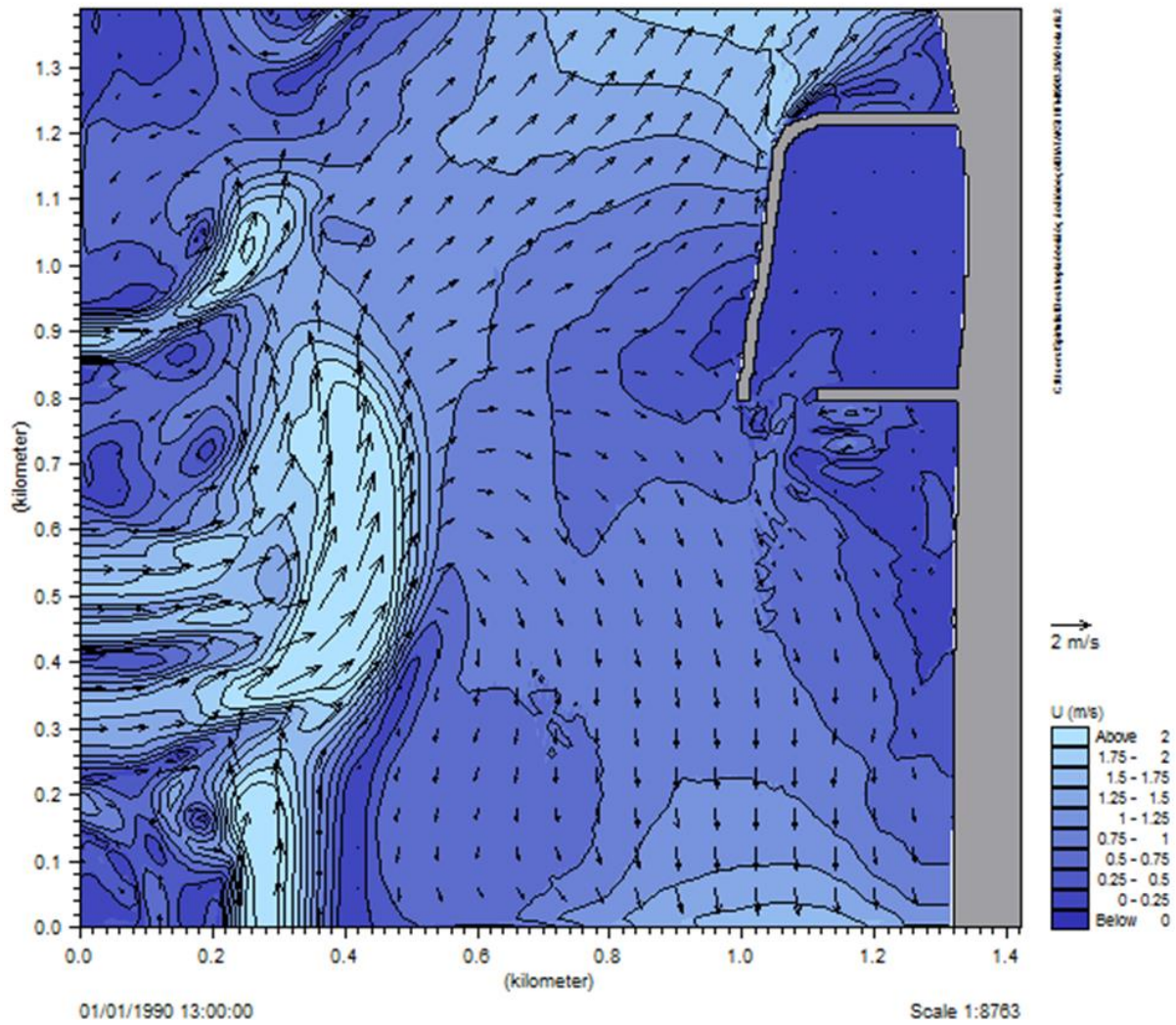
5.4) Αποτελέσματα του υδροδυναμικού μοντέλου ΜΙΚΕ 21 HD από τη προσομοίωση της παράκτιας κυματογενούς κυκλοφορίας για γωνία πρόσπτωσης 90°

Στα Σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η ταχύτητα και η μορφή του κυματογενούς ρεύματος στην περιοχή μελέτης για κάθε σενάριο ανέμου που μελετήθηκε, τη χρονική στιγμή που μονιμοποιούνται οι συνθήκες και συγκεκριμένα ο αριθμός mapping σε όλα τα σημεία του καννάβου με τη διαδικασία που περιγράφηκε στη παράγραφο 5.3. Τα αποτελέσματα αυτά αντιστοιχούν στο κυματικό σενάριο H_s 3.20m και T_p 8.53s, για κάθε διάταξη του έργου, και για αζιμούθιο 90° μοίρες.

5.4.1 Γραφική απεικόνιση ταχύτητας ρευμάτων για τη διάταξη 0

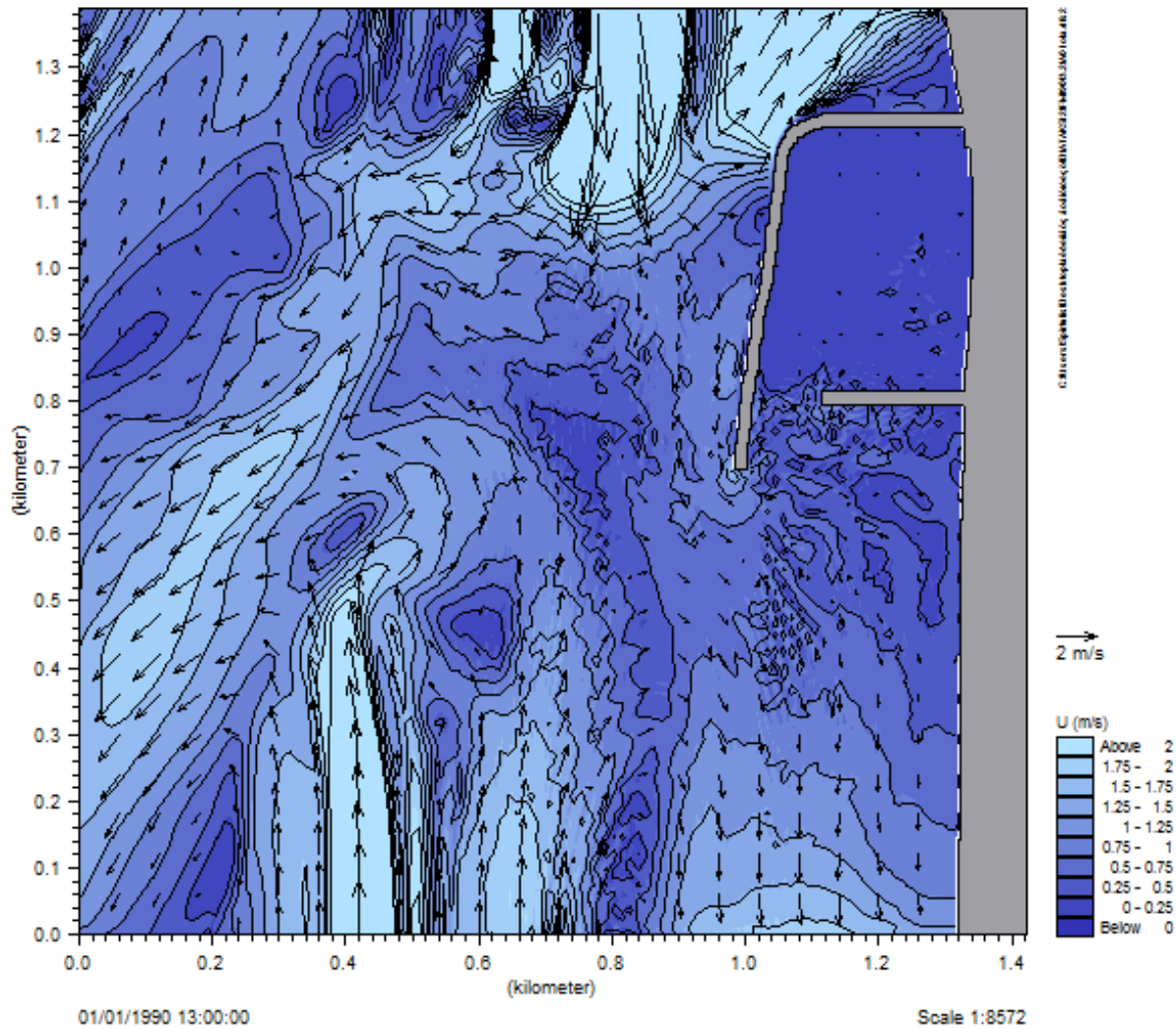


5.4.2 Γραφική απεικόνιση ταχύτητας ρευμάτων για τη διάταξη 1



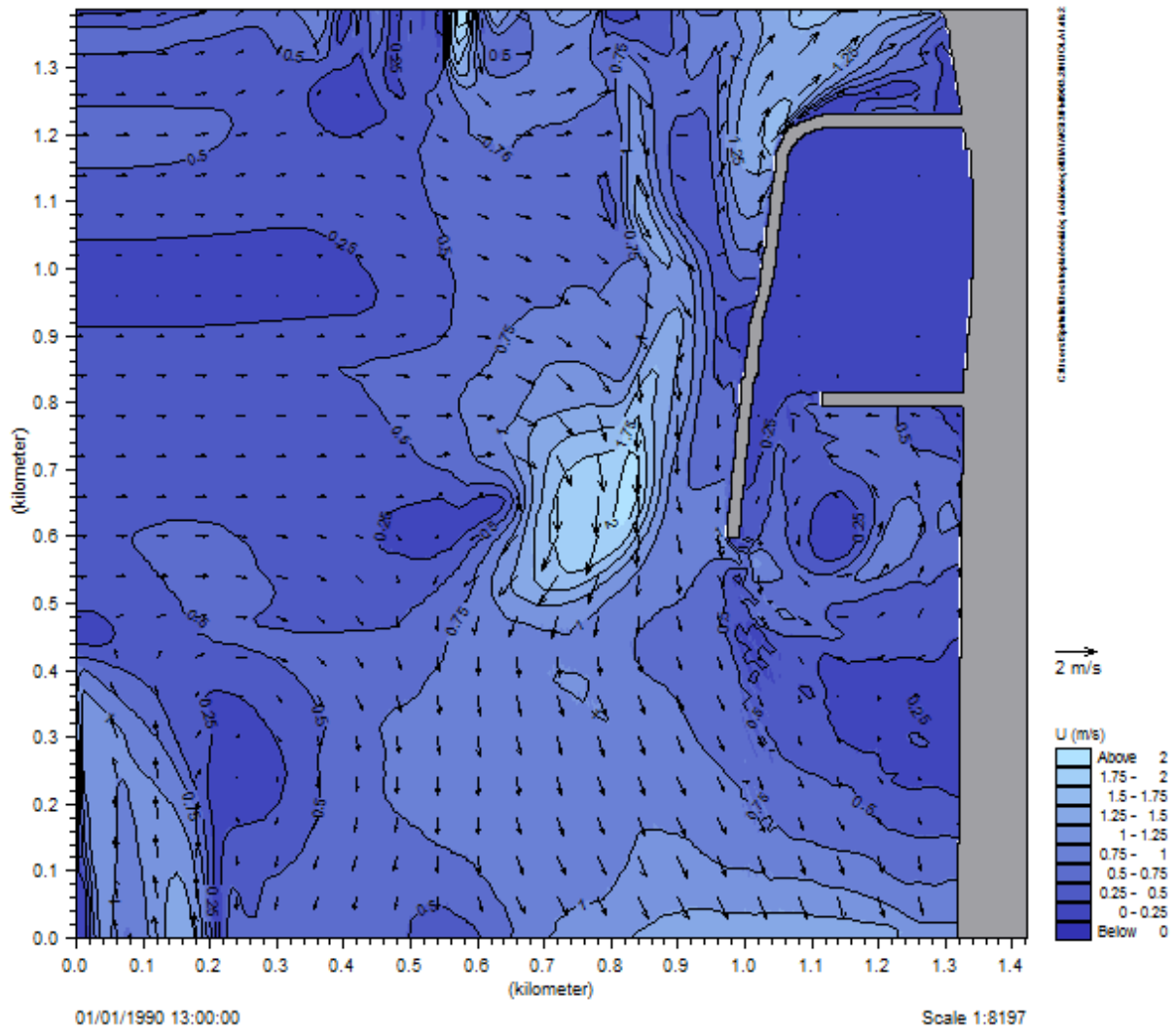
Σχήμα 5.2: διάταξη 1 (Ho 3.20m, Tp 8.53s)

5.4.3 Γραφική απεικόνιση ταχύτητας ρευμάτων για τη διάταξη 1



Σχήμα 5.3: διάταξη 2 (Ho 3.20m, Tp 8.53s)

5.4.4 Γραφική απεικόνιση ταχύτητας ρευμάτων για τη διάταξη 3

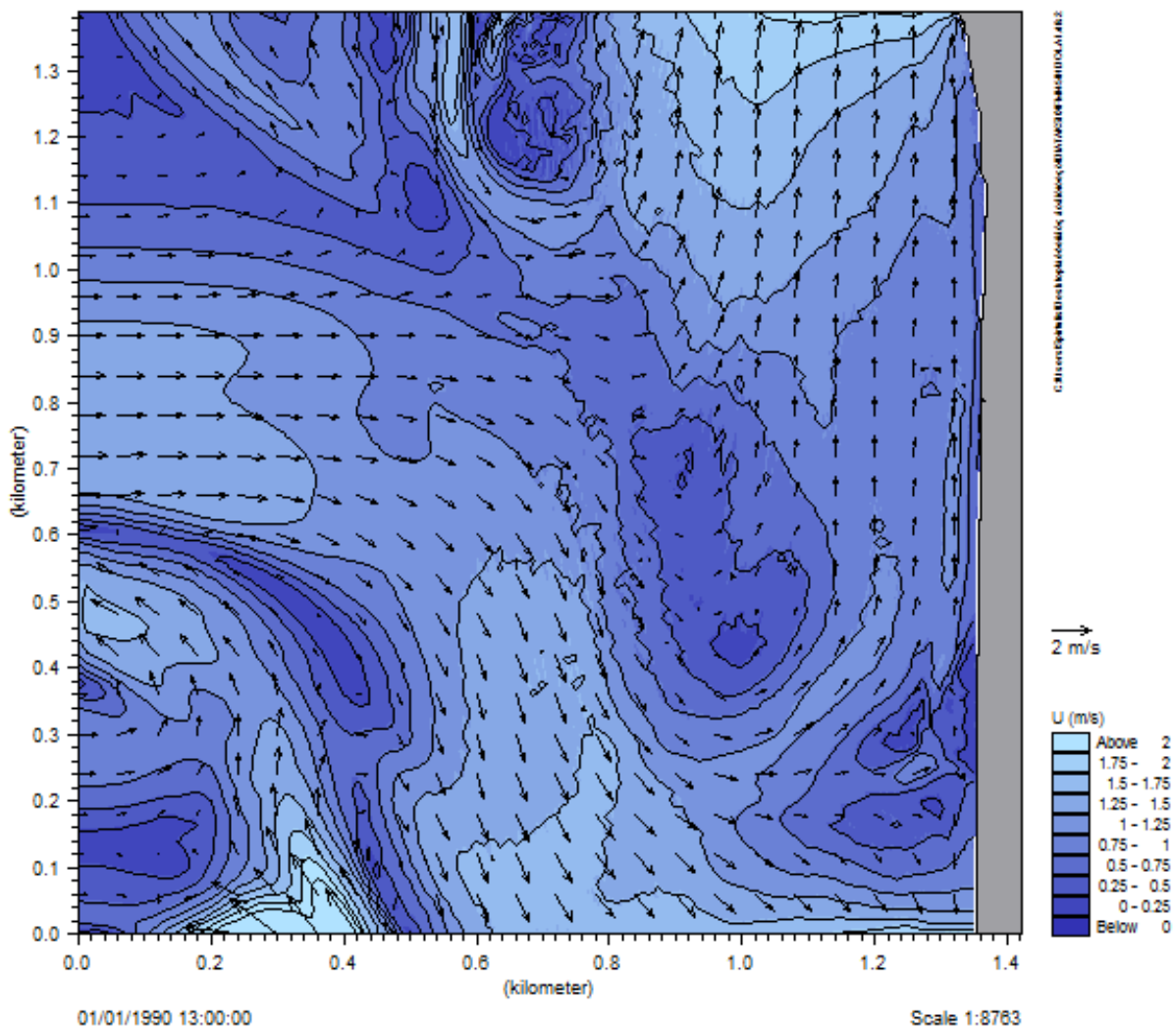


Σχήμα 5.4: διάταξη 3 (Ho 3.20m, Tp 8.53s)

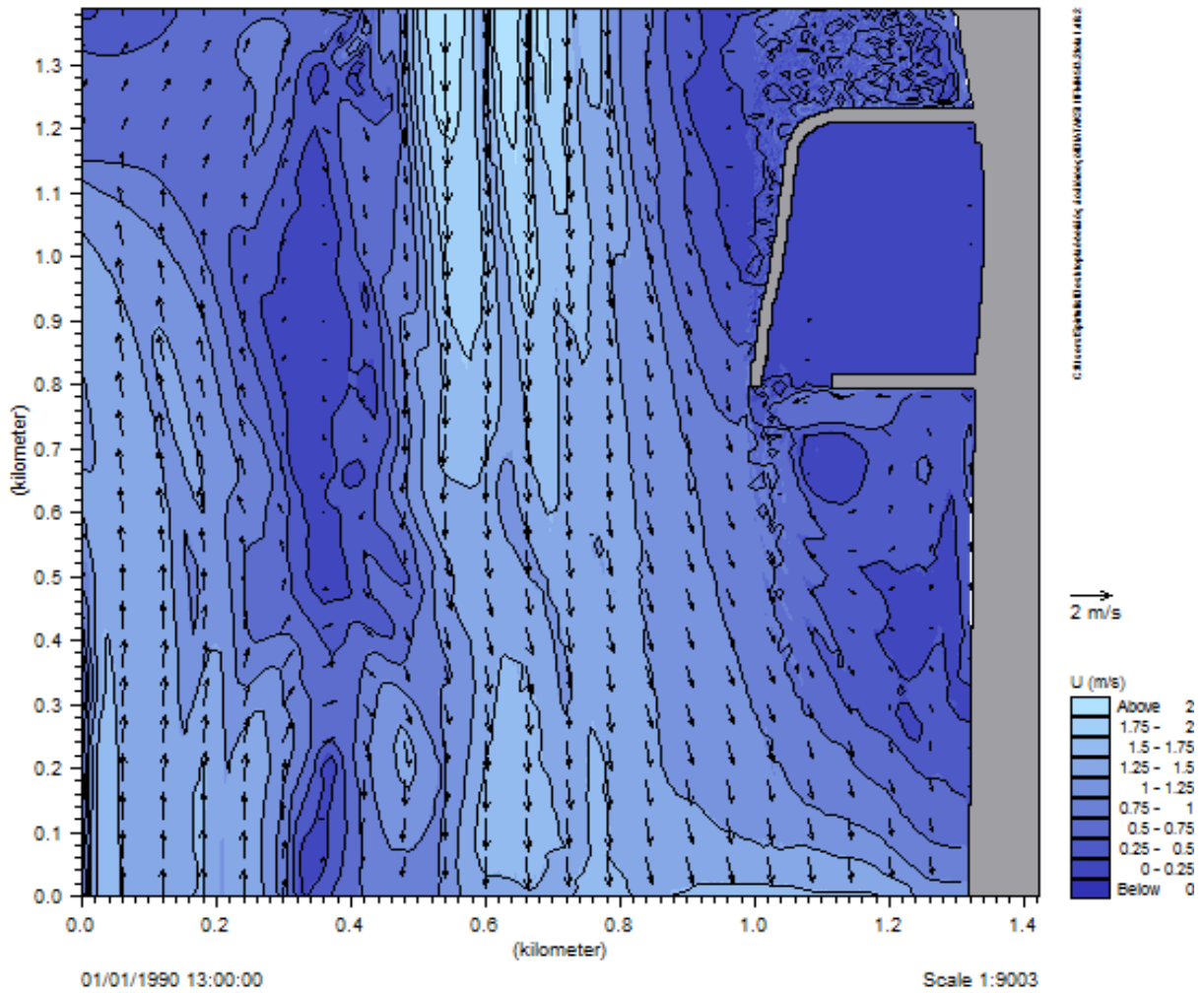
5.5) Αποτελέσματα του υδροδυναμικού μοντέλου ΜΙΚΕ 21 HD από τη προσομοίωση της παράκτιας κυματογενούς κυκλοφορίας για γωνία πρόσπτωσης 45°

Στα Σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η ταχύτητα και η μορφή του κυματογενούς ρεύματος στην περιοχή μελέτης για κάθε σενάριο ανέμου που μελετήθηκε, τη χρονική στιγμή που μονιμοποιούνται οι συνθήκες και συγκεκριμένα ο αριθμός mapping σε όλα τα σημεία του καννάβου με τη διαδικασία που περιγράφηκε στη παράγραφο 5.3. Τα αποτελέσματα αυτά αντιστοιχούν στο κυματικό σενάριο H_s 3.20m και T_p 8.53s, για κάθε διάταξη του έργου, και για αζιμούθιο 45° μοίρες.

5.5.1 Γραφική απεικόνιση ταχύτητας ρευμάτων για τη διάταξη 0

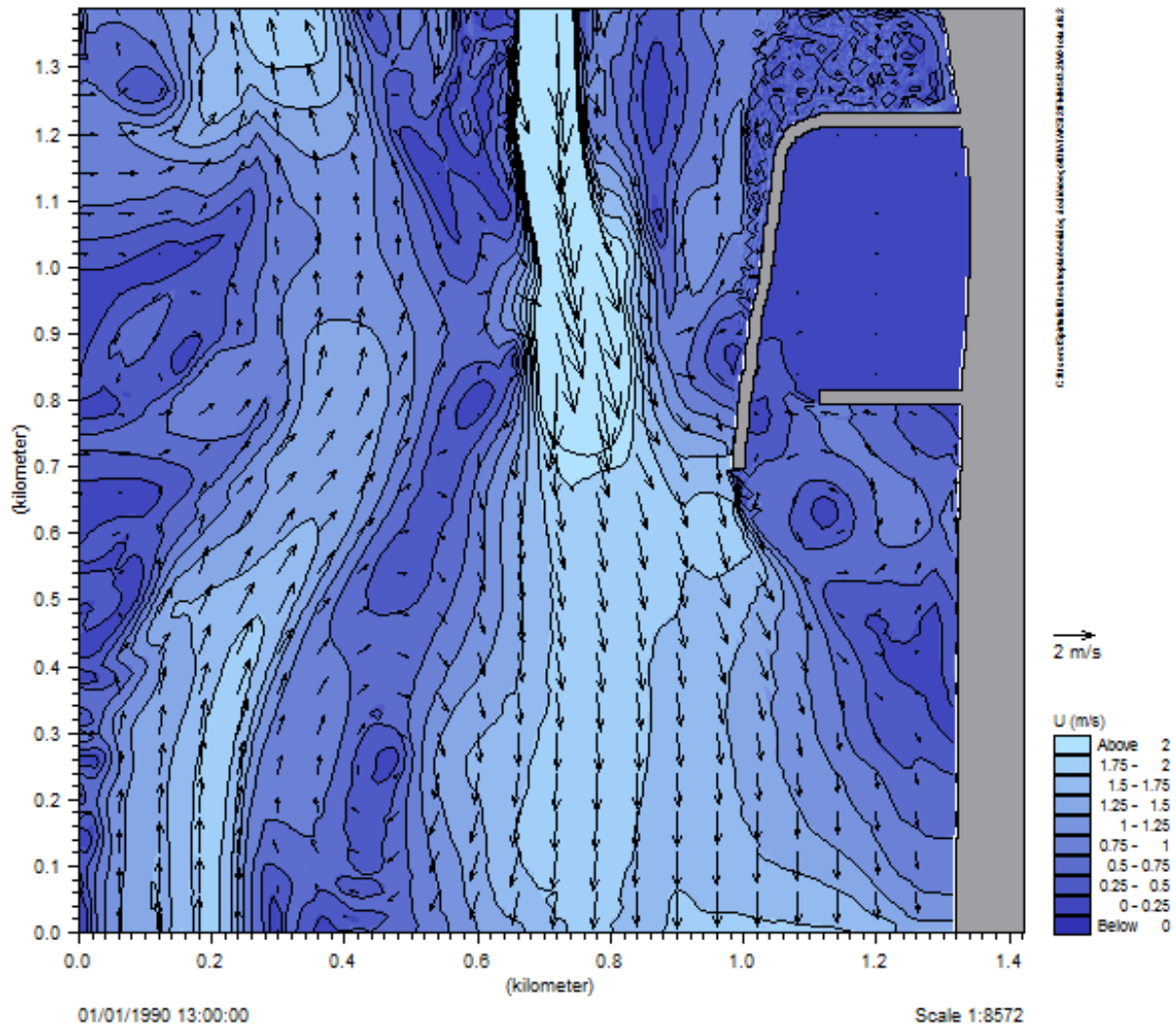


5.5.2 Γραφική απεικόνιση ταχύτητας ρευμάτων για τη διάταξη 1



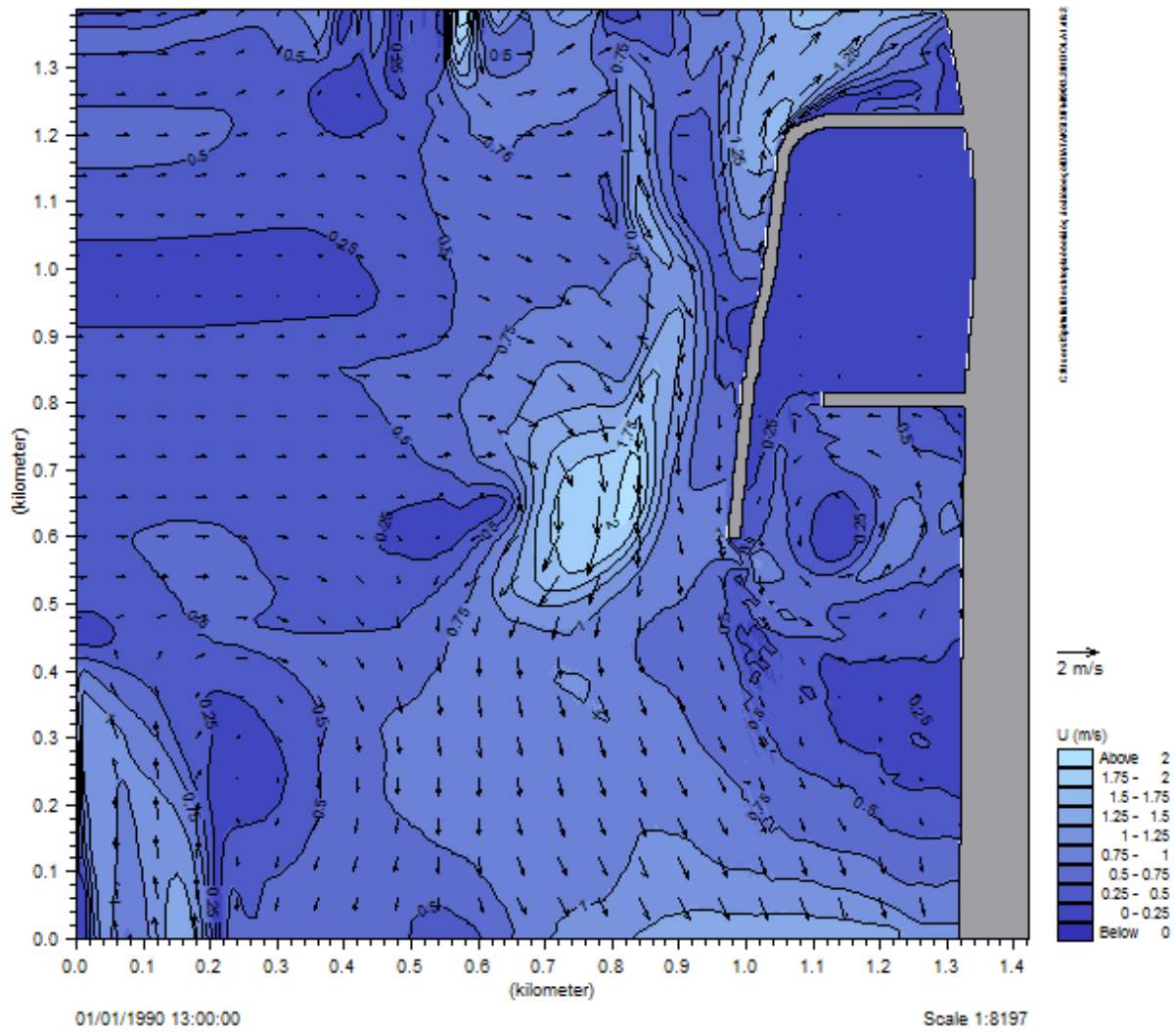
Σχήμα 5.6: διάταξη 1 (Ho 3.20m, Tp 8.53s)

5.5.3 Γραφική απεικόνιση ταχύτητας ρευμάτων για τη διάταξη 2



Σχήμα 5.7: διάταξη 2 (Ho 3.20m, Tp 8.53s)

5.5.4 Γραφική απεικόνιση ταχύτητας ρευμάτων για τη διάταξη 3



Σχήμα 5.8: διάταξη 3 (Ho 3.20m, Tp 8.53s)

5.6) Συμπεράσματα από την προσομοίωση της παράκτιας κυματογενούς μεταφοράς

i. Στα σχήματα 5.1 έως 5.4 παρουσιάζεται, η παράκτια κυκλοφορία κυματογενών ρευμάτων στην συνολική έκταση της περιοχής μελέτης για τις κυματικές συνθήκες H_0 3.20m, T_p 8.53s και γωνία πρόσπτωσης των κυματισμών 90° και στα σχήματα 5.5 έως 5.8 οι αντίστοιχες κυματικές συνθήκες για γωνία πρόσπτωσης κυματισμών 45° .

ii. Στο σχήμα 5.1 που αντιστοιχεί στη μηδενική διάταξη (χωρίς έργα) τα διανύσματα των ταχυτήτων των ρευμάτων είναι σχεδόν κάθετα στην ακτή, ενώ σε μια απόσταση 100 έως 200 από την ακτή τα διανύσματα των ταχυτήτων των ρευμάτων έχουν κατεύθυνση προς τα ανάντη.

iii. Στα σχήματα 5.2 έως 5.4 παρατηρούμε πως τα κυματογενή ρεύματα προσπίπτουν στον προσήνεμο μόλο και διαχέονται στα ανάντη και στα κατάντη του έργου, ενώ παρατηρούνται στροβιλισμοί στο μέτωπο του κατάντη εγκάρσιου προβόλου. Το φαινόμενο αυτό γίνεται πιο έντονο στη διάταξη 3 όπου είναι αυξημένο το μήκος του προσήνεμου μόλου και μεταφέρεται η κυματική διαταραχή στα κατάντη, έτσι επιβεβαιώνεται και η αντίστοιχη παρατήρηση που έγινε στο κεφάλαιο 3.

iv. Στα σχήματα 5.5 έως 5.8 που αντιστοιχούν σε λοξή γωνία πρόσπτωσης (45 μοίρες) διαπιστώνεται πως τα διανύσματα είναι σε γενικές γραμμές και στις τέσσερις διατάξεις παράλληλα με την ακτογραμμή. Ενώ επίσης παρατηρούνται και εδώ στροβιλισμοί στο μέτωπο του κατάντη εγκάρσιου προβόλου. Επιπλέον προκύπτουν οι ανάλογες παρατηρήσεις που έγιναν στην προηγούμενη παράγραφο για τη μεταφορά της κυματικής διαταραχής στα κατάντη του έργου όσο αυξάνει το μήκος του προσήνεμου μόλου.

v. Η υδροδυναμική κυκλοφορία σε όλες τις διατάξεις είναι εντονότερη σε μια ζώνη που κυμαίνεται από 400 έως και 700 μέτρα από την ακτογραμμή. Οι ταχύτητες των ρευμάτων στην περιοχή αυτή κυμαίνονται από 1.25 έως και πάνω από 2.0 m/sec.

vi. Η υδροδυναμική κυκλοφορία σε όλες τις διατάξεις είναι μικρότερη σε μία ζώνη που κυμαίνεται από 100 έως 200 μέτρα από την ακτογραμμή και ιδιαίτερα στην περιοχή που προστατεύεται πλήρως από τον προσήνεμο μόλο στις διατάξεις 1, 2 και 3. Οι ταχύτητες των ρευμάτων στην περιοχή αυτή κυμαίνονται από 0.5 έως 1.25 m/sec.

vii. Στο σχήμα 5.3 που αντιστοιχεί στη δεύτερη διάταξη του έργου παρατηρούμε μεγαλύτερο ποσοστό ανάκλασης των ρευμάτων που προσπίπτουν στον προσήνεμο μόλο. Αυτό το φαινόμενο πιθανόν να οφείλεται σε αδυναμία του μοντέλου να προσομοιώσει με ακρίβεια την απορρόφηση ενός μέρους της κυματικής ενέργειας κατά την πρόσπτωση των κυμάτων στο πρηνές του μόλου.

viii. Στα σχήματα 5.1 έως 5.8 παρατηρούμε πως στα ανάντη και κατάντη όρια του καννάβου της βαθυμετρίας τα κυματογενή ρεύματα ακολουθούν ακανόνιστες τροχιές. Κατά την πειραματική διαδικασία για την απορρόφηση των προσπιπτόντων κυμάτων, έχουν κατασκευασθεί στα τοιχώματά της δεξαμενής αποσβεστικές επενδύσεις από λιθορριπή με κλίση πρηνών 1:2 και κοκκομετρία τέτοια ώστε να εξασφαλίζεται πολύ χαμηλός συντελεστής ανάκλασης, ενώ στην περιοχή των κυματογεννητριών, τμήμα των αποσβεστικών επενδύσεων έχει καλυφθεί με γεωύφασμα. για την ενίσχυση της απορρόφησης των προσπιπτόντων εκεί κυματισμών. Αυτά τα όρια είναι δύσκολο να προσομοιωθούν με ακρίβεια από το υδροδυναμικό μοντέλο ΜΙΚΕ 21 HD. Έτσι προτιμήθηκε η επιλογή των συμμετρικών ορίων στα ανάντη και στα κατάντη θεωρώντας δεδομένο πως υπάρχει ανάκλαση κυματισμών στα πρηνή. Η διαδικασία αυτή έχει ως αποτέλεσμα την ύπαρξη των ακανόνιστων τροχών που αναφέρθηκαν παραπάνω σε υποπεριοχές που βρίσκονται μακριά από την υπό μελέτη περιοχή στα κατάντη του μόλου λιμένα.

