



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ
ΕΡΓΩΝ

Μελέτη Υδροδυναμικού Πεδίου σε Φυσικό Ύφαλο Κυματοθραύστη



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Μαντέλου Μερόπη - Κυριακή

Επιβλέπων: Μέμος Δ. Κωνσταντίνος
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Μάιος 2014



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΕΡΓΩΝ

Μελέτη Υδροδυναμικού Πεδίου σε Φυσικό Ύφαλο Κυματοθραύστη

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Μαντέλου Μερόπη - Κυριακή

Επιβλέπων: Μέμος Δ. Κωνσταντίνος
Καθηγητής ΕΜΠ

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, Μάιος 2014

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 θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους με βοήθησαν για την εκπόνησή της.

Αρχικά οφείλω να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Κωνσταντίνο Μέμο που ανέλαβε την επίβλεψη αυτής της διπλωματικής εργασίας και μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης τον κ. Αθανάσιο Ζηρό, υποψήφιο διδάκτορα της σχολής Πολιτικών Μηχανικών, για τη συνεργασία και το χρόνο που αφιέρωσε, ιδιαίτερα στη διαδικασία των μετρήσεων στο πεδίο, καθώς και τους κ. Μιχάλη Χονδρό και κ. Αναστάσιο Μεταλληνό, υποψήφιους διδάκτορες, για την πολύτιμη βοήθεια τους και τις πληροφορίες τους, 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 οικογένειάς μου και των φίλων μου.

Περίληψη

Τελευταία η σημασία των ύφαλων διαπερατών κατασκευών αυξάνεται σταθερά λόγω των περιβαλλοντικών πλεονεκτημάτων τους έναντι των έξαλλων κατασκευών. Μια βασική παράμετρος για να αξιολογηθεί κατά πόσο μπορεί να αποτελέσουν τοπικό οικότοπο είναι η ταχύτητα των ρευστών σωματιδίων του νερού γύρω από την κατασκευή. Στην παρούσα διπλωματική ερευνάται το υδροδυναμικό πεδίο γύρω από φυσικό ύφαλο κυματοθραύστη και πραγματοποιείται προσομοίωση αυτού με χρήση αριθμητικού μοντέλου.

Ο φυσικός ύφαλος κυματοθραύστης βρίσκεται στην παραλία Χάρακα Αττικής που βρίσκεται πέντε χιλιόμετρα μακριά από το Σούνιο. Οι μετρήσεις που έγιναν με τη χρήση ενός οργάνου Flow Meter που διαθέτει το Εργαστήριο Λιμενικών Έργων του ΕΜΠ, πραγματοποιήθηκαν σε σημεία ανάντη, κατάντη αλλά και πάνω στο φυσικό εμπόδιο, ώστε να υπάρξει λεπτομερής καταγραφή των προφίλ ταχυτήτων.

Το ύφαλο φυσικό εμπόδιο χαρακτηρίζεται από μέτωπα απότομης κλίσης τόσο στην προσήνεμη όσο και στην υπήνεμη πλευρά του. Το γεγονός αυτό καθιστά δύσκολη την προσομοίωσή του στο πρόγραμμα. Το αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης της κυματικής διαταραχής που χρησιμοποιήθηκε για την διερεύνηση της απόκρισης του ύφαλου εμποδίου στον επερχόμενο κυματισμό είναι το εμπορικό πρόγραμμα MIKE21 BW (1DH).

Σε γενικές γραμμές παρατηρήθηκε ότι η προσομοίωση φυσικού ύφαλου κυματοθραύστη στο συγκεκριμένο πρόγραμμα είναι ένα πολυπαραμετρικό πρόβλημα. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων και των μετρήσεων χαρακτηρίζεται από μεγάλες αποκλίσεις, ειδικά στα σημεία πάνω στη στέψη όπου δεν προσομοιώνεται σωστά η θραύση του κυματισμού λόγω της ιδιόμορφης γεωμετρίας του κυματοθραύστη. Παρόλα αυτά το πρόγραμμα οδηγεί σε ορθές προβλέψεις των μέσων τιμών ταχυτήτων, ειδικά στα ανάντη και στα κατάντη σημεία του εμποδίου.

Abstract

Lately, the importance of permeable submerged structures is steadily increasing due to environmental merits over emerged breakwaters. A key parameter to assess the shelter they provide to the local habitats is the water particle velocity around the structure. The present dissertation focuses on the hydrodynamic field over a natural submerged sill and carries out a simulation through a numerical model.

The natural submerged sill is located at the coastal area of Charakas which is five kilometers away from Sounio. The field measurements, which were performed by using a Flow Meter provided by the Harbor Works Laboratory of the NTUA, were implemented upstream and downstream of the submerged sill, in order to estimate the velocity profile of each point.

The natural, submerged sill has an offshore vertical face and an inshore face of steep inclination. Due to its morphology, simulation was approximate in practical approaches. The oncoming wave was investigated by applying the MIKE 21 BW (1DH) commercial numerical simulation model.

In conclusion, the simulation of the natural submerged breakwater with this particular program is a multivariate problem. The comparison of the results and the measurements led to large deviations, especially around the points above the sea level, where the wave fracture is not simulated properly, because of the peculiar geometry of the breakwater. However, the program gives us good estimates of the average speed values, especially in the upstream and downstream points of the obstacle.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	i
Περίληψη	iii
Abstract.....	iv
Περιεχόμενα	vi
Παράρτημα Πινάκων	x
1. Εισαγωγή.....	1
1.1 Αντικείμενο της εργασίας	1
1.2 Διάρθρωση εργασίας.....	2
2. Περί ύφαλων κυματοθραυστών	3
2.1 Η ανάγκη για ύφαλους κυματοθραύστες.....	3
2.2 Γεωμετρία ύφαλου κυματοθραύστη	5
2.3 Κυματική μετάδοση και παράμετροι επιρροής	6
2.4 Τύποι κατασκευών.....	8
2.5 Φαινόμενα γύρω από ύφαλο κυματοθραύστη.....	10

2.6 Οι ύφαλοι κυματοθραύστες ως τεχνητοί οικότοποι	11
2.7 Μελέτες για το πεδίο ταχυτήτων γύρω από ύφαλο κυματοθραύστη	12
2.7.1 Διεθνή βιβλιογραφία	13
2.7.2 Ελληνική βιβλιογραφία	14
3. Περιγραφή μετρήσεων πεδίου	15
3.1 Γενικά στοιχεία	16
3.1.1 Στοιχεία για την παραλία μετρήσεων	17
3.1.2 Χαρακτηριστικά του υπό εξέταση φυσικού εμποδίου	22
3.1.3 Μετεωρολογικά Στοιχεία.....	23
3.2 Διαδικασία και προετοιμασία μετρήσεων πεδίου	27
3.2.1 Όργανα μέτρησης	28
3.2.2 Διαδικασία μετρήσεων	28
3.2.3 Προετοιμασία μετρήσεων	28
3.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων μετρήσεων πεδίου	32
3.3.1 1^H ομάδα μετρήσεων	32

3.3.2 2 ^H ομάδα μετρήσεων.....	38
3.3.3 3 ^H ομάδα μετρήσεων	35
3.3.4 4 ^H ομάδα μετρήσεων.....	38
4. Θεωρητικό υπόβαθρο προγράμματος MIKE21 (BW).....	41
4.1 Εισαγωγή.....	41
4.2 Γενική περιγραφή	41
4.3 Βασικές εξισώσεις για το 2DH κυματικό μοντέλο Boussinesq του προγράμματος MIKE 21 BW	43
4.4 Προσομοίωση θραύσης στο λογισμικό MIKE 21 BW	47
4.5 Οριακές συνθήκες.....	50
4.6 Αριθμητική εφαρμογή	51
4.6.1 Κυματικό μοντέλο Boussinesq μία οριζόντια διάσταση MIKE 21 BW	63
4.6.2 Κυματικό μοντέλο Boussinesq σε δύο οριζόντιες διαστάσεις MIKE 21 BW	63
5. Υπολογιστικό πρόγραμμα MIKE21 (BW)	55
5.1 Εφαρμογή MIKE 21 BW	55
5.2 Διαγράμματα – Σχολιασμός αποτελεσμάτων	57

5.2.1 1 ^η ομάδα αποτελεσμάτων	57
5.2.2 2 ^η ομάδα αποτελεσμάτων	62
5.2.3 3 ^η ομάδα αποτελεσμάτων	66
5.2.4 4 ^η ομάδα αποτελεσμάτων	71
5.2.5 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων	75
6.1 Σύνοψη συμπερασμάτων	77
6.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	78
7. Βιβλιογραφία	79
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	82
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β	85

Παράρτημα Πινάκων

Πίνακας Π.1: Παράρτημα Εικόνων

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΕΙΚΟΝΩΝ		
A/A	Περιγραφή	Πηγή
1	Εικόνα 2.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ύφαλου κυματοθραύστη	Moutzouris K.I. 2009, «Θαλάσσια Υδραυλική», Εκδόσεις ΕΜΠ
2	Εικόνα 3.1 Περιοχή μετρήσεων	Google Earth
3	Εικόνα 3.2 Ερασιτεχνικές φωτογραφίες περιοχής μετρήσεων	Προσωπικό αρχείο
4	Εικόνα 3.3 Το υπό εξέταση φυσικό εμπόδιο	Προσωπικό αρχείο
5	Εικόνα 3.4 Χάρτης περιοχής Σαρωνικού	ΓΥΣ
6	Εικόνα 3.5 Τοπογραφικό ύφαλου κυματοθραύστη	AutoCAD
7	Εικόνα 3.6 Υπό εξέταση διατομή ύφαλου κυματοθραύστη	AutoCAD
8	Εικόνα 3.7 Αριστερό πρανές	Προσωπικό αρχείο
9	Εικόνα 3.8 Στροφική ράβδος μέσα στο νερό	Geopacks, The Geography Specialists, Operation Manual
10	Εικόνα 3.9 Χρήση μετωπικής ράβδου	Geopacks, The Geography Specialists, Operation Manual
11	Εικόνα 3.10 Διάγραμμα Βαθμονόμησης	Geopacks, The Geography Specialists, Operation Manual
12	Εικόνα 4.1: Απεικόνιση των δύο κυματικών module του λογισμικού MIKE 21 BW. Το δισδιάστατο (αριστερά) και το μονοδιάστατο (δεξιά).	DHI (2005), MIKE21 User guide and Reference Manual, Danish Hydraulic Institute, Water and Environment, Denmark.
13	Εικόνα 4.2: Απεικόνιση κανναβιού για το 2DH module του λογισμικού MIKE 21 BW.	DHI (2005), MIKE21 User guide and Reference Manual, Danish Hydraulic Institute, Water and Environment, Denmark.

Πίνακας Π.2: Παράρτημα Διαγραμμάτων

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΧΗΜΑΤΩΝ		
A/A	Περιγραφή	Πηγή
1	Διάγραμμα 3.1: Προφίλ ταχυτήτων σημείου 5	MIKE 21 BW - Excel
2	Διάγραμμα 3.2: Προφίλ ταχυτήτων σημείου 26	MIKE 21 BW - Excel
3	Διάγραμμα 3.3: Προφίλ ταχυτήτων σημείου 33	MIKE 21 BW - Excel
4	Διάγραμμα 3.4: Προφίλ ταχυτήτων σημείου 44	MIKE 21 BW - Excel
5	Διάγραμμα 3.5: Προφίλ ταχυτήτων σημείου 48	MIKE 21 BW - Excel
6	Διάγραμμα 3.6: Προφίλ ταχυτήτων σημείου 5	MIKE 21 BW - Excel
7	Διάγραμμα 3.7: Προφίλ ταχυτήτων σημείου 26	MIKE 21 BW - Excel
8	Διάγραμμα 3.8: Προφίλ ταχυτήτων σημείου 33	MIKE 21 BW - Excel
9	Διάγραμμα 3.9: Προφίλ ταχυτήτων σημείου 44	MIKE 21 BW - Excel
10	Διάγραμμα 3.10: Προφίλ ταχυτήτων σημείου 48	MIKE 21 BW - Excel
11	Διάγραμμα 3.11: Προφίλ ταχυτήτων σημείου 5	MIKE 21 BW - Excel
12	Διάγραμμα 3.12: Προφίλ ταχυτήτων σημείου 26	MIKE 21 BW - Excel
13	Διάγραμμα 3.13: Προφίλ ταχυτήτων σημείου 33	MIKE 21 BW - Excel
14	Διάγραμμα 3.14: Προφίλ ταχυτήτων σημείου 44	MIKE 21 BW - Excel
15	Διάγραμμα 3.15: Προφίλ ταχυτήτων σημείου 48	MIKE 21 BW - Excel
16	Διάγραμμα 3.16: Προφίλ ταχυτήτων σημείου 5	MIKE 21 BW - Excel
17	Διάγραμμα 3.17: Προφίλ ταχυτήτων σημείου 26	MIKE 21 BW - Excel
18	Διάγραμμα 3.18: Προφίλ ταχυτήτων σημείου 33	MIKE 21 BW - Excel
19	Διάγραμμα 3.19: Προφίλ ταχυτήτων σημείου 44	MIKE 21 BW - Excel
20	Διάγραμμα 3.20: Προφίλ ταχυτήτων σημείου 48	MIKE 21 BW - Excel
21	Σχήμα 5.1 Κατασκευή βαθυμετρίας με χωρικό βήμα $\Delta x = 0.05$.	MIKE 21 BW - Excel

22	Σχήμα 5.2 Προφίλ υψών κύματος με $H=0.10$ – 1η ομάδα μετρήσεων	MIKE 21 BW - Excel
23	Σχήμα 5.3 Σύγκριση χρονοσειρών για 1η ομάδα μετρήσεων – Σημείο 5	MIKE 21 BW - Excel
24	Σχήμα 5.4 Σύγκριση χρονοσειρών για 1η ομάδα μετρήσεων – Σημείο 33	MIKE 21 BW - Excel
25	Σχήμα 5.5 Σύγκριση χρονοσειρών για 1η ομάδα μετρήσεων – Σημείο 44	MIKE 21 BW - Excel
26	Σχήμα 5.6 Σύγκριση μέσων όρων για 1η ομάδα μετρήσεων.	MIKE 21 BW - Excel
27	Σχήμα 5.7 Σύγκριση μέγιστης τιμής για 1η ομάδα μετρήσεων.	MIKE 21 BW - Excel
28	Σχήμα 5.8 Προφίλ υψών κύματος για $H=0.90$ – 2η ομάδα μετρήσεων	MIKE 21 BW - Excel
29	Σχήμα 5.9 Σύγκριση χρονοσειρών για 2η ομάδα μετρήσεων – Σημείο 5	MIKE 21 BW - Excel
30	Σχήμα 5.10 Σύγκριση χρονοσειρών για 2η ομάδα μετρήσεων – Σημείο 33	MIKE 21 BW - Excel
31	Σχήμα 5.11 Σύγκριση χρονοσειρών για 2η ομάδα μετρήσεων – Σημείο 44	MIKE 21 BW - Excel
32	Σχήμα 5.12 Σύγκριση μέσων όρων για 2η ομάδα μετρήσεων	MIKE 21 BW - Excel
33	Σχήμα 5.13 Σύγκριση μέγιστων τιμών για 2η ομάδα μετρήσεων	MIKE 21 BW - Excel
34	Σχήμα 5.14 Προφίλ υψών κύματος $H=0.095$ για 3η ομάδα μετρήσεων.	MIKE 21 BW - Excel
35	Σχήμα 5.15 Σύγκριση χρονοσειρών για 3η ομάδα μετρήσεων – Σημείο 5	MIKE 21 BW - Excel
36	Σχήμα 5.16 Σύγκριση χρονοσειρών για 3η ομάδα μετρήσεων – Σημείο 33	MIKE 21 BW - Excel
37	Σχήμα 5.17 Σύγκριση χρονοσειρών για 3η ομάδα μετρήσεων – Σημείο 44	MIKE 21 BW - Excel
38	Σχήμα 5.18 Σύγκριση μέσων όρων για 3η ομάδα μετρήσεων.	MIKE 21 BW - Excel
39	Σχήμα 5.19 Σύγκριση μέγιστων τιμών για 3η ομάδα μετρήσεων.	MIKE 21 BW - Excel
40	Σχήμα 5.20 Προφίλ υψών κύματος για $H=0.15m$ για 4η ομάδα μετρήσεων.	MIKE 21 BW - Excel
41	Σχήμα 5.21 Σύγκριση χρονοσειρών για 4η ομάδα μετρήσεων– Σημείο 5	MIKE 21 BW - Excel
42	Σχήμα 5.22 Σύγκριση χρονοσειρών για 4η ομάδα μετρήσεων – Σημείο 33	MIKE 21 BW - Excel
43	Σχήμα 5.23 Σύγκριση χρονοσειρών για 4η ομάδα μετρήσεων– Σημείο 44	MIKE 21 BW - Excel
44	Σχήμα 5.24 Σύγκριση μέσων όρων για 4η ομάδα μετρήσεων	MIKE 21 BW - Excel
45	Σχήμα 5.25 Σύγκριση μέγιστης τιμής για 4η ομάδα μετρήσεων.	MIKE 21 BW - Excel

Πίνακας Π.3: Παράρτημα Πινάκων

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΠΙΝΑΚΩΝ		
A/A	Περιγραφή	Πηγή
1	Πίνακας 5.1 Στατιστικές παράμετροι για 1η ομάδα μετρήσεων.	Excel
2	Πίνακας 5.2 Στατιστικές Παράμετροι για 2η ομάδα μετρήσεων	Excel
3	Πίνακας 5.3 Στατιστικές παράμετροι για 3η ομάδα μετρήσεων.	Excel
4	Πίνακας 5.4 Στατιστικές παράμετροι για 4η ομάδα μετρήσεων.	Excel

1. Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο της εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μία προσπάθεια κατανόησης των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα γύρω από ένα ύφαλο κυματοθραύστη σε ό,τι αφορά το υδροδυναμικό πεδίο ταχυτήτων. Επίσης περιλαμβάνει μία σύντομη καταγραφή όλων των αντίστοιχων προσπαθειών που έχουν πραγματοποιηθεί στο χώρο της έρευνας.