Κεφάλαιο 6: Μοντέλο στερεομεταφοράς - MIKE21 Non - Cohesive Sediment Transport Module (ST)

Το MIKE21 ST είναι ένα αριθμητικό μοντέλο του λογισμικού MIKE21 που υπολογίζει τους ρυθμούς στερεομεταφοράς μη συνεκτικών ιζημάτων σε περιπτώσεις αμιγούς ρεύματος ή για συνδυασμένη δράση ρεύματος και κύματος. Επιπλέον υπολογίζονται και οι αρχικοί ρυθμοί μεταβολής της στάθμης του πυθμένα. Το MIKE21 ST δεν αποτελεί ένα πλήρες μορφολογικό μοντέλο, αλλά είναι δυνατόν με αυτό να προσδιορισθούν οι περιοχές πιθανής διάβρωσης ή απόθεσης ιζήματος. Για μεγαλύτερη ακρίβεια στην προσομοίωση λαμβάνονται υπόψη η παλίρροια, ο άνεμος, οι κυματισμοί και τα ρεύματα. Το μοντέλο βρίσκει εφαρμογή σε φυσικά περιβάλλοντα, όπως εκβολές ποταμών και ακτογραμμές, καθώς επίσης και σε ανθρώπινες κατασκευές, όπως λιμάνια και γέφυρες.

6.1) Θεωρίες στερεομεταφοράς σε συνθήκες αμιγούς ρεύματος

Στο μοντέλο MIKE21 ST είναι διαθέσιμες 5 διαφορετικές θεωρίες υπολογισμού της στερεομεταφοράς, σε συνθήκες αμιγούς ρεύματος.

i. Θεωρία ολικού φορτίου μεταφοράς των Engelund & Hansen.

Ο αδιάστατος ρυθμός μεταφοράς του συνολικού φορτίου υπολογίζεται ως:

$$\Phi_t = 0.1 \frac{c^2}{2g} \theta^{2.5} \quad (6.1)$$

και

$$\Phi_t = \frac{qt}{\sqrt{(s-1)gd^3}} \quad (6.2)$$

ii. Θεωρία ολικού φορτίου (πυθμένα και αιωρούμενου) μεταφοράς των Engelund & Fredsoe. Ο ρυθμός μεταφοράς του συνολικού φορτίου (qt) υπολογίζεται ως το άθροισμα του φορτίου πυθμένα (qb) και του φορτίου σε αιώρηση (qs), $qt = qb + qs$.

Γίνεται η θεώρηση ότι η στερεομεταφορά στον πυθμένα λαμβάνει χώρα σε ένα στρώμα πάχους ίσου με τη διάμετρο των κόκκων του ιζήματος και η στερεοπαροχή υπολογίζεται από τη σχέση:

$$q_b = 5p(\sqrt{\theta'} - 0.07\sqrt{\theta_c})\sqrt{(s-1)gd} \text{ όταν } \theta' > \theta_c \quad (6.3)$$

όπου p η πιθανότητα όλοι οι κόκκοι σε κάποιο στρώμα να βρίσκονται σε κίνηση, $\theta' = \frac{U_f^2}{(s-1)gd}$ η αδιάστατη διατμητική τάση στον πυθμένα (παράμετρος Shields) σε σχέση με την τριβή και θ_c η κρίσιμη διατμητική τάση πυθμένα για την έναρξη της κίνησης. Η πιθανότητα p ορίζεται ως $p = [1 + (\frac{\pi\beta/6}{\theta' - \theta_c})^4]^{-1/4}$ όπου β ο δυναμικός συντελεστής τριβής.

Το φορτίο σε αιώρηση υπολογίζεται ως

$$q_s = 11.6U_f'c_b a [I_1 \ln(30h/k_N) + I_2] \quad (6.4)$$

όπου c_b η συγκέντρωση στον πυθμένα του αιωρούμενου ιζήματος, U_f' η διατμητική ταχύτητα σχετιζόμενη με την τριβή, $a = 2d$ το επίπεδο αναφοράς για το c_b , I_1 και I_2 τα ολοκληρώματα του Einstein, h το βάθος του νερού και $k_N = 2.5D$ η ισοδύναμη τραχύτητα του Nikuradse. Τα ολοκληρώματα I_1 και I_2 αποτελούν μια συνάρτηση του αδιάστατου επίπεδο αναφοράς $A = r/h$ και του αριθμού Rouse $z^* = w/\kappa U_{f,wc}$ (w η ταχύτητα καθίζησης του αιρούμενου ιζήματος, κ η σταθερά του von Karman (≈ 0.40) και $U_{f,wc}$ η διατμητική ταχύτητα υπό τη συνδυασμένη δράση ρεύματος και κύματος) και έχουν όρια $y = a$ και $y = h$ όπου το y μετράται πάνω από το σταθερό επίπεδο του πυθμένα.

Στο επίπεδο αναφοράς $a = 2d$ η συγκέντρωση c_b υπολογίζεται από τη σχέση

$$c_b = 0.65/(1 + 1/\lambda)^3 \quad (6.5)$$

$$\text{όπου } \lambda = \sqrt{\frac{\theta' - \theta_c - \pi\beta/6}{0.027s\theta'}} \text{ για } \theta' > \theta_c + \pi\beta/6$$

Η θεωρία των Engelund & Fredsoe αναπτύχθηκε από αποτελέσματα που προέκυψαν από πειράματα με αμμώδες υλικό πυθμένα και για το λόγο αυτό πρέπει το υλικό που εισάγεται ως δεδομένο να έχει διάμετρο κόκκων του μεγέθους της άμμου.

iii. Διατύπωση ολικού φορτίου (πυθμένα και αιωρούμενου) μεταφοράς των Zyserman & Fredsoe. Αυτή η μέθοδος υπολογισμού του ρυθμού μεταφοράς του συνολικού φορτίου q_t είναι παρόμοια με αυτή των Engelund & Fredsoe, με μόνη διαφορά ότι η συγκέντρωση του φορτίου στον πυθμένα υπολογίζεται από την εμπειρική σχέση:

$$c_b = \frac{A(\theta' - \theta_c)^n}{1 + \frac{A}{c_m}(\theta' - \theta_c)^n} \text{ όταν } \theta' > \theta_c \quad (6.6)$$

iv. Θεωρία μεταφοράς φορτίου πυθμένα των Meyer-Peter & Miiller. Ο αδιάστατος ρυθμός μεταφοράς του φορτίου πυθμένα υπολογίζεται ως:

$$\Phi_b = 8(\theta' - \theta_c)^{1.5} \quad (6.7)$$

και

$$\Phi_b = \frac{q_b}{\sqrt{(s-1)gd^3}} \quad (6.8)$$

Σε περιπτώσεις όπου το ίζημα είναι πολύ λεπτόκοκκο και/ή η ταχύτητα του ρεύματος μεγάλη με τη φόρμουλα αυτή υπολογίζονται μικρότεροι ρυθμοί στερεομεταφοράς καθώς λαμβάνεται υπόψη μόνο η συνεισφορά του φορτίου πυθμένα.

v. Διατύπωση ολικού φορτίου μεταφοράς των Ackers & White. Ο αδιάστατος ρυθμός μεταφοράς του συνολικού φορτίου υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$G_{gr} = C \left[\frac{F_{gr}}{A} - 1 \right]^m \quad (6.9)$$

όπου C, m και A είναι παράμετροι του μοντέλου που εξαρτώνται από το αδιάστατο μέγεθος

$$D_{gr} = D[g(s-1)/v^2]^{1/3} \quad (6.10)$$

όπου D το μέγεθος των κόκκων του ιζήματος, g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας, s η σχετική πυκνότητα του ιζήματος και v το κινηματικό ιξώδες του νερού.

F_{gr} είναι ένα γενικός αριθμός της κινητικότητας του ιζήματος και ορίζεται ως

$$F_{gr} = \frac{U_f^n}{\sqrt{gd(s-1)}} \left[\frac{V}{\sqrt{32 \log \left(\frac{10h}{d} \right)}} \right]^{1-n} \quad (6.11)$$

όπου U_f είναι η συνολική διατμητική ταχύτητα, h το βάθος του νερού, V η μέση κατά βάθος ταχύτητα του ρεύματος, n μια σταθερά που εξαρτάται από το D_{gr} που κυμαίνεται από 0 για χονδρόκοκκα υλικά έως 1 για λεπτόκοκκα. Η παράμετρος μεταφοράς G_{gr} ορίζεται ως

$$G_{gr} = \frac{Xh}{sd} \left(\frac{U_f}{V} \right)^n, \text{ όπου } X \text{ η μαζική ροή ιζημάτων ανά μονάδα μαζικού ρυθμού ροής.}$$

6.2) Θεωρίες στερεομεταφοράς σε συνθήκες ρεύματος-κύματος

Στο μοντέλο MIKE21 ST είναι διαθέσιμες 2 διαφορετικές μέθοδοι προσομοίωσης της στερεομεταφοράς, για συνδυασμό ρεύματος και κύματος.

- i. Εφαρμογή του ντετερμινιστικού μοντέλου στερεομεταφοράς της DHI, STP
- ii. Μέθοδος ολικού φορτίου μεταφοράς του Bijker

Το Q είναι ένας αδιάστατος παράγοντας που ορίζεται από τη σχέση

$$Q = \left[I_1 \ln \left(\frac{33h}{r} \right) + I_2 \right] \quad (6.12)$$

όπου h το βάθος, r η τραχύτητα του πυθμένα και I_1, I_2 είναι ολοκληρώματα του Einstein. Η τραχύτητα r μπορεί να συνδεθεί με τον αριθμό Chézy μέσω της σχέσης $C = 18 \log \left(\frac{12h}{r} \right)$.

Ακολουθώντας τον Bijker, η διατμητική ταχύτητα για συνδυασμό κυματισμών και ρεύματος υπολογίζεται ως

$$U_{f,wc} = U_{f,c} \sqrt{1 + \frac{1}{2} \left(\xi \frac{\widehat{u}_b}{V} \right)^2} = \frac{\sqrt{gV}}{c} \sqrt{1 + \frac{1}{2} \left(\xi \frac{\widehat{u}_b}{V} \right)^2} \quad (6.13)$$

όπου U_{fc} η διατμητική ταχύτητα λόγω ρεύματος, V η μέση στο βάθος ταχύτητα του ρεύματος, \widehat{u}_b το πλάτος της τροχιάς της ταχύτητας λόγω κύματος στον πυθμένα και ξ ο αδιάστατος παράγοντας που μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση του συντελεστή τριβής λόγω κύματος (f_w) και του αριθμού Chézy (C) $\xi = C \sqrt{\frac{f_w}{2g}}$.

Ο συντελεστής τριβής λόγω κύματος υπολογίζεται σύμφωνα με τον Swart ως

$$f_w = \exp \left[-5.977 + 5.213 \left(\frac{a_b}{r} \right)^{-0.194} \right] \text{ όταν } 1.47 < \frac{a_b}{r} < 3000 \text{ και}$$

$$f_w = 0.32 \text{ όταν } \frac{a_b}{r} \leq 1.47$$

όπου $a_b = \frac{\widehat{u}_b T}{2\pi}$ το πλάτος της τροχιάς των υγρών μορίων, λόγω κύματος, στον πυθμένα. Τόσο το a_b όσο και το \widehat{u}_b υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τη γραμμική θεωρία των κυματισμών.

Το φορτίο πυθμένα (q_b) και το φορτίο σε αιώρηση (q_s) υπολογίζονται από τη σχέση

$$q_b = B d_{50} U_{f,c} \exp \left(-\frac{0.27 \Delta d_{50} g}{\mu U_{f,wc}^2} \right) \quad (6.14)$$

όπου B είναι ένας αδιάστατος συντελεστής και $\Delta = \rho_s / \rho - 1$ η σχετική πυκνότητα του ιζήματος. Το μ είναι ένας συντελεστής που ονομάζεται συντελεστής αμμοκυμάτων και ισούται με $\mu = (C/C')^{3/2}$, όπου $C' = 18 \log \left(\frac{12h}{d_{50}} \right)$ ο αριθμός Chézy που εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υλικού του πυθμένα.

6.3) Εφαρμογή μοντέλου

Η εισαγωγή στο μοντέλο των διαφόρων παραμέτρων γίνεται σε δύο βασικές καρτέλες. Στην πρώτη καρτέλα επιλέγεται ο τύπος της ανάλυσης, δηλαδή αν θα γίνει για συνθήκες αμιγούς ρεύματος (Current only) ή για συνδυασμό ρεύματος και κυματισμών (Current and waves). Εισάγονται τα αποτελέσματα του υδροδυναμικού μοντέλου, επιλέγεται η περιοχή μελέτης και ορίζονται τα στοιχεία που αφορούν την περίοδο προσομοίωσης (χρονικά βήματα και υποσειρές). Επιλέγεται χρονικό βήμα ίσο με αυτό της υδροδυναμικής ανάλυσης.

Στη δεύτερη καρτέλα ορίζονται οι παράμετροι του μοντέλου. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, που η ανάλυση γίνεται για συνθήκες συνδυασμένης δράσης ρεύματος και κυματισμών, επιλέγεται ως μέθοδος υπολογισμού των ρυθμών στερεομεταφοράς η διδιάστατη προσέγγιση (2DH) του ντετερμινιστικού μοντέλου STP. Το STP αποτελεί ένα προηγμένο μοντέλο στερεομεταφοράς, το οποίο λαμβάνει υπόψη την επίδραση στην κίνηση των ιζημάτων, μεταξύ άλλων, της θραύσης των κυματισμών, της ύπαρξης ή μη αμμοκυμάτων, της διαβάθμισης των κόκκων του υλικού του πυθμένα και της διάδοσης των κυματισμών υπό γωνία ως προς το παράκτιο ρεύμα. Ο χρόνος που απαιτείται για την ανάλυση με αυτή τη μέθοδο είναι σημαντικά μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο άλλων απλούστερων μεθόδων. Για να μειωθεί ο χρόνος αυτός γίνεται παρεμβολή μεταξύ των τιμών των ρυθμών στερεομεταφοράς που περιέχονται σε πίνακα ο οποίος δημιουργείται από το χρήστη και εισάγεται στο MIKE21 ST.

Για τη δημιουργία ενός πίνακα στερεομεταφοράς χρησιμοποιείται το εργαλείο "Generation of Sediment Tables" της καρτέλας "Sediments" του MIKE21 Toolbox. Ο χρήστης ορίζει το εύρος διακύμανσης των υδροδυναμικών παραμέτρων (ταχύτητα ρεύματος, ύψος και περίοδος κύματος, λόγος ύψους κύματος προς βάθος νερού) και των παραμέτρων του ιζήματος (διάμετρος D_{50} και διακύμανση κόκκων $Gg=(D_{84}/D_{16})^{1/2}$) για το οποίο υπολογίζονται οι ρυθμοί στερεομεταφοράς. Έτσι καθορίζεται η πρώτη τιμή κάθε παραμέτρου, το διάστημα μεταξύ διαδοχικών τιμών καθώς και ο αριθμός των τιμών. Επίσης ορίζεται αν στους υπολογισμούς θα ληφθούν υπόψη η επίδραση των αμμοκυμάτων και της κλίσης του πυθμένα.

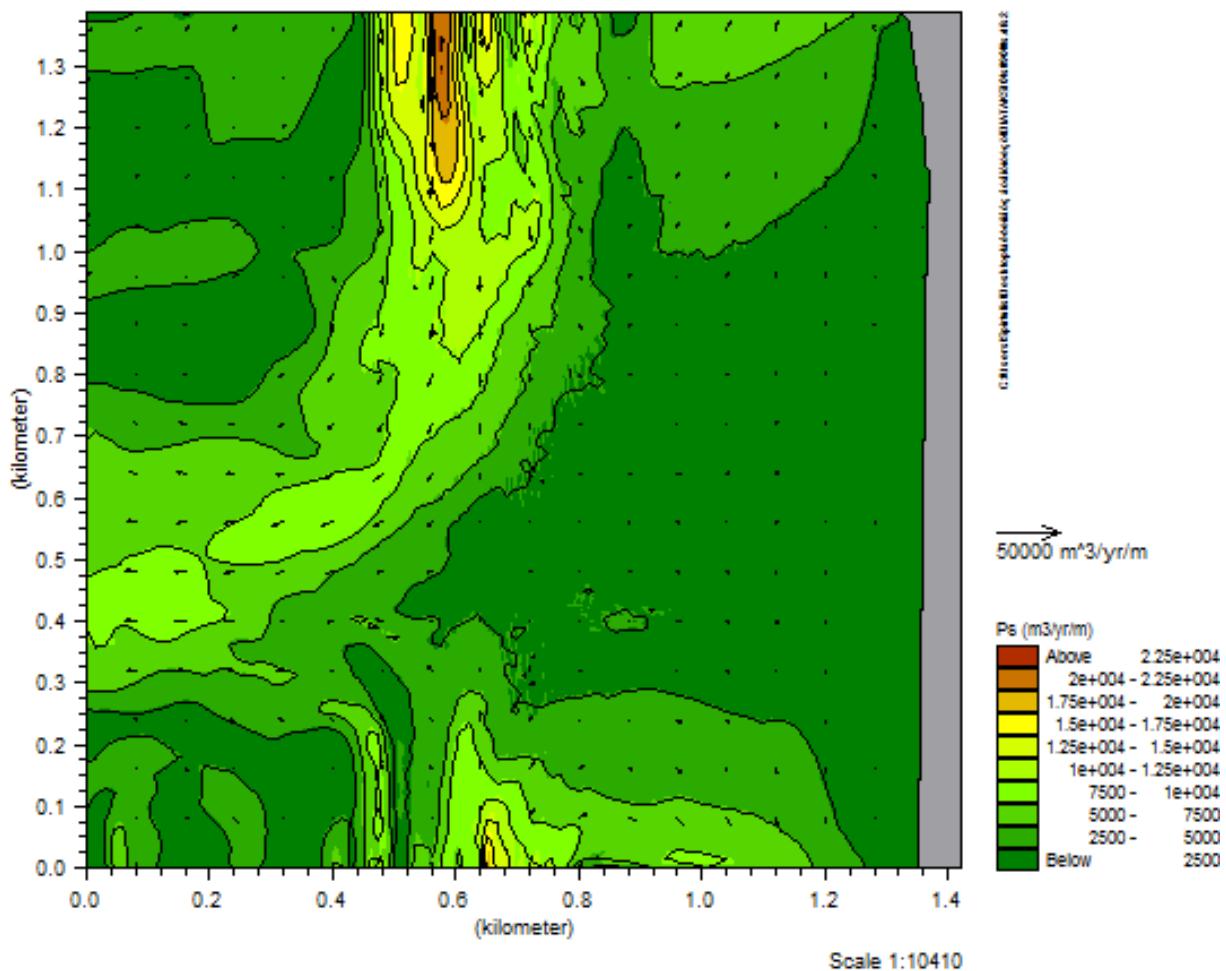
Στην καρτέλα των παραμέτρων του μοντέλου της στερεομεταφοράς εισάγονται επιπλέον τα αποτελέσματα του κυματικού μοντέλου, το αρχείο της αντίστασης του πυθμένα που αντιστοιχεί στην τελευταία ώρα της ανάλυσης καθώς και δεδομένα που αφορούν το ίζημα του πυθμένα, όπως το μέγεθος και η διαβάθμιση των κόκκων και το πορώδες. Τέλος, για τον υπολογισμό του ρυθμού μεταβολής του πυθμένα επιλέγεται το μορφολογικό σχήμα επίλυσης Lax-Wendroff.

Το αρχείο των αποτελεσμάτων του MIKE21 ST περιλαμβάνει τους ρυθμούς της εγκάρσιας (P_s) και της κατά μήκος της ακτής (Q_s) στερεομεταφοράς, το ρυθμό μεταβολής του πυθμένα (dz/dt) και τη νέα βαθυμετρία.

6.4) Αποτελέσματα μοντέλου στερεομεταφοράς MIKE 21 ST

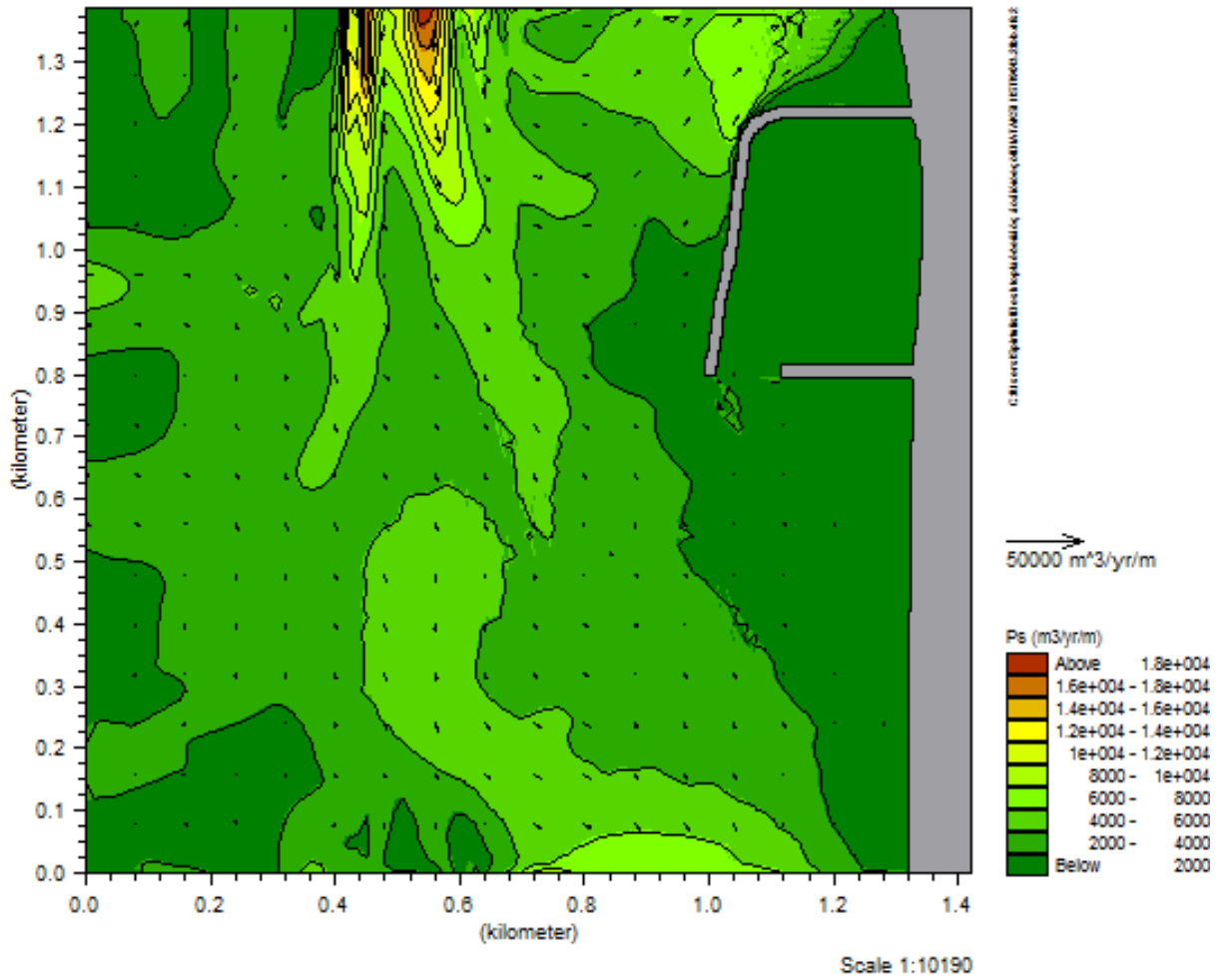
Στην ενότητα αυτή παραθέτονται τα αποτελέσματα του μοντέλου στερεομεταφοράς. Συγκεκριμένα παρουσιάζεται η στερεοπαροχή στην περιοχή μελέτης για το δυσμενέστερο κυματικό σενάριο (Ho 3.20m, Tr 8.53s) στις τέσσερις διατάξεις του έργου. Ωστόσο θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη μόνο ποιοτικά. Τα ποσοτικά δεδομένα αυτού του αρχείου, συχνά δεν ανταποκρίνεται στις πραγματικές τιμές. Αυτό συμβαίνει για διάφορους λόγους. Ένας από τους σημαντικότερους, είναι ότι το μοντέλο στερεομεταφοράς θεωρεί ότι υπάρχει άπειρη ποσότητα ιζημάτων στην περιοχή καθώς και άπειρο πάχος πυθμένα. Άλλος ένας λόγος είναι ότι το μοντέλο δεν θεωρεί ότι υπάρχει καμία αλληλεπίδραση έξω από τα όρια της περιοχής μελέτης. Τέλος, επισημαίνεται πως στο μοντέλο θεωρείται ότι δεν υπάρχει ανάδραση στο ρυθμό μεταβολής εξαιτίας των κυμάτων και των ρευμάτων, όπως συμβαίνει στη φύση. Για τους παραπάνω λόγους τα αποτελέσματα αποτελούν μια πρώτη προσέγγιση της τάξης μεγέθους της στερεοπαροχής και κυρίως μια ένδειξη για τις πιθανές περιοχές διάβρωσης και απόθεσης ιζημάτων. Στα Σχήματα 6.1 έως 6.8 απεικονίζεται η μέση ετήσια στερεοπαροχή ανά διατομή στην περιοχή μελέτης σε $m^3/yr/m$.