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο βασικής έρευνας του Εργαστηρίου Λιμενικών Έργων του Ε.Μ.Π. και περιλαμβάνει την πρώτη σειρά αριθμητικών μετρήσεων πεδίου της ευρύτερης αυτής διερεύνησης. Βασίστηκε σε μία σειρά μετρήσεων ταχυτήτων γύρω από φυσικό εμπόδιο, που θεωρήθηκε και εξετάστηκε ως ύφαλος κυματοθραύστης, καθώς και στην αριθμητική προσομοίωση του ίδιου φυσικού εμποδίου. Στο μοντέλο ελέγχθηκαν κυματισμοί με ποικίλες χαρακτηριστικές παραμέτρους και όσο το δυνατόν πιο κοντά στις επικρατούσες κυματικές συνθήκες κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, με στόχο την ορθότερη σύγκριση των δύο αποτελεσμάτων και τον σωστότερο έλεγχο της απόδοσης του μοντέλου. Συγκεκριμένα, για τον προσδιορισμό των δυναμικών συνθηκών πραγματοποιήθηκε προσομοίωση με το πρόγραμμα MIKE 21 και για λόγους ορθότερων αποτελεσμάτων το μοντέλο Boussinesq Wave (BW).

1.2 Διάρθρωση εργασίας

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

- Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια περιγραφή των ύφαλων κυματοθραυστών, της χρήσης τους και των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα γύρω από τέτοιου είδους κατασκευές. Επίσης γίνεται συνοπτική αναφορά στην λειτουργία των ύφαλων κατασκευών ως τεχνητών οικοτόπων και στους παράγοντες που επηρεάζουν τα θαλάσσια οικοσυστήματα καθώς δίνονται και κάποια βασικά μεγέθη που συσχετίζονται με τις μαθηματικές θεωρίες μετάδοσης κυματισμού. Τέλος,

παρατίθενται κάποιες σημαντικές αντίστοιχες έρευνες της διεθνούς και της ελληνικής βιβλιογραφίας.

- Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην περιοχή που βρίσκεται το υπό εξέταση φυσικό εμπόδιο, στα όργανα μέτρησης και μια προσπάθεια περιγραφής της διαδικασίας των μετρήσεων καθώς και του τρόπου που ψηφιοποιήθηκαν τα αποτελέσματα. Τέλος παρουσιάζονται σε διαγράμματα οι ομάδες των μετρήσεων.
- Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται το θεωρητικό υπόβαθρο του υπολογιστικού προγράμματος MIKE 21 και ο τρόπος λειτουργίας της διεπιφάνειας του για τη μονοδιάστατη περίπτωση. Συγκεκριμένα αναλύονται οι εξισώσεις ορμής και συνέχειας και το κριτήριο θραύσης Madsen – Sorensen – Schaffer (1997), το οποίο βασίζεται στη γεωμετρία της κορυφής του κύματος, που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα όπως επίσης και οι οριακές συνθήκες και το αριθμητικό σχήμα επίλυσης του.
- Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βήματα εισαγωγής των δεδομένων που προέκυψαν κατά τις μετρήσεις και των βασικών παραμέτρων στο πρόγραμμα MIKE21 καθώς και η εισαγωγή της κυματικής διαταραχής. Τέλος, παρουσιάζονται οι χρονικές σειρές των αποτελεσμάτων του προγράμματος και των μετρήσεων, συγκρίνονται οι στατιστικές τους παράμετροι και παρατίθενται τα πρώτα συμπεράσματα.
- Στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο πραγματοποιείται μία σύνοψη συμπερασμάτων που καταλήγει ότι το πρόγραμμα MIKE 21 δεν είναι ικανό να προσομοιώσει πλήρως το υδροδυναμικό πεδίο ενός φυσικού κυματοθραύστη ιδιάζουσας γεωμετρίας αλλά είναι ικανό να προβλέψει σωστές μέσες ταχύτητες ανάντη και κατάντη της κατασκευής με σκοπό να ελεγχθεί ο ύφαλος κυματοθραύστης ως βιότοπος.

2. Περί ύφαλων κυματοθραυστών

Κύματα στην επιφάνεια της θάλασσας με περίοδο 2-25 δευτερόλεπτα, παράγονται κυρίως από την επίδραση του ανέμου και είναι ένα θεμελιώδες γνώρισμα όλων των παράκτιων περιοχών του κόσμου. Άλλα γενεσιουργά αίτια ταλάντωσης της ελεύθερης επιφάνειας είναι οι σεισμοί, οι παλίρροιες και οι γρήγορες μεταβολές της ατμοσφαιρικής πίεσεως. Στην παρούσα εργασία οι κυματισμοί που μελετώνται και αναφέρονται είναι μόνο ανεμογενείς. Η πρόβλεψη και η εκτίμηση των κυματικών συνθηκών είναι απαραίτητες σε όλες τις ακτομηχανικές μελέτες και οδηγούν συχνά στην ανάγκη κατασκευής ειδικών έργων, όπως είναι οι ύφαλοι κυματοθραύστες.

2.1 Η ανάγκη για ύφαλους κυματοθραύστες

Η παράκτια ζώνη είναι το τμήμα το οποίο έρχεται σε δυναμική επαφή η θάλασσα με την ξηρά, με αποτέλεσμα να λαμβάνουν χώρα έντονα δυναμικά φαινόμενα και διεργασίες όπως η θραύση κυμάτων, αναρρίχηση στην ακτή και τριβή στον πυθμένα. Όλα αυτά έχουν ως αποτέλεσμα την αλλαγή στη γενικότερη μορφολογία (διάβρωση) της παράκτιας ζώνης και τη στερεομεταφορά ιζήματος.

Τα πιο διαδεδομένα έργα προστασίας του μηχανικού απέναντι σε αυτά τα φαινόμενα μέχρι πρόσφατα ήταν οι έξαλλοι κυματοθραύστες. Πρόκειται ουσιαστικά για ογκώδη κατασκευές των οποίων η στέψη ξεπερνά την επιφάνεια της θάλασσας, ικανές να αντέξουν ακραίους κυματισμούς και να καταστρέψουν κατά το μέγιστο τη κυματική ενέργεια στην υπήνεμη πλευρά τους. Αν και οι έξαλλοι κυματοθραύστες είναι τελείως αποτελεσματικοί ως προς το σκοπό τους, δεν πετυχαίνουν την επιθυμητή επανακυκλοφορία του νερού στην προστατευόμενη περιοχή και δεν εξασφαλίζουν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει το θαλάσσιο νερό της εν λόγω περιοχής.

Σήμερα η αναγνώριση της σημασίας των παράκτιων ζωνών ως σημαντικού, μη ανανεώσιμου, περιβαλλοντικού και οικονομικού πόρου, οδηγεί κατ' ανάγκη στην αναζήτηση νέων μεθόδων συνολικής διαχείρισης και κατασκευής νέων τύπων έργων.

Εναλλακτικά δηλαδή έργα τα οποία επηρεάζουν κατά το ελάχιστο τα φυσικά οικοσυστήματα, τους βιότοπους και πρωτίστως την αισθητική και την ποιοτική αξία της παράκτιας ζώνης. Τέτοια έργα προστασίας του μηχανικού είναι οι ύφαλοι κυματοθραύστες των οποίων η στέψη είναι χαμηλότερη από τη μέση στάθμη του ύδατος. Οι κατασκευές αυτές μειώνουν κατά ένα αξιόλογο ποσοστό την κυματική ενέργεια και συγχρόνως επιτρέπουν την απρόσκοπτη κυκλοφορία του νερού αφήνοντας τα παράκτια ρεύματα να περάσουν πάνω από την στέψη τους διευκολύνοντας την κυκλοφορία των υδάτων και αποφεύγοντας τη δημιουργία λιμναζόντων νερών. Συχνά δε, χρησιμοποιούνται ως έργα πρωτοβάθμιας προστασίας μιας περιοχής, μειώνοντας την ενέργεια ακραίων κυματικών φαινομένων πριν αυτά «φτάσουν» στα κύρια έργα προστασίας.

Τα μειονεκτήματα τους είναι τα εξής:

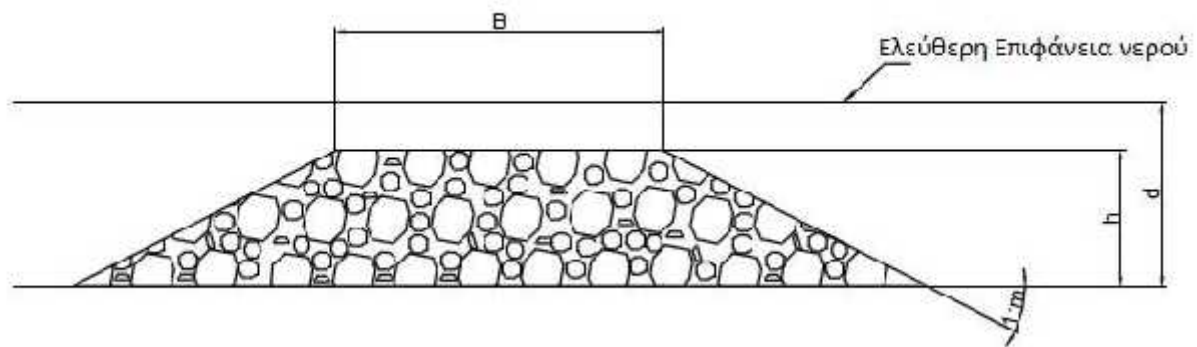
- Οι πολύ χαμηλές στέψεις μπορεί να μη μειώνουν ικανοποιητικά την κυματική ενέργεια συνεπώς να μην αποτελούν επαρκή μέτρο για προστασία έναντι διάβρωσης, ειδικά σε περιοχές με υψηλό υδροδυναμικό καθεστώς και με μεγάλο εύρος παλίρροιας.
- Οι Υ.Κ. μπορεί να εμποδίζουν την αναμόρφωση (εξυγίανση) της ακτής κατά τη διάρκεια επικράτησης υδροδυναμικών και κυματικών συνθηκών που ευνοούν την τροφοδότηση της ακτής με ίζημα.
- Λόγω συγκεκριμένων υδροδυναμικών συνθηκών ή απότομων αλλαγών τους μπορεί να προκληθούν ρεύματα τέτοια που να προκαλούν τελικά, αντί να αποσοβούν, την παράκτια διάβρωση. Οι αποσπασμένοι Υ.Κ. μπορεί να δημιουργήσουν πεδία υψηλών ταχυτήτων ειδικά στα ακρομώλια ή ανάμεσα σε δύο τέτοιες κατασκευές και έτσι να προκαλέσουν υποσκαφή των έργων ή περεταίρω διάβρωση.
- Μπορεί να αποτελούν δυνητικό κίνδυνο για την ναυσιπλοΐα ή την κυκλοφορία θαλάσσιων οχημάτων λόγω του ότι δεν είναι ιδιαίτερα ορατοί ενώ αναπτύσσονται μεγάλες ταχύτητες πάνω από την στέψη της κατασκευής.
- Η επιθεώρηση της ευστάθειας και στην αρτιότητα της κατασκευής είναι σχετικά δύσκολη αφού ολόκληρο το έργο βρίσκεται κάτω από την στάθμη της θαλάσσιας επιφάνειας.
- Η κατασκευή μπορεί να είναι οικονομικά επαχθής λόγω της αναγκαίας χρήσης φορηγίδων και πλεούμενων μηχανημάτων κατασκευής.

Αν και η έρευνα έχει προχωρήσει αρκετά, υπάρχουν ακόμα πολλές αμφιβολίες για τους σχεδιαστικούς κανονισμούς και τις διαδικασίες κατασκευής τέτοιων έργων. Οι Υ.Κ είναι ιδιαίτερα ακριβά έργα προστασίας καθώς το έργο είναι εξ ολοκλήρου κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, κάτι που καθιστά την επίβλεψη και την ευστάθειά του ιδιαίτερα

δύσκολη υπόθεση και η κατασκευή τους απαιτεί πλεούμενα μηχανήματα και χρήση φορηγίδων.

2.2 Γεωμετρία ύφαλου κυματοθραύστη

Η γεωμετρία ενός ύφαλου κυματοθραύστη προσδιορίζεται από τα εξής χαρακτηριστικά μεγέθη όπως φαίνονται και στην εικόνα:



Εικόνα 2.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ύφαλου κυματοθραύστη

$h(m)$: το ύψος του κυματοθραύστη στον άξονα του

$d(m)$: το βάθος του νερού στην προσήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη

$B (m)$: το πλάτος στέψης του κυματοθραύστη

$F (m)$: το ελεύθερο ύψος ή ελεύθερο περιθώριο του έργου που ορίζεται ως η διαφορά του βάθους νερού στον προσήνεμο πόδα και του ύψους του κυματοθραύστη, δηλ. $d-h$.

$\tan\theta$: κλίση προσήνεμου πρανούς

$\tan\beta$: κλίση υπήνεμου πρανούς

2.3 Κυματική μετάδοση και παράμετροι επιρροής

Ένας ύφαλος κυματοθραύστης κατασκευάζεται με σκοπό να μειώσει την κυματική ενέργεια κατά την υπήνεμη πλευρά. Αυτό επιτυγχάνεται κατά την αλληλεπίδραση του έργου με τα κύματα και πιο συγκεκριμένα με τα φαινόμενα τριβής, της ανάκλασης και της θραύσης των κυματισμών.

Η απόδοση του έργου σχετίζεται με την κυματική ενέργεια που μεταδίδεται στην υπήνεμη πλευρά και δίνεται από το συντελεστή μετάδοσης K_T :

$$K_T = \frac{H}{H}$$

όπου:

H_t (m): ύψος μεταδιδόμενου κυματισμού στην υπήνεμη πλευρά

H_i (m): ύψος μεταδιδόμενου κυματισμού στην προσήνεμη πλευρά

Υπάρχουν αρκετοί παράμετροι που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα του κυματοθραύστη και έχουν να κάνουν με το σχεδιασμό του όπως:

- ο βαθμός βύθισης d/h
- το σχετικό ύψος της κατασκευής h/d
- το σχετικό ελεύθερο ύψος της κατασκευής F/H_i
- το σχετικό πλάτος στέψης B/H_i
- το σχετικό ύψος κύματος H_i/d

Το πιο σημαντικό μέγεθος αποτελεί το **επερχόμενο ύψος** κύματος H_i . Στην περίπτωση σύνθετων κυματισμών εκφράζεται ως το σημαντικό ύψος κύματος H_s (significant wave height). Προφανώς τα μικρά σε ύψος κύματα περνούν πιο εύκολα πάνω από τους Υ.Κ. και δίνουν μεγαλύτερους συντελεστές μετάδοσης από ότι τα υψηλά κύματα. Εκτός όμως του άμεσου καθορισμού του συντελεστή κυματικής μετάδοσης K_t το μέγεθος του ύψους του επερχόμενου κύματος H_i καθορίζει αν άλλα συναφή μεγέθη, όπως η διάμετρος των ογκολίθων θωράκισης D_{n50} , το ελεύθερο ύψος θάλασσας F πάνω από τη στέψη του Υ.Κ., το πλάτος στέψης B , έχουν μεγάλες ή μικρές τιμές.

Προηγούμενες μελέτες (όπως το DELOS) αναδεικνύουν το ρόλο που παίζει το **πλάτος στέψης B** στην απόδοση της κυματικής διάδοσης. Έχει βρεθεί ότι ένα ευρύτερο πλάτος στέψης B μειώνει την κυματική μετάδοση (άρα και το K_t) και συγκεκριμένα για τις αμιγώς ύφαλες κατασκευές, όσο αυξάνει το σχετικό πλάτος στέψης B/H_i , τόσο τα κύματα αναγκάζονται να θραυτούν με συνέπεια περισσότερη ενέργεια να καταστρέφεται πάνω στη στέψη.

Το **προσήνεμο πρανές** του κυματοθραύστη επηρεάζει τη μετάδοση του κύματος πάνω από αυτόν, αφού καθορίζει τον τύπο της θραύσης του κύματος ανάλογα με την κλίση του (όπως ορίσαμε και πιο πάνω tan θ : κλίση προσήνεμου πρανούς μπαίνει στον υπολογισμό του αριθμού Iribaren ξ). Γενικά σε ηπιότερες κλίσεις πρανών παρατηρείται μεγαλύτερη απώλεια κυματικής ενέργειας λόγω θραύσης από ότι σε πιο απότομες. Το φαινόμενο αυτό γίνεται εντονότερο όσο πιο κοντά στη θαλάσσια επιφάνεια είναι η στέψη του έργου.

Αντίστοιχα το **υπήνεμο πρανές** του κυματοθραύστη, όσο πιο ήπια κλίση έχει, τόσο συνεισφέρει στην περαιτέρω απώλεια της ενέργειας, λόγω τριβής στον τραχύ πυθμένα κυρίως, του μεταδιδόμενου κύματος, ενώ όσο πιο απότομο είναι ευνοεί την απελευθέρωση υψίσυχνων βραχύτερων δεύτερης τάξης κυματισμών με μικρότερες περιόδους από ότι το επερχόμενο κύμα στην ανάντη παρειά.

Θα πρέπει βέβαια να αναφερθούν και οι έννοιες της **τραχύτητας** της επιφάνειας και της **διαπερατότητας** (surface roughness and permeability) που είναι άμεσα συνδεδεμένες με την ονομαστική διάμετρο D_{n50} των ογκολίθων θωράκισης. Όσο μεγαλύτερη είναι η τελευταία τόσο πιο τραχεία και διαπερατή είναι η κατασκευή με αποτέλεσμα στις περισσότερες περιπτώσεις η απώλεια ενέργειας να είναι μεγαλύτερη. Ανάλογα με το τύπο της κατασκευής τα δύο αυτά μεγέθη παίζουν αντίστοιχο ρόλο. Έχει παρατηρηθεί ότι στα έργα χαμηλής στέψης (τα οποία θα αναλυθούν παρακάτω) η τραχύτητα και η διαπερατότητα επιδρούν ανταγωνιστικά στα φαινόμενα της υπερπήδησης και

αναρρίχησης, ενώ στα ύφαλα έργα φαίνεται να επηρεάζουν εξίσου λόγω τριβής στον πυθμένα και τυρβώδους διήθησης στην πορώδη στρώση θωράκισης.

Όμως γενικά η κρισιμότερη παράμετρος που επηρεάζει το συντελεστή μετάδοσης άρα και την απόδοση της κατασκευής είναι το **σχετικό ελεύθερο ύψος της κατασκευής F/H_i** . Αυτό συμβαίνει γιατί η παράμετρος αυτή ρυθμίζει πλήρως την κυματική ενέργεια που θα επιτραπεί να περάσει στην υπήνεμη πλευρά λόγω της θραύσης και της ρήχωσης του κυματισμού.

2.4 Τύποι κατασκευών

Κατασκευές χαμηλής στέψης (Low-Crested Structures, LCS) ονομάζονται αυτές οι οποίες έχουν τη στέψη τους κοντά (λίγο πάνω, λίγο κάτω ή ακριβώς) στη Μέση Στάθμη Ηρεμίας (ΜΣΗ). Βασικός στόχος των κατασκευών χαμηλής στέψης και των Υ.Κ. είναι να προφέρουν ηρεμία στο κυματικό πεδίο καθαρισμένων περιοχών για την προστασία είτε φυσικών ακτογραμμών είτε διαδικασιών φορτοεκφόρτωσης σε λιμενικές εγκαταστάσεις. Οι λειτουργικές απαιτήσεις διαφόρων έργων παρόλα αυτά δεν καθιστούν απαραίτητη την πλήρη απόσβεση της κυματικής ενέργειας. Εφόσον δε ο όγκος και το ύψος της κατασκευής είναι ανάλογος τους κόστους της, τότε αξίζει να προσπαθήσει κανείς να βρει το ελάχιστο βέλτιστο ύψος στέψης της κατασκευής (minimum best-fit crest height), ώστε να παρέχει ικανή προστασία στην παράκτια ζώνη. Οι έξαλλοι κυματοθραύστες χαμηλής στέψης (sub-aerial LCS) συνήθως κατασκευάζονται σε ένα ύψος κοντά στην στάθμη ανώτατης πλήμμης και έτσι τείνουν να γίνονται ξεκάθαρα εμφανείς κατά την διάρκεια αμπώτιδας, πολύ δε μάλλον κατά την φάση της κατωτάτης ρηχίας. Διαφέρουν δηλαδή με του ύφαλους κυματοθραύστες (submerged breakwaters) ακριβώς στο ότι οι δεύτεροι είναι μονίμως βυθισμένοι άσχετα από τις παλιρροιακές συνθήκες. Υπάρχει επίσης ακόμα ένας τύπος ύφαλής κατασκευής, ο τεχνητός ύφαλος (reef breakwater), με τον οποίο εννοούμε μια κατασκευή σε αρκετά μμεγαλύτερο βάθος που εξυπηρετεί πρωτίστως περιβαλλοντικούς λόγους και δεν παρουσιάζει ουσιαστική αποτελεσματικότητα αναφορικά με τη μείωση της κυματικής ενέργειας. Σύμφωνα με τα παραπάνω γίνεται κατανοητή η ανάγκη να ξεκαθαριστούν οι διάφορες έννοιες και η ουσία των συναφών ειδών κατασκευών. Έτσι οι κυματοθραύστες χαμηλής στέψης μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες:

- Δυναμικά ευσταθείς ύφαλοι κυματοθραύστες (reef breakwaters)

- Στατικά ευσταθείς κυματοθραύστες χαμηλής στέψης με ύψος στέψης πάνω από την ΜΣΗ (LCS)
- Στατικά ευσταθείς ύφαλοι (ή βυθισμένοι) κυματοθραύστες (submerged breakwaters)

i. Ονομάζονται και τεχνητοί ύφαλοι καθώς αποτελούν ουσιαστικά έναν χαμηλής στέψης ομογενή σωρό από ογκολίθους χωρίς διαχωρισμένες στρώσεις που να εξασφαλίζουν λειτουργία φίλτρου ή πυρήνα, με αποτέλεσμα να επιτρέπει την αναδιαμόρφωση της γεωμετρίας της κατασκευής κάτω από διάφορες κυματικές συνθήκες

ii. Αποτελούν κατασκευές τις οποίες υπερπηδούν τα επερχόμενα κύματα οριακά ή καθόλου αλλά παρουσιάζουν ευστάθεια λόγω διάταξης των στρώσεων θωράκισης και πυρήνα από τους τεχνητούς υφάλους

iii. Αποτελούν κατασκευές οι οποίες βρίσκονται μονίμως κάτω από την ΜΣΗ αλλά και την κατωτάτη ρηχία. Όλα τα κύματα τις υπερπηδούν ή περνούν από πάνω τους. Η ευστάθεια τους αυξάνεται όσο το ύψος της κατασκευής μειώνεται

Ειδικό τύπο τέτοιου είδους κατασκευής αποτελεί ο τύπος Reef-ball (HSAR) προτεινόμενος από τους Armonio and Hall (2002), ο οποίος είναι ένας ειδικά διαμορφωμένος διάτρητος κοίλος ημισφαιρικός τεχνητός ύφαλος χρησιμοποιούμενος από μόνος ή ως μονάδα κατασκευής Υ.Κ. Σκοπός του είναι η ταυτόχρονη προστασία παράκτιων περιοχών από την κυματική όχληση και η δημιουργία κατάλληλου φιλικού χώρου για την ανάπτυξη πρωτότυπων βιοκοινωνιών μέσα στο σώμα του έργου προστασίας, καθώς οι κατασκευές από Reef-ball (Εικόνα 2.1) παρουσιάζουν μεγάλη διαπερατότητα.

Δεν είναι όμως όλες οι χαμηλής στέψης κατασκευές (LCS), τύπου πρισματικής λιθορριπής. Μερικές φορές επιλέγονται κατασκευές με λεία επιφάνεια θωράκισης, στεγανές και αδιαπέρατες, οι οποίες π.χ. καλύπτονται από ασφαλτικές στρώσεις πλήρωσης κενών ή στις οποίες η θωράκισή τους γίνεται με έτοιμα μπλόκια από σκυρόδεμα όπως οι κρηπιδότοιχοι σε παράκτια έργα θωράκισης. Πρώτα από όλα η κυματική μετάδοση είναι μεγαλύτερη για το ίδιο ύψος στέψης σε σχέση με τις κατασκευές από λιθορριπή, απλά και μονό καθώς δεν υπάρχει απόσβεση της κυματικής ενεργείας λόγω τριβής και διήθησης μέσω του πορώδους σώματος της κατασκευής. Κατά δεύτερο λόγο προκύπτει μικρότερη ή καθόλου επίδραση του πλάτους στέψης της κατασκευής στην εν λόγω απόσβεση της κυματικής ενέργειας, έκτος ίσως από τις πλήρως βυθισμένες (ύφαλες) κατασκευές με πολύ όμως ευρεία στέψη, ώστε να προκληθεί σίγουρα έντονη θραύση του επερχόμενου κυματισμού πάνω από

αυτές. Αυτή όμως η περίπτωση δεν συναντάται συχνά ως σχεδιαστική λύση καθώς τα ασφάλτινα και σκυροδεμάτινα κρηπιδώματα κατασκευάζονται εν ξηρώ και όχι μέσα στην θάλασσα.

2.5 Φαινόμενα γύρω από ύφαλο κυματοθραύστη

Ο λειτουργικός σχεδιασμός ύφαλων κυματοθραυστών απαιτεί ακριβείς προβλέψεις της κυματικής μετάδοσης, του ύψους κύματος και της αναμενόμενης ανύψωσης της στάθμης της θάλασσας στην προστατευόμενη περιοχή. Η κίνηση θαλάσσιου ρέματος στο οποίο παρεμβάλλεται ύφαλη κατασκευή προκαλεί την εμφάνιση ιδιαίτερα υψηλών ταχυτήτων ροής πάνω από τη στέψη της κατασκευής. Τα φαινόμενα ερμηνεύονται από την παρουσία μειωμένης υγρής διατομής πάνω από την κατασκευή σε συνδυασμό με την αύξηση της ανάντη στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας. Το μέγεθος των ταχυτήτων που δύναται να αναπτυχθούν υπό αυτές τις συνθήκες ροής, εγκυμονεί κινδύνους για τη ναυσιπλοΐα, την κολύμβηση, αλλά και την ευστάθεια της θωράκισης της στέψης του έργου.

Η παρατήρηση της εξέλιξης της κατανομής της ταχύτητας του ρεύματος από τα ανάντη προς τα κατάντη του κυματοθραύστη προδίδει την παροδικότητα των συντελούμενων μεταβολών στη μορφή της και την τάση να επανέλθει στην αρχική της μορφή.

Κατάντη της κατασκευής του ύφαλου κυματοθραύστη παρατηρείται η δημιουργία περιοχής στροβιλισμού της ροής. Η εμφάνιση της ζώνης αυτής εντοπίζεται στο κατάντη πρानές της θωράκισης του κυματοθραύστη. Η διαδικασία στροβιλισμού της ροής στην περιοχή αυτή, εγκυμονεί τον κίνδυνο της υποσκαφής του πυθμένα στον κατάντη πόδα της θωράκισης του κυματοθραύστη με φυσικό επακόλουθο την υποχώρηση τμήματος της θωράκισης. Παρόμοιες συνθήκες πιθανής αστοχίας της κατασκευής ισχύουν στην κορυφή του ανάντη πρானούς του κυματοθραύστη. Πρόκειται για τη ζώνη εισόδου του ρευστού στην κατασκευή και ο κίνδυνος αστοχίας εστιάζεται στην περιοχή όπου παρουσιάζεται η αιχμή της εισερχόμενης παροχής. Και σε αυτή την περίπτωση, η ενδεχόμενη ενίσχυση αφορά τη θωράκιση της κατασκευής.

Συνοπτικά, αν το ύψος της στέψης είναι χαμηλό η κυματική ενέργεια διέρχεται πάνω από την ύφαλη κατασκευή με αποτέλεσμα αφενός η θωράκιση του προσήνεμου πρானούς να είναι με ελαφρύτερους άρα και μικρότερους ογκόλιθους σε σύγκριση με κυματοθραύστες

που επιτρέπουν την υπερπήδηση, και αφετέρου η θωράκιση της στέψης και της υπήνεμης πλευράς να είναι με μεγαλύτερους ογκόλιθους ικανούς να αντιμετωπίσουν τις δυνάμεις που αναπτύσσονται λόγω υπερπήδησης του κυματισμού. Συνηθέστερα εφαρμόζεται η ίδια θωράκιση ανάντη, πάνω και κατόπι της στέψης του Υ.Κ. Οι σχεδιαστικοί κανονισμοί σχετικά με τη θωράκιση των Υ.Κ διαφέρουν για κατασκευές από λιθορριπή με φυσικούς ογκόλιθους και για μονάδες θωράκισης από σκυρόδεμα.

2.6 Οι ύφαλοι κυματοθραύστες ως τεχνητοί οικότοποι

Η αστικοποίηση της παράκτιας ζώνης έχει ως αποτέλεσμα τις τελευταίες δεκαετίες να πραγματοποιούνται πληθώρα έργων ακτομηχανικής, με κύριο στόχο τον έλεγχο της διάβρωσης των ακτών. Ωστόσο η παρουσία τέτοιων έργων, προκαλεί σε ορισμένες περιπτώσεις υποβάθμιση του θαλάσσιου περιβάλλοντος, καθώς υποβοηθά τη ρύπανση των υδάτων και την καταστροφή των οικοτόπων. Μια από τις προσπάθειες για την αντιμετώπιση της υποβάθμισης του θαλάσσιου περιβάλλοντος και περαιτέρω της μείωσης της βιοποικιλότητας, συνιστά η κατασκευή και τοποθέτηση στοιχείων (τεχνητοί ύφαλοι) στη θάλασσα προκειμένου να ελκύσουν τους οργανισμούς και να εμπλουτίσουν το θαλάσσιο περιβάλλον. Προς την κατεύθυνση αυτή, αντικείμενο έρευνας των μηχανικών είναι το ενδεχόμενο της χρήσης βυθισμένου κυματοθραύστη ως τεχνητού οικοτόπου για τους οργανισμούς της παράκτιας ζώνης. Η έρευνα θα πρέπει να στοχεύει στην πρόβλεψη στοιχείων των κατασκευών που να συντελέσουν στην ανάπτυξη βιοκοινωνιών σε αυτές, με επιθυμητό αποτέλεσμα τη συμβολή τους στον περιορισμό συγκεκριμένων ανθρωπογενών δραστηριοτήτων που έχουν αρνητικές επιδράσεις στα παράκτια οικοσυστήματα. Παρότι έχει πραγματοποιηθεί πλήθος μελετών που αφορούν στο σχεδιασμό έργων ακτομηχανικής, λιγιστές είναι αυτές που περιλαμβάνουν και περιβαλλοντικούς όρους. Παρά το γεγονός αυτό, συμπεράσματα έχουν εξαχθεί για τους παράγοντες που έχουν να κάνουν με τις παράκτιες κατασκευές και επηρεάζουν τα θαλάσσια οικοσυστήματα. Τέτοιοι είναι:

- Ο προσανατολισμός του υποστρώματος. Οι παράκτιες κατασκευές αποτελούνται από κάθετες επιφάνειες με σχετικά μεγάλες κλίσεις σε αντίθεση με τις φυσικές ακτές, μειώνοντας έτσι τη διαθέσιμη επιφάνεια εποίκησης.
- Η διαφορετική υδροδυναμική. Η περισσότερο αντιπροσωπευτική παράμετρος εξ αυτών που διαμορφώνουν τις κατάλληλες συνθήκες για τη διαβίωση θαλάσσιων οργανισμών στις βυθισμένες κατασκευές, θεωρείται η επικρατούσα τιμή της μέγιστης ταχύτητας των ρευστών σωματιδίων

- Η αυξημένη τύρβη. Σε σχετικά υψηλά επίπεδα τύρβης λαμβάνει χώρα παραμόρφωση των μηχανισμών τροφοληψίας με αποτέλεσμα την μείωση της ενεργής επιφάνειας σύλληψης

2.7 Μελέτες για το πεδίο ταχυτήτων γύρω από ύφαλο κυματοθραύστη

Ο έως τώρα σχεδιασμός των ύφαλων διαπερατών κατασκευών αφορούσε από μηχανικής απόψεως αποκλειστικά την προστασία της ακτής. Στη σύγχρονη εποχή όμως, όπου η ανάγκη για περιβαλλοντική ευαισθητοποίηση καθίσταται ολοένα και πιο επιτακτική, ο ρόλος του μηχανικού στο σχεδιασμό τέτοιων κατασκευών γίνεται πιο σύνθετος. Ζητούμενο των τελευταίων ετών αποτελεί ο σχεδιασμός ύφαλων κατασκευών που θα εξυπηρετούν διπλό σκοπό: α) την προστασία των ακτών και β) την ελάχιστη δυνατή υποβάθμιση του θαλάσσιου περιβάλλοντος αν όχι τον εμπλουτισμό του.

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό και από τα προηγούμενα, η σημασία των ύφαλων διαπερατών κατασκευών αυξάνεται σταθερά λόγω των περιβαλλοντικών πλεονεκτημάτων τους έναντι των έξαλλων κατασκευών. Μια βασική παράμετρος για να αξιολογηθεί κατά πόσο μπορεί να αποτελέσουν τοπικό οικότοπο είναι η ταχύτητα των ρευστών σωματιδίων του νερού γύρω από την κατασκευή.

Το υδροδυναμικό πεδίο μιας ύφαλης κατασκευής αποτελεί πεδίο έρευνας σε εξέλιξη και σε αυτό συνηγορεί ο περιορισμένος αριθμός σχετικών άρθρων στη διεθνή βιβλιογραφία. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι πολύ σημαντικό ρόλο στα φαινόμενα που διαδραματίζονται γύρω από την κατασκευή παίζει η διαπερατότητα αυτής. Το πορώδες του κυματοθραύστη επηρεάζει, πέρα από το συντελεστή μετάδοσης, το υδροδυναμικό πεδίο που δημιουργείται στο εσωτερικό του και είναι υπεύθυνο για την δυνατότητα ή μη ανάπτυξης ζωής.