6.4.1 Γραφική απεικόνιση της μέσης ετήσιας στερεομεταφοράς για τη διάταξη 0



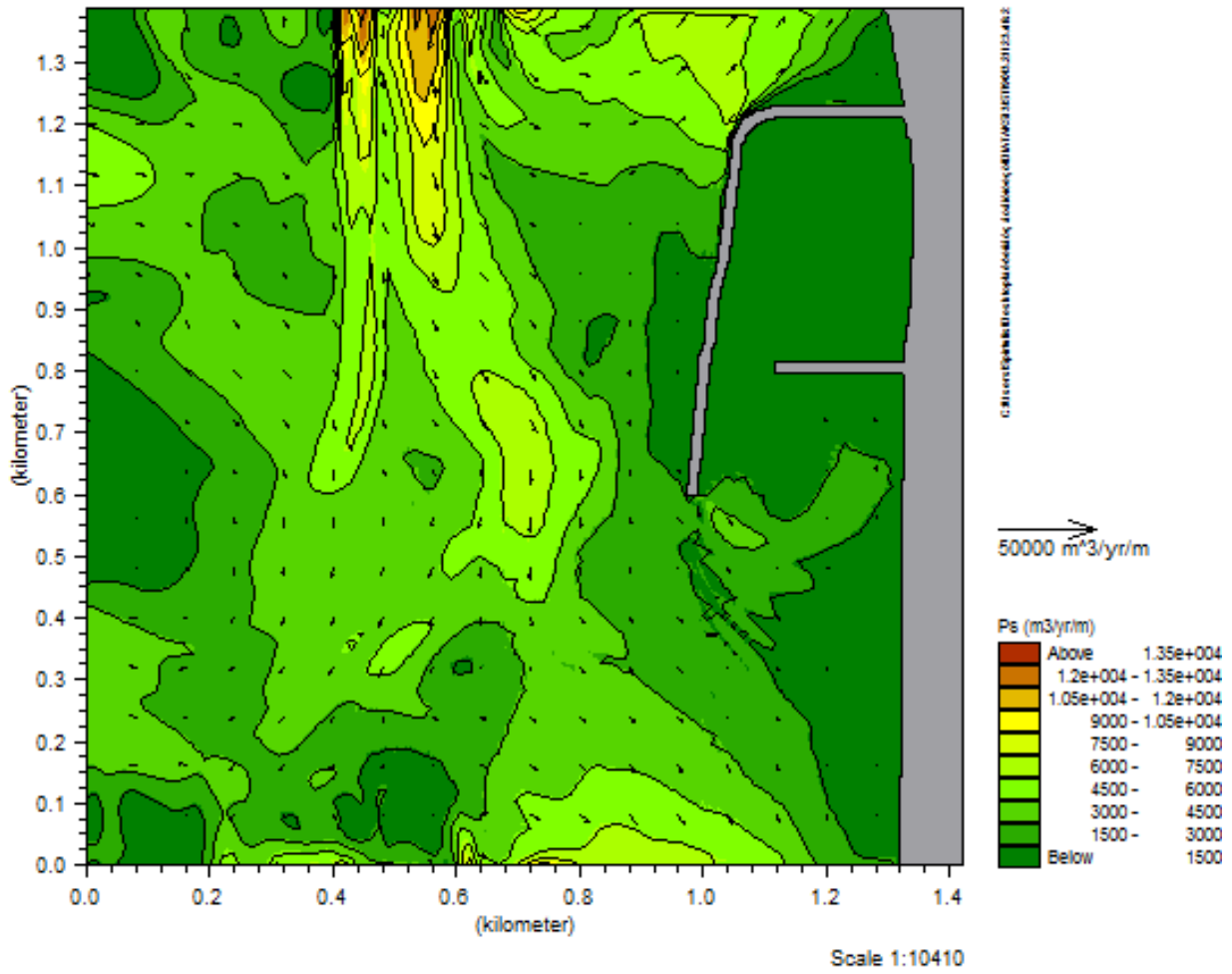
Σχήμα 6.1: διάταξη 0 (Ho 3.20m, Tr 8.53s dir. 90deg)

6.4.2 Γραφική απεικόνιση της μέσης ετήσιας στερεομεταφοράς για τη διάταξη 1



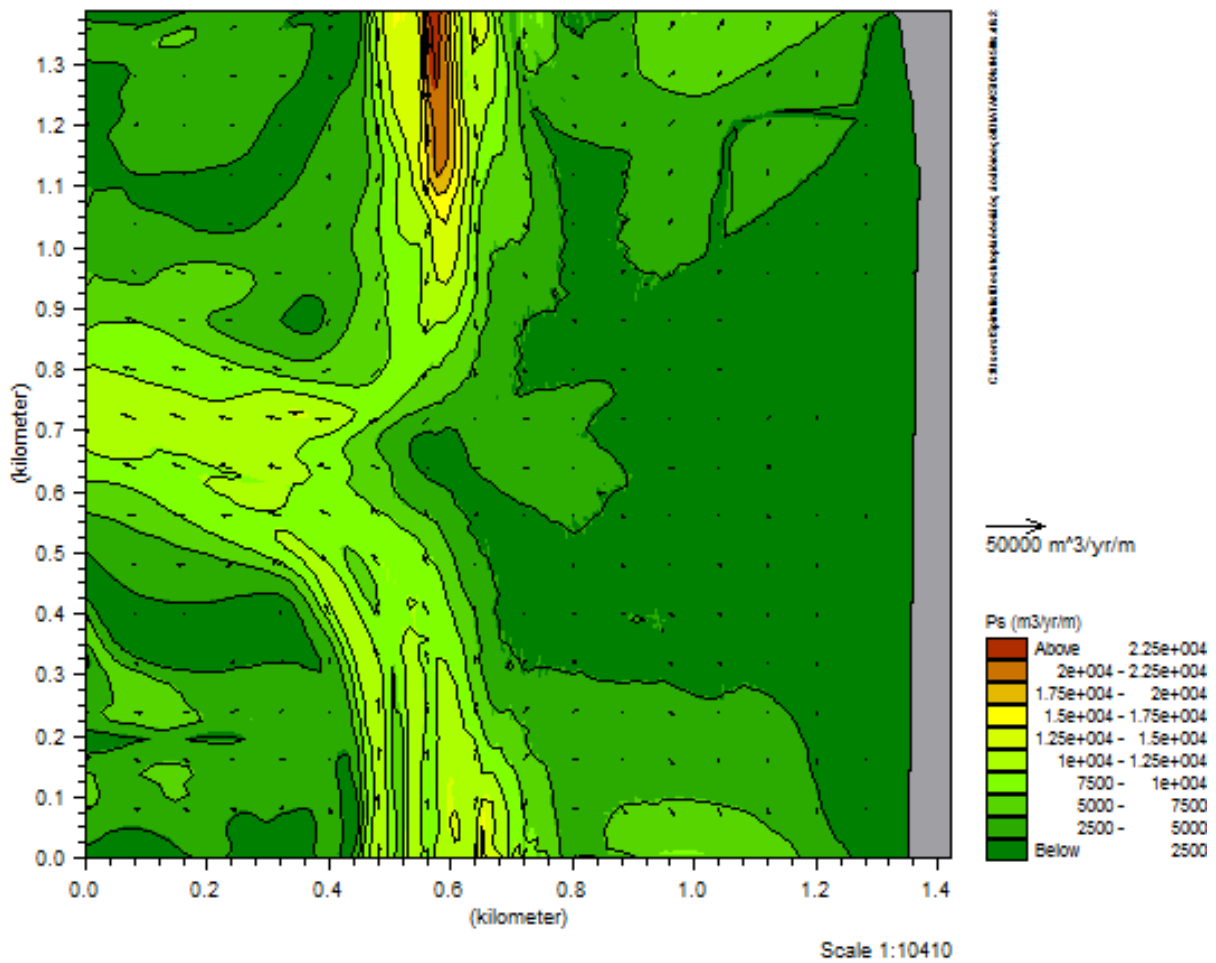
Σχήμα 6.2: διάταξη 1 (Ho 3.20m, Tp 8.53s dir. 90deg)

6.4.4 Γραφική απεικόνιση της μέσης ετήσιας στερεομεταφοράς για τη διάταξη 1



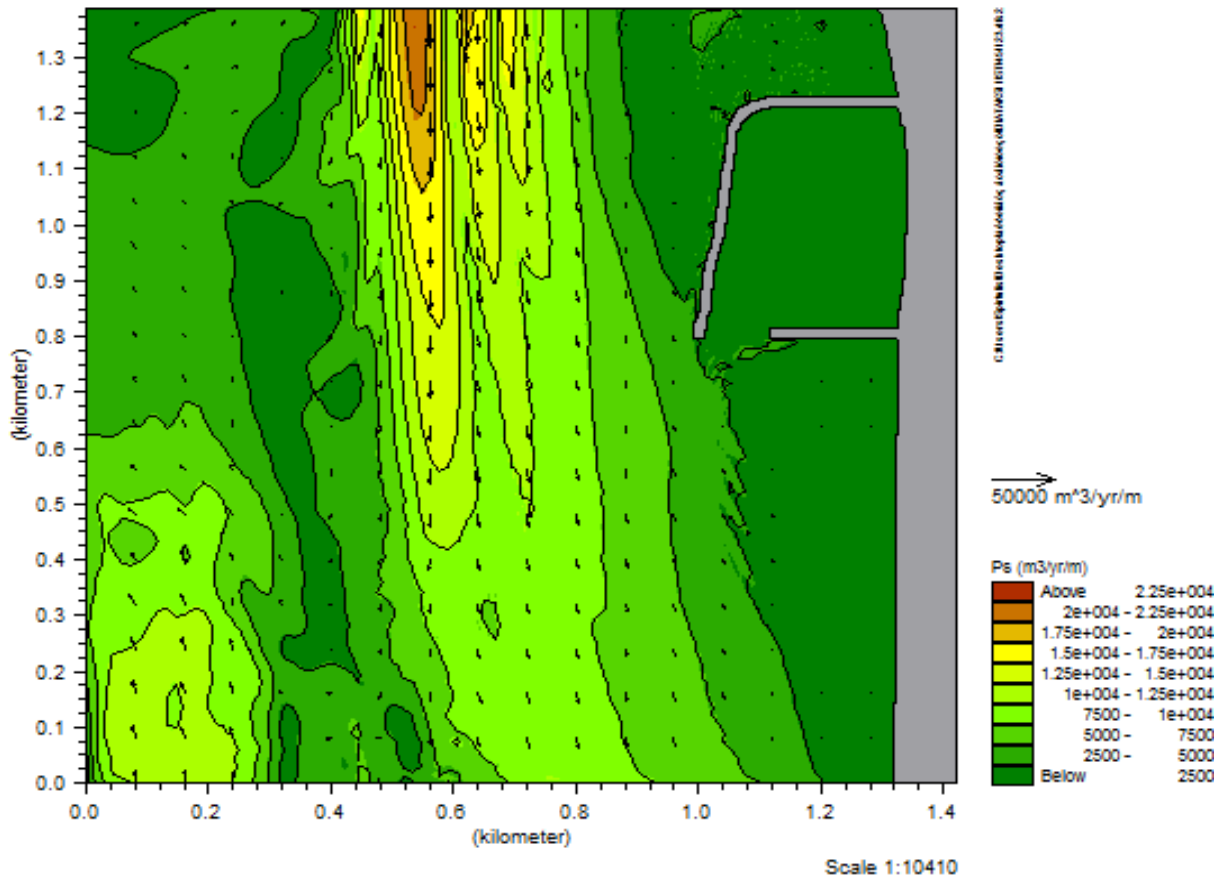
Σχήμα 6.4: διάταξη 3 (Ho 3.20m, Tp 8.53s dir. 90deg)

6.4.5 Γραφική απεικόνιση της μέσης ετήσιας στερεομεταφοράς για τη διάταξη 0



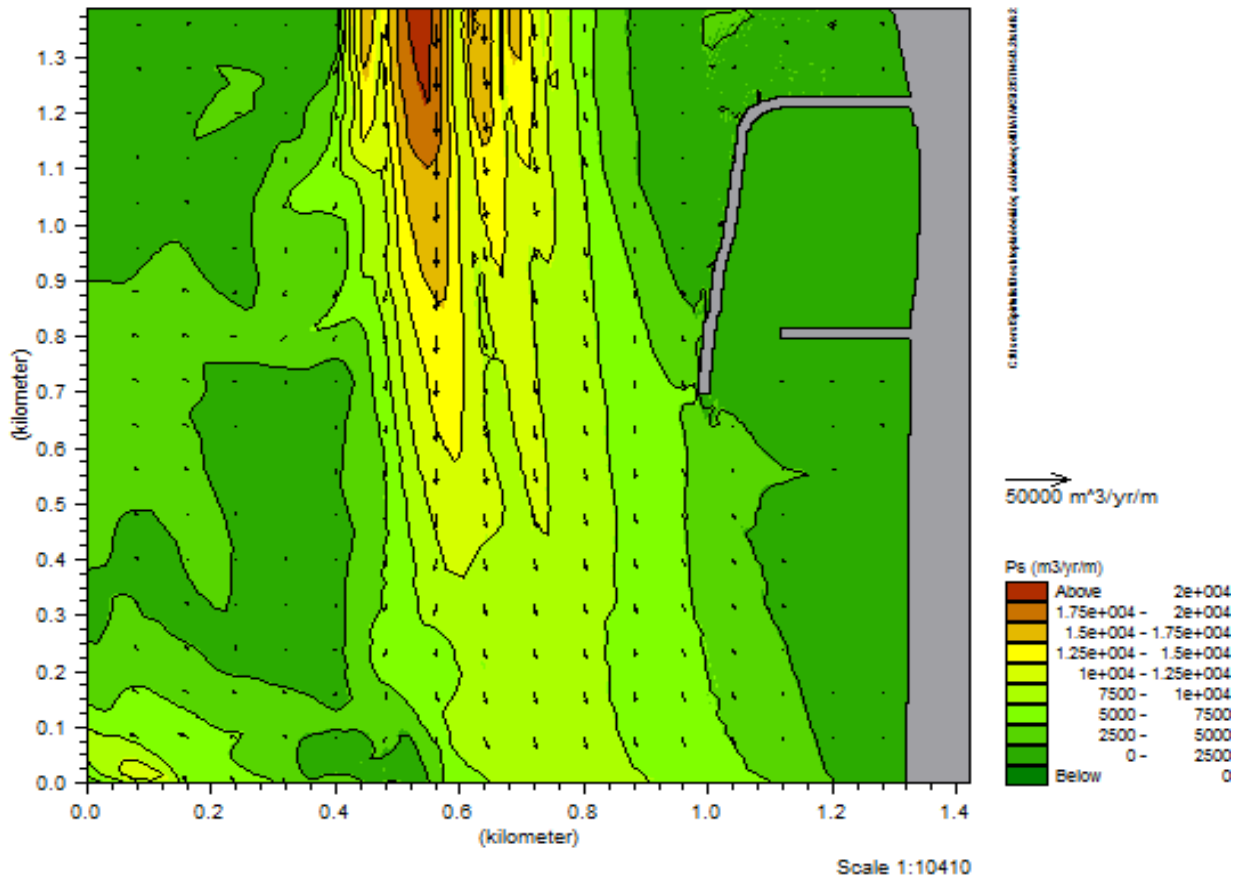
Σχήμα 6.5: διάταξη 0 (Ho 3.20m, Tp 8.53s dir. 45deg)

6.4.6 Γραφική απεικόνιση της μέσης ετήσιας στερεομεταφοράς για τη διάταξη 1



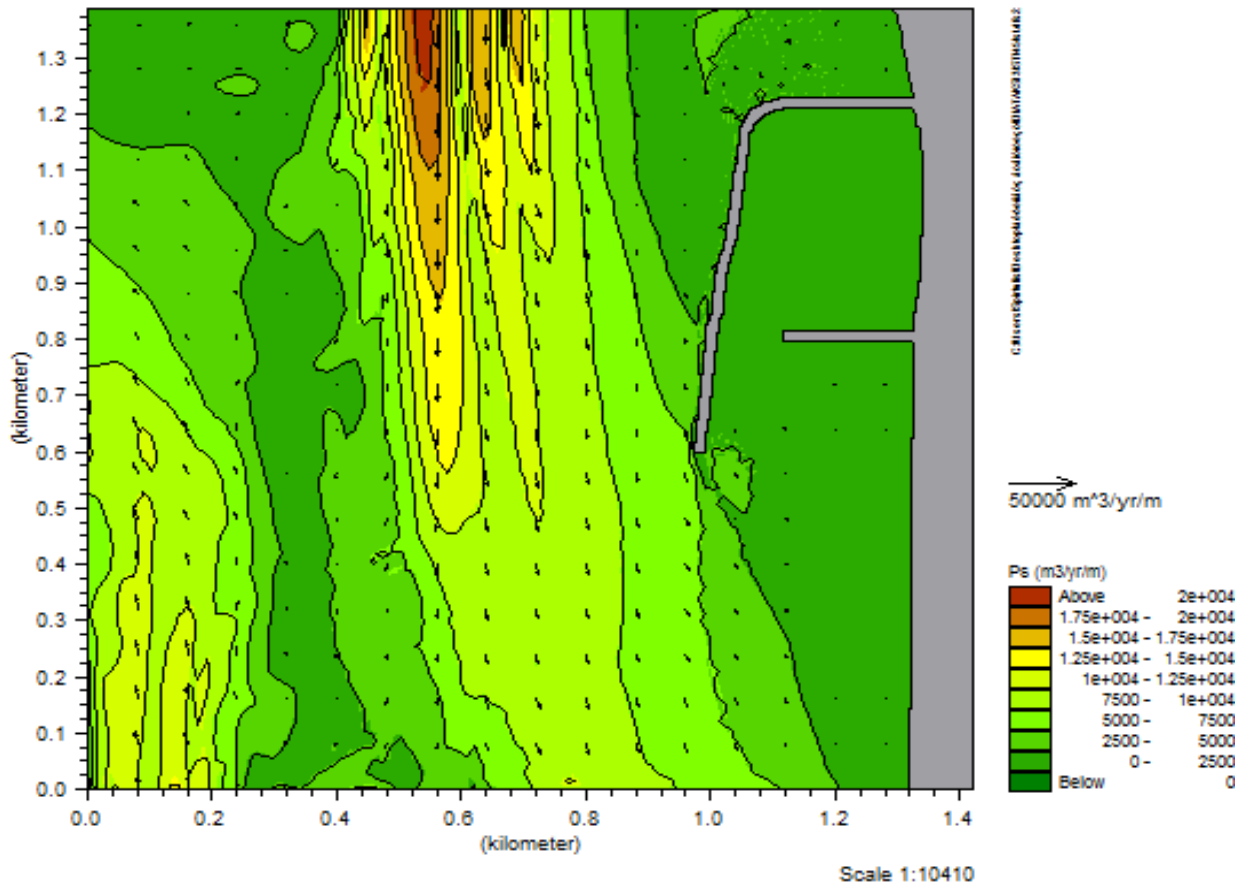
Σχήμα 6.6: διάταξη 1 (Ho 3.20m, Tr 8.53s dir. 45deg)

6.4.7 Γραφική απεικόνιση της μέσης ετήσιας στερεομεταφοράς για τη διάταξη 2



Σχήμα 6.7: διάταξη 2 (Ho 3.20m, Tp 8.53s dir. 45deg)

6.4.8 Γραφική απεικόνιση της μέσης ετήσιας στερεομεταφοράς για τη διάταξη 1



Σχήμα 6.8: διάταξη 3 (Ho 3.20m, Tp 8.53s dir. 45deg)

6.5) Συμπεράσματα από την προσομοίωση της παράκτιας στερεομεταφοράς

i. Στα σχήματα 6.1 έως 6.8 παρουσιάζεται η παράκτια κυματογενής στερεομεταφορά στη συνολική περιοχή μελέτης για όλες τις διατάξεις έργου και για το δυσμενέστερο κυματικό σενάριο (H_0 3.20m, T_p 8.53s) με γωνίες πρόσπτωσης 45 και 90 μοίρες.

ii. Η φορά της στερεομεταφοράς είναι αντίστοιχη με αυτήν της υδροδυναμικής κυκλοφορίας, καθώς η ροή του ιζήματος προκαλείται από την αντίστοιχη κυκλοφορία ρευμάτων. Η ζώνη στην οποία εκτείνεται η στερεομεταφορά έχει μικρότερο εύρος από την αντίστοιχη της υδροδυναμικής κυκλοφορίας, καθώς περιορίζεται από το ενεργό βάθος (active depth)

iii. Στροβιλισμοί παρατηρούνται αντίστοιχα στα σημεία που παρατηρούνται και στην υδροδυναμική κυκλοφορία. (σχήματα 6.1 έως 6.8)

iv. Ο ρυθμός της στερεομεταφοράς έχει μέγιστη τιμή της τάξεως των $20000 \text{ m}^3/\text{yr}/\text{m}$, για τους μέγιστους προσπίπτοντες κυματισμούς.

v. Παρατηρούνται τάσεις για διάβρωση στο μεγαλύτερο μέρος της ακτής και τάσεις για προσάμμωση στην σκιά του ανάντη ακρομολίου.

vi. Ιδιαίτερη προσοχή αξίζει να δώσουμε στην υπό μελέτη περιοχή στα κατάντη του έργου, όπου παρατηρείται έντονη τάση για διάβρωση επαληθεύοντας τις αρχικές εκτιμήσεις του φαινομένου που έχουν γίνει στις προηγούμενες ενότητες.

vii. Με την αύξηση του προσήνεμου μόλου φαίνεται πως εντατικοποιείται το φαινόμενο της διάβρωσης όπως προκύπτει από το ποσοστό της στερεομεταφοράς στην περιοχή αυτή ενώ παράλληλα αυξάνεται η τάση προσάμμωσης στο ανάντη και κατάντη όριο της βαθυμετρίας.

viii. Για προσπίπτοντες κυματισμούς με γωνία 90° παρατηρούμε πως εντείνεται η τάση ανάκλασης της υδροδυναμικής κυκλοφορίας και της αντίστοιχης στερεομεταφοράς σε εγκάρσια διεύθυνση σε σχέση με την ακτή, κάτι που μεταβάλλεται όταν η διεύθυνση των προσπίπτων κυματισμών είναι υπό λοξή γωνία αφού το ποσοστό ανάκλασης είναι μικρότερο.

Κεφάλαιο 7: Γενικά συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

7.1) Σύνοψη συμπερασμάτων

Στο πλαίσιο της διπλωματικής αυτής εργασίας, ελέγχθηκε με αριθμητικές δοκιμές η ενίσχυση της κυματικής δράσης στις θέσεις κατάντη λιμενικού έργου, σε φυσικό προσομοίωμα λιμένα με μεταβαλλόμενο μήκος προσήνεμου μόλου, για δύο διευθύνσεις πρόσπτωσης και διάφορες τιμές παραμέτρων των κυματισμών που εφαρμόστηκαν. Στο παρόν κεφάλαιο δίνονται τα βασικά συμπεράσματα της διερευνήσεως με μαθηματική προσομοίωση που προηγήθηκε.

Οι προσπίπτοντες κυματισμοί προκαλούν έντονη κυματική διαταραχή στην περιοχή μελέτης στα κατάντη του έργου.

Ειδικότερα, οι διαδοχικές προεκτάσεις του προσήνεμου μόλου είχαν ως αποτέλεσμα την ενίσχυση της κυματικής δράσης σε περισσότερες από τις θέσεις που εξετάστηκαν και την αντίστοιχα διαδοχική μετατόπιση της περιοχής εντατικοποίησης προς τα κατάντη του έργου

Η αύξηση του μήκους του προσήνεμου μόλου οδήγησε, επίσης, στην αύξηση των υψών κύματος στις θέσεις των μετρητών, αλλά και στη μείωση της απόκλισης της εξέλιξης της κυματικής διαταραχής για τις δύο διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης

Για την πρώτη πειραματική διάταξη που εξετάστηκε, τα ύψη κύματος που μετρήθηκαν για διεύθυνση πρόσπτωσης 45° ως προς την ακτή διατηρούνται σε αρκετά χαμηλά επίπεδα στις θέσεις που βρίσκονται υπό την προστασία του έργου, αυξάνονται όσο μετακινούμαστε προς τα κατάντη αυτού και σε ακόμη μεγαλύτερη απόσταση από αυτό σταθεροποιούνται σε χαμηλότερες τιμές, εφόσον πάψει η επίδραση της παρουσίας του. Η τάση αυτή εμφανίζεται περισσότερο σαφής σε βάθος νερού -3 m.

Όπως επιβεβαιώνεται τόσο από την πειραματική προσέγγιση του φαινομένου, όσο και από την αριθμητική προσομοίωση του με το μοντέλο MIKE 21 , η κυματική εντατικοποίηση παρουσιάζεται σαφέστερη και εντονότερη σε βάθος -3 m και προκαλείται από κυματισμούς οι οποίοι προσπίπτουν στην ακτή υπό γωνία 45° και 90° , ενώ υπό δεδομένες συνθήκες, ανέρχεται έως το 60% περίπου του ύψους του παραγόμενου κυματισμού.

Η αύξηση των υψών των προσπιπτόντων κυματισμών που καταγράφηκε στις θέσεις πλησιέστερα στην ακτή και συγκεκριμένα κατά μήκος της ισοβαθούς καμπύλης των -2 m, λόγω της παρουσίας του έργου, ερμηνεύει, χωρίς αμφιβολία, το φαινόμενο της διάβρωσης της παρακείμενης ακτής, το οποίο παρατηρείται κατά κανόνα στις περιπτώσεις κατασκευασμένων έργων

Η υδροδυναμική κυκλοφορία σε όλες τις διατάξεις είναι εντονότερη σε μια ζώνη που κυμαίνεται από 400 έως και 700 μέτρα από την ακτογραμμή. Οι ταχύτητες των ρευμάτων στην περιοχή αυτή κυμαίνονται από 1.25 έως και πάνω από 2.0 m/sec.

Η υδροδυναμική κυκλοφορία σε όλες τις διατάξεις είναι μικρότερη σε μία ζώνη που κυμαίνεται από 100 έως 200 μέτρα από την ακτογραμμή και ιδιαίτερα στην περιοχή που προστατεύεται πλήρως από τον προσήνεμο μόλο στις διατάξεις 1,2 και 3 . Οι ταχύτητες των ρευμάτων στην περιοχή αυτή κυμαίνονται από 0.5 έως 1.25 m/sec

Διαπιστώνεται ότι γενικώς υπάρχει δυναμικό μεταφοράς ιζήματος , από το ανάντη τμήμα της ακτής προς το κατάντη , η οποία δείχνει όμως να παρεμποδίζεται σε μεγάλο βαθμό από του μόλους του υφιστάμενου έργου.

Με την αύξηση του προσήνεμου μόλου φαίνεται πως εντατικοποιείται το φαινόμενο της διάβρωσης όπως προκύπτει από το ποσοστό της στερεομεταφοράς στην περιοχή αυτή ενώ παράλληλα αυξάνεται η τάση προσάμμιωσης στο ανάντη και κατάντη όριο της βαθυμετρίας.

7.2) Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Τα αποτελέσματα που επεξεργαστήκαμε για την εξαγωγή των παραπάνω συμπερασμάτων προέκυψαν από αριθμητικές και πειραματικές μετρήσεις οι οποίες διεξάχθηκαν υπό το σχετικό περιορισμό του χρόνου και του κόστους που συνήθως προβλέπεται για την εκπόνηση μιας διπλωματικής εργασίας, δεδομένου ότι η παρούσα εργασία δεν αποτελεί τμήμα χρηματοδοτούμενου προγράμματος, αλλά βασικής έρευνας του Εργαστηρίου Λιμενικών Έργων του Ε.Μ.Π. Συνεπώς, καθίσταται σαφές ότι το υπό μελέτη φαινόμενο θα μπορούσε, αν δεν οι υπήρχαν οι περιορισμοί αυτοί να εξεταστεί επίσης ως προς πληθώρα άλλων παραμέτρων.

Όπως άλλωστε ισχύει στην περίπτωση κάθε αριθμητικής διαδικασίας, ύστερα από το πέρας της, αλλά και κατά την εξέλιξή της, η αποκτηθείσα εμπειρία και η επαφή με το υπό εξέταση αντικείμενο δίνουν τη δυνατότητα τροποποίησης της υφιστάμενης διάταξης, ώστε η διαδικασία να καταστεί περισσότερο αποτελεσματική και καρποφόρα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση και εφόσον δεν πρόκειται για πραγματικό έργο, θα μπορούσε να εφαρμοστεί ενιαία κλίση πυθμένα. Θα ήταν, επίσης, χρήσιμο η έρευνα να επεκταθεί στη διεξαγωγή των αντίστοιχων πειραμάτων, ώστε να επιβεβαιωθεί η επίδραση των αρχικών συνθηκών που εισάγονται ως δεδομένα στο μοντέλο προσομοίωσης της κυματικής δράσης, στην εξέταση επιπέδων γωνιών πρόσπτωσης των κυματισμών, καθώς και στην εισαγωγή περισσότερων μεταβλητών παραμέτρων, όπως η γωνία διεύθυνσης του προσήνεμου μόλου ως προς την ακτή και η γωνία κλίσης του πυθμένα, με απώτερο στόχο τον προσδιορισμό του βέλτιστου μήκους και προσανατολισμού μόλου η κυματοθραύστη για την προστασία των κατάντη ακτών, αλλά και πιθανόν τη δημιουργία εμπειρικών σχέσεων για την πρόβλεψη του φαινομένου που μελετήθηκε. Τέλος, ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η μελέτη των αλληλεπιδράσεων έξω από τα όρια της περιοχής μελέτης, καθώς και η περαιτέρω διερεύνηση σε σχέση με την ποσότητα ιζήματος του πυθμένα, το μέγεθος και η διαβάθμιση των κόκκων και το πορώδες.

Βιβλιογραφικές αναφορές

Κατσαρδή Β., Τσουκαλά Β.Κ., Μουτζούρης Κ.Ι., (2011). ‘Έντατικοποίηση Κυματικής Δράσης στα αμέσως κατάντη μόλων και κυματοθραυστών’, 5ο Πανελλήνιο Συνέδριο Διαχείρισης και Βελτίωσης Παράκτιων Ζωνών 2011, Αθήνα.