Παρακάτω ακολουθεί μια σύντομη αλλά περιεκτική καταγραφή των εργασιών, μελετών και διατριβών που έχουν υλοποιηθεί προσφάτως στο συγκεκριμένο κομμάτι της διεθνούς έρευνας, αυτό του υδροδυναμικού πεδίου ταχυτήτων στο εσωτερικό ενός ύφαλου κυματοθραύστη αλλά και γύρω από αυτό. Οι έρευνες βασίζονται κυρίως τόσο σε εμπορικά προγράμματα, όπως MIKE21 και FLOW 3D, όσο και μαθηματικά μοντέλα, όπως Boussinesq,

ή ακόμα και σε εμπειρικές σχέσεις. Για την επαλήθευσή τους έχουν πραγματοποιηθεί πολλές πειραματικές μετρήσεις και έχουν εξαχθεί τα αντίστοιχα αποτελέσματα.

2.7.1 Διεθνή βιβλιογραφία

Οι Cruz et al. (1997) παρήγαγαν ένα σετ από δισδιάστατο μοντέλο Boussinesq (2D) πάνω από πορώδη πυθμένα αυθαίρετου πάχους και δοκίμασαν την εφαρμογή του στην διάθλαση περίθλαση και ανάκλαση γύρω από έναν ύφαλο κυματοθραύστη με μικρό άνοιγμα. Η μελέτη της συμπεριφοράς των κυματοθραυστών χαμηλής στέψης σε μια διάσταση (1D) έχει μελετηθεί από τους Drei and Lamberti, (1999), Yamashiro et al., (1999), Kriezis et al., (1999) και Gironella and Sanchez-Arcilla (1999). Υπάρχουν λιγότερες έρευνες για πειράματα σε τρισδιάστατη μορφή (3D) όπως αυτές των Charman et al., (1999), Ilic et al., (1999). Πρόσφατες πειραματικές μετρήσεις έγιναν στο πρόγραμμα DELOS (DELOS project) που χρησιμοποιήθηκαν για την επιβεβαίωση δύο προσεγγίσεων για την προσομοίωση των κυμάτων και των ρευμάτων στην περιοχή των βυθισμένων κυματοθραυστών. Πρόσφατα οι Hsiao et al. (2002) παρουσίασαν ένα πλήρως μη γραμμικό δισδιάστατο μοντέλο Boussinesq (2DH-Boussinesq type model) για διάδοση κυματισμών πάνω από διαπερατό πυθμένα και έγινε σύγκριση με πειραματικές μετρήσεις για γραμμικούς κυματισμούς πάνω από βυθισμένο κυματοθραύστη.

Επίσης, οι Cox et al., (1995), Cox and Kobayashi (1997) δημιούργησαν ένα ολοκληρωμένο στο βάθος μοντέλο επίλυσης κυματισμών. Οι Ting and Kirby (1994) πραγματοποίησαν πειράματα οριζόντιων και κατακόρυφων τροχιακών ταχυτήτων σωματιδίων του νερού στη ζώνη διαβροχής. Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις τα πειράματα και τα αριθμητικά μοντέλα που έχουν παραχθεί αφορούν σε θέσεις τόσο στην ζώνη διαβροχής για θραυόμενους κυματισμούς όσο και στα κατάντη της κατασκευής (DELOS project, 2003). Επίσης οι Deigaard et al., (1986) και Christensen et al., (2003) πραγματοποίησαν πειραματικές μετρήσεις τροχιακών ταχυτήτων των υγρών μορίων στη ζώνη θραύση σε ακτή με ομαλή κλίση. Οι Garcia et al. (2004) στα πλαίσια επίσης του ερευνητικού προγράμματος DELOS πραγματοποίησαν μετρήσεις ταχυτήτων στην περιοχή γύρω από βυθισμένο κυματοθραύστη όπως και τελευταία οι Huang et al. (2011).

2.7.2 Ελληνική βιβλιογραφία

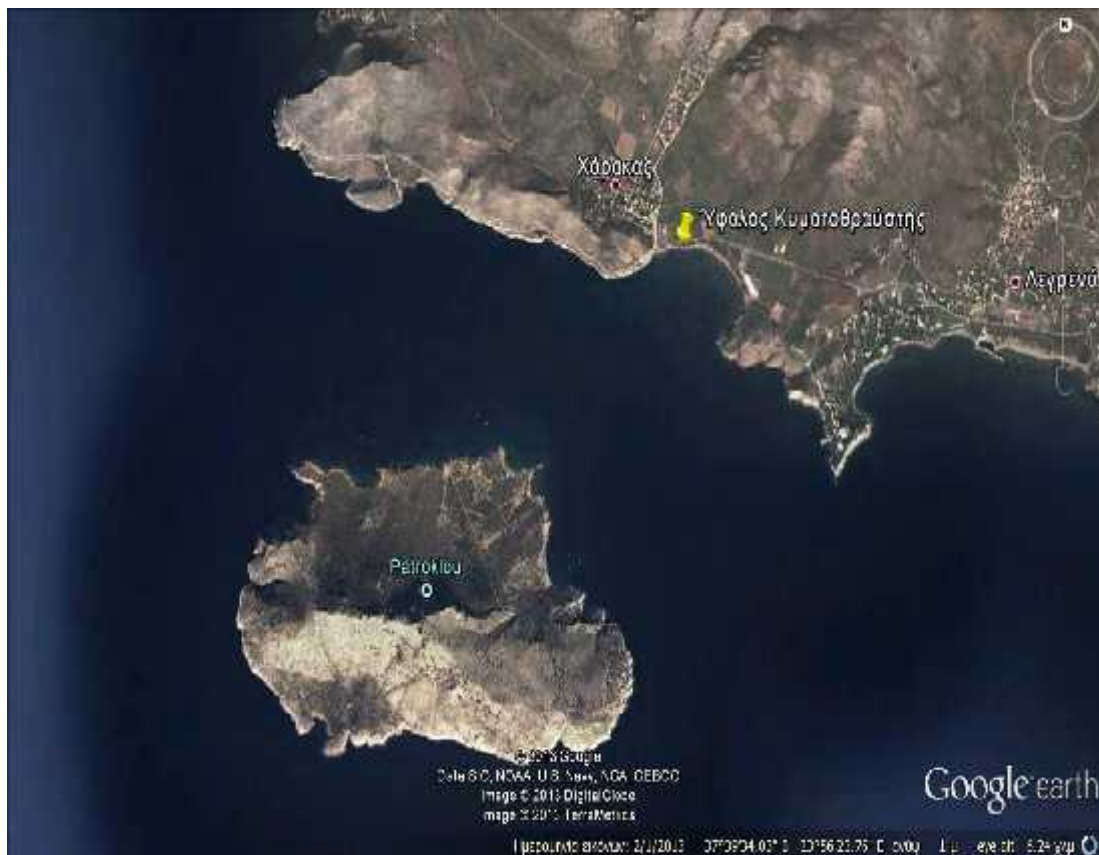
Ο Α. Καψάλης (2007) μελέτησε το υδροδυναμικό πεδίο στο εσωτερικό ύφαλής διαπερατής κατασκευής για ρεύματα χρησιμοποιώντας το εμπορικό πρόγραμμα FLOW-3D. Συγκεκριμένα, Η έρευνα του πραγματοποιήθηκε μέσω προσομοιώματων, τα οποία επιλύθηκαν από εμπορικό υπολογιστικό πρόγραμμα CFD μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών. Αρχικά, το εν λόγω πρόγραμμα (FLOW- 3D) εφαρμόζεται σε πειραματικά αποτελέσματα ροής γύρω από ύφαλη διαπερατή κατασκευή, τα στοιχεία των οποίων αντλούνται από τη βιβλιογραφία. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν την αποτελεσματικότητα του προγράμματος στην επίλυση ροών πλησίον ύφαλής διαπερατής κατασκευής. Εν συνεχεία, η έρευνα επεκτείνεται στο εσωτερικό της κατασκευής. Διερευνάται η μεταβολή των αποτελεσμάτων μεταξύ προσομοιώσεων, που διαφέρουν ως προς τον τρόπο με τον οποίο αποτυπώνεται η πολύπλοκη γεωμετρία του εσωτερικού ύφαλων διαπερατών κατασκευών. Συγκρίνονται προσομοιώματα στα οποία η διαπερατή κατασκευή αποδίδεται λεπτομερώς μέσω ενός συμπλέγματος συμπαγών σφαιρών, με προσομοιώματα προσεγγιστικής θεώρησης του εσωτερικού της κατασκευής, όπως διαλαμβάνονται στο πρόγραμμα. Από την αντιπαράθεση των αποτελεσμάτων αυτών προκύπτει ικανοποιητική αριθμητική και οπτική σύγκλιση των αποτελεσμάτων. Η έρευνα καταλήγει με την εφαρμογή του προγράμματος σε πρόβλημα πραγματικού ύφαλου κυματοθραύστη, ο οποίος φορτίζεται από θαλάσσιο ρεύμα. Παρατηρήθηκε η ανάπτυξη σημαντικών ταχυτήτων ροής πάνω από την κατασκευή με συνεπαγόμενους κινδύνους για την ναυσιπλοΐα, τις σχετικές ανθρώπινες δραστηριότητες αλλά και την ευστάθεια της ίδιας της κατασκευής. Αναδεικνύονται επίσης, δύο περιοχές στον κυματοθραύστη ως πιθανές θέσεις αστοχίας της θωράκισης. Η μεν πρώτη στα ανάντη της κατασκευής λόγω της υψηλής ταχύτητας εισόδου της ροής στο εσωτερικό του κυματοθραύστη, η δε δεύτερη στα κατόντη λόγω του έντονου στροβιλισμού της ροής.

Ο Α. Μεταλληνός (2011), στη μεταπτυχιακή του εργασία ανέπτυξε ένα απλό μοντέλο για την πρόβλεψη της κατακόρυφης κατανομής των οριζοντίων μέγιστων τροχιακών ταχυτήτων στο εσωτερικό διαπερατής ύφαλής κατασκευής για μη θραυόμενους κυματισμούς. Το προφίλ ταχύτητας που προκύπτει βασίζεται σε ένα εκθετικό προφίλ από τη μη γραμμική θεωρία κυματισμών (Dingemans, 1997) στο οποίο στη συνέχεια εισάγεται η μέση, ολοκληρωμένη στο βάθος οριζόντια ταχύτητα η οποία δίνεται από ένα τροποποιημένο μοντέλο Boussinesq λαμβάνοντας υπόψη και το πορώδες της κατασκευής (Avgeris et al., 2004). Για να επαληθευτεί το αριθμητικό μοντέλο έγιναν πειράματα στην διώρυγα δοκιμών «Δημήτρης Κοιλάκος» του Εργαστηρίου Λιμενικών έργων στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο και έγινε σύγκριση με το υπολογιστικό πρόγραμμα FLOW 3D.

3. Περιγραφή μετρήσεων πεδίου

3.1 Γενικά στοιχεία

Η περιοχή η οποία εκλέχτηκε για να γίνουν οι μετρήσεις πεδίου είναι η παραλία του Χάρακα Αττικής. Ο Χάρακας είναι παραθαλάσσιος οικισμός της Ανατολικής Αττικής που είναι χτισμένος στις ακτές του Σαρωνικού, μπροστά από την ομώνυμη παραλία. Βρίσκεται 58 χιλιόμετρα νοτιοανατολικά της Αθήνας, πολύ κοντά στο ακρωτήριο Σούνιο και μαζί με τα Λεγρενά και το Κάτω Σούνιο είναι οι νοτιότεροι οικισμοί του ηπειρωτικού τμήματος του νομού Αττικής. Διοικητικά ανήκει στον δήμο Λαυρεωτικής. Μέχρι το 1952 άνηκε στον δήμο Κερατέας οπότε αποσπάστηκε και εντάχθηκε στον δήμο Λαυρεωτικής.



Εικόνα 3.1 Περιοχή μετρήσεων (Πηγή: Google Earth)

3.1.1 Στοιχεία για την παραλία μετρήσεων



Εικόνα 3.2 Ερασιτεχνικές φωτογραφίες περιοχής μετρήσεων

Η παραλία Χάρακας βρίσκεται απέναντι από τη νησίδα του Πατρόκλου, ή για τους ντόπιους και τους παλιούς Γαϊδουρονήσι, 5 χιλιόμετρα πριν το Σούνιο. Συγκεκριμένα έχει γεωγραφικό πλάτος-Latitude $37^{\circ}40'10.05''\text{B}$ και γεωγραφικό μήκος-Longitude $23^{\circ}58'10.86''\text{A}$. Πρόκειται για μια αμμουδερή παραλία μήκους 850 μέτρων που σχηματίζει με το Βορρά γωνία 100° περίπου και εκτείνεται στον καλά προφυλαγμένο από τους βοριάδες ομώνυμο μικρό ορμίσκο. Η παραλία συγκεντρώνει πολλούς λουόμενους τους καλοκαιρινούς μήνες και έχει ρηχά νερά και ομαλό βάθος.

Στη δυτική πλευρά της εν λόγω παραλίας βρίσκεται ένα φυσικό εμπόδιο στη διάδοση της κυματικής ενέργειας το οποίο μπορεί να θεωρηθεί και να μελετηθεί ως ύφαλος κυματοθραύστης (Εικόνα 3.3).



Εικόνα 3.3 Το υπό εξέταση φυσικό εμπόδιο (Πηγή: Ερασιτεχνική λήψη)

3.1.2 Χαρακτηριστικά του υπό εξέταση φυσικού εμποδίου

Πριν ξεκινήσει η ουσιαστική διαδικασία μέτρησης και καταγραφής των ταχυτήτων στο πεδίο, υπήρξε η ανάγκη γνώσης της επακριβής γεωμετρίας της κατασκευής, καθώς και της τοπικής βαθυμετρίας γύρω από το υπό εξέταση φυσικό εμπόδιο. Έτσι, στη δεύτερη επίσκεψη στην περιοχή μελέτης χρησιμοποιώντας το τοπογραφικό όργανο Leica GS08 plus έγινε αποτύπωση των ορίων του κυματοθραύστη μέχρι το βάθος που επέτρεπαν οι συνθήκες κυματισμού. Η υπόλοιπη γεωμετρία προσδιορίστηκε με τη βοήθεια γεωμορφολογικού χάρτη (1:50000) από τη Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού (ΓΥΣ).

Συγκεκριμένα, ο παρακάτω χάρτης (Εικόνα 3.4) σε ηλεκτρονική μορφή, εισήχθηκε στο πρόγραμμα AutoCAD στις πραγματικές γεωγραφικές συντεταγμένες και σε κλίμακα 1:1.



Εικόνα 3.4 Χάρτης περιοχής Σαρωνικού (Πηγή: ΓΥΣ)

Με τη βοήθεια ορθοφωτογραφιών σε συνδυασμό με τις πληροφορίες του Google Earth προσδιορίστηκε η γεωμετρία του ύφαλου κυματοθραύστη ακόμα και στα μεγάλα βάθη. Έτσι συγκεντρώθηκαν οι γεωγραφικές συντεταγμένες και τα βάθη των ορίων του φυσικού εμποδίου και στη συνέχεια σχεδιάστηκαν οι ισοβαθείς, με τη βοήθεια της εντολής polyline.



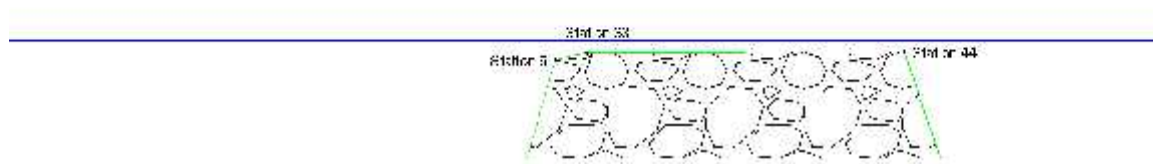
Εικόνα 3.5 Τοπογραφικό ύψαλου κυματοθραύστη

Με την εφαρμογή plist.lsp δημιουργήθηκε ένα αρχείο txt που περιείχε τις συντεταγμένες κάθε ισοβαθούς. Το αρχείο αυτό μετατράπηκε σε αρχείο του Excel, όπου προσδιορίστηκαν κάποια ενδεικτικά σημεία, γύρω από τον κυματοθραύστη καθώς και πάνω στη στέψη του, πάνω στα οποία έγιναν οι αναμενόμενες μετρήσεις ταχυτήτων. Έτσι έγινε εφικτή στο πεδίο η δημιουργία σταθερών σημείων μετρήσεων και συγκεκριμένων διατομών.

Το φυσικό εμπόδιο όπου έγιναν οι μετρήσεις χαρακτηρίζεται από σταθερή γεωμετρία και προσανατολισμό ως προς την ακτή. Συγκεκριμένα, έχει μήκος περίπου πενήντα μέτρα, πλάτος στέψης πέντε μέτρα, ύψος περίπου ένα μέτρο, και είναι κάθετος στη διεύθυνση της ακτής. Όπως φαίνεται και από τη διατομή που ακολουθεί η προσήνεμη και η υπήνεμη πλευρά παρουσιάζουν σχεδόν κατακόρυφη κλίση, γεγονός που μας καθιστά δύσκολη την προσομοίωσή του σε κάποιο υπολογιστικό πρόγραμμα και την εκτίμηση του υδροδυναμικού πεδίου ταχυτήτων λόγω του κυματισμού στην ύφαλη κατασκευή. Αξίζει να σημειωθεί ότι το πρώτο ένα μέτρο του φυσικού εμποδίου τείνει να θεωρηθεί περισσότερο ίσαλο παρά ύφαλο.

ΔΙΑΤΟΜΗ

- έδαφος
- θάλασσα



Εικόνα 3.6 Υπό εξέταση διατομή ύφαλου κυματοθραύστη.



Εικόνα 3.7 Αριστερό πρανές (Ερασιτεχνική λήψη)

3.1.3 Μετεωρολογικά Στοιχεία

Απαραίτητη προϋπόθεση για το σωστό παράκτιο σχεδιασμό και προγραμματισμό αποτελεί η σε βάθος κατανόηση της μετεωρολογίας της υπό μελέτη περιοχής. Τη σημαντικότερη μετεωρολογική παράμετρο ωστόσο αποτελούν τα ανεμολογικά στοιχεία, καθώς οι άνεμοι είναι υπεύθυνοι για τη γένεση των κυματισμών. Κυριότερος παράγοντας στην περίπτωση του ελλαδικού χώρου για τη μελέτη του υδροδυναμικού περιβάλλοντος είναι τα ανεμολογικά δεδομένα αφού η διακύμανση της παλίρροιας είναι μικρή.

Οι μετρήσεις των ταχυτήτων των κυματισμών πραγματοποιήθηκαν τους μήνες Ιούνιο Ιούλιο και Αύγουστο. Όπως θα διαπιστωθεί και στο κεφάλαιο με την παρουσίαση των αποτελεσμάτων παρατηρείται συχνή μεταβολή των επικρατούντων ανέμων ακόμα και κατά τη διάρκεια της ίδιας ημερήσιας μέτρησης. Η μόνη πηγή πληροφόρησης για το ανεμολογικό καθεστώς της κάθε ημέρας ήταν το www.meteo.gr για την ευρύτερη περιοχή του Σουνίου.

3.2 Διαδικασία και προετοιμασία μετρήσεων πεδίου

3.2.1 Όργανα μέτρησης

➤ Στροφική ράβδος

Η στροφική ράβδος χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της ταχύτητας του νερού και αποτελείται από:

- Ένα στροφέιο και ένα ζεύγος αισθητήρων, στο οποίο υπάρχει ένας διακόπτης που ανοίγει και κλείνει καθώς το στροφέιο κινείται λόγω της ροής του νερού.
- Τέσσερα μακρά τμήματα σωλήνων μήκους 250mm, τα οποία ενώνονται και σχηματίζουν μία ράβδο μήκους 1m.
- Τρεις "μετωπικές ράβδους", οι οποίες όταν συνδέονται μεμονωμένα ή σε συνδυασμούς μεταξύ τους, επιτρέπουν την ανύψωση του στροφείου πάνω από την κοίτη του ποταμού σε σταθερά ύψη (250 mm, 125mm και 75mm ή συνδυασμός αυτών).
- Ένα καλώδιο μήκους 1m, το οποίο συνδέεται με έναν μετρητή ροής.

➤ Βασικός ροομετρητής

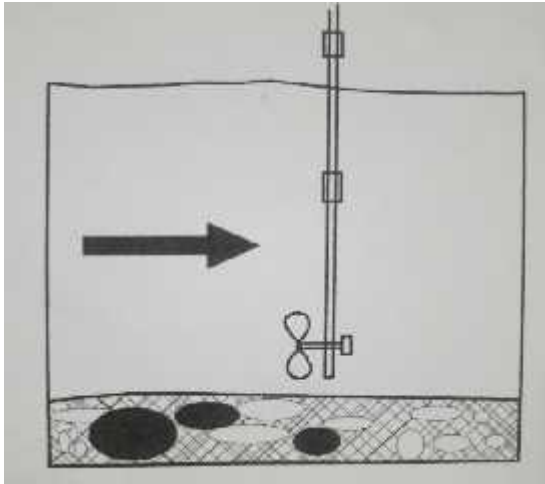
Ο βασικός ροομετρητής είναι μια ηλεκτρονική συσκευή που μετρά σήματα (παλμούς) αναλογικά με την ταχύτητα, τα οποία λαμβάνονται από τη στροφική ράβδο. Ο συνολικός αριθμός μετρήσεων στην μονάδα του χρόνου (συνήθως ένα λεπτό) μπορεί να μετατραπεί σε μονάδες ταχύτητας μέσω ενός διαγράμματος βαθμονόμησης ή χρησιμοποιώντας έναν μαθηματικό τύπο. Η μονάδα έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Έναν μετρητή LCD (Liquid Crystal Display = Οθόνη Υγρού Κρυστάλλου)
- Μια υποδοχή για τη σύνδεση του βύσματος της στροφικής ράβδου
- Έναν διακόπτη τριών θέσεων, οι οποίες είναι:
 1. NEUTRAL (ΟΥΔΕΤΕΡΟ) - Κεντρική θέση
 2. START (ΕΝΑΡΞΗ) - Γυρίστε το διακόπτη προς το κάτω
 3. STOP (ΤΕΛΟΣ) - Γυρίστε το διακόπτη πίσω στην κεντρική θέση
 4. RESET (ΕΠΑΝΕΚΚΙΝΗΣΗ) - Γυρίστε το διακόπτη προς τα πάνω
 5. NEUTRAL (ΟΥΔΕΤΕΡΟ) - Κεντρική θέση και πάλι

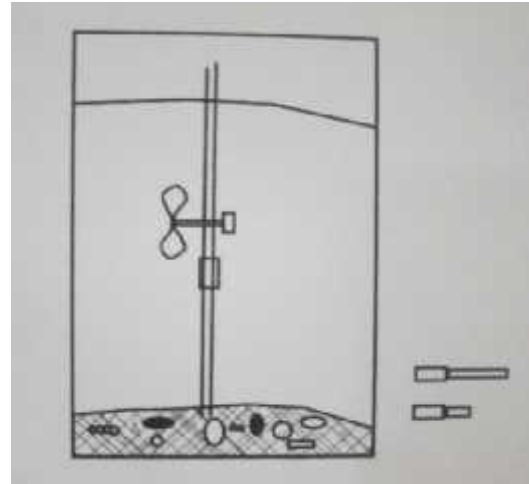
Η εισαγωγή του βύσματος της στροφικής ράβδου στην κατάλληλη υποδοχή, ενεργοποιεί το ροομετρητή. Αμέσως μετά την εισαγωγή του, η ένδειξη του μετρητή LCD πρέπει να είναι μηδέν. Σε περίπτωση που είναι μεγαλύτερη του μηδενός, ο διακόπτης πρέπει να μετακινηθεί προς τα επάνω και να στραφεί η στροφική ράβδος κλασματικά μέχρι να κλείσει το ρελέ και να εμφανιστεί η ένδειξη μηδέν. Έπειτα ο διακόπτης θα μετακινηθεί στην ουδέτερη θέση (NEUTRAL).

ΟΔΗΓΙΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΤΡΟΦΙΚΗΣ ΡΑΒΔΟΥ ΜΕ ΒΑΣΙΚΟ ΡΟΟΜΕΤΡΗΤΗ

Οι ράβδοι της στροφικής μονάδας ενώνονται και ο στροφέας στρέφεται προς τη ροή του διερχόμενου νερού στο απαιτούμενο βάθος (Εικόνα 3.8). Για την ανύψωση του στροφέα πάνω από τη στάθμη της θάλασσας, εάν χρειάζεται, χρησιμοποιείται μία ή περισσότερες μετωπικές ράβδοι (Εικόνα 3.9).



Εικόνα 3.8 Στροφική ράβδος μέσα στο νερό



Εικόνα 3.9 Χρήση μετωπικής ράβδου

Όταν ο στροφέας περιστρέφεται στο κατάλληλο βάθος (το οποίο εξαρτάται από το σκοπό των μετρήσεων σας), ο διακόπτης μετακινείται προς τα κάτω στη θέση START (ΕΝΑΡΞΗ) και κρατείται για 60 δευτερόλεπτα (προτείνεται να χρησιμοποιηθεί χρονόμετρο!). Η μέτρηση σταματά, μετακινώντας το διακόπτη στην κεντρική θέση (NEUTRAL) την κατάλληλη στιγμή και σημειώνεται η αναγραφόμενη ένδειξη.

Η ταχύτητα της ροής προσδιορίζεται μέσω του δοσμένου γραφήματος. Εναλλακτικά, η ταχύτητα του νερού (V) σε μονάδες m/s , υπολογίζεται από τον μαθηματικό τύπο που δίνεται στην επόμενη παράγραφο.

Ο μετρητής μηδενίζεται, μετακινώντας το διακόπτη στην επάνω θέση (στρέφεται ελαφρώς το στροφέο, εάν χρειάζεται, ώστε να κλείσει το ρελέ) και έπειτα επιστρέφοντας τον στην κεντρική θέση (NEUTRAL) για να είναι έτοιμος για την επόμενη μέτρηση.

ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΣΤΡΟΦΙΚΗΣ ΡΑΒΔΟΥ

Η στροφική ράβδος έχει βαθμονομηθεί προσεκτικά κάτω από εργαστηριακές συνθήκες. Ο μαθηματικός τύπος και το γράφημα, τα οποία καλούμε Δεδομένα Βαθμονόμησης, είναι απαραίτητα για τη χρήση του βασικού ροομετρητή με τη στροφική ράβδο.

Η βαθμονόμηση της στροφικής ράβδου έχει πραγματοποιηθεί σε έναν αγωγό όπου η ταχύτητα του νερού μπορεί να ελεγχθεί αυστηρά, μέσω συνδυαστικών

διακυμάνσεων της αποπλήρωσης, της κλίσης και του ύψους του υδατοφράκτη. Ο ρυθμός της ροής παρακολουθούνταν από έναν μικρό ηλεκτρονικό ροομετρητή Nixon και από έναν Ott.

Ο μαθηματικός τύπος για τη μετατροπή του αριθμού των καταγεγραμμένων από το βασικό ροομετρητή μετρήσεων ανά λεπτό (C) σε ταχύτητα νερού (V) σε m/s είναι:

$$\text{Ταχύτητα νερού (V) σε m/s} = 0.000854 * C + 0.05 \quad (\text{Σχέση 1})$$

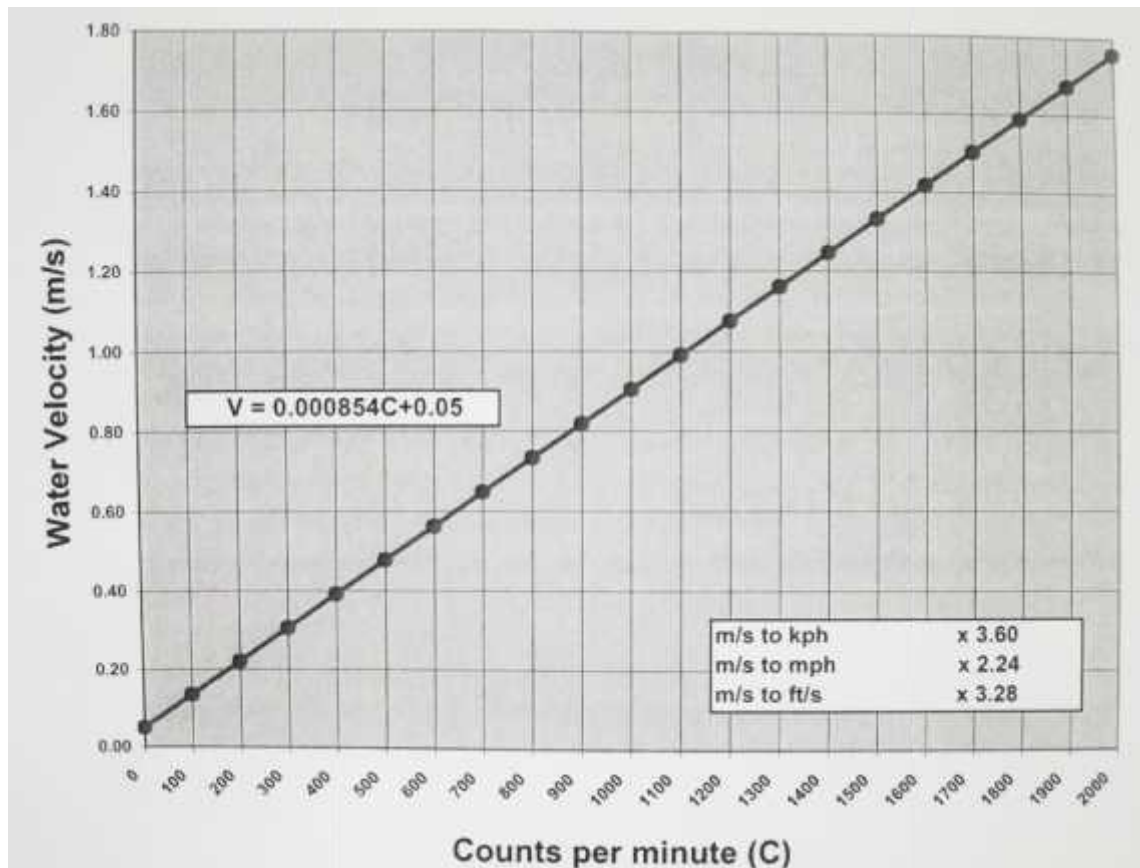
Εναλλακτικές μονάδες μέτρησης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ο τρόπος υπολογισμού τους είναι:

$$\text{m/s σε kph} \quad \times \quad 3.60$$

$$\text{m/s σε mph} \quad \times \quad 2.24$$

$$\text{m/s σε ft/s} \quad \times \quad 3.28$$

Ο μαθηματικός αυτός τύπος μπορεί να εισαχθεί σε ένα φύλλο εργασίας ή σε οποιοδήποτε άλλο υπολογιστικό πρόγραμμα και να χρησιμοποιηθεί για τη μετατροπή μετρήσεων ανά λεπτό στην επιθυμητή μονάδα μέτρησης της ταχύτητας. Εναλλακτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα Διάγραμμα Βαθμονόμησης.



Εικόνα 3.10 Διάγραμμα Βαθμονόμησης

3.2.2 Διαδικασία μετρήσεων

Στόχος της εργασίας ήταν να υπολογιστούν οι ταχύτητες στα όρια του κυματοθραύστη και πάνω στη στέψη αυτού, ώστε έτσι να προκύψει μία όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστική εικόνα του υδροδυναμικού πεδίου γύρω από το φυσικό εμπόδιο. Έτσι χρειάστηκε να πραγματοποιηθούν έξι επισκέψεις στην περιοχή μελέτης κατά τις οποίες επικρατούσαν διαφορετικές μετεωρολογικές συνθήκες και συνεπώς διαφορετικές συνθήκες κυματισμού. Αφού γινόταν η περιγραφή και σημείωση των επικρατούντων συνθηκών για κάθε ημέρα μέτρησης, το όργανο μέτρησης τοποθετούταν στα ενδεδειγμένα σημεία βάσει του τοπογραφικού και με τη βοήθεια βιντεοκάμερας πραγματοποιούνταν η καταγραφή των μεταβολών των γωνιακών ταχυτήτων που εμφανίζονταν στην οθόνη του οργάνου. Για κάθε σημείο πραγματοποιούνταν μέτρηση και καταγραφή για περίοδο ενός περίπου λεπτού. Αξίζει να σημειωθεί ότι λόγω μεγάλων βαθών πάνω από τη στέψη του ύφαλου κυματοθραύστη σε συνδυασμό με την ευαισθησία των οργάνων στο νερό οι μετρήσεις δεν ήταν δυνατές σε όλο το μήκος του κυματοθραύστη.

Έτσι προέκυψε προφίλ ταχυτήτων, περιόδου ενός λεπτού, για εικοσιπέντε διαφορετικά σημεία εκ των οποίων δέκα βρίσκονται στην προσήνεμη πλευρά, δέκα στην υπήνεμη πλευρά και τα υπόλοιπα πέντε πάνω στη στέψη του κυματοθραύστη.

3.2.3 Προετοιμασία μετρήσεων

Μετά την ολοκλήρωση των έξι ημερησίων μετρήσεων είχε συγκεντρωθεί ένας αξιόλογος αριθμός ψηφιακών ταινιών διάρκειας ενός λεπτού. Έτσι, η βιντεοκάμερα συνδέθηκε μέσω σειριακής θύρας με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή και από εκεί με κατάλληλο πρόγραμμα κάθε βίντεο αναλύθηκε καρέ καρέ. Συνεπώς για κάθε σημείο μέτρησης ενός λεπτού (εξήντα δευτερόλεπτα) προέκυψε μια σειρά εξήντα γωνιακών ταχυτήτων. Ακολούθως, δημιουργήθηκε ένα αρχείο excel με τις τιμές αυτές και κατόπιν, έχοντας γνωστή τη Σχέση 1 οι τιμές γωνιακών ταχυτήτων μετατράπηκαν σε τιμές ταχύτητας κυματισμού σε m/s.