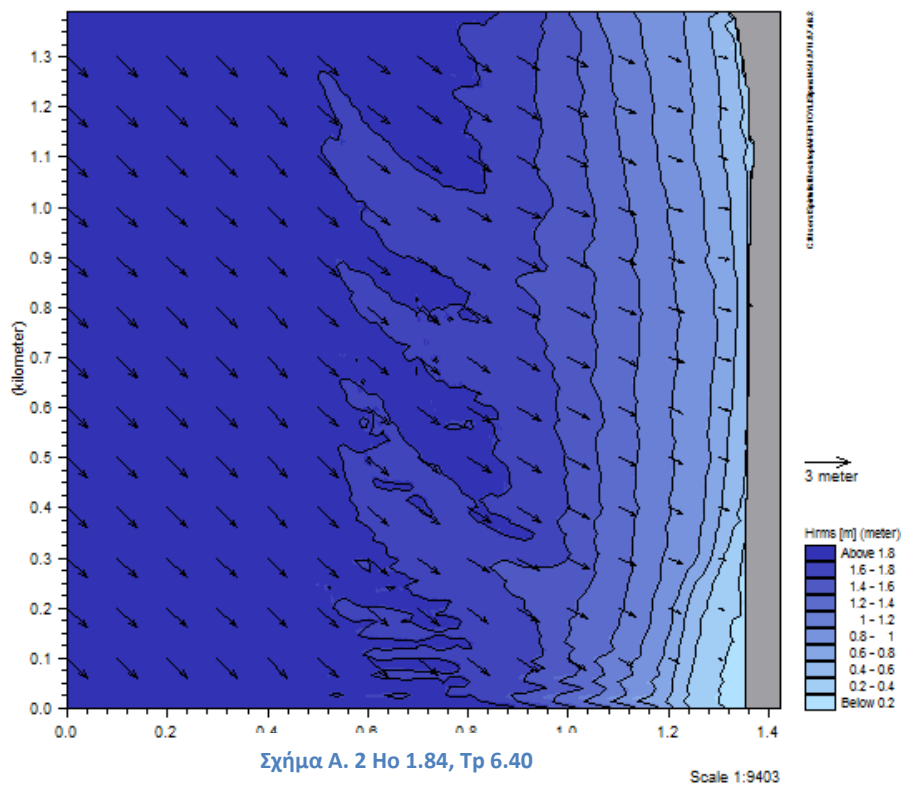
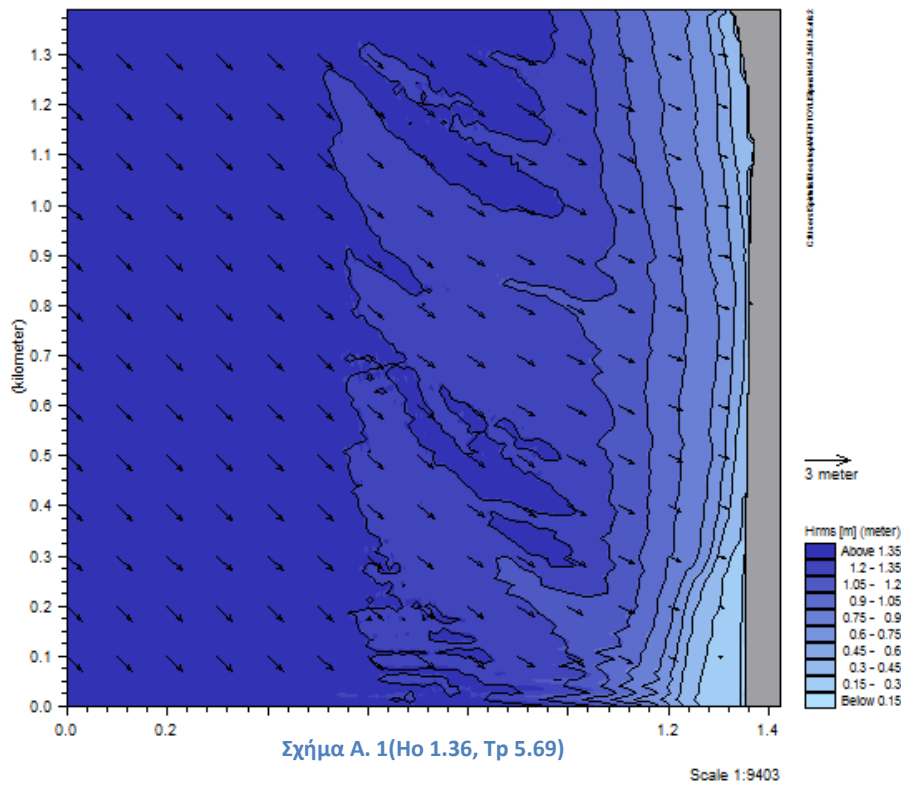
1. Μουτζούρης Κ.Ι., (2000). Θαλάσσια Υδραυλική, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα.
2. Μουτζούρης Κ.Ι., (2010). ‘Προστασία Ακτογραμμής στα αμέσως κατάντη λιμένων από την αυξημένη κυματική δράση λόγω προσήνεμων μόλων’, 5ο Πανελλήνιο Συνέδριο Λιμενικών Έργων 2010, Αθήνα.
3. Μουτζούρης Κ. Ι. (2006). «Θαλάσσια Υδραυλική», ΕΜΠ, Αθήνα 2006
4. MIKE21 PMS (2007). «MIKE 21 Parabolic mild slope module, User Guide», Danish Hydraulic Institute, Water and Environment, Denmark
5. MIKE21 HD (2007). «MIKE 21 Flow Model, Hydrodynamic module, User Guide», Danish Hydraulic Institute, Water and Environment, Denmark
6. MIKE21 ST (2007). «MIKE 21 Non-cohesive Sediment Transport module, User Guide», Danish Hydraulic Institute, Water and Environment, Denmark
7. Smagorinsky J (1963). «General Circulation Experiment with the Primitive Equations», Monthly Weather Review, 91, No. 3, pp 99-164, 1963
8. Swart DH (1974). «Offshore sediment transport and equilibrium beach profiles», WL Delft Hydraulics Publication no. 131, Delft, the Netherlands.
9. Wiegel R.L., (1962). “Diffraction of Waves by a Semi-infinite Breakwater”, J. Hydraulics Div., ASCE, Vol. 88, No HY1, 27-44.

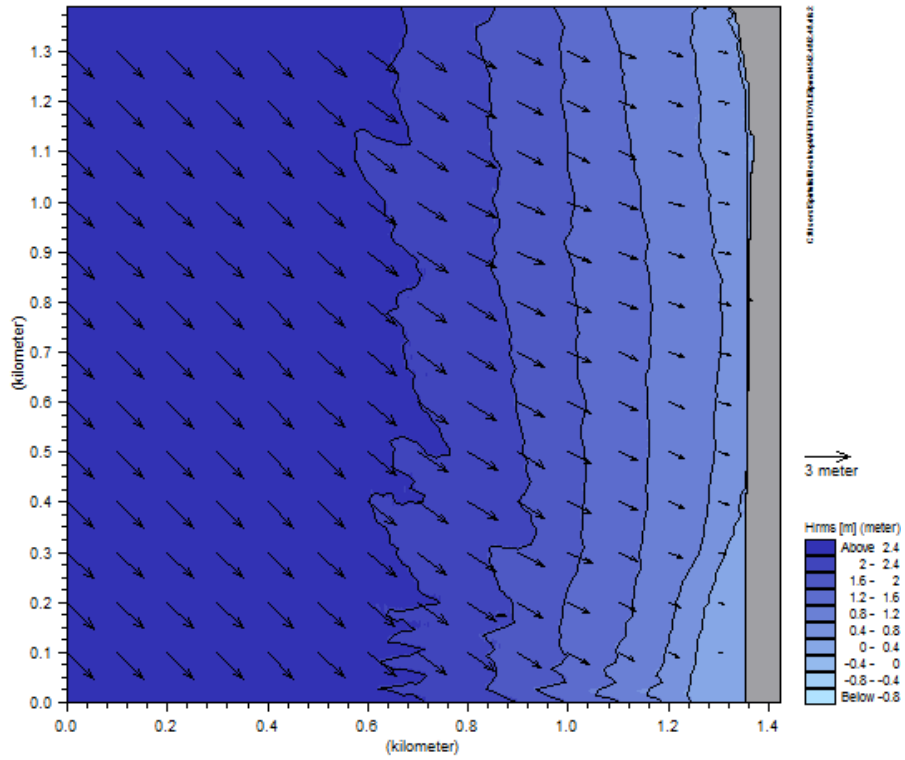
10. Πειραματική διερεύνηση της εντατικοποίησης της κυματικής δράσης στα κατάντη μόλου λιμένα Μάρω Γ. Κούφαλη (2012)
11. Διερεύνηση των μοντέλων εκτίμησης της μετακίνησης της ακτογραμμής ΠΙΕΤΡΕΛΗΣ Β. ΝΙΚΟΛΑΟΥ(2012)
12. Coastal Engineering Manual (2008). CEM 2.01 Professional Edition, US Army Engineer Research and Development Center, Veri-Tech, Incorporated, Vicksburg, USA. US Army Corps of Engineers (2008), „Coastal Engineering Manual".
13. Nelson RC (1987). «Design Wave Heights on Very Mild Slopes: an Experimental Study» Civil Eng Trans, Inst Eng Australia, Vol 29, pp 157-161.
14. Nielsen P (1979). «Some Basic Concepts of Wave Sediment Transport» Institute of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering (ISVA), Technical University of Denmark, Series Paper No 20, January 1979.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α
ΣΧΗΜΑΤΑ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΜΙΚΕ 21 ΡΜΣ
ΥΨΗ ΚΥΜΑΤΟΣ

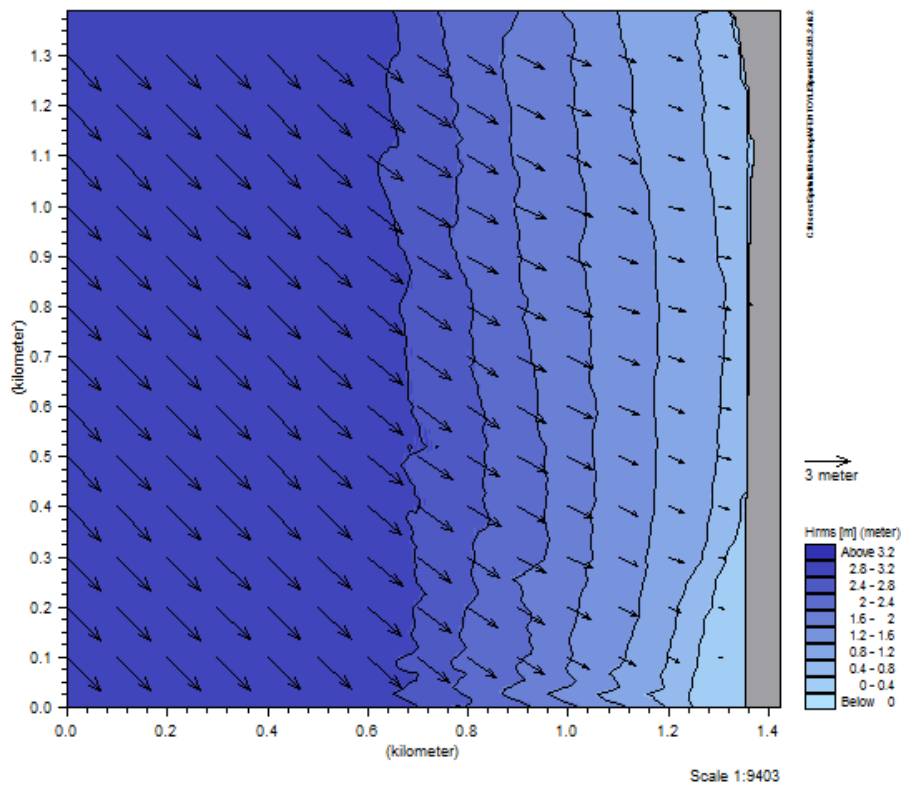
ΔΙΑΤΑΞΗ 0 (Χωρίς έργα)

Dir. =45 deg





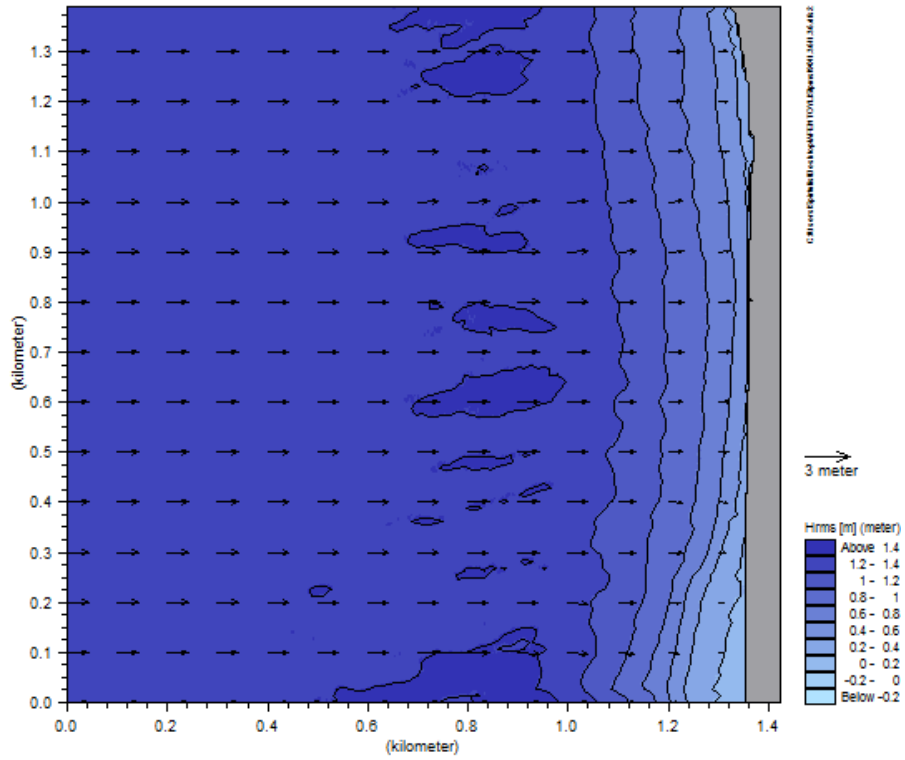
Σχήμα Α. 3 Νο 2.48, Τρ 7.31



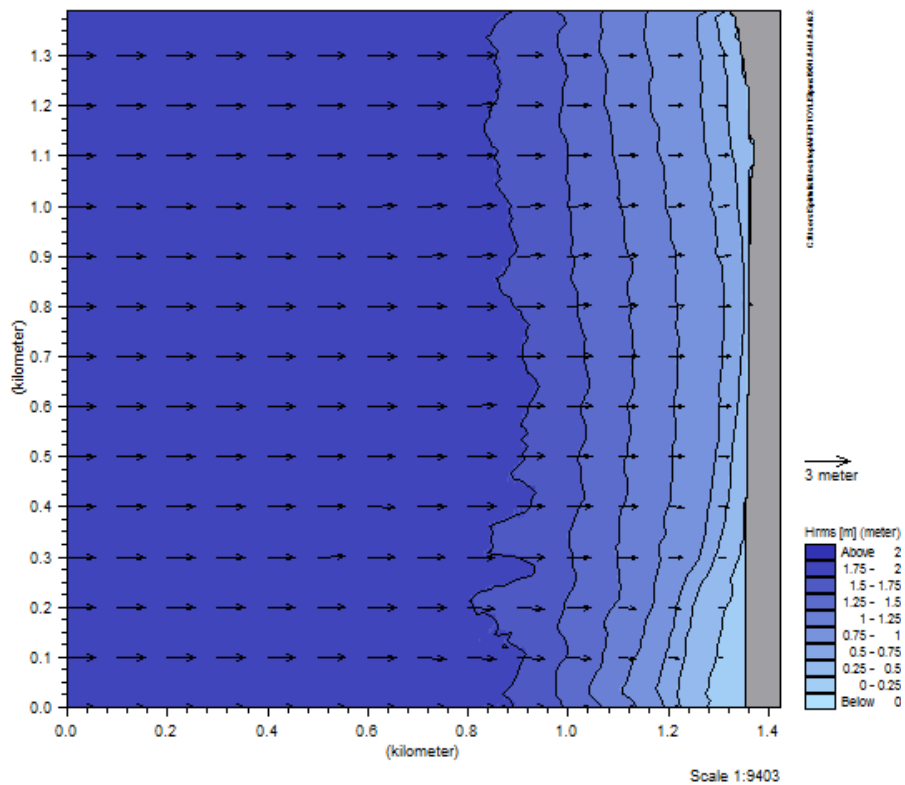
Σχήμα Α. 4 Νο 3.20, Τρ 8.53

ΔΙΑΤΑΞΗ 0 (Χωρίς έργα)