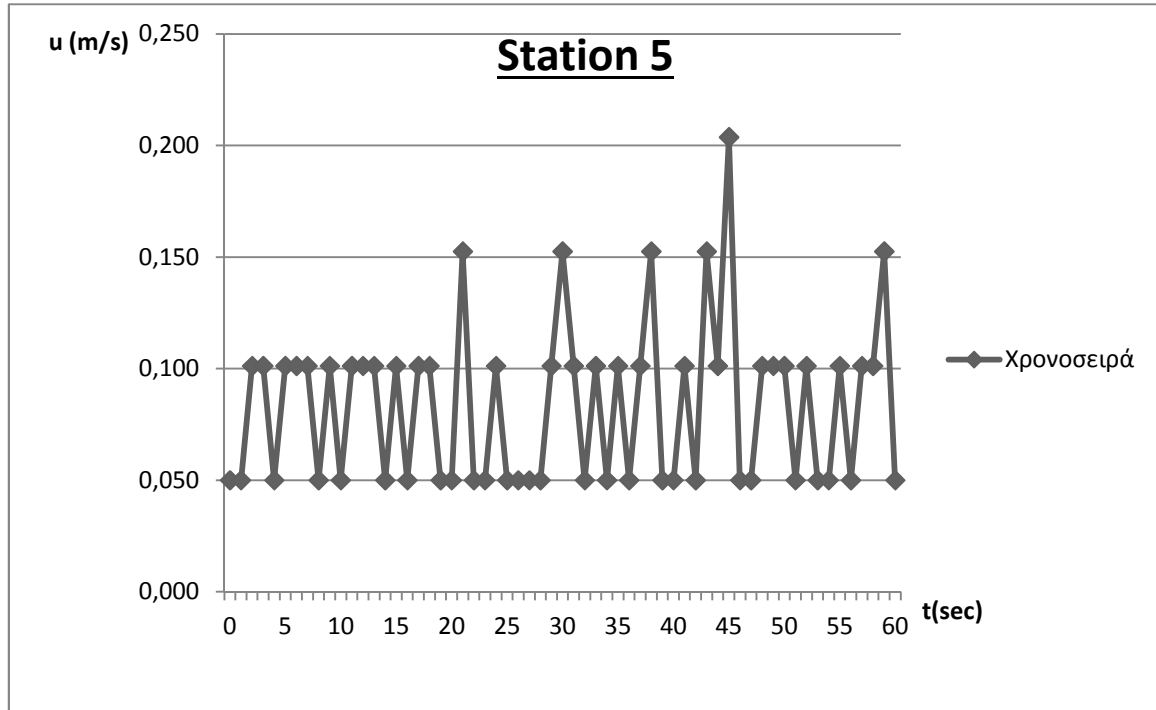
Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν τέσσερις από τις έξι ημέρες μετρήσεως διότι αυτές τις δύο συγκεκριμένες ημέρες επικρατούσε νηνεμία και οι ταχύτητες ήταν υπερβολικά μικρές για να καταγραφούν και να συνεισφέρουν στη διαμόρφωση της συνολικής εικόνας του υδροδυναμικού πεδίου της περιοχής γύρω από τον ύφαλο κυματοθραύστη. Επίσης θα παρουσιαστούν σε διαγράμματα και θα συγκριθούν μόνο πέντε ενδεικτικά χαρακτηριστικά σημεία του κυματοθραύστη λόγω περιορισμού του όγκου της παρούσας εργασίας.

3.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων μετρήσεων πεδίου

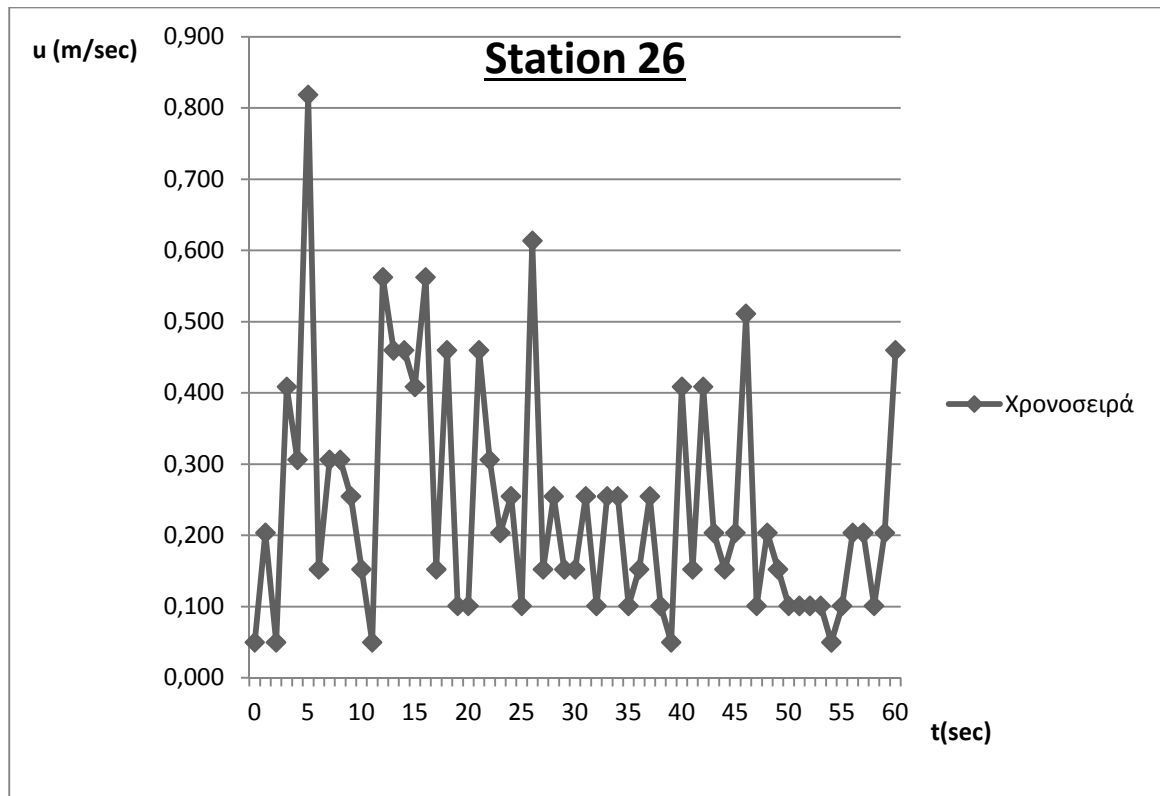
3.3.1 1^η ομάδα μετρήσεων

Η πρώτη ομάδα μετρήσεων πραγματοποιήθηκε στις 25-06-2013 και οι άνεμοι ήταν ασθενείς με μεγάλες διακυμάνσεις και με κατεύθυνση ΒΑ20°. Τα ύψη κύματος στα συγκεκριμένα σημεία μετρήθηκαν με βαθμονομημένα σταδία και μπορούν να θεωρηθούν σταθερά και ίσα με 10cm. Στα διαγράμματα ταχυτήτων, που

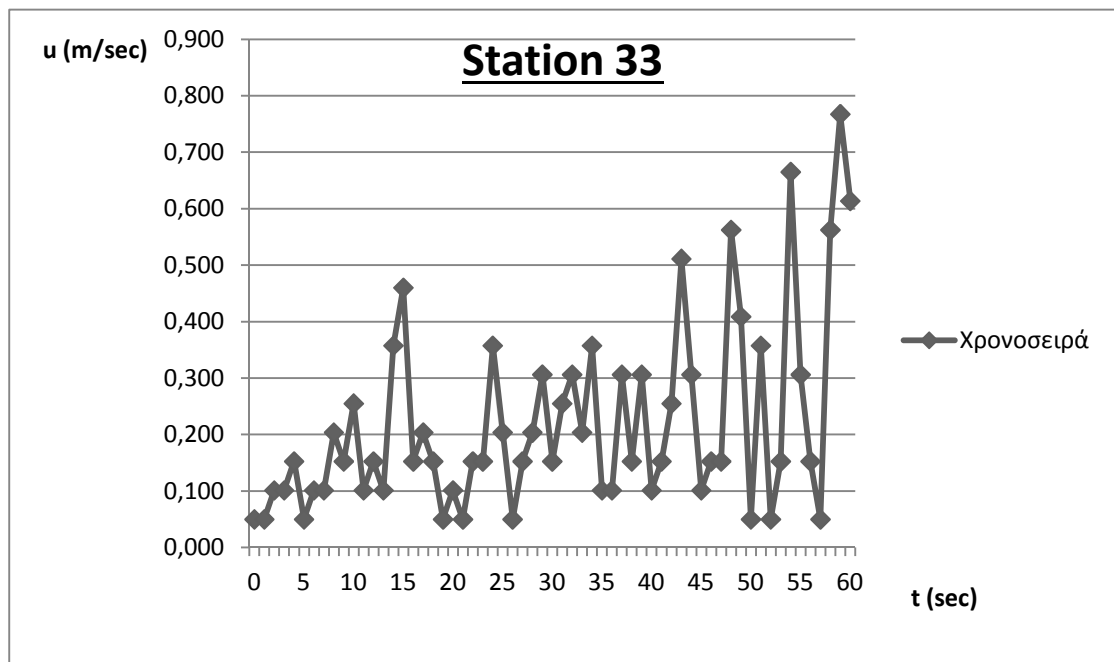
ακολουθούν παρακάτω, για κάθε σημείο παρουσιάζεται μια χρονοσειρά ταχυτήτων διάρκειας εξήντα δευτερολέπτων.



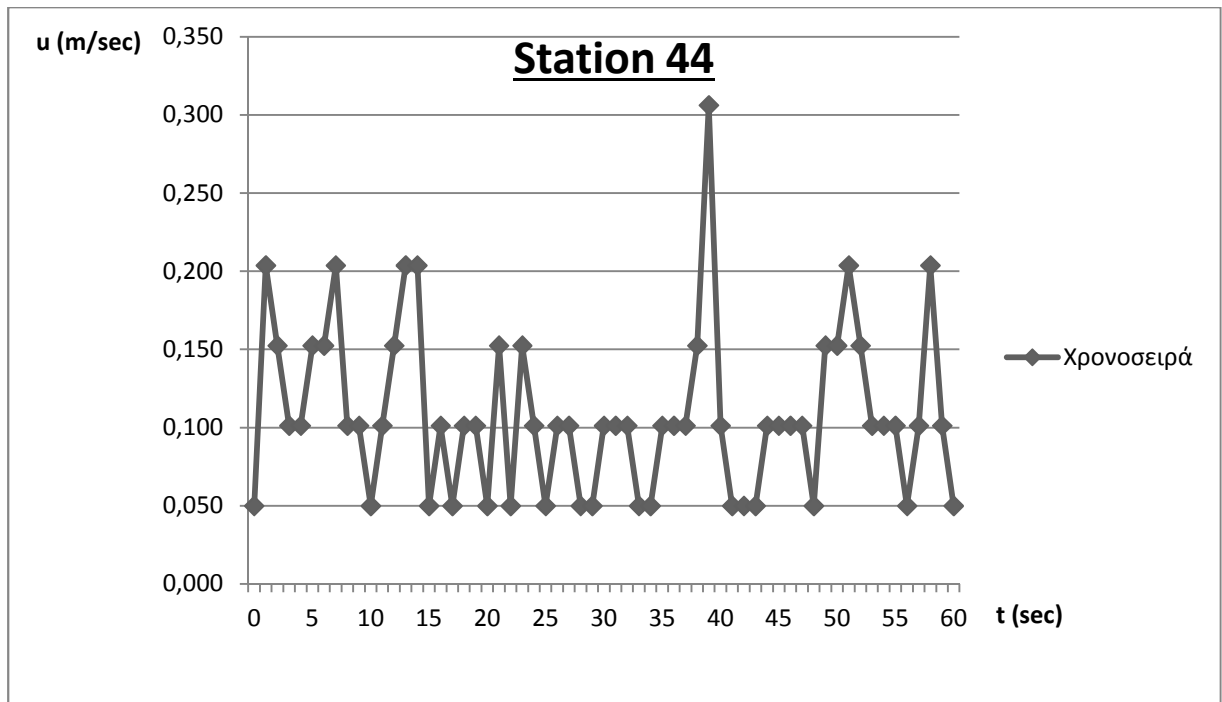
Διάγραμμα 3.1: Προφίλ ταχυτήτων σημείου 5



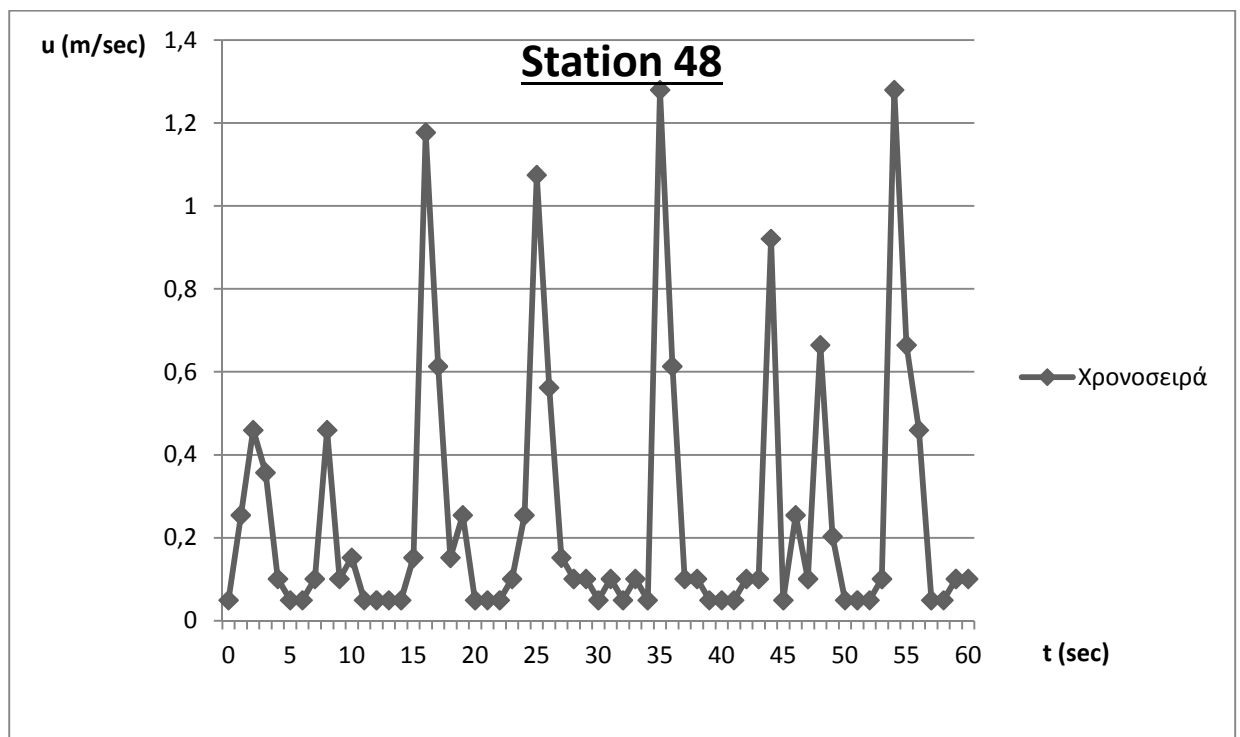
Διάγραμμα 3.2: Προφίλ ταχυτήτων σημείου 26



Διάγραμμα 3.3: Προφίλ ταχυτήτων σημείου 33



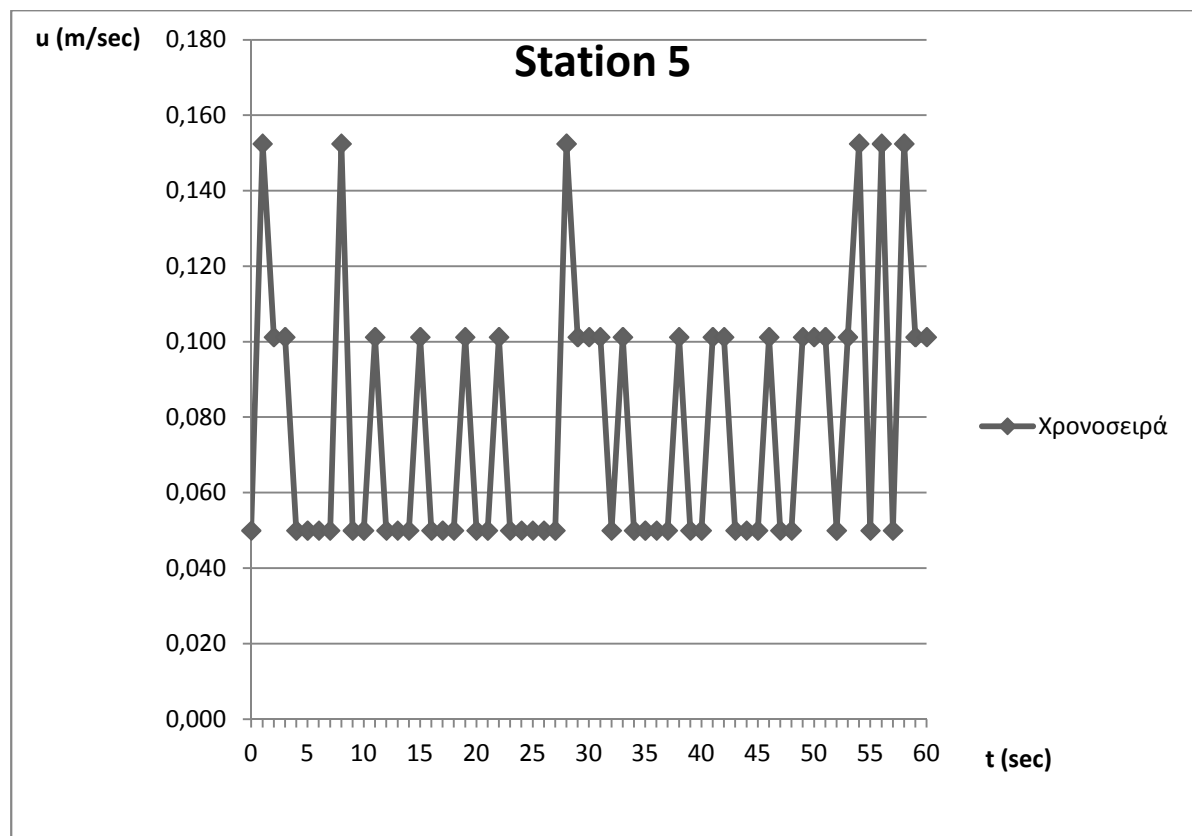
Διάγραμμα 3.4: Προφίλ ταχυτήτων σημείου 44



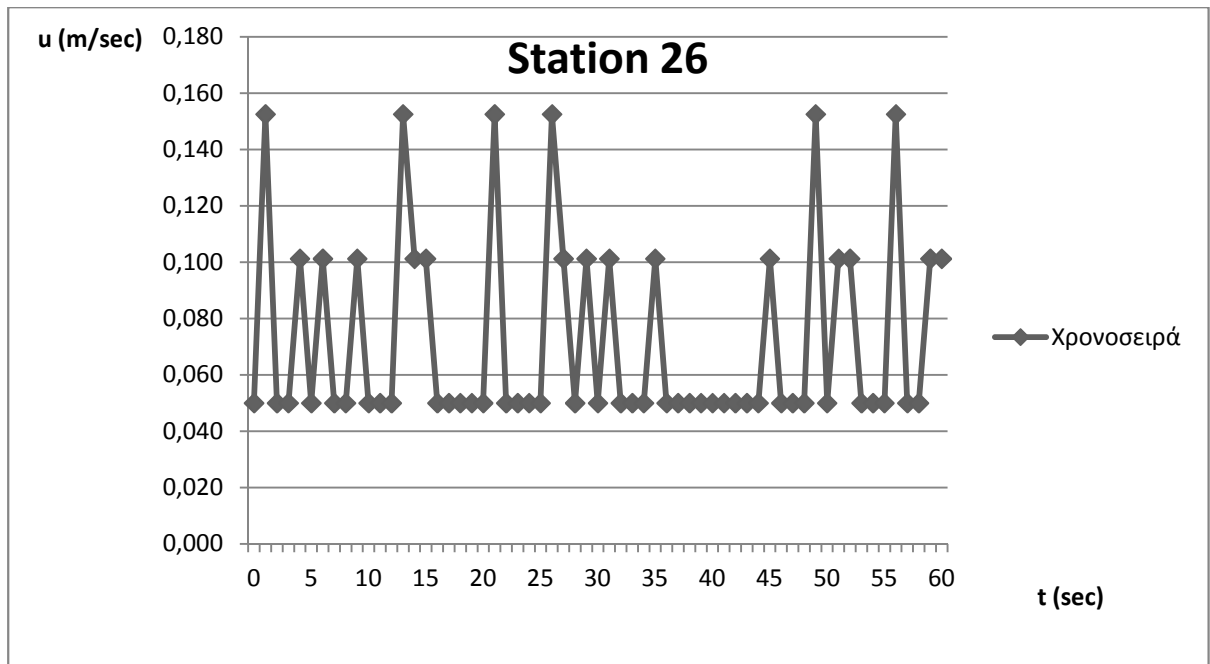
Διάγραμμα 3.5: Προφίλ ταχυτήτων σημείου 48

3.3.2 2^η ομάδα μετρήσεων

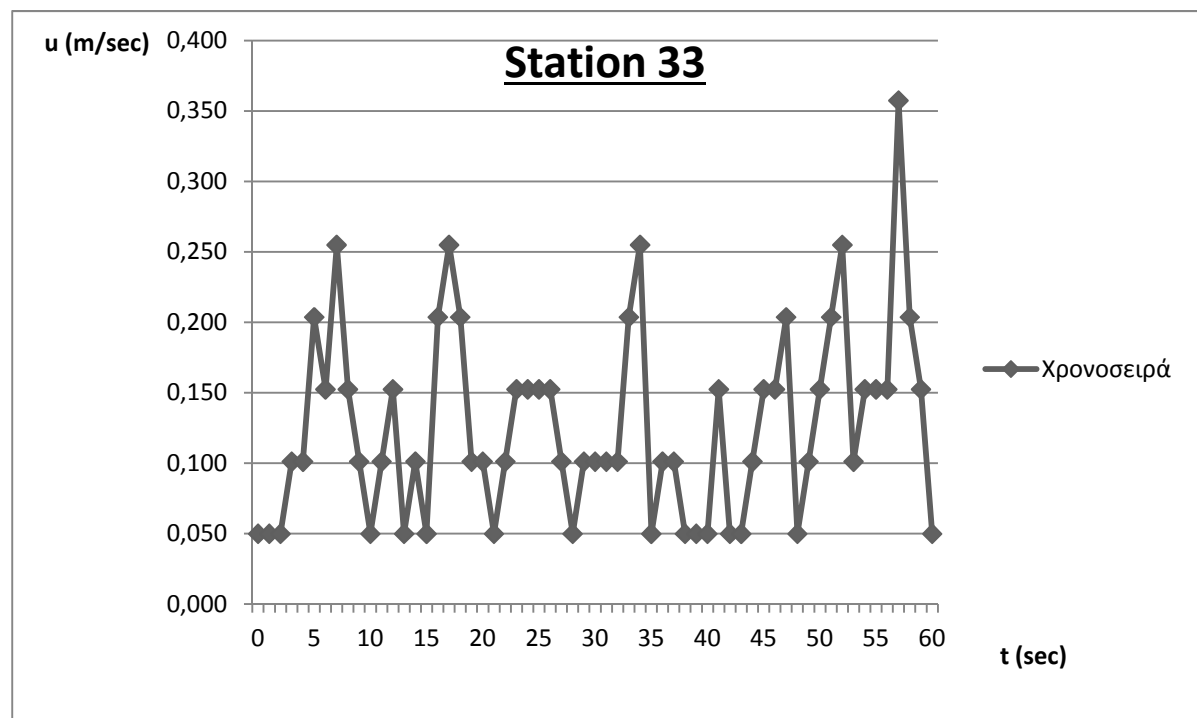
Η δεύτερη ομάδα μετρήσεων πραγματοποιήθηκε στις 05-07-2013 με πολύ ασθενείς ανέμους αλλά σταθερούς καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων. Η διεύθυνση των ανέμων θεωρείται βορειανατολική και το ύψος κύματος που «έφτανε» στα σημεία ήταν της τάξης 0.08cm έως 0.10cm. Παρακάτω ακολουθούν τα προφίλ ταχυτήτων για τα ίδια ενδεικτικά σημεία και της ίδιας διάρκειας χρονοσειρά.



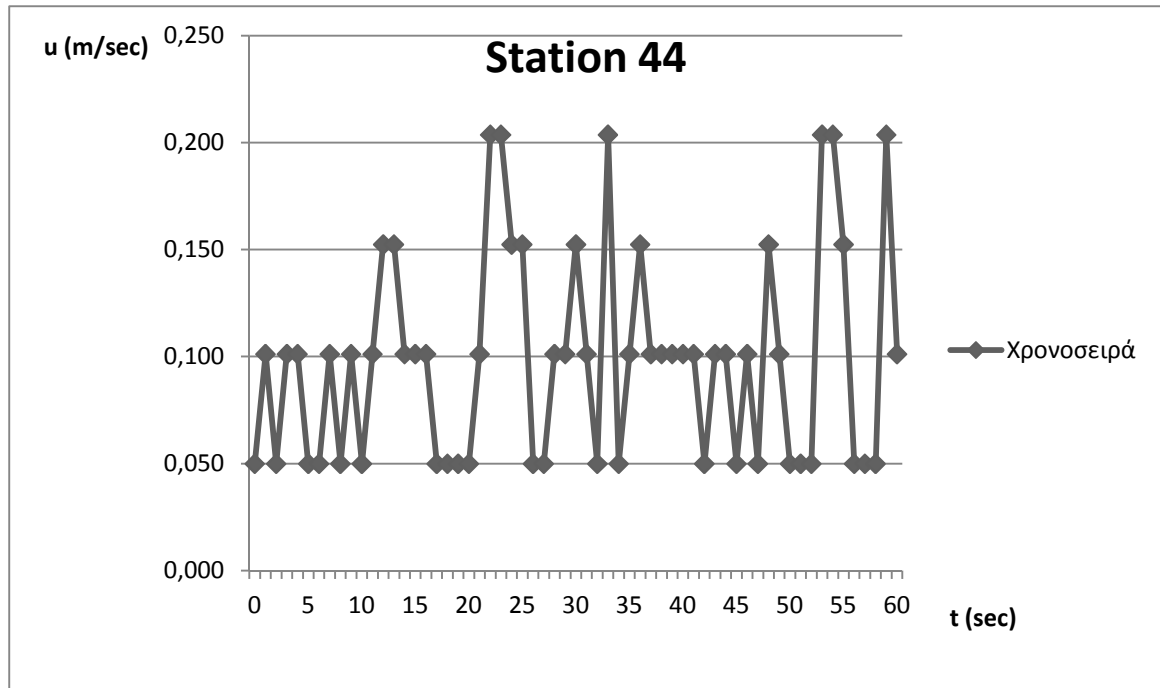
Διάγραμμα 3.6: Προφίλ ταχυτήτων σημείου 5



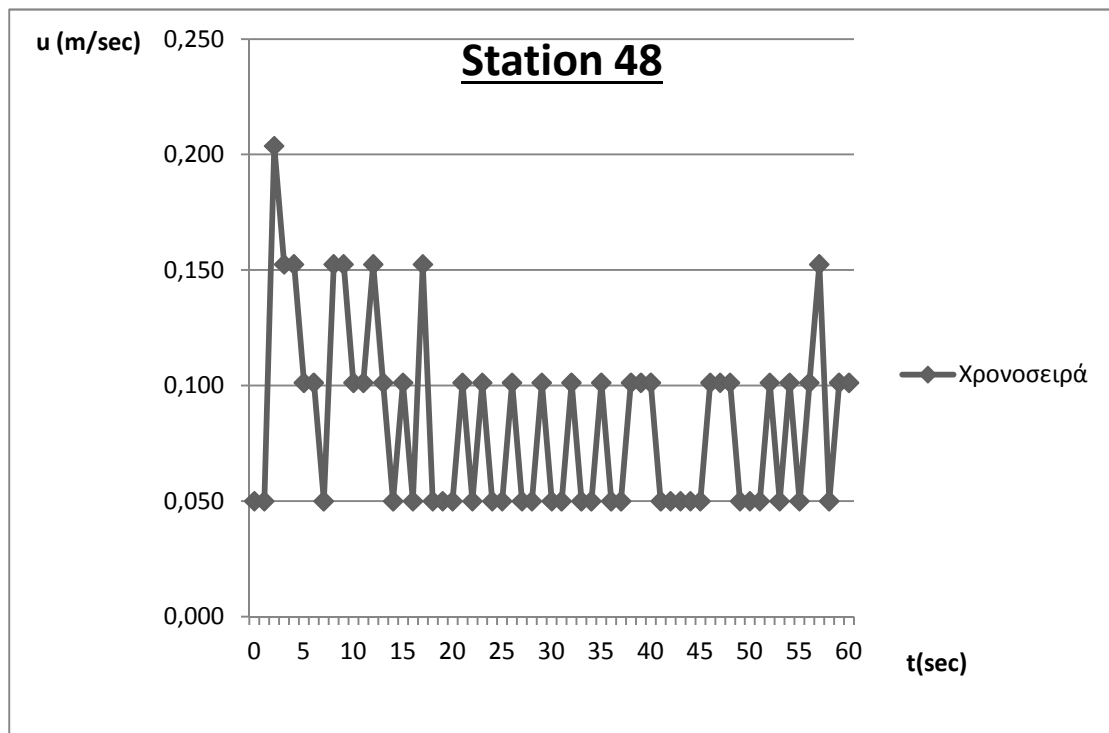
Διάγραμμα 3.7: Προφίλ ταχυτήτων σημείου 26



Διάγραμμα 3.8: Προφίλ ταχυτήτων σημείου 33



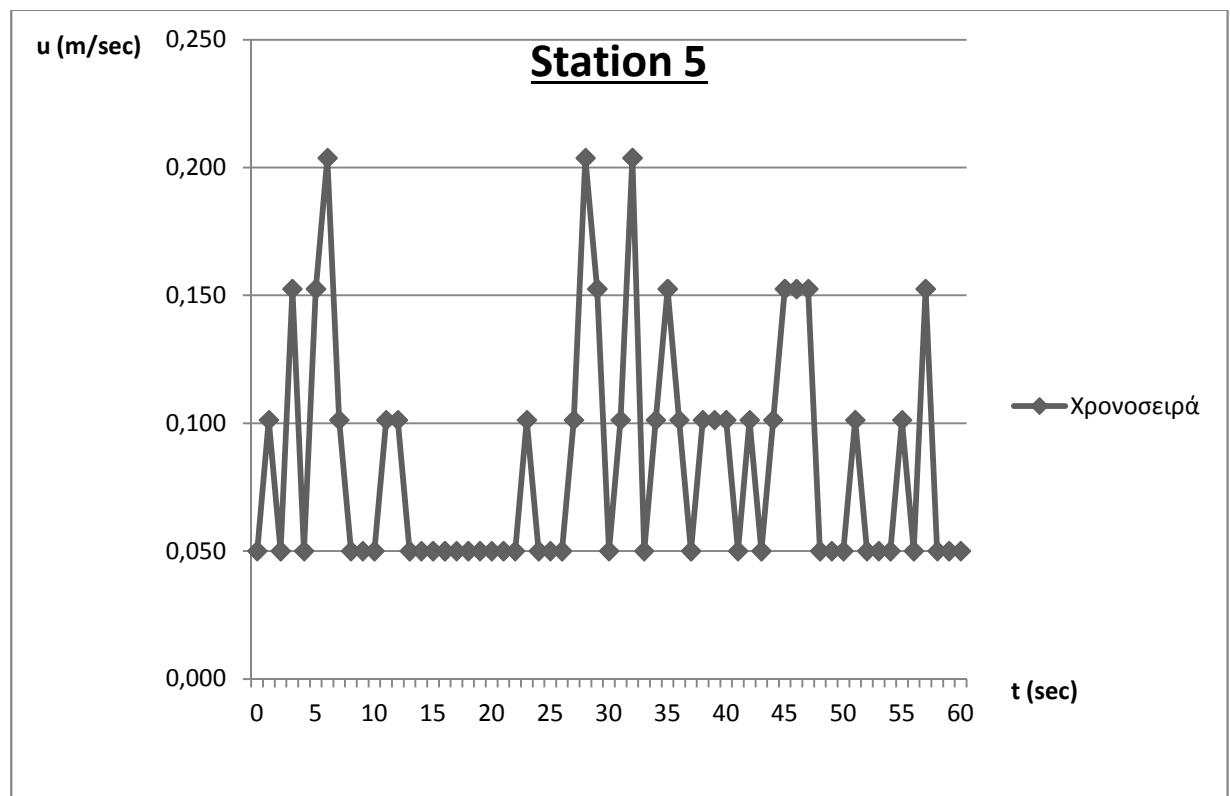
Διάγραμμα 3.9: Προφίλ ταχυτήτων σημείου 44



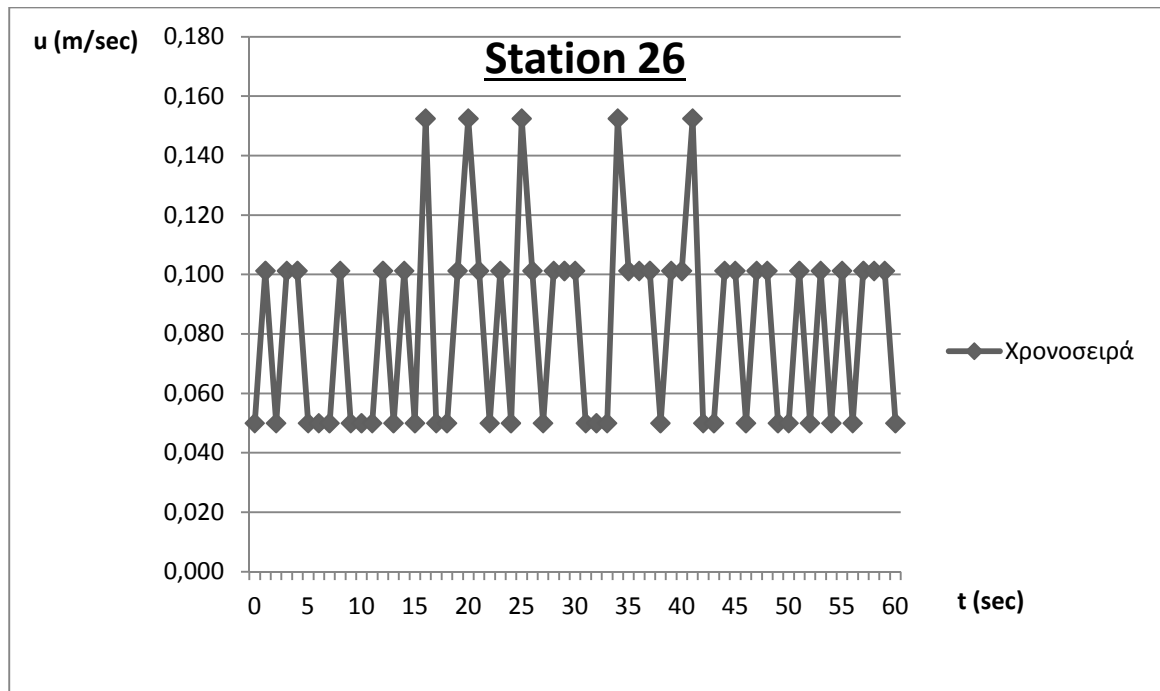
Διάγραμμα 3.10: Προφίλ ταχυτήτων σημείου 48