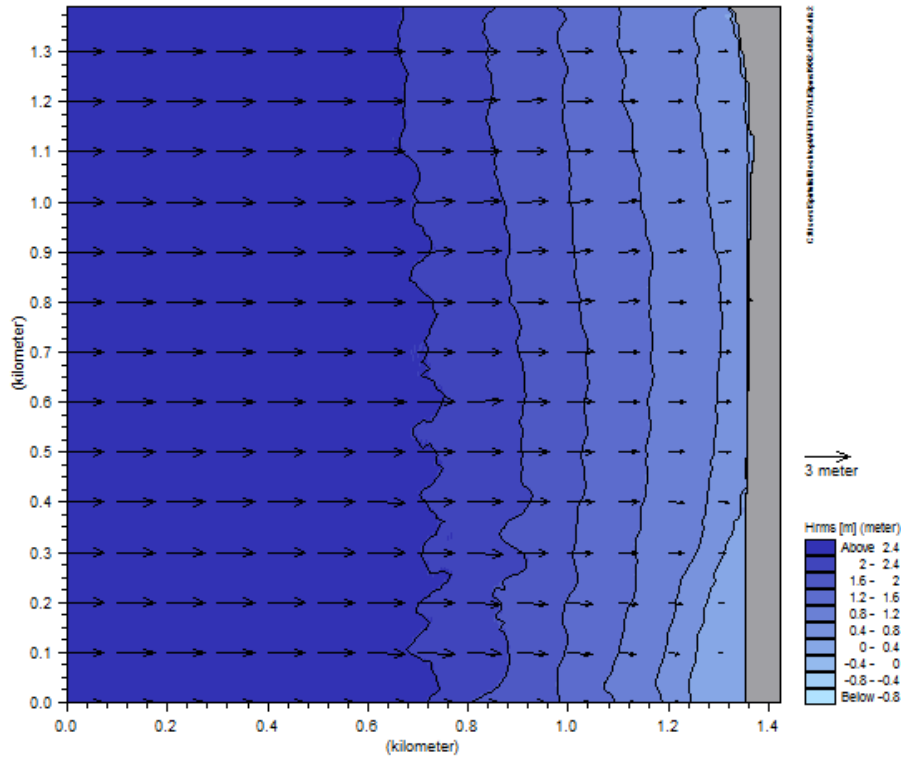
Dir.=90 deg



Σχήμα Α. 5 Νο 1.36, Τρ 5.69

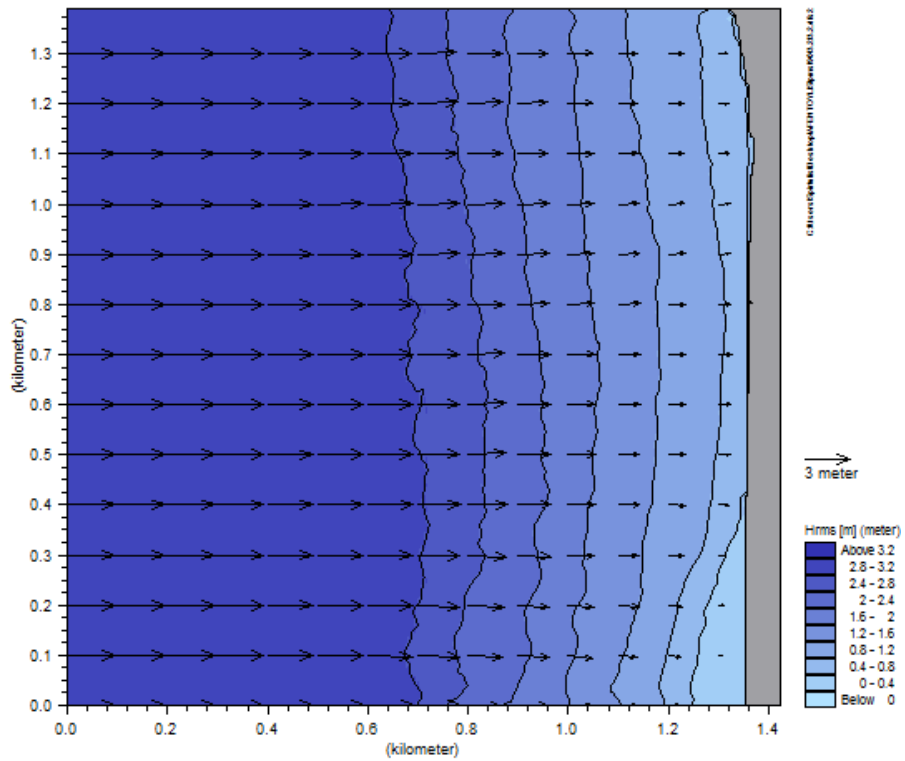


Σχήμα Α. 6 Νο 1.84, Τρ 6.40



Σχήμα Α. 7 Νο 2.48, Τρ 7.31

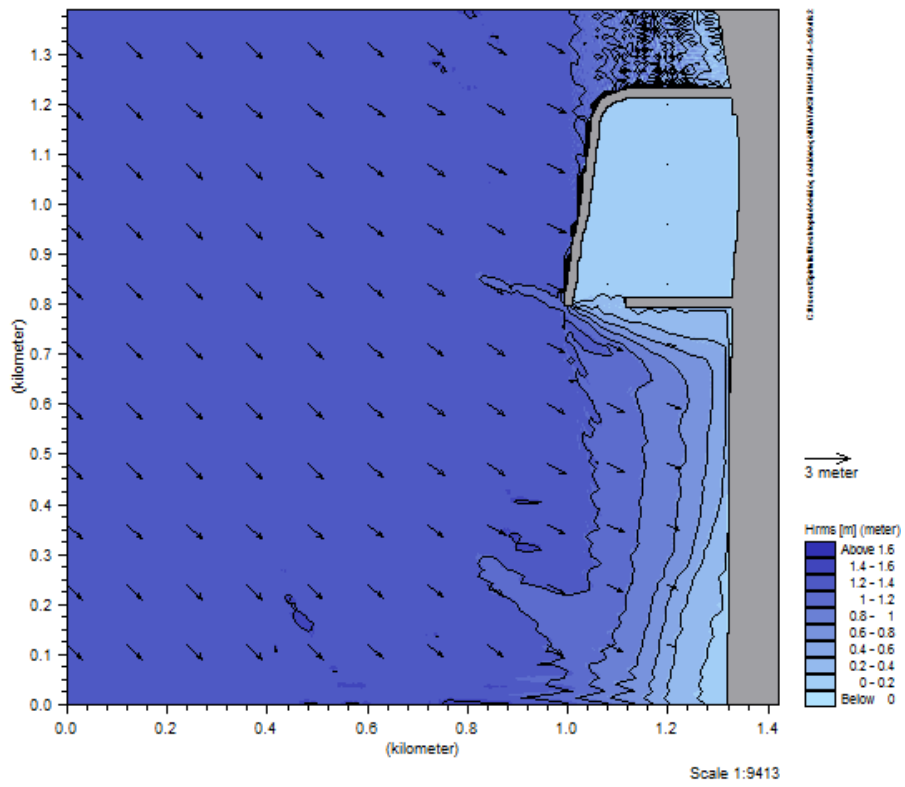
Scale 1:9403



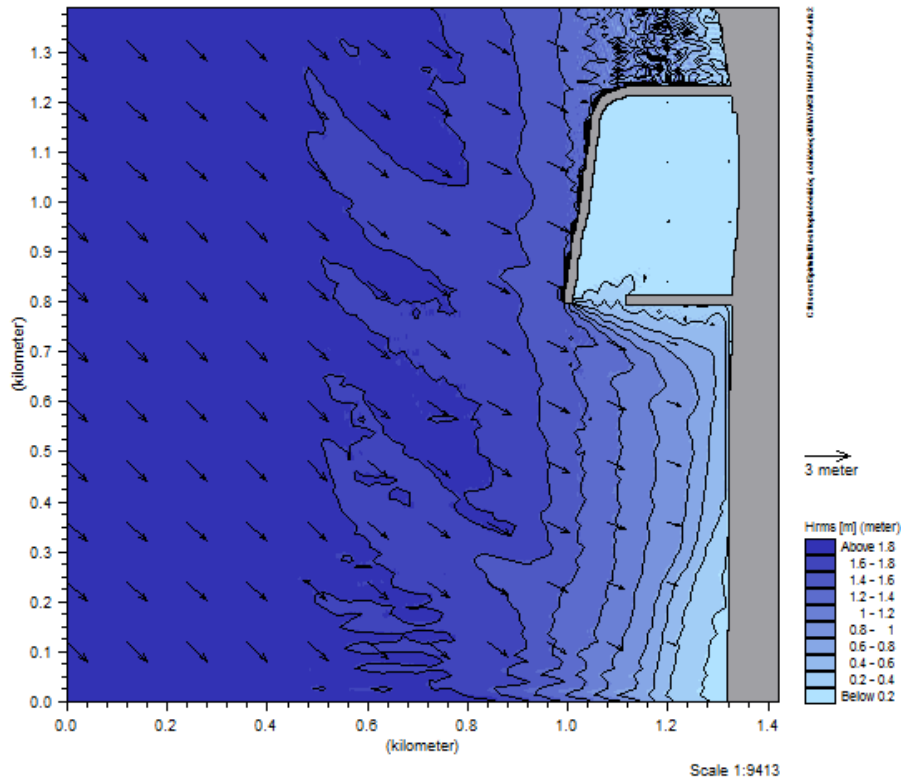
Σχήμα Α. 8 Νο 3.20, Τρ 8.53

Scale 1:9403

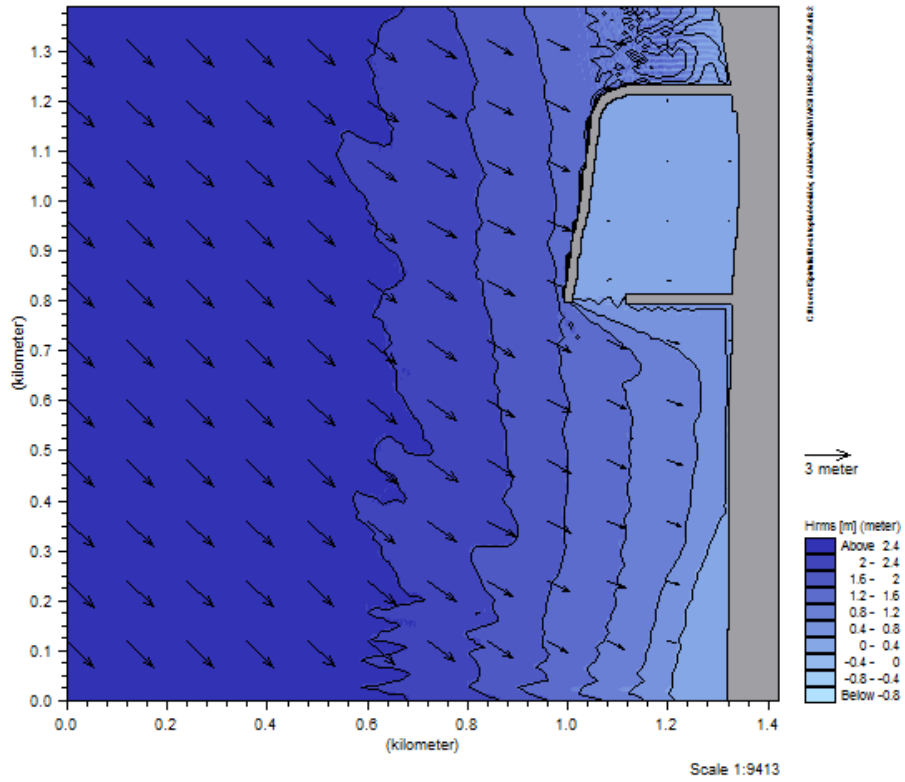
ΔΙΑΤΑΞΗ 1
Dir.=45 deg



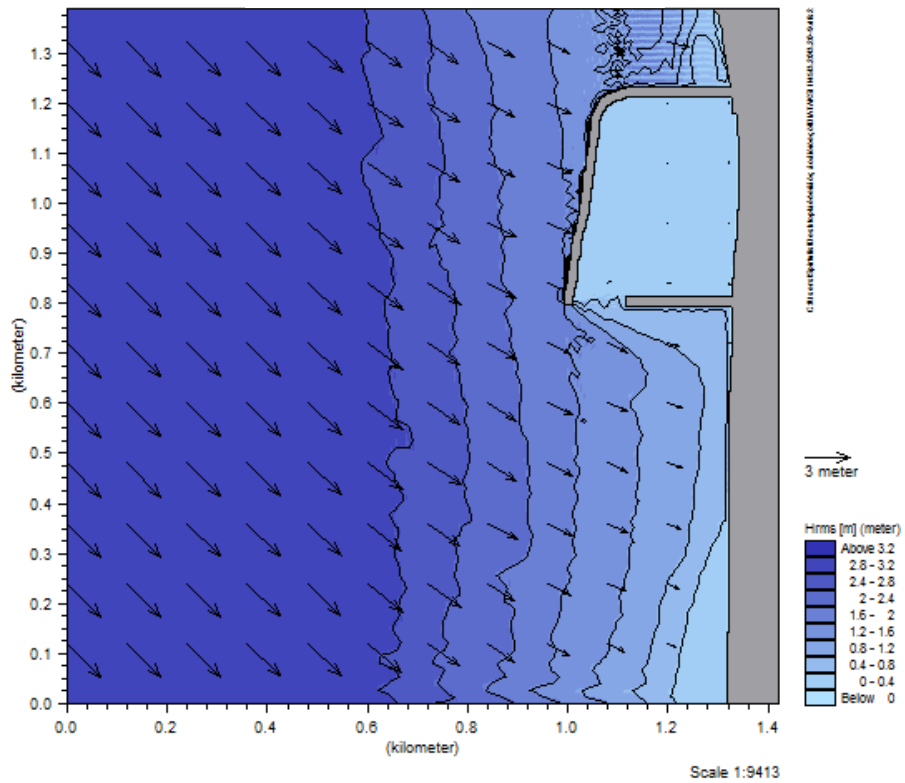
Σχήμα Α.9 Νο 1.36, Τρ 5.69



Σχήμα Α.10 Νο 1.84, Τρ 6.40

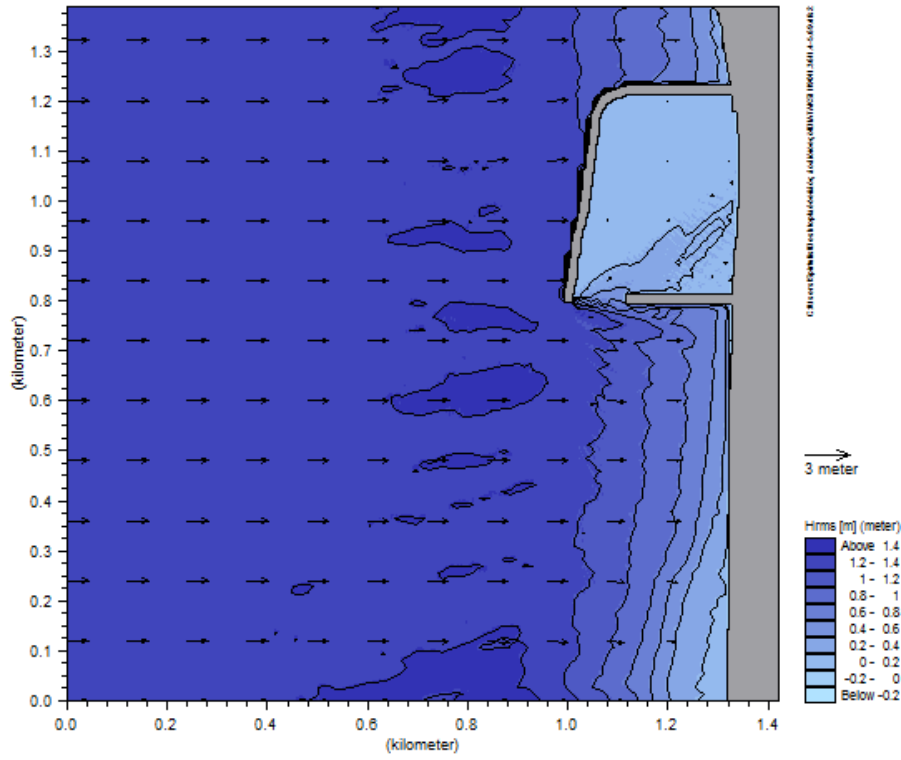


Σχήμα A.11 Νο 2.48, Τρ 7.31

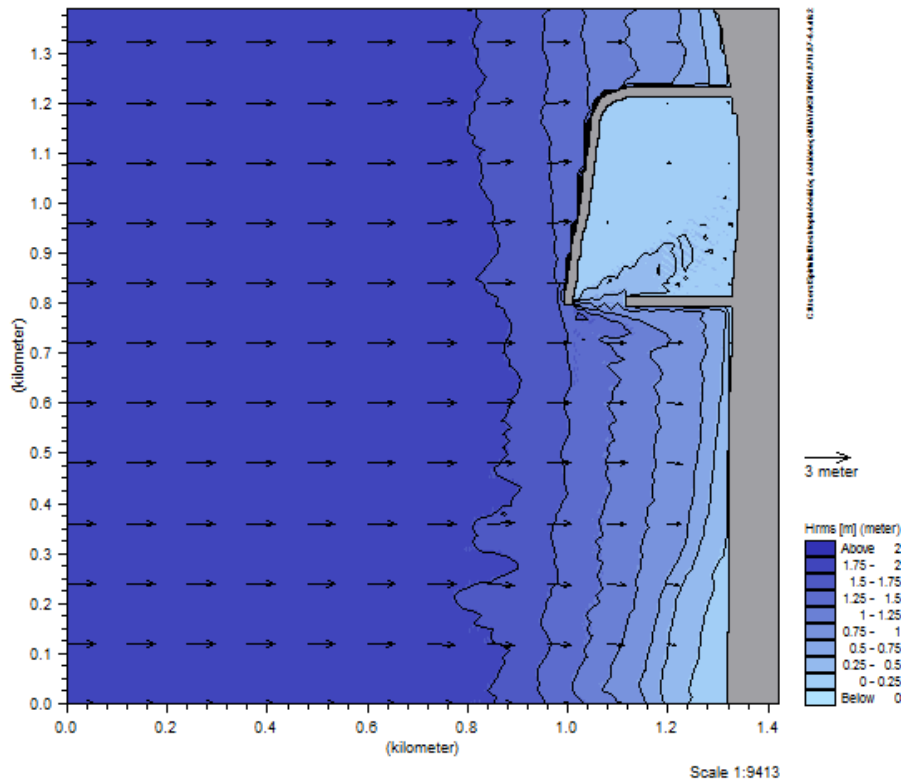


Σχήμα A.12 Νο 3.20, Τρ 8.53

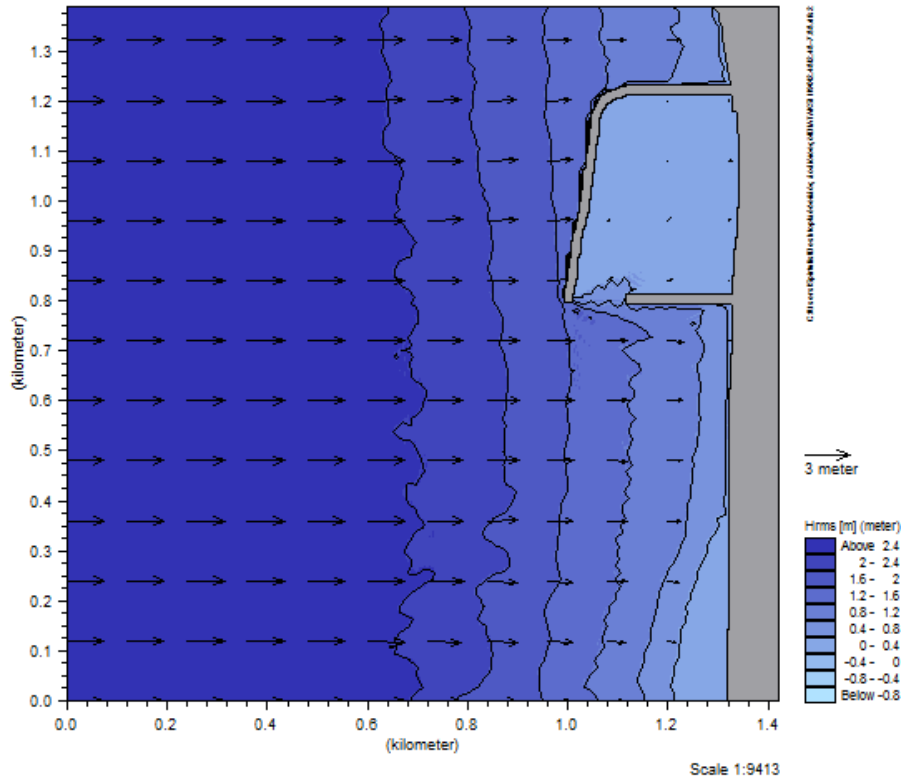
ΔΙΑΤΑΞΗ 1
Dir.=90 deg



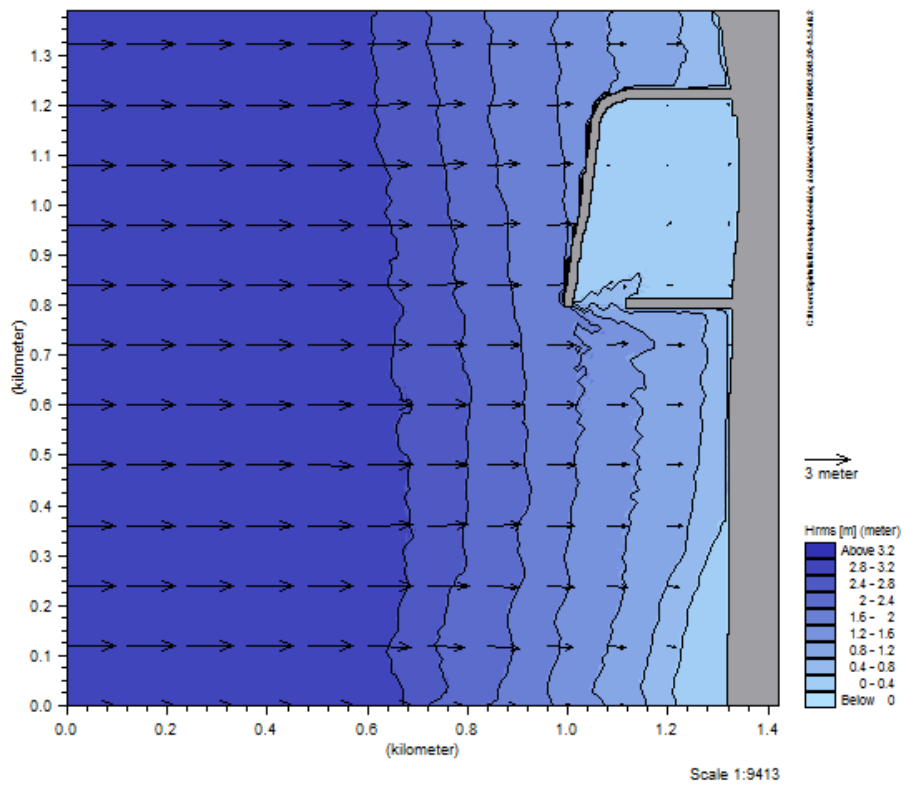
Σχήμα A.13 Νο 1.36, Τρ 5.69



Σχήμα A.14 Νο 1.84, Τρ 6.40

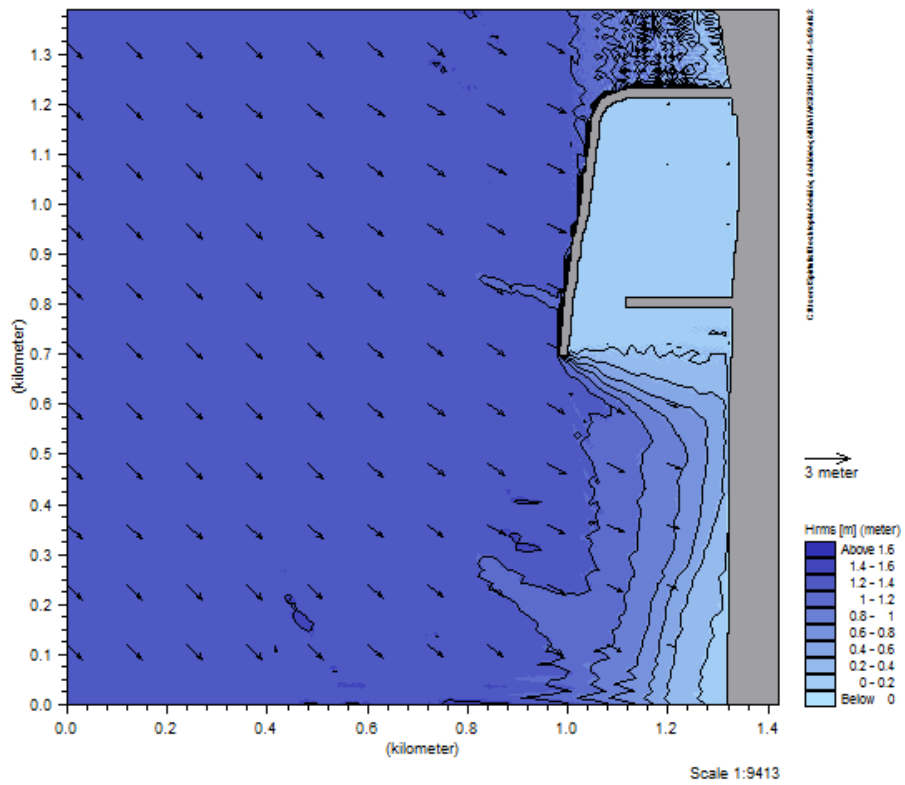


Σχήμα Α.15 Νο 2.48, Τρ 7.31

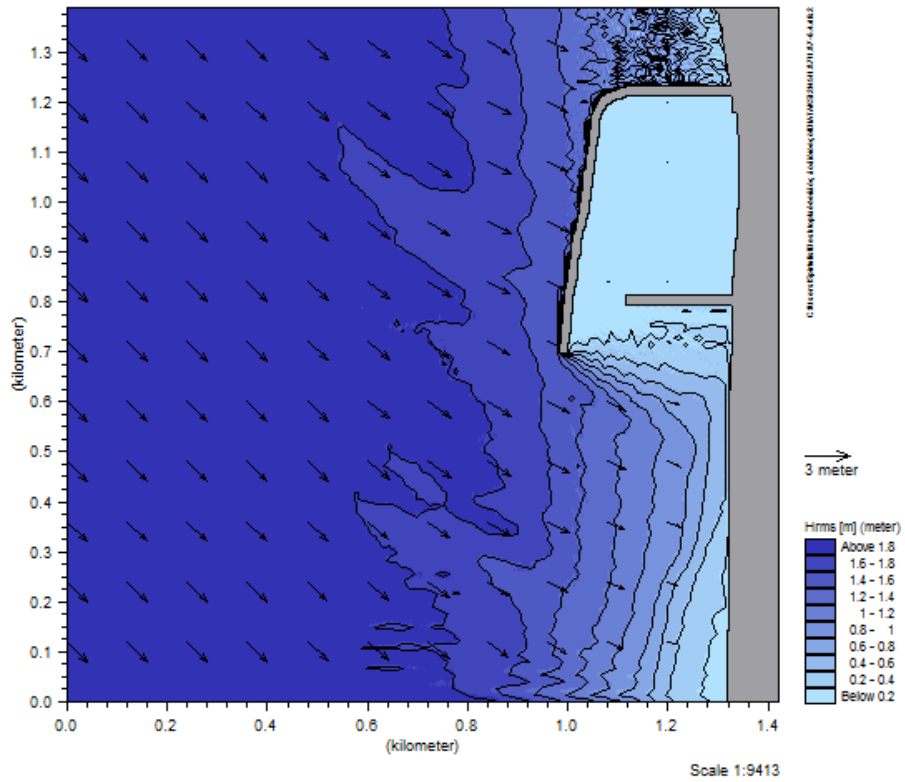


Σχήμα Α.16 Νο 3.20, Τρ 8.53

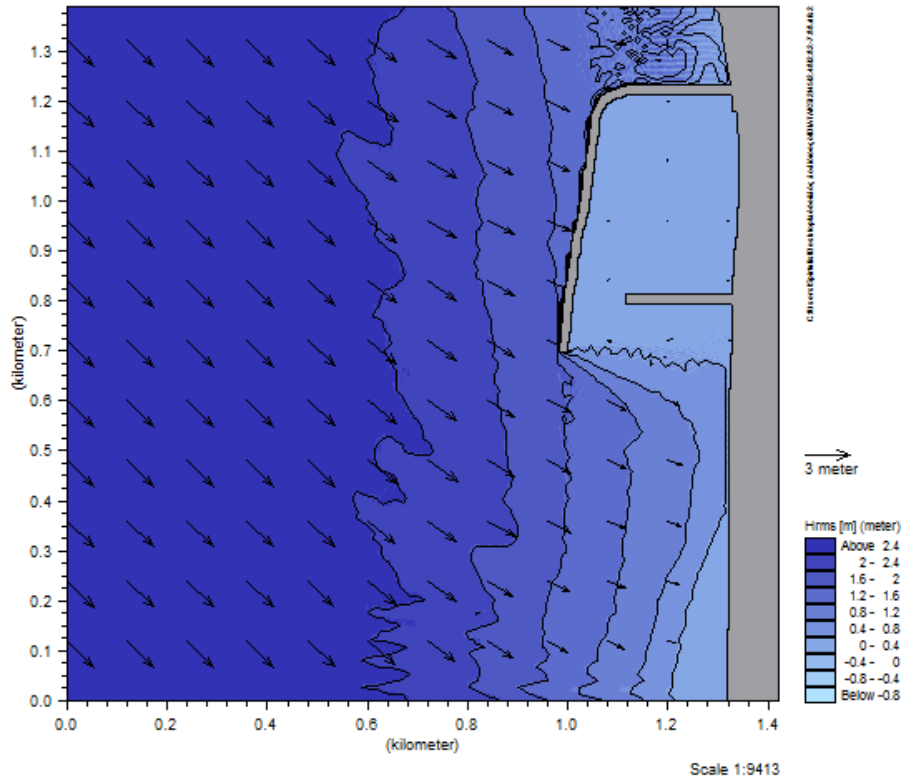
ΔΙΑΤΑΞΗ 2
Dir.=45 deg



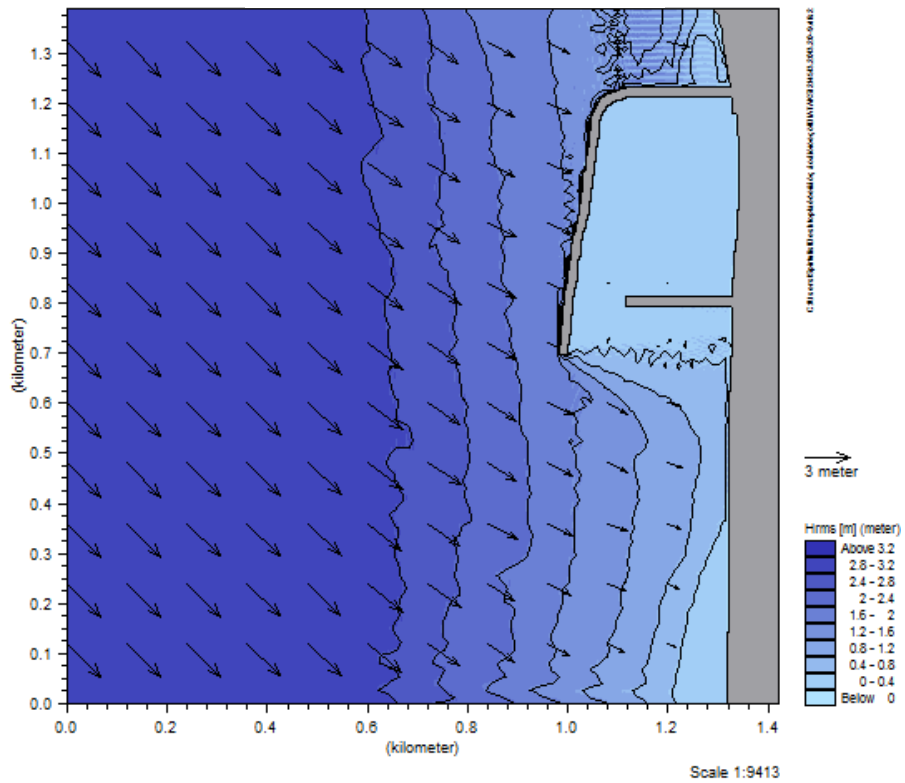
Σχήμα Α.17 Νο 1.36, Τρ 5.69



Σχήμα Α.18 Νο 1.84, Τρ 6.40

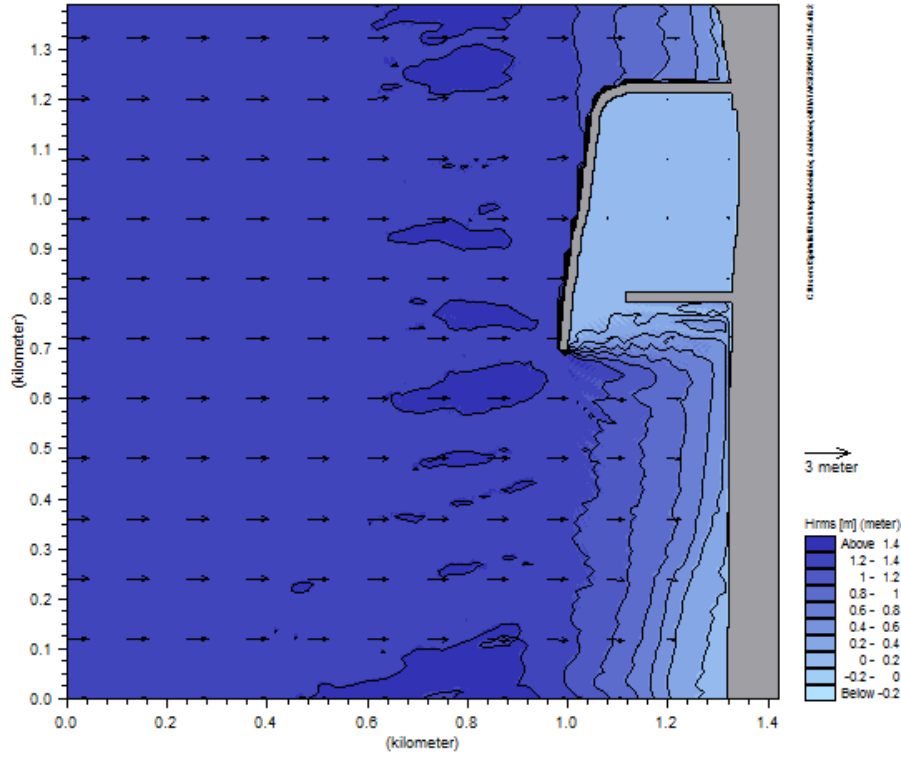


Σχήμα Α.19 Νο 2.48, Τρ 7.31

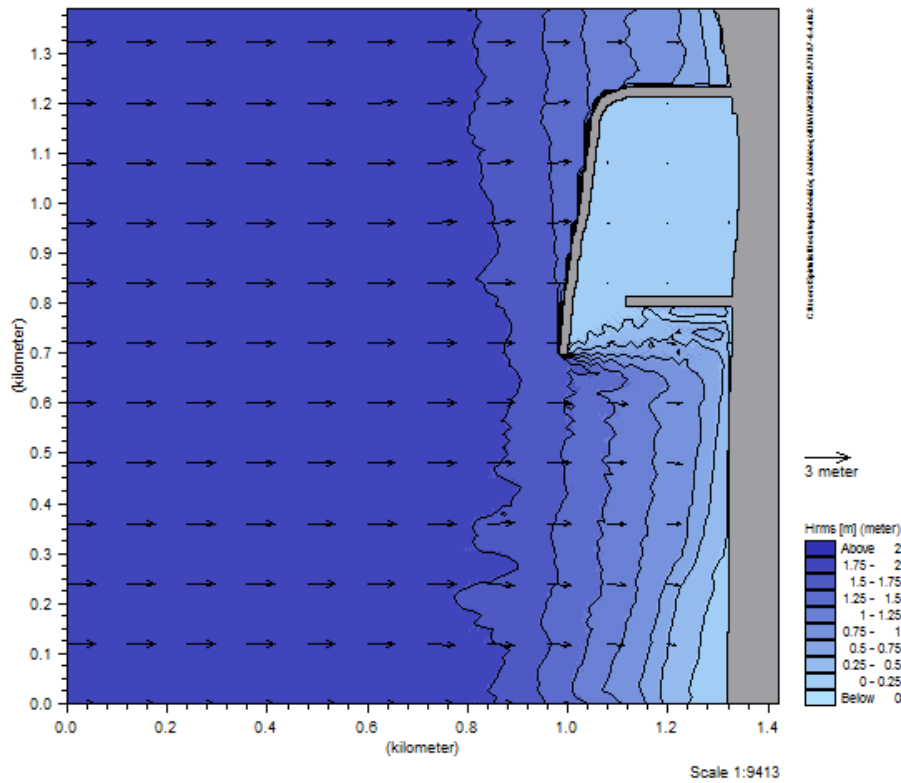


Σχήμα Α.20 Νο 3.20, Τρ 8.53

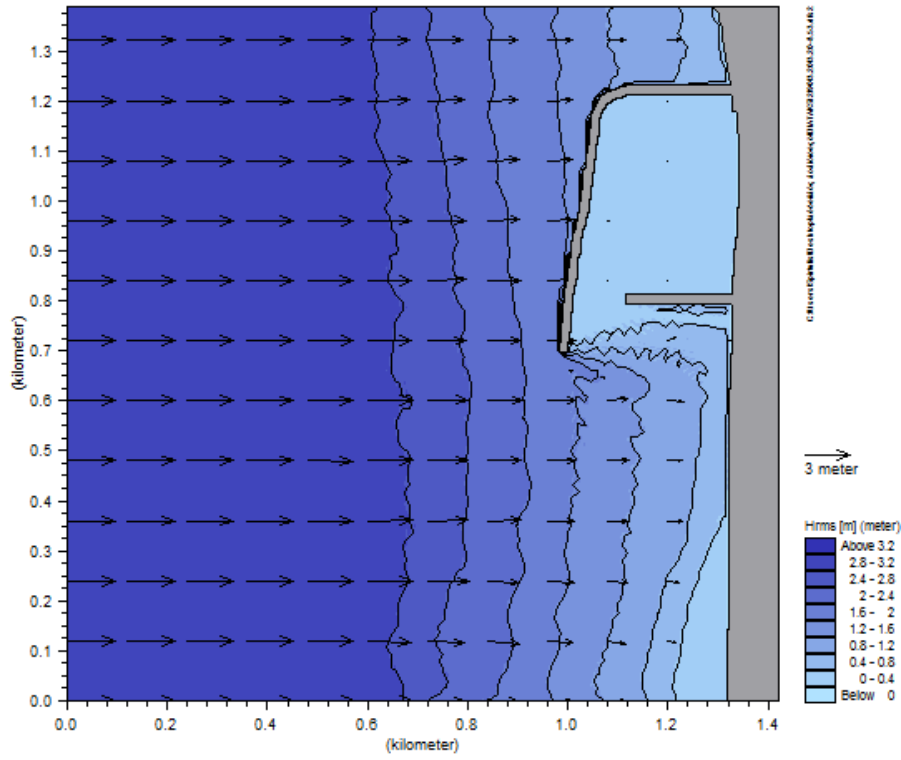
ΔΙΑΤΑΞΗ 2
Dir.=90 deg



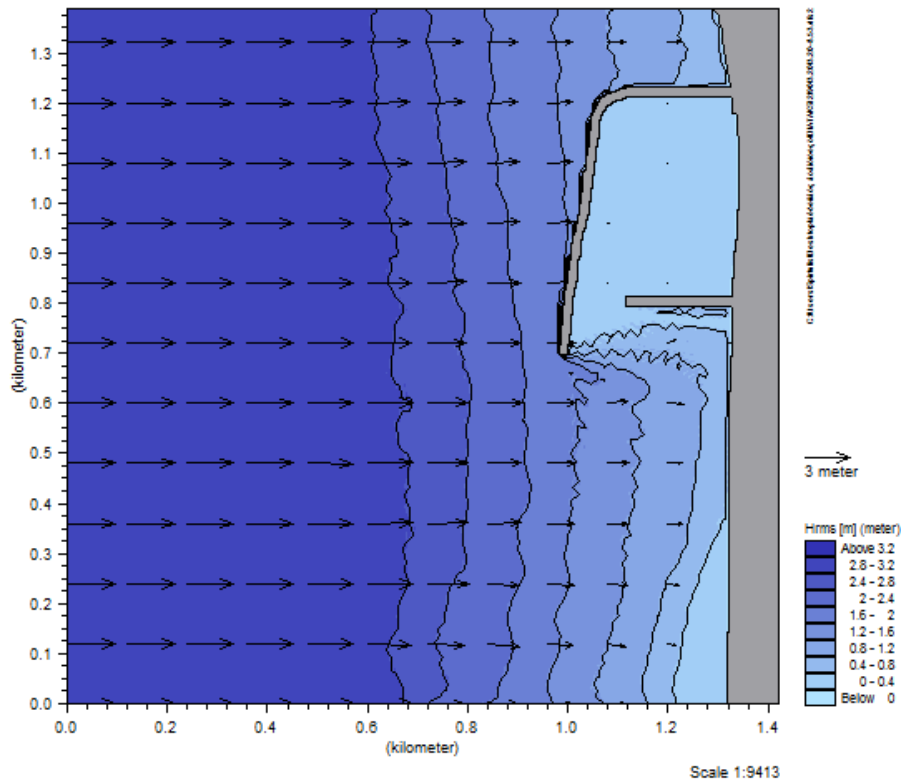
Σχήμα A.21 Νο 1.36, Τρ 5.69



Σχήμα A.22 Νο 1.84, Τρ 6.40

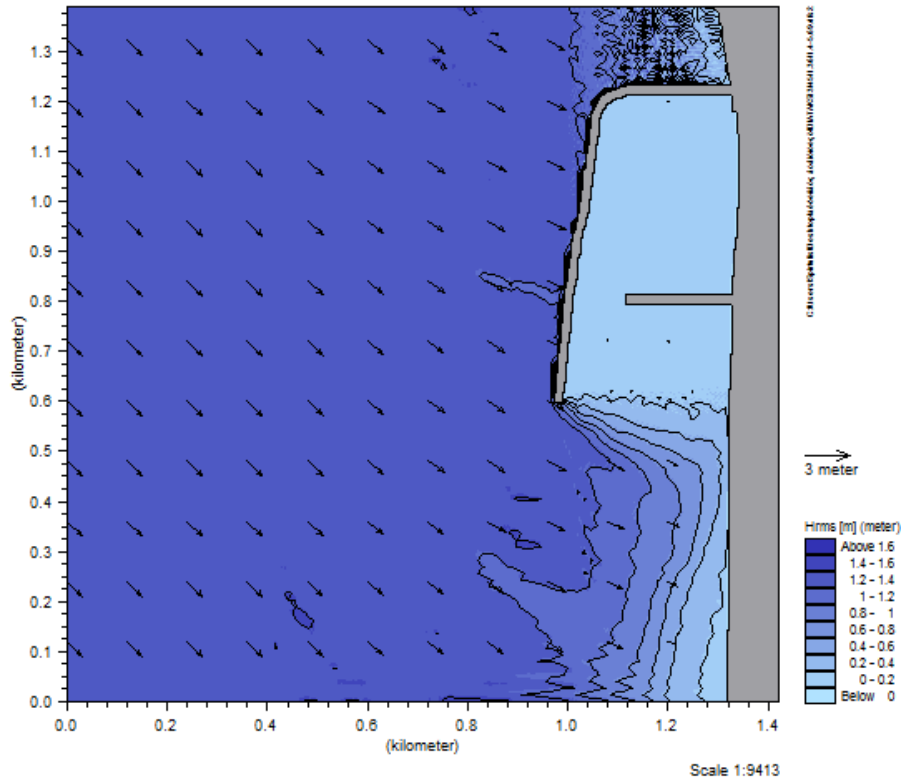


Σχήμα A.23 Νο 2.48, Τρ 7.31

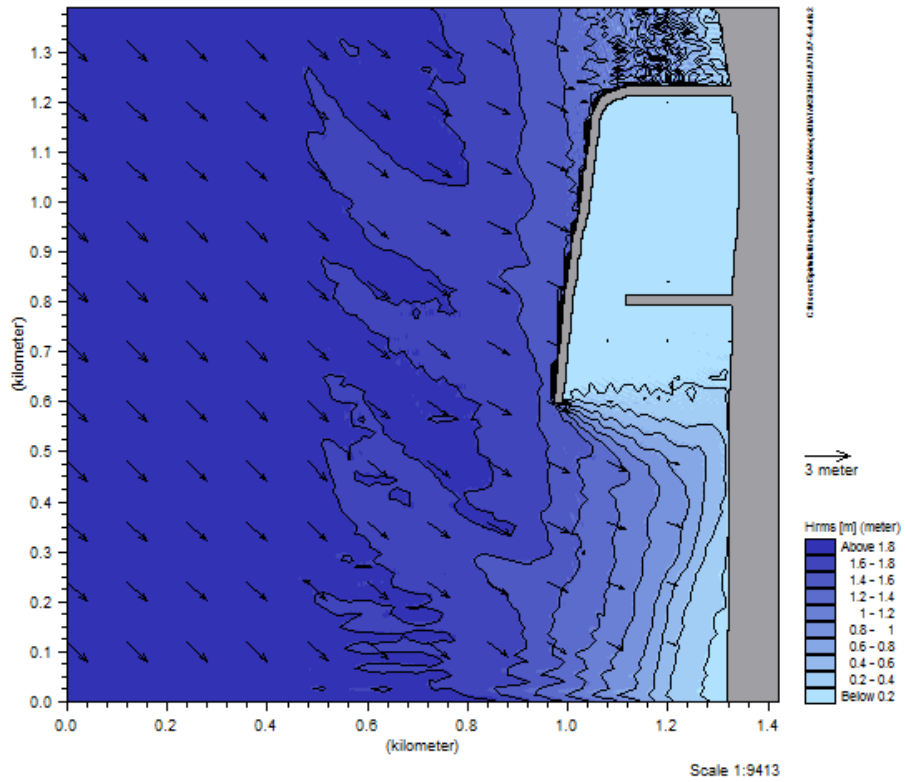


Σχήμα A.24 3.20, Τρ 8.53

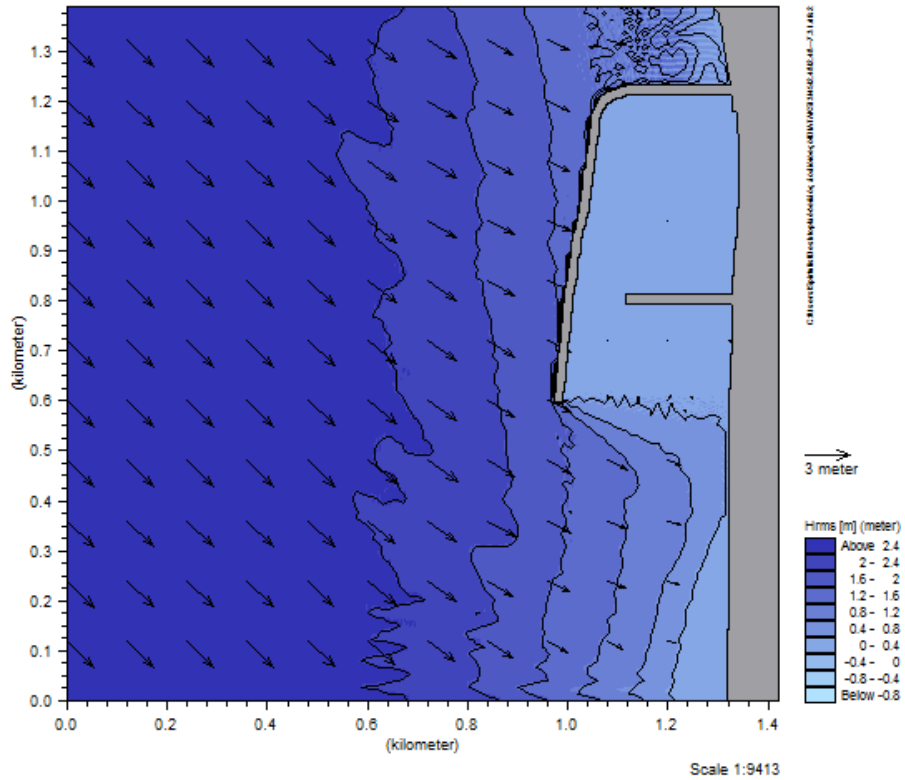
ΔΙΑΤΑΞΗ 3
Dir.=45 deg



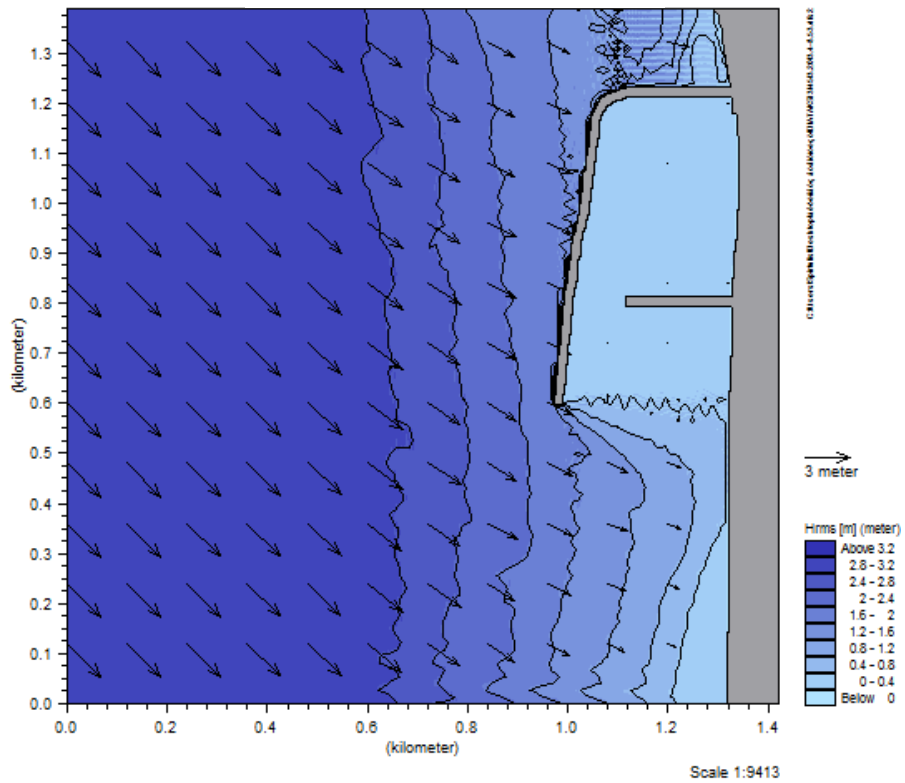
Σχήμα A.25 Νο 1.36, Τρ 5.69



Σχήμα A.26 Νο 1.84, Τρ 6.40

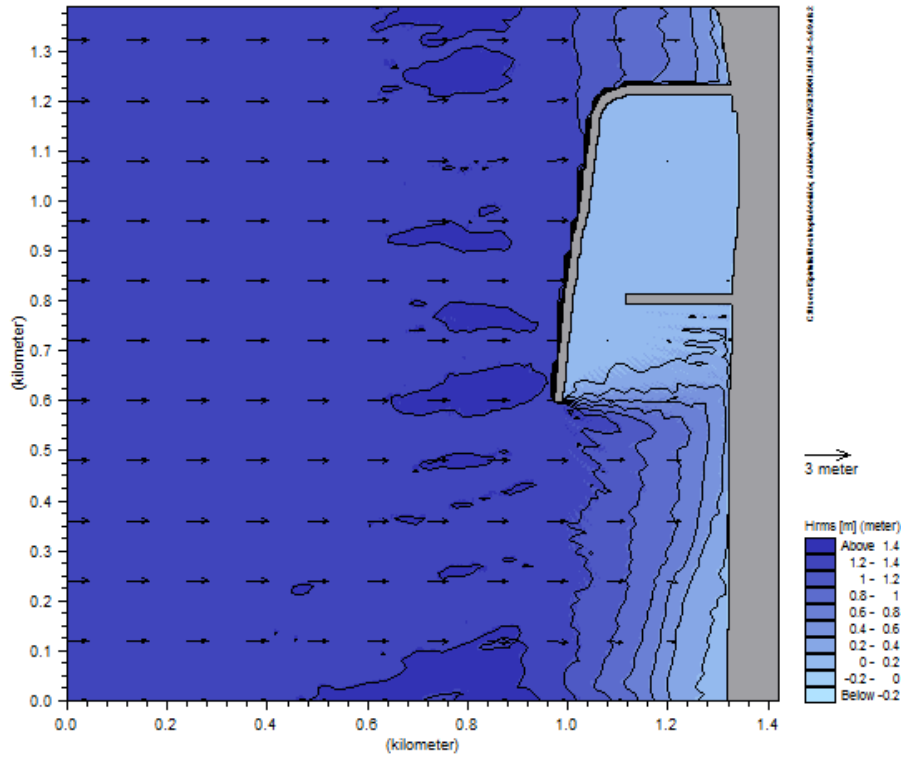


Σχήμα Α.27 Νο 2.48, Τρ 7.31

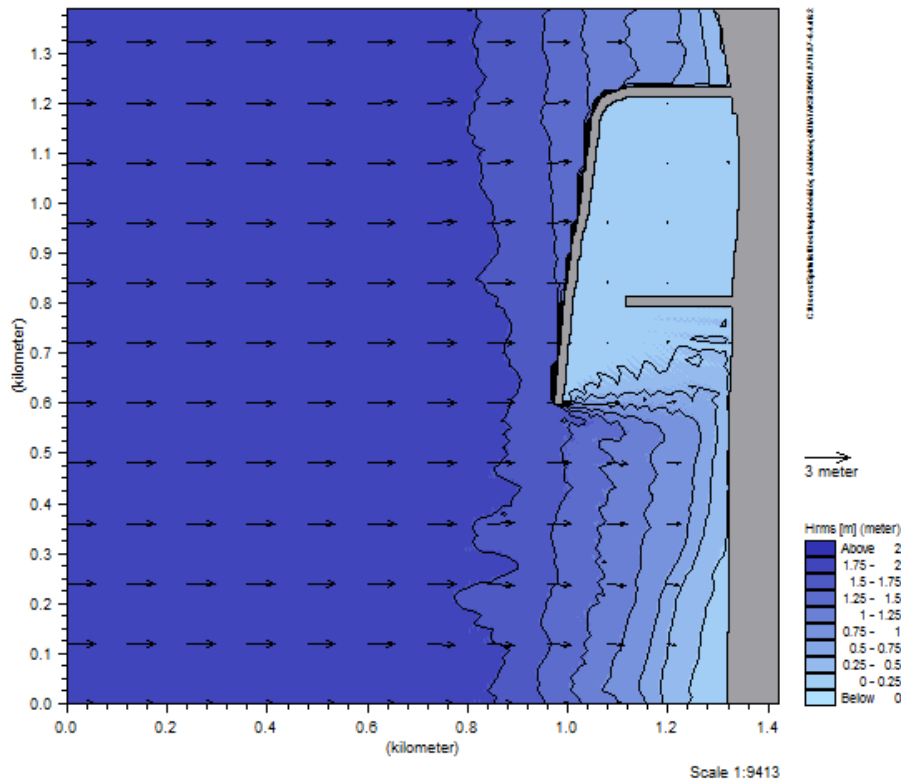


Σχήμα Α.28 Νο 3.20, Τρ 8.53

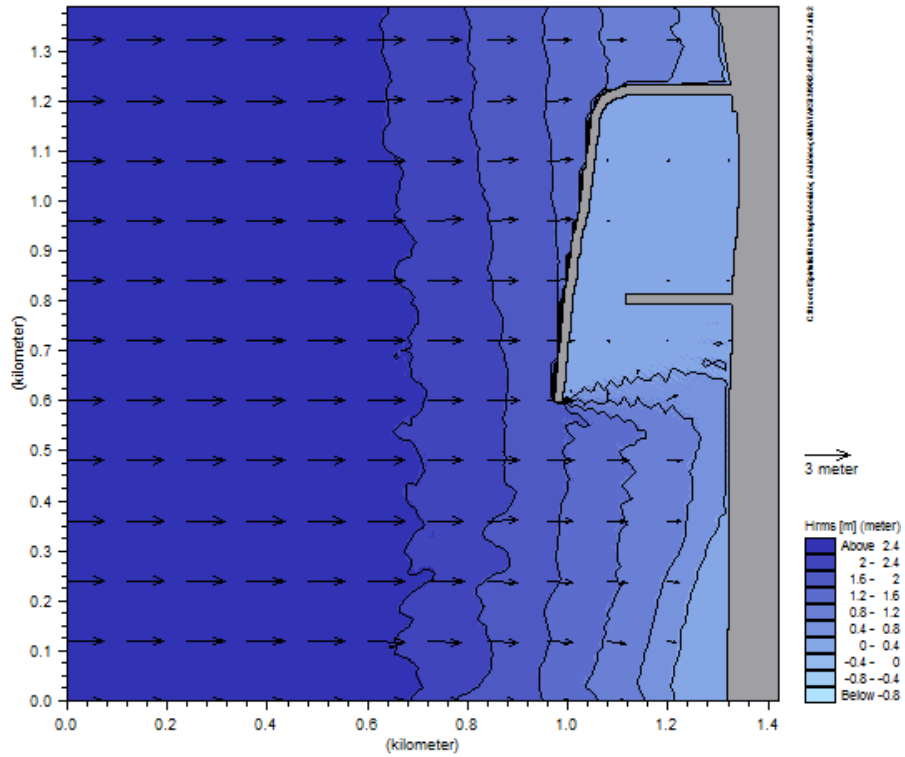
ΔΙΑΤΑΞΗ 3
Dir.=90 deg



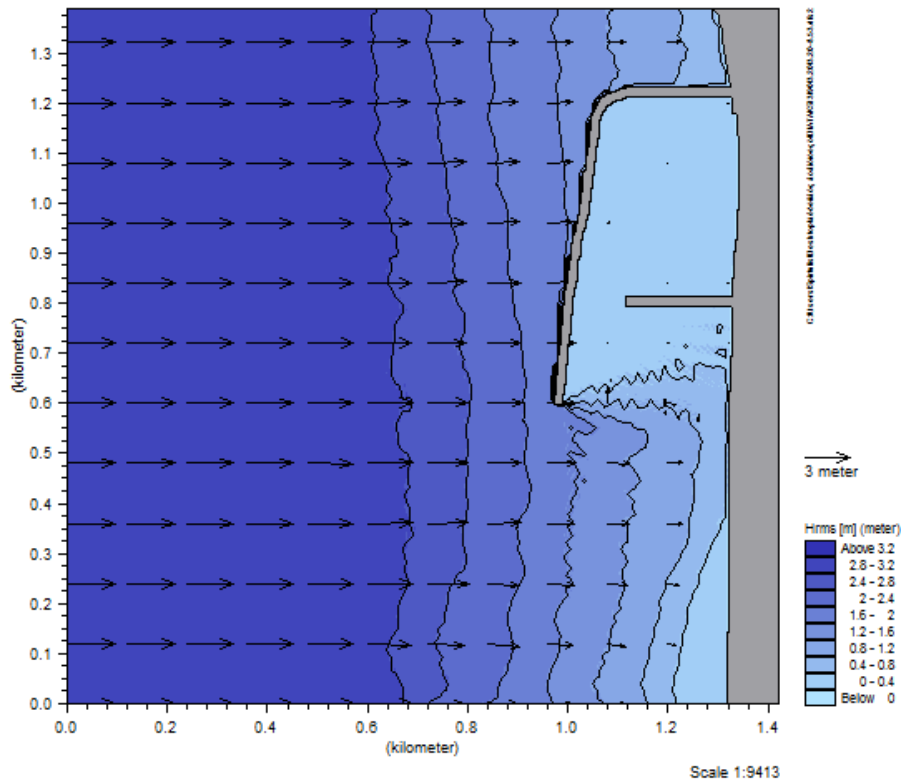
Σχήμα A.29 Νο 1.36, Τρ 5.69



Σχήμα A.30 Νο 1.84, Τρ 6.40



Σχήμα Α.31 Νο 2.48, Τρ 7.31

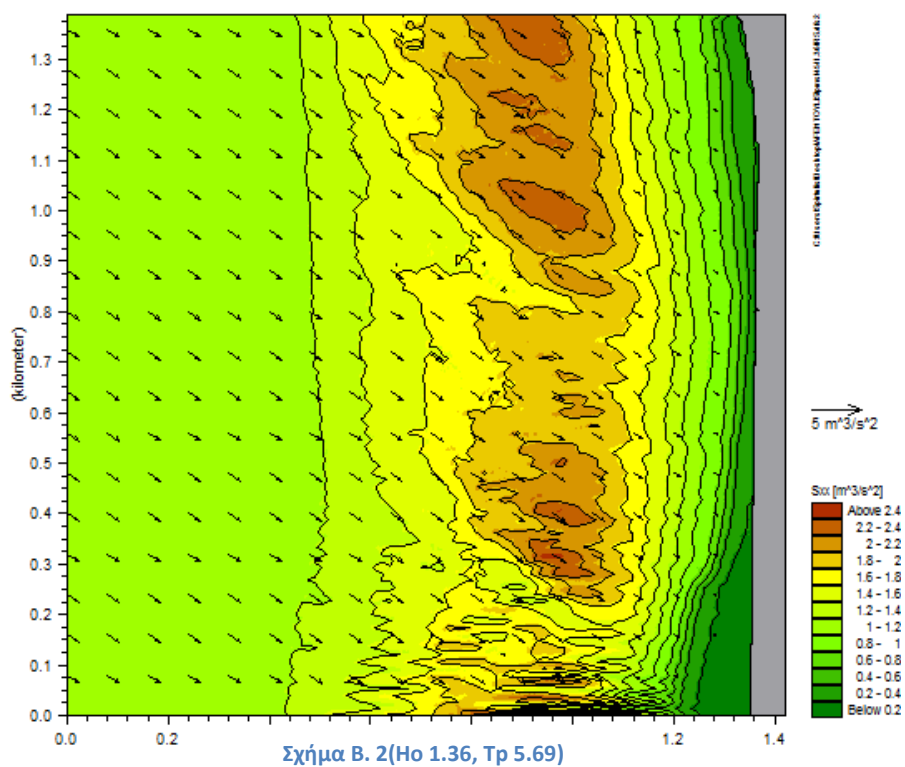


Σχήμα Α.32 Νο 3.20, Τρ 8.53

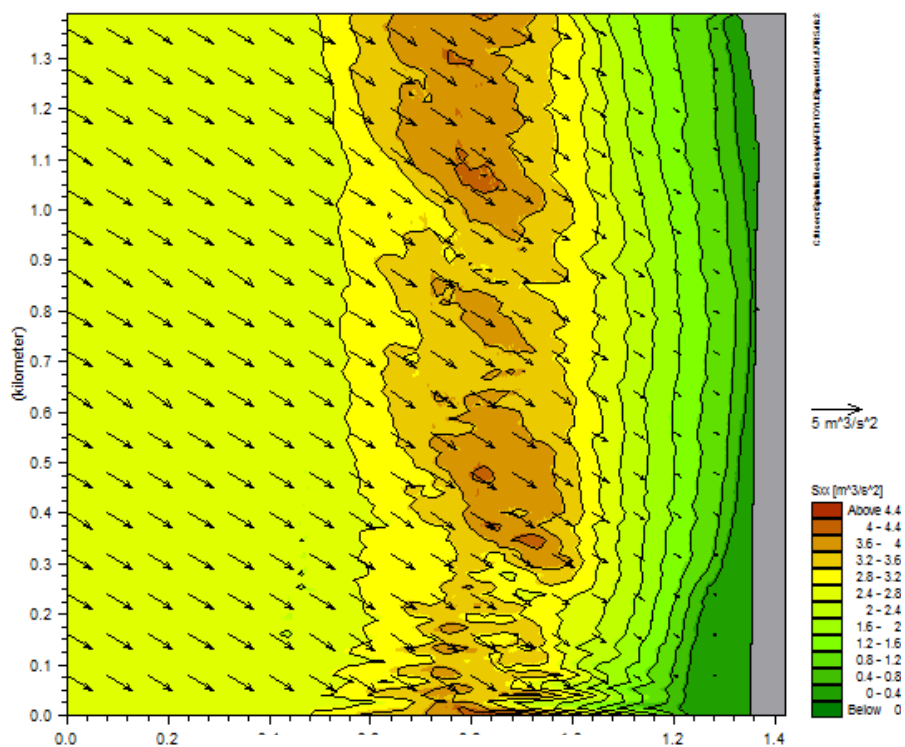
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β
ΣΧΗΜΑΤΑ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ MIKE 21 PMS
ΤΑΣΕΙΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

ΔΙΑΤΑΞΗ 0 (Χωρίς έργα)

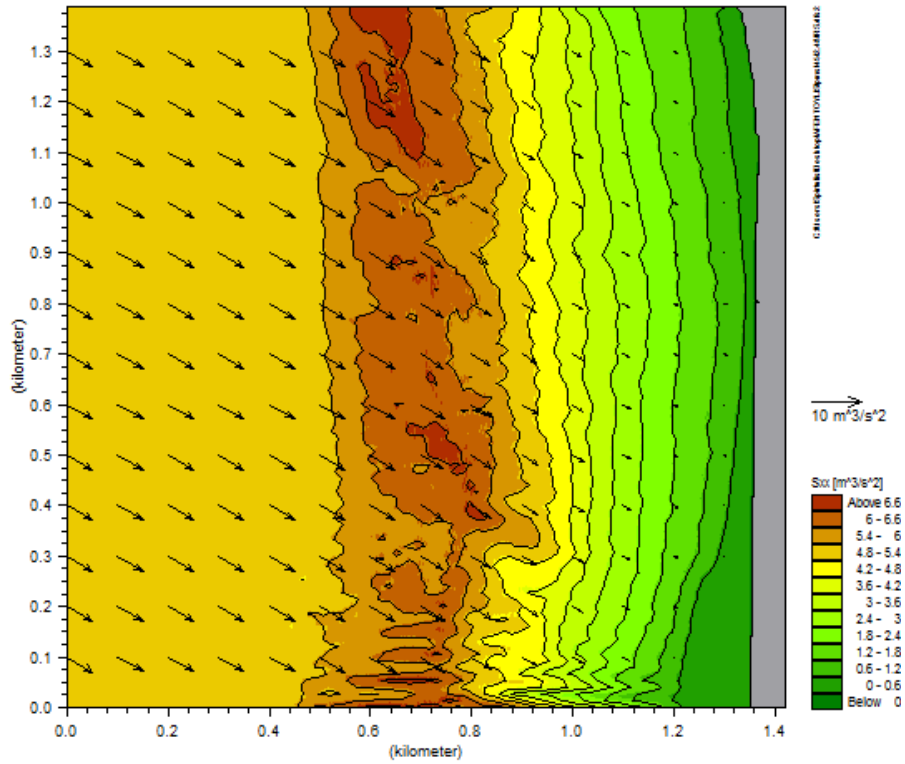
Dir. =45 deg



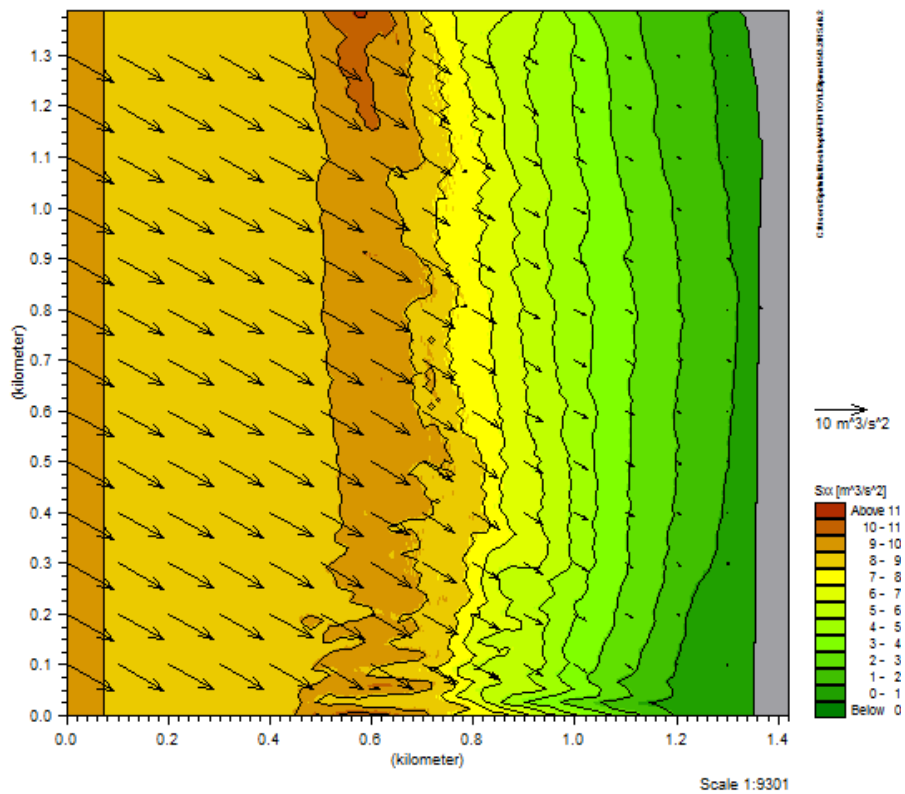
Σχήμα Β. 2(Ho 1.36, Tr 5.69)



Σχήμα Β. 2 Ho 1.84, Tr 6.40



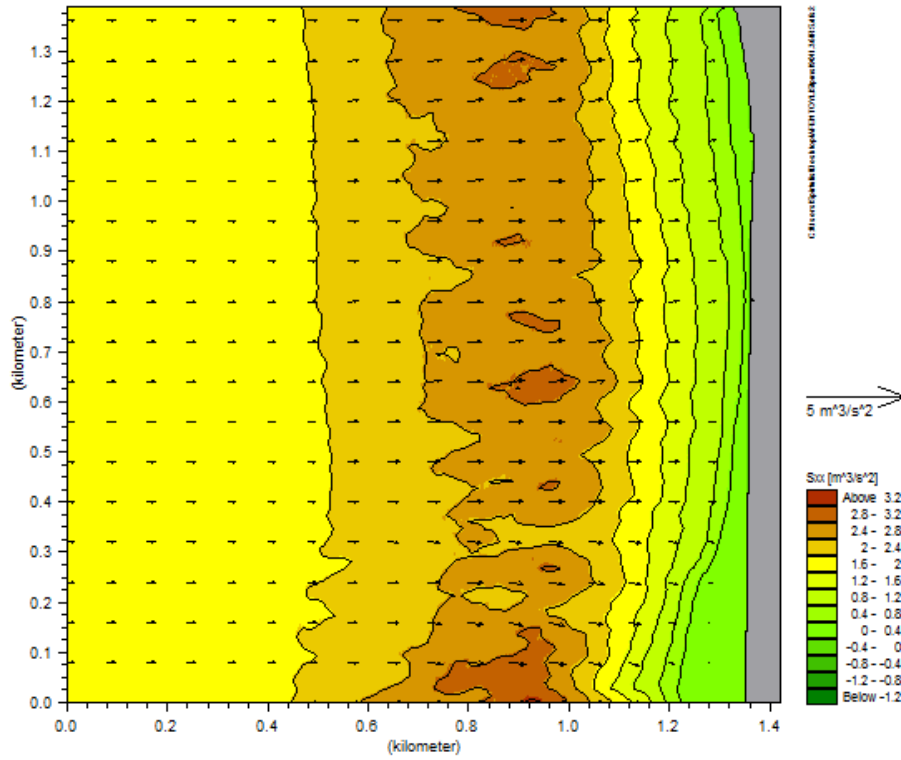
Σχήμα Β. 3 Νο 2.48, Τρ 7.31



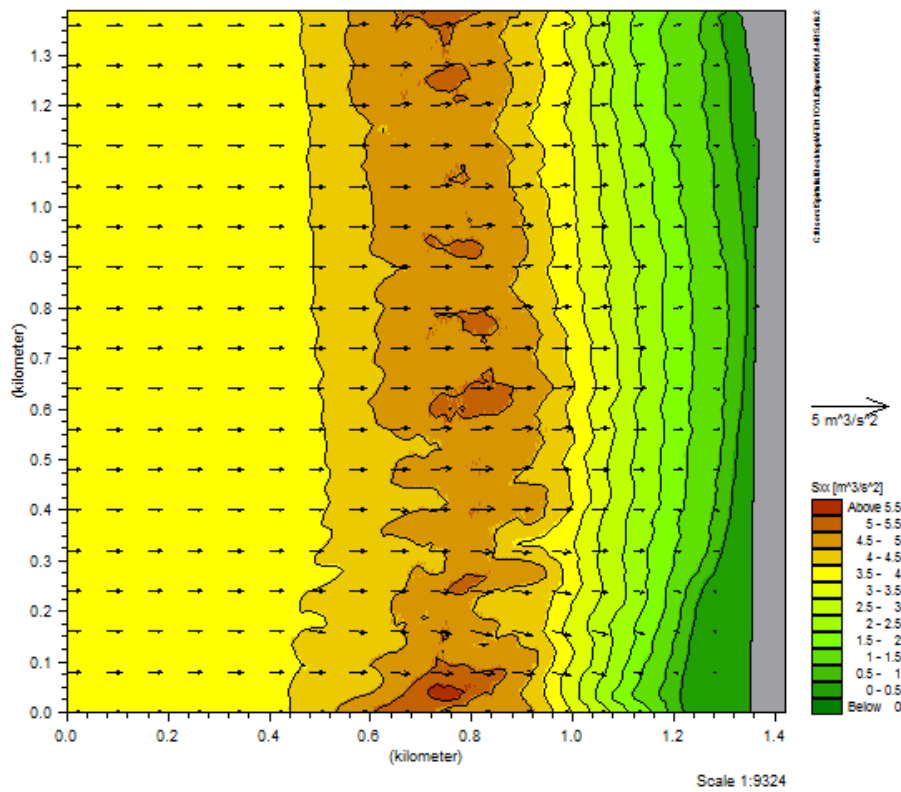
Σχήμα Β. 4 Νο 3.20, Τρ 8.53

ΔΙΑΤΑΞΗ 0 (Χωρίς έργα)

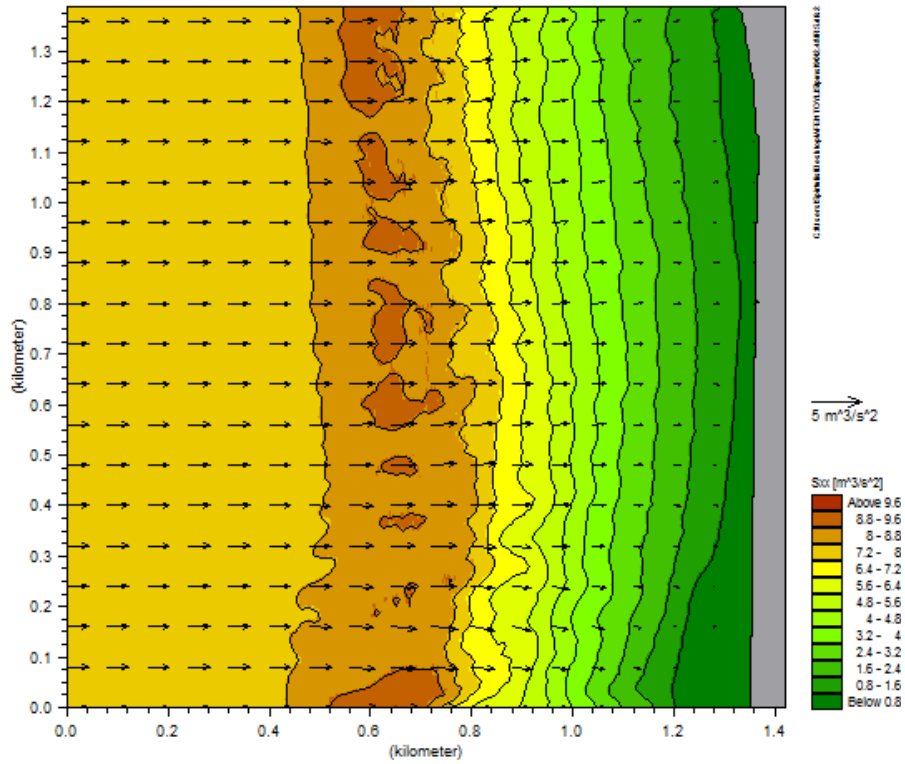
Dir.=90 deg



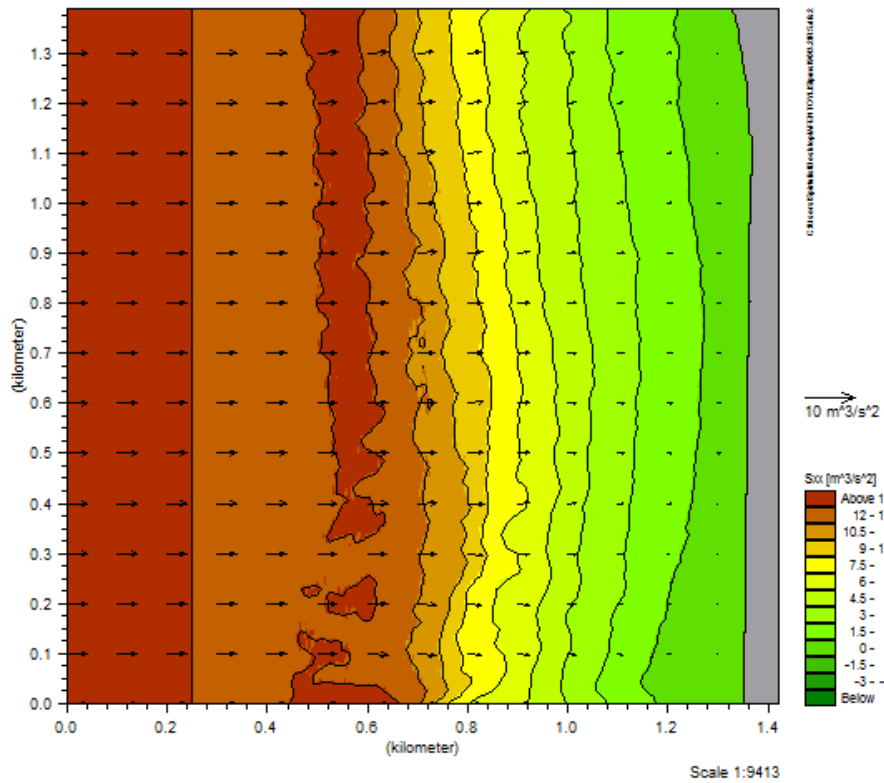
Σχήμα Β. 5 Νο 1.36, Τρ 5.69



Σχήμα Β. 6 Νο 1.84, Τρ 6.40

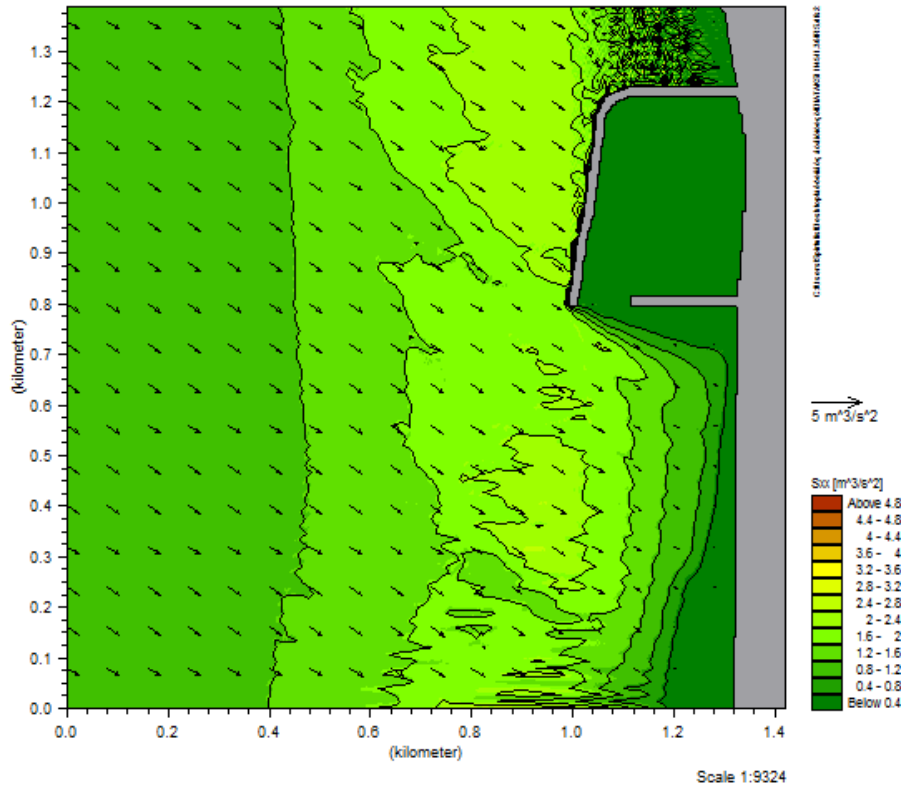


Σχήμα Β. 7 Νο 2.48, Τρ 7.31

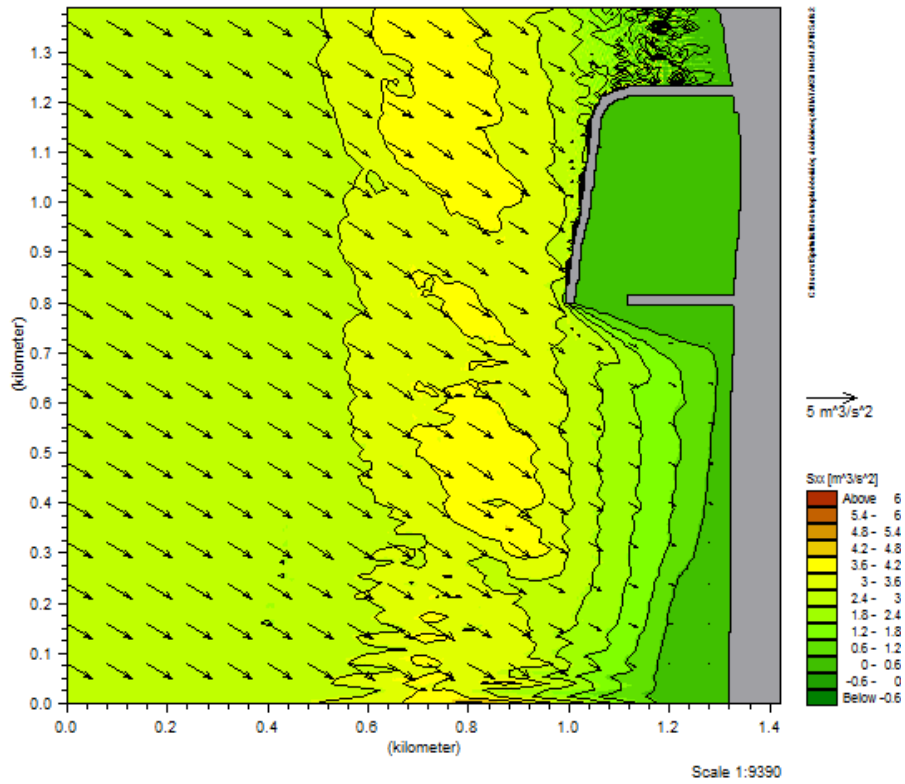


Σχήμα Β. 8 Νο 3.20, Τρ 8.53

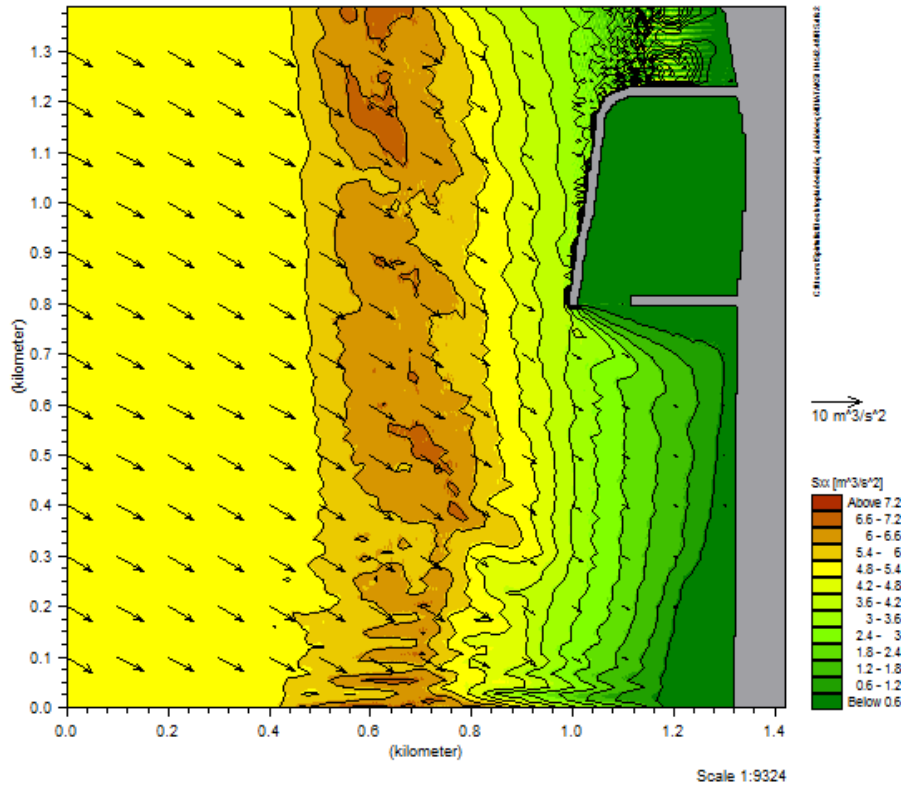
ΔΙΑΤΑΞΗ 1
Dir.=45 deg



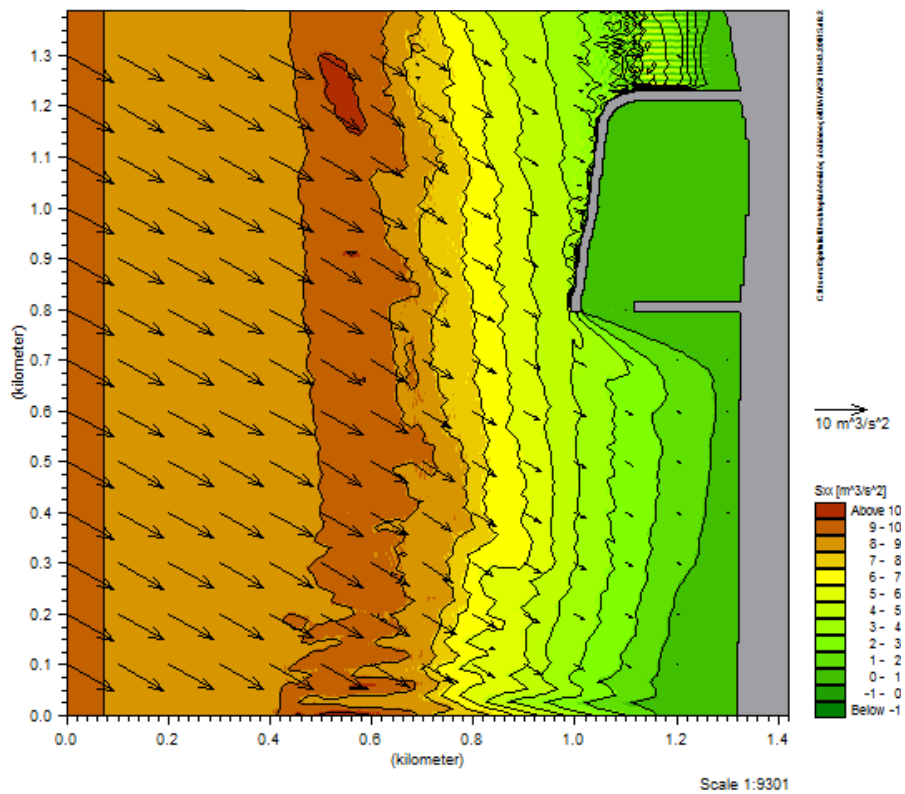
Σχήμα Β.9 Νο 1.36, Τρ 5.69



Σχήμα Β.10 Νο 1.84, Τρ 6.40

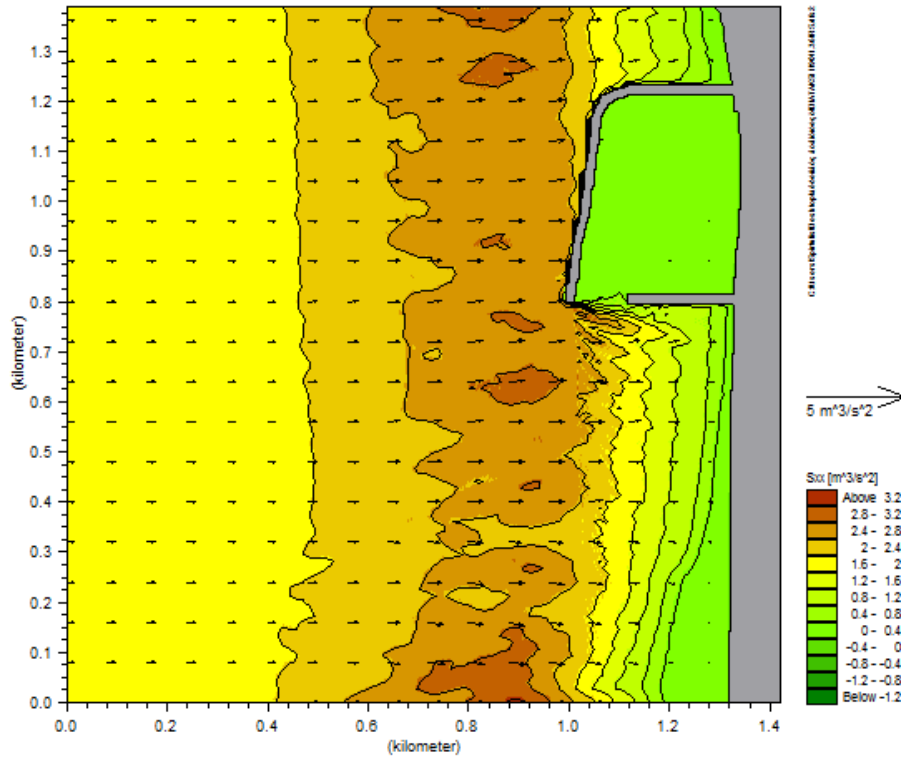


Σχήμα Β.11 Νο 2.48, Τρ 7.31

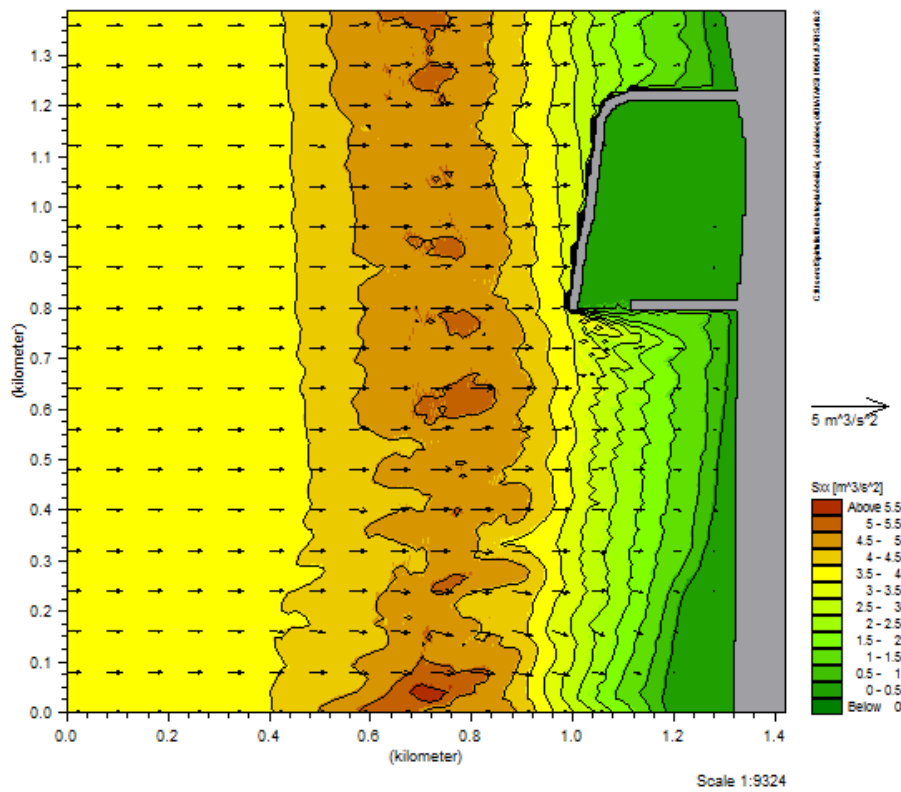


Σχήμα Β.12 Νο 3.20, Τρ 8.53

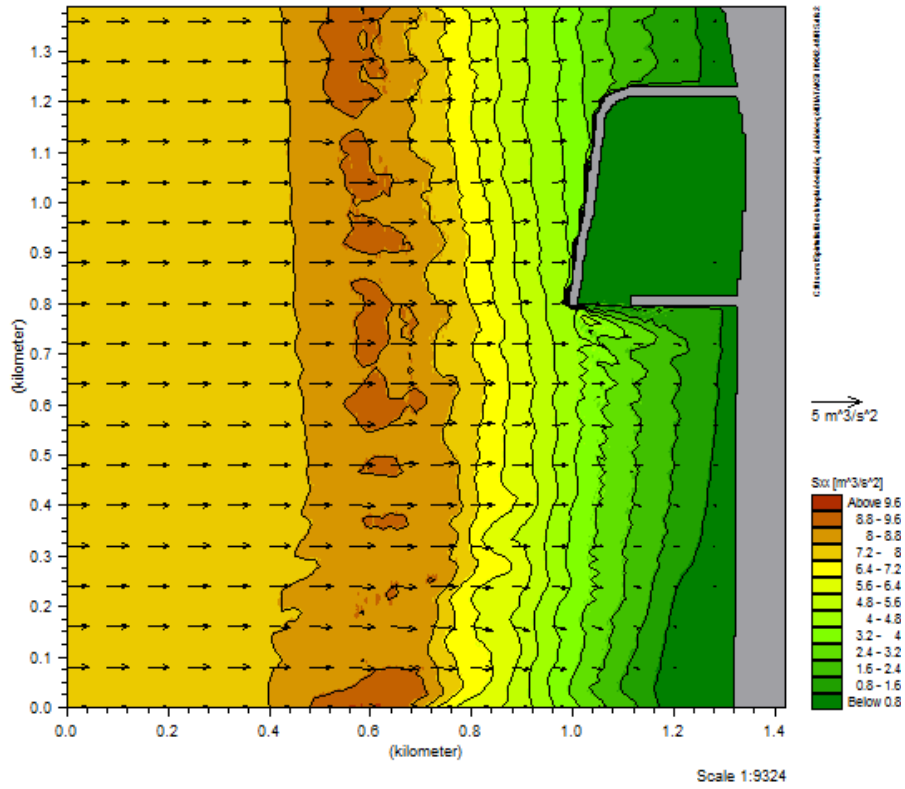
ΔΙΑΤΑΞΗ 1
Dir.=90 deg



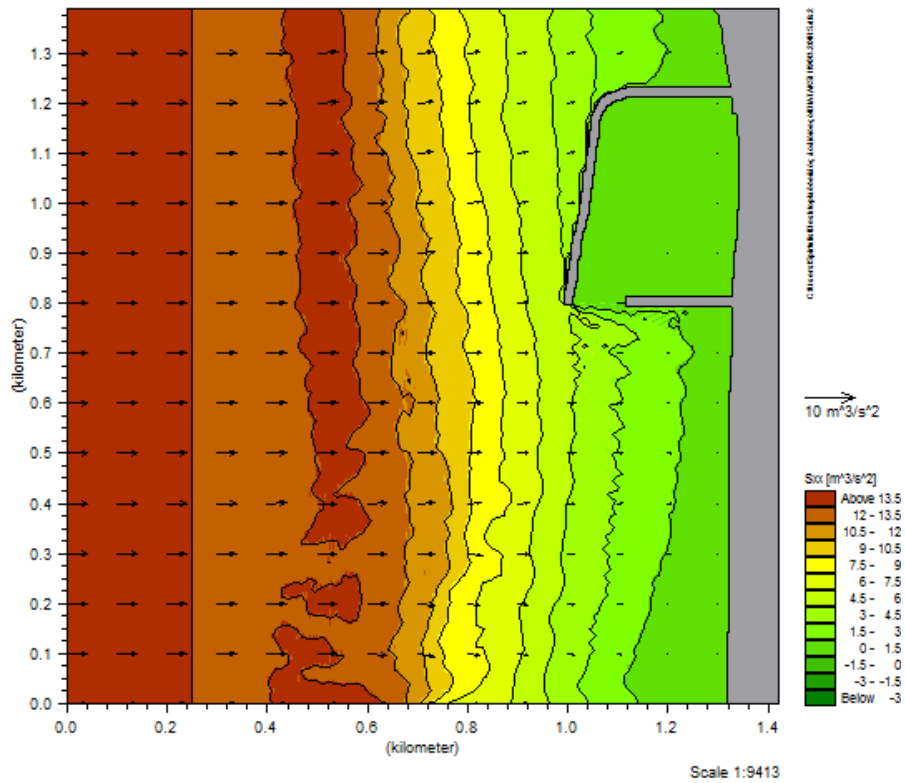
Σχήμα Β.13 Νο 1.36, Τρ 5.69



Σχήμα Β.14 Νο 1.84, Τρ 6.40

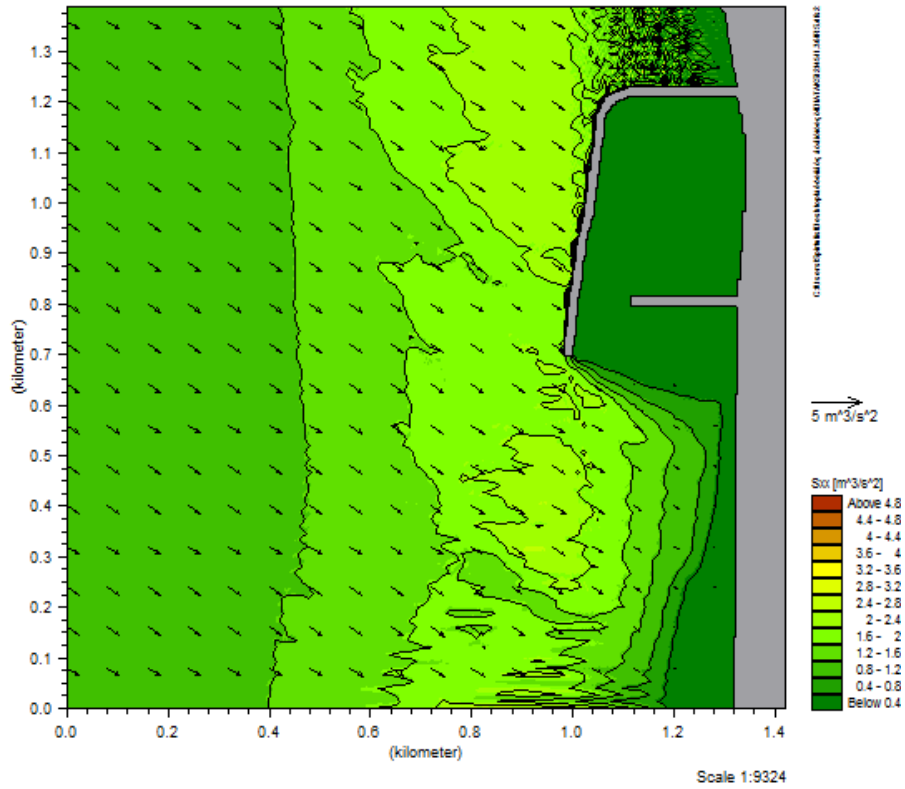


Σχήμα Β.15 Νο 2.48, Τρ 7.31

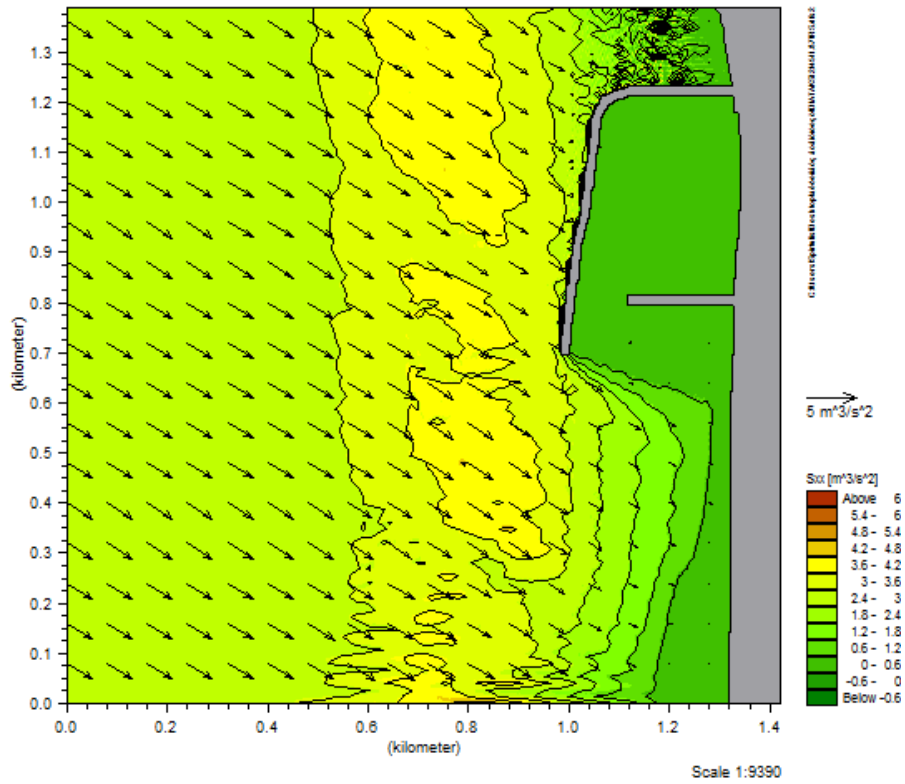


Σχήμα Β.16 Νο 3.20, Τρ 8.53

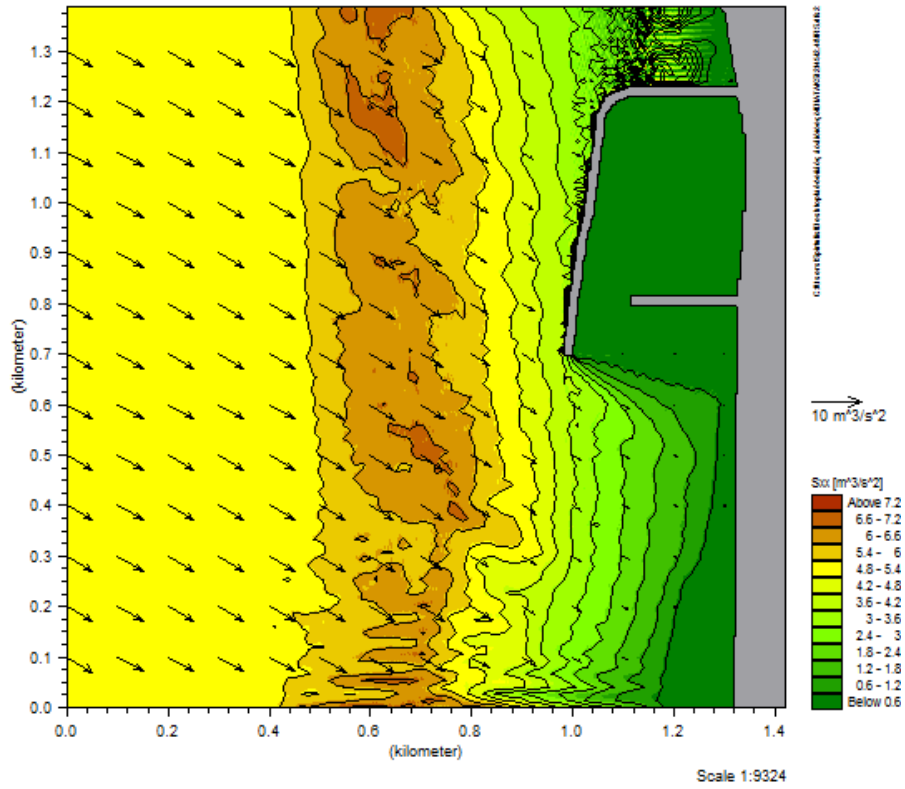
ΔΙΑΤΑΞΗ 2
Dir.=45 deg



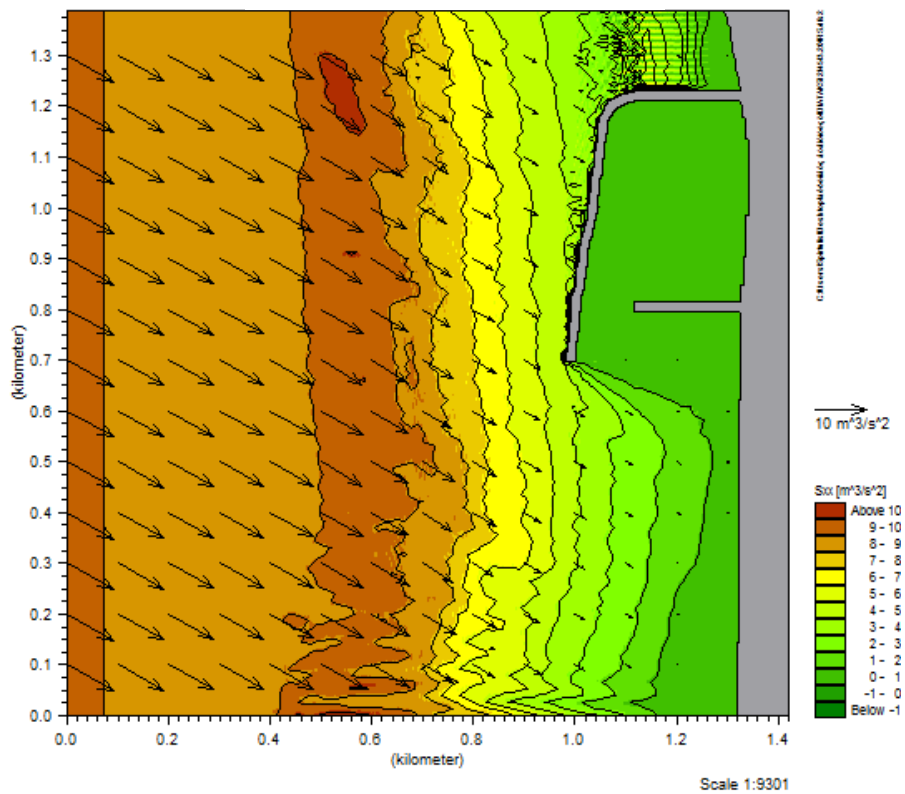
Σχήμα Β.17 Νο 1.36, Τρ 5.69



Σχήμα Β.18 Νο 1.84, Τρ 6.40

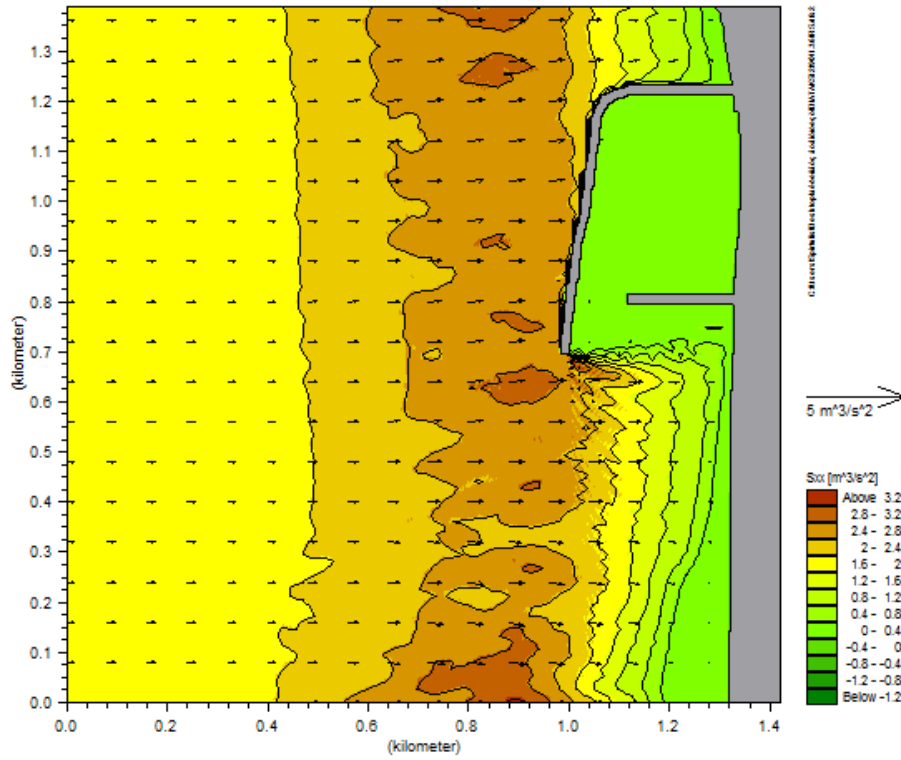


Σχήμα Β.19 Νο 2.48, Τρ 7.31

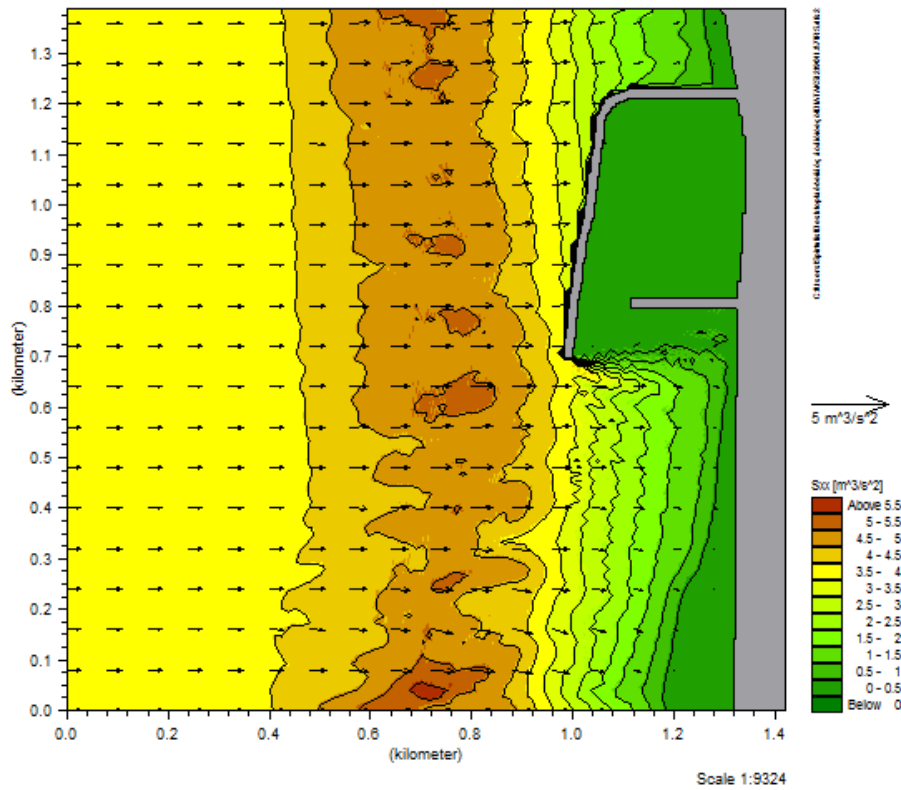


Σχήμα Β.20 Νο 3.20, Τρ 8.53

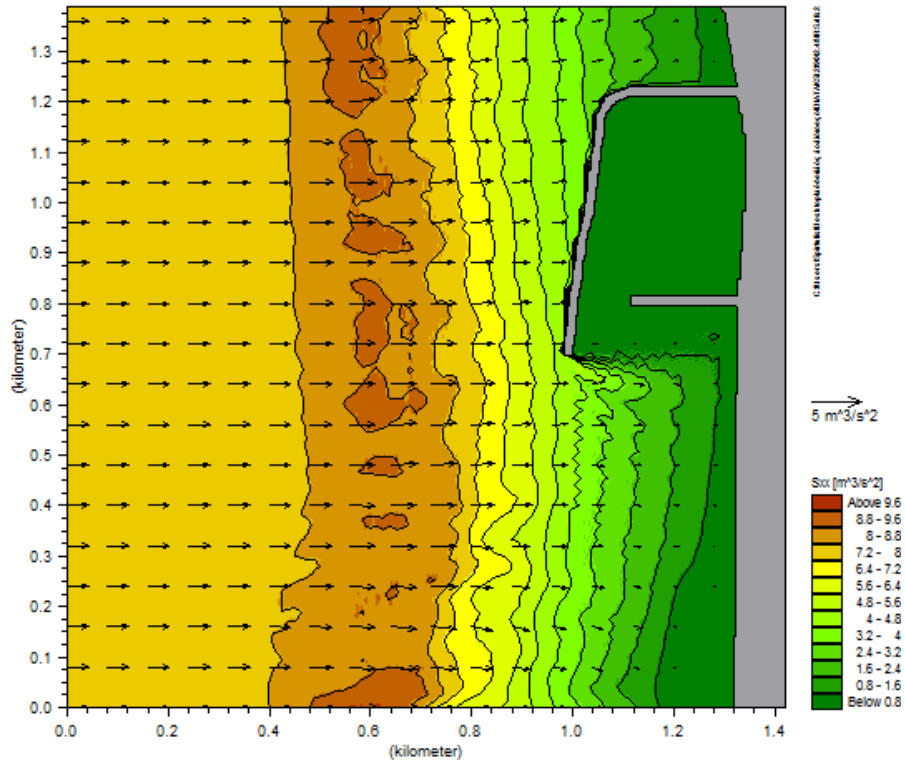
ΔΙΑΤΑΞΗ 2
Dir.=90 deg



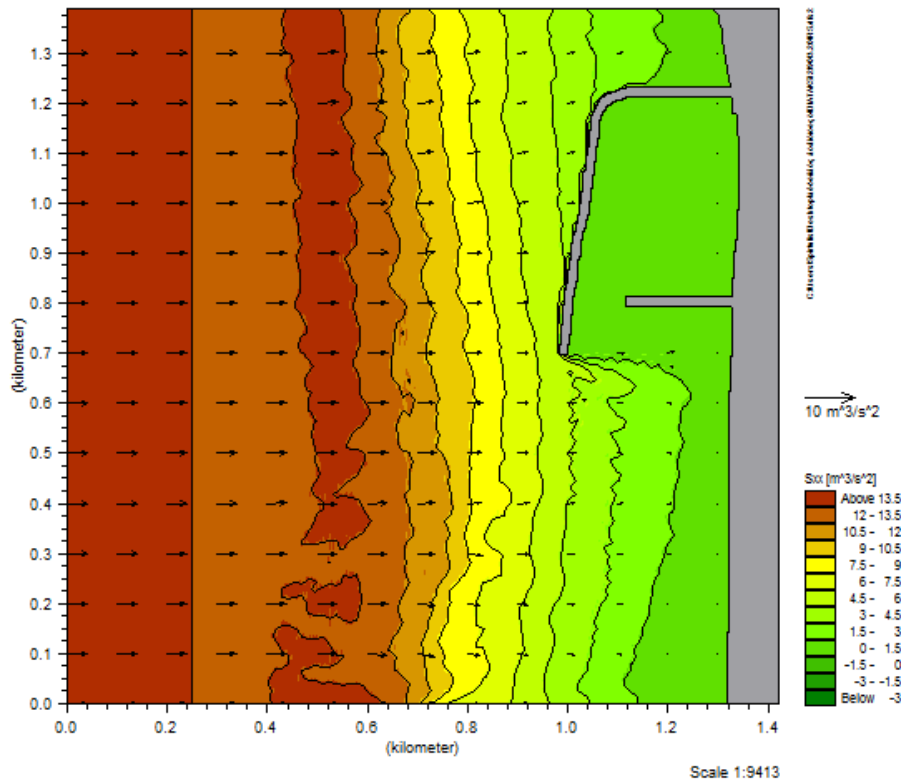
Σχήμα Β.21 Νο 1.36, Τρ 5.69



Σχήμα Β.22 Νο 1.84, Τρ 6.40

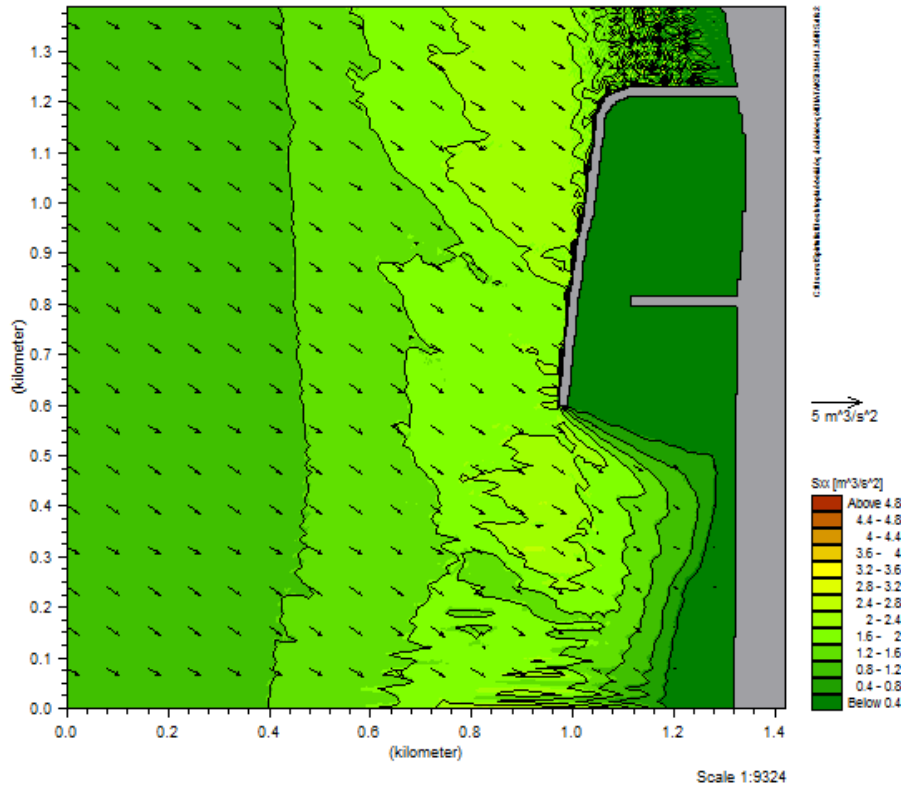


Σχήμα Β.23 Νο 2.48, Τρ 7.31

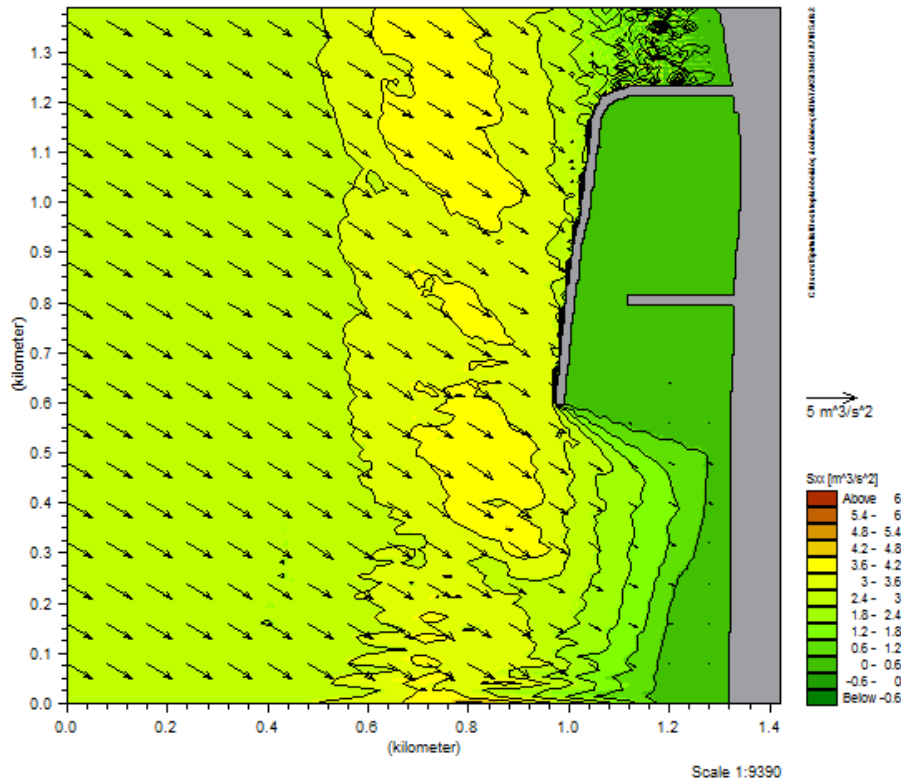


Σχήμα Β.24 3.20, Τρ 8.53

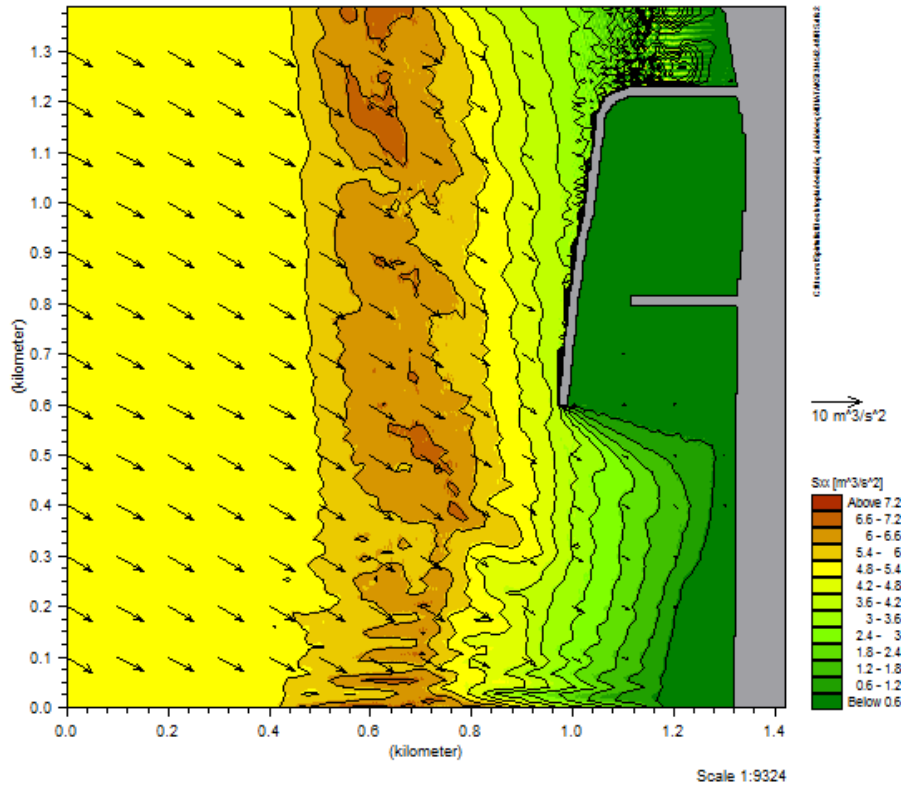
ΔΙΑΤΑΞΗ 3
Dir.=45 deg



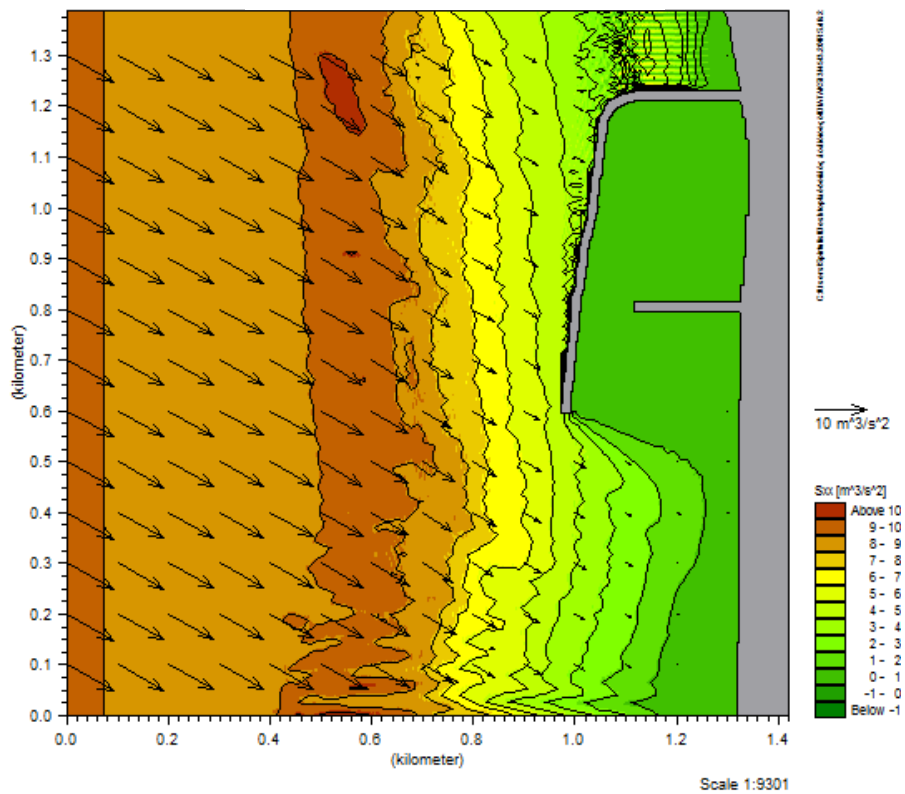
Σχήμα Β.25 Νο 1.36, Τρ 5.69



Σχήμα Β.26 Νο 1.84, Τρ 6.40

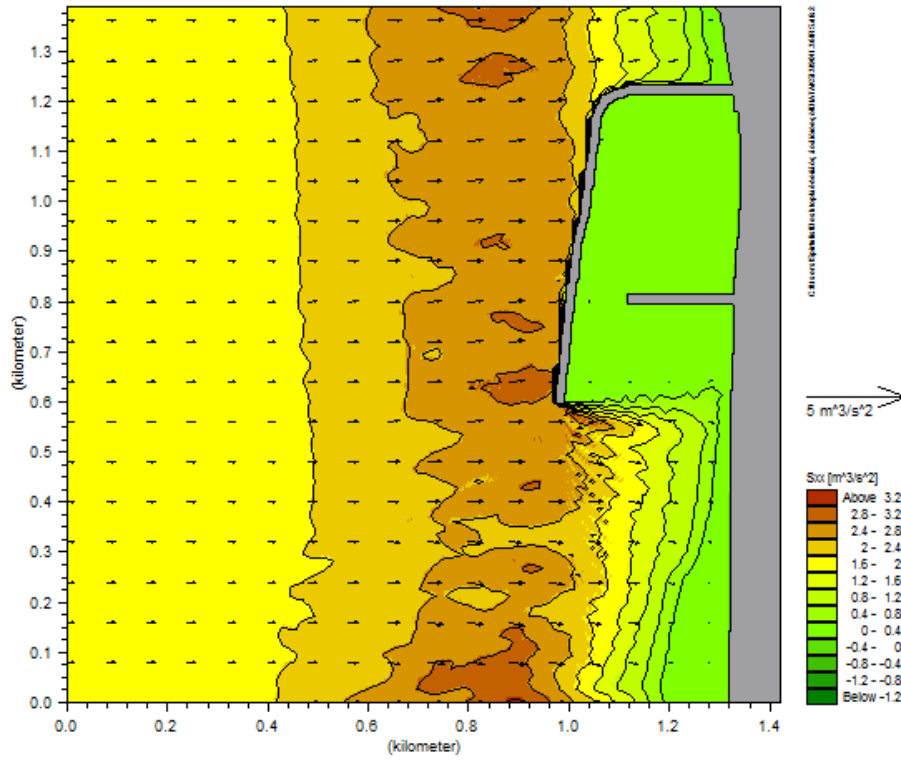


Σχήμα Β.27 Νο 2.48, Τρ 7.31

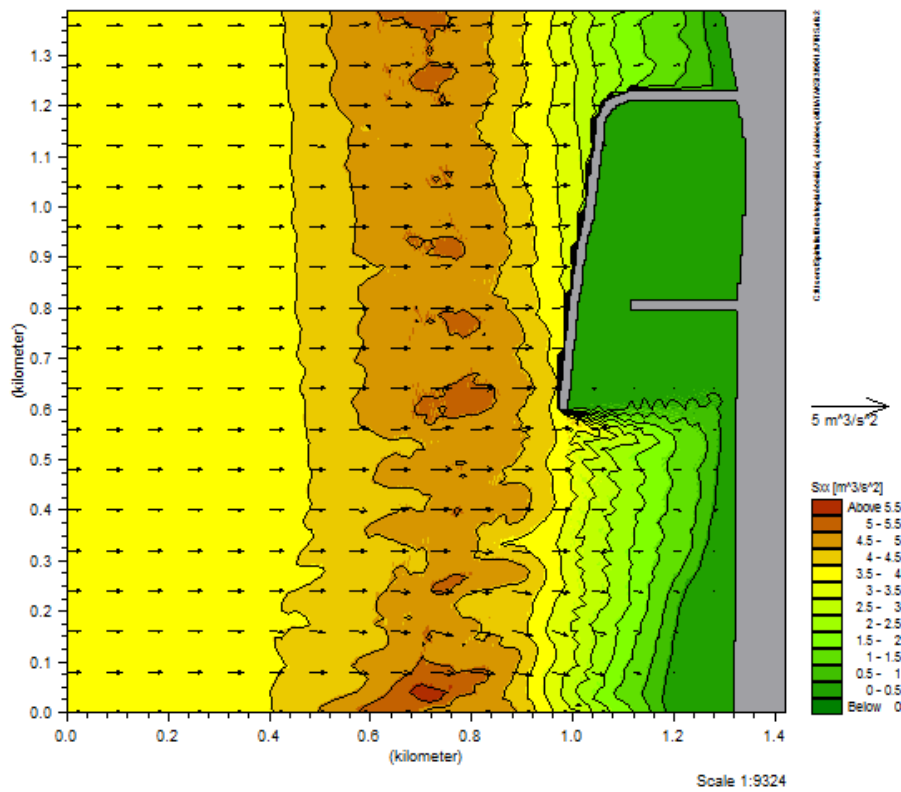


Σχήμα Β.28 Νο 3.20, Τρ 8.53

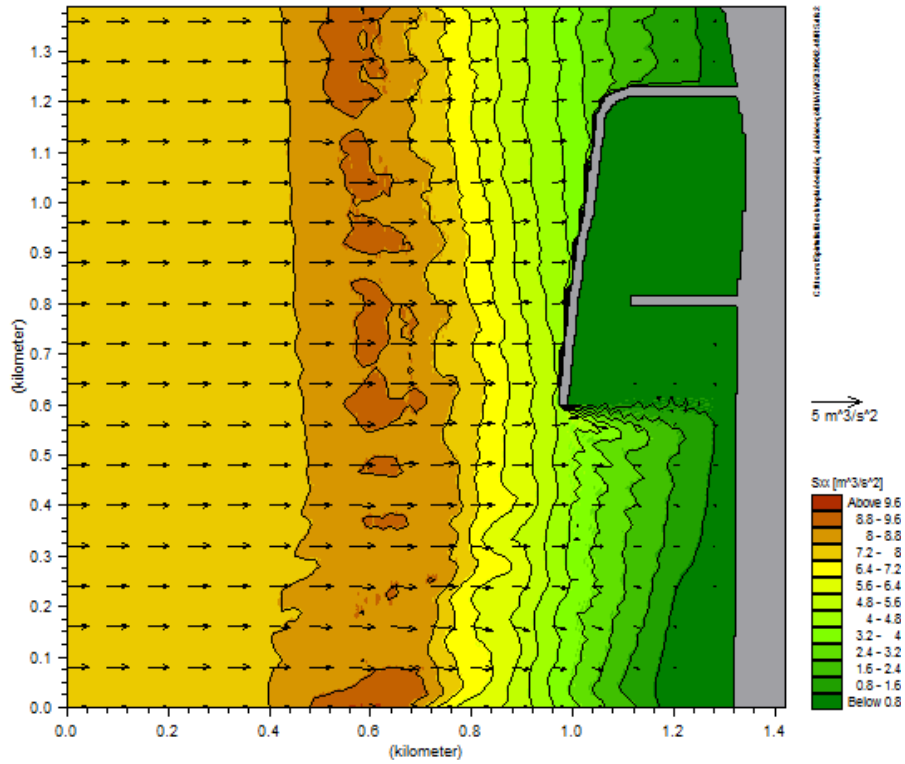
ΔΙΑΤΑΞΗ 3
Dir.=90 deg



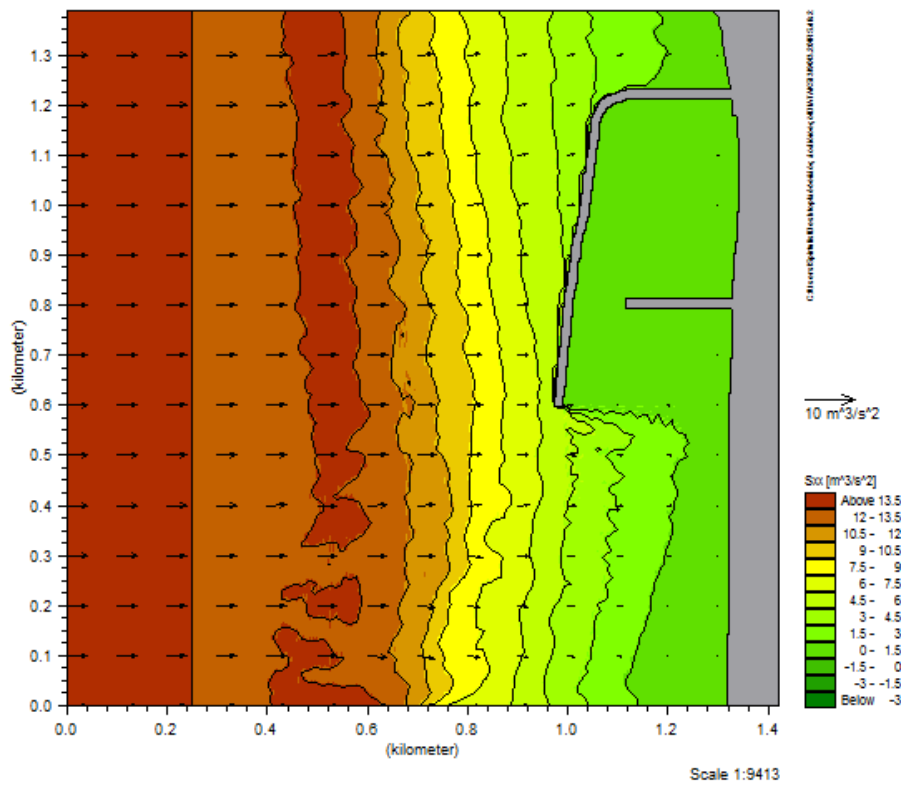
Σχήμα Β.29 Νο 1.36, Τρ 5.69



Σχήμα Β.30 Νο 1.84, Τρ 6.40



Σχήμα Β.31 Νο 2.48, Τρ 7.31



Σχήμα Β.32 Νο 3.20, Τρ 8.53