3.3.3 3^η ομάδα μετρήσεων

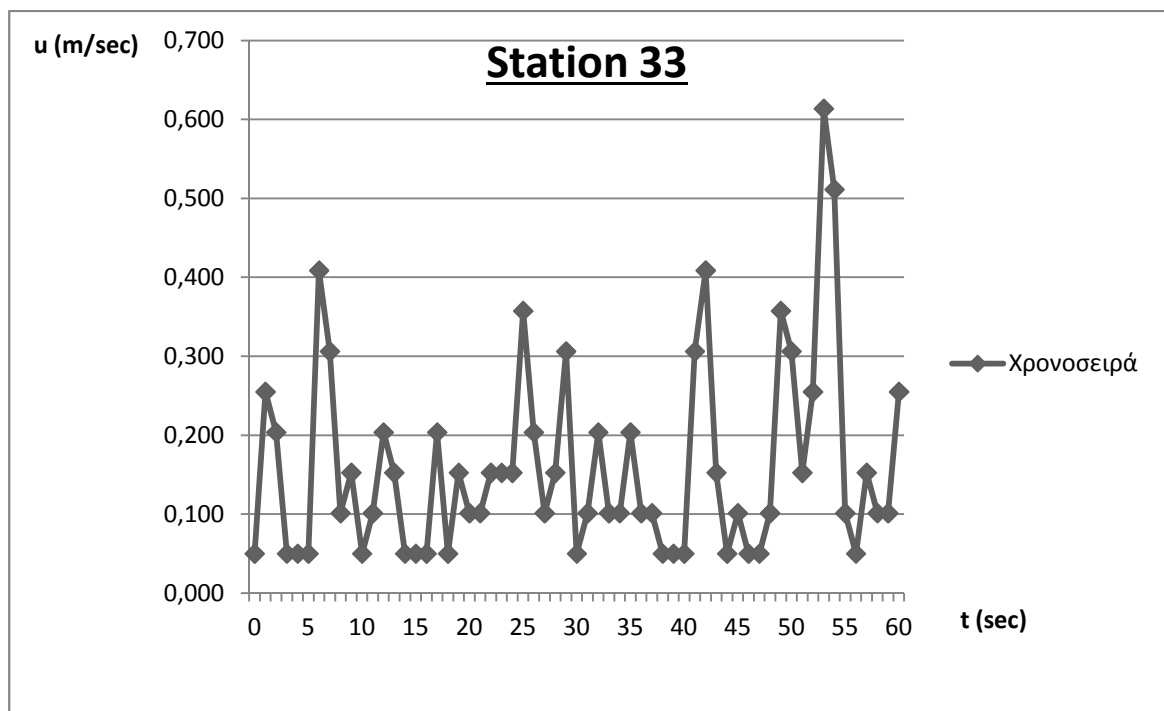
Η 3^η ομάδα μετρήσεων πραγματοποιήθηκε στις 13-07-2013 και είχε υποπνέοντες ανέμους, σχεδόν σταθερούς κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, με διεύθυνση ΒΑ40°. Το ύψος κύματος δεν ξεπέρασε τα 10 εκατοστά.



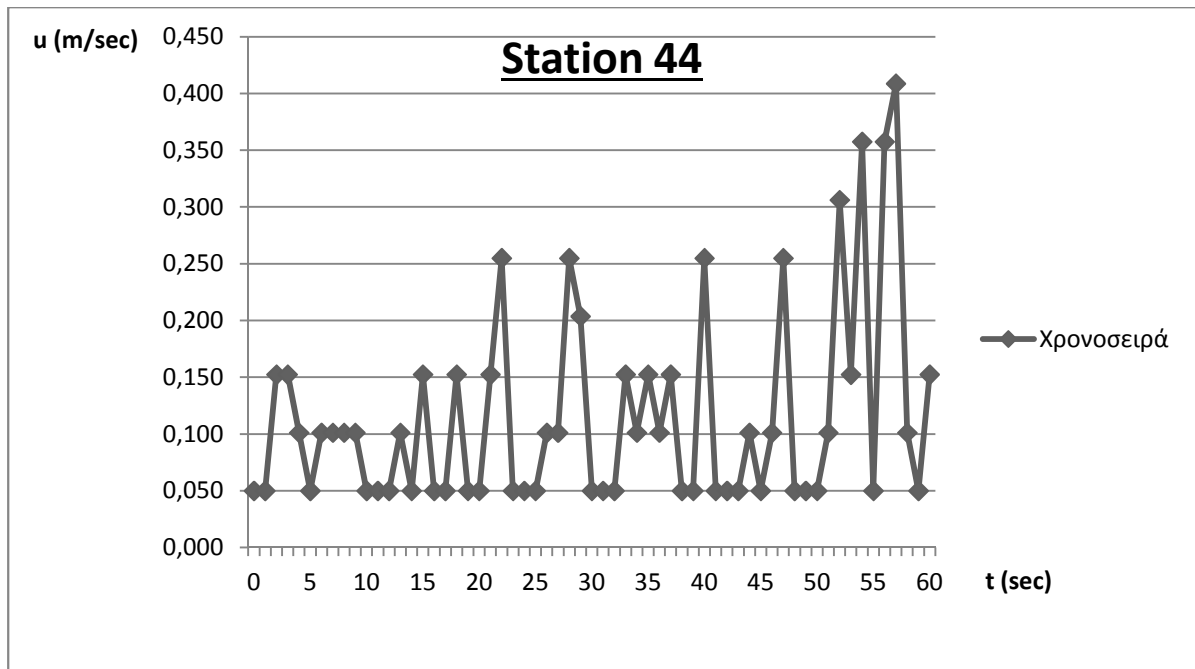
Διάγραμμα 3.11: Προφίλ ταχυτήτων σημείου 5



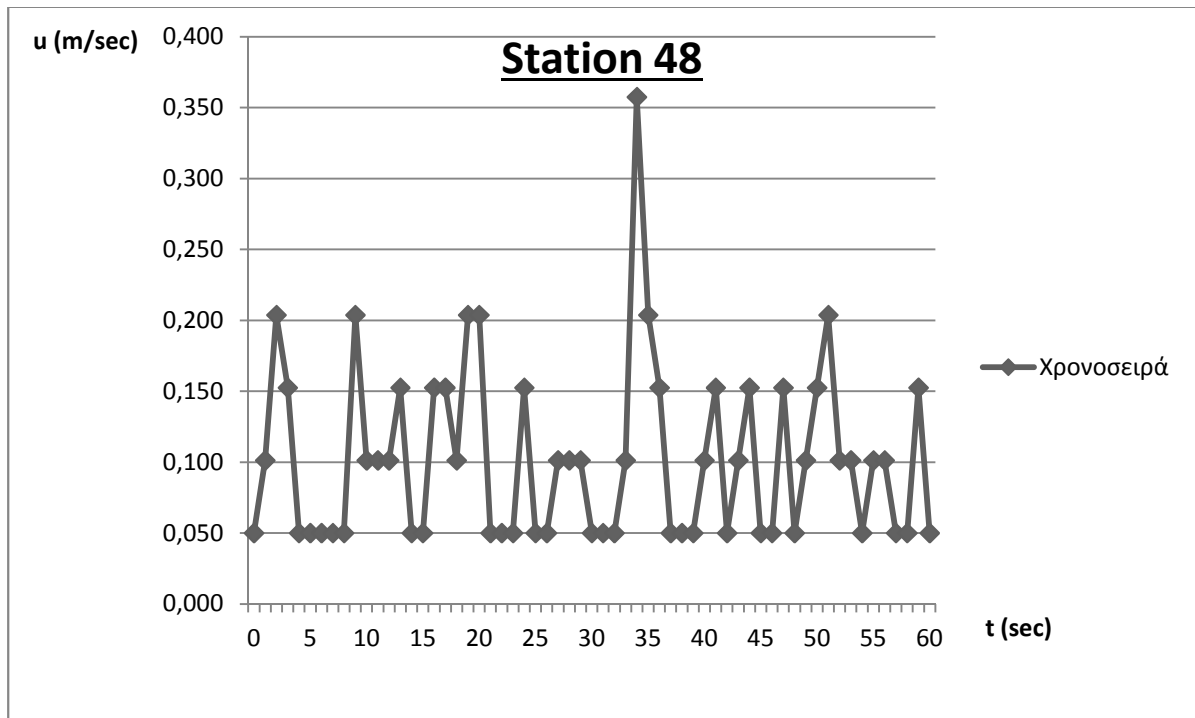
Διάγραμμα 3.12: Προφίλ ταχυτήτων σημείου 26



Διάγραμμα 3.13: Προφίλ ταχυτήτων σημείου 33



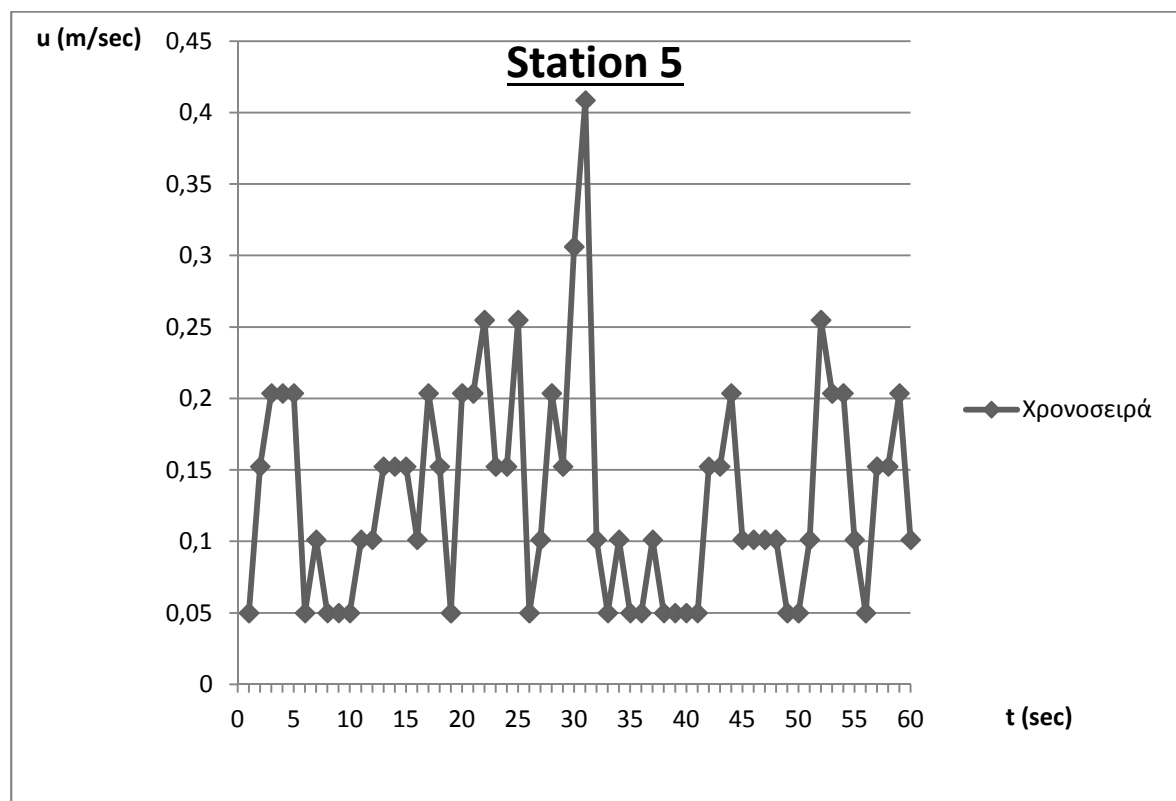
Διάγραμμα 3.14: Προφίλ ταχυτήτων σημείου 44



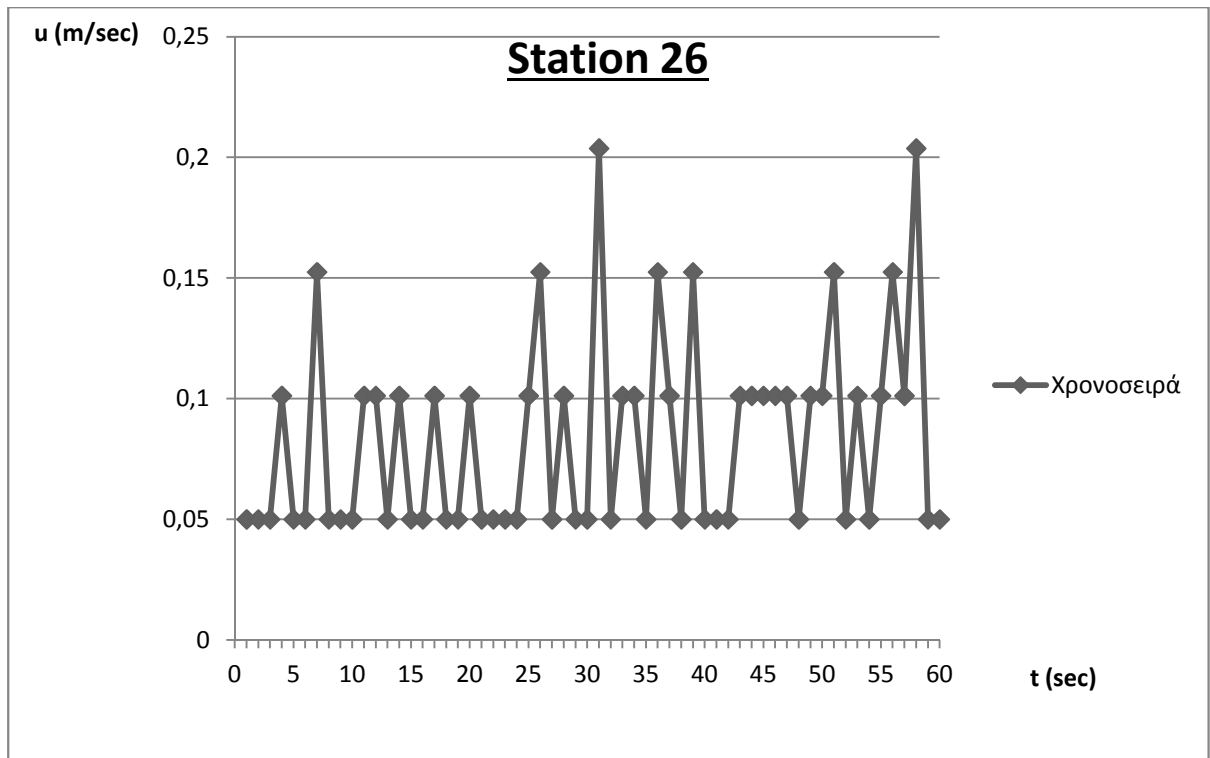
Διάγραμμα 3.15: Προφίλ ταχυτήτων σημείου 48

3.3.4 4^η ομάδα μετρήσεων

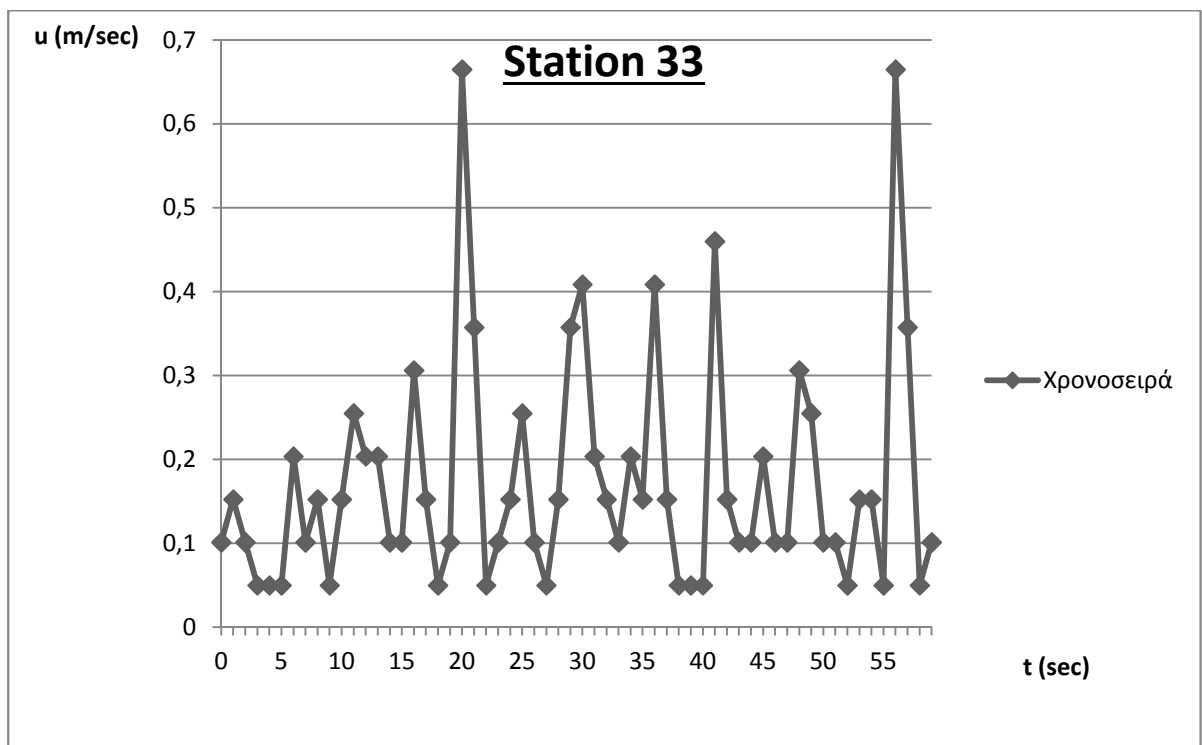
Η τέταρτη και τελευταία ομάδα μετρήσεων πραγματοποιήθηκε στις 19-08-2013 που επικρατούσαν υποπνέοντες άνεμοι, ενώ το ύψος κύματος ξεπέρασε τα 10 εκατοστά. Συγκεκριμένα:



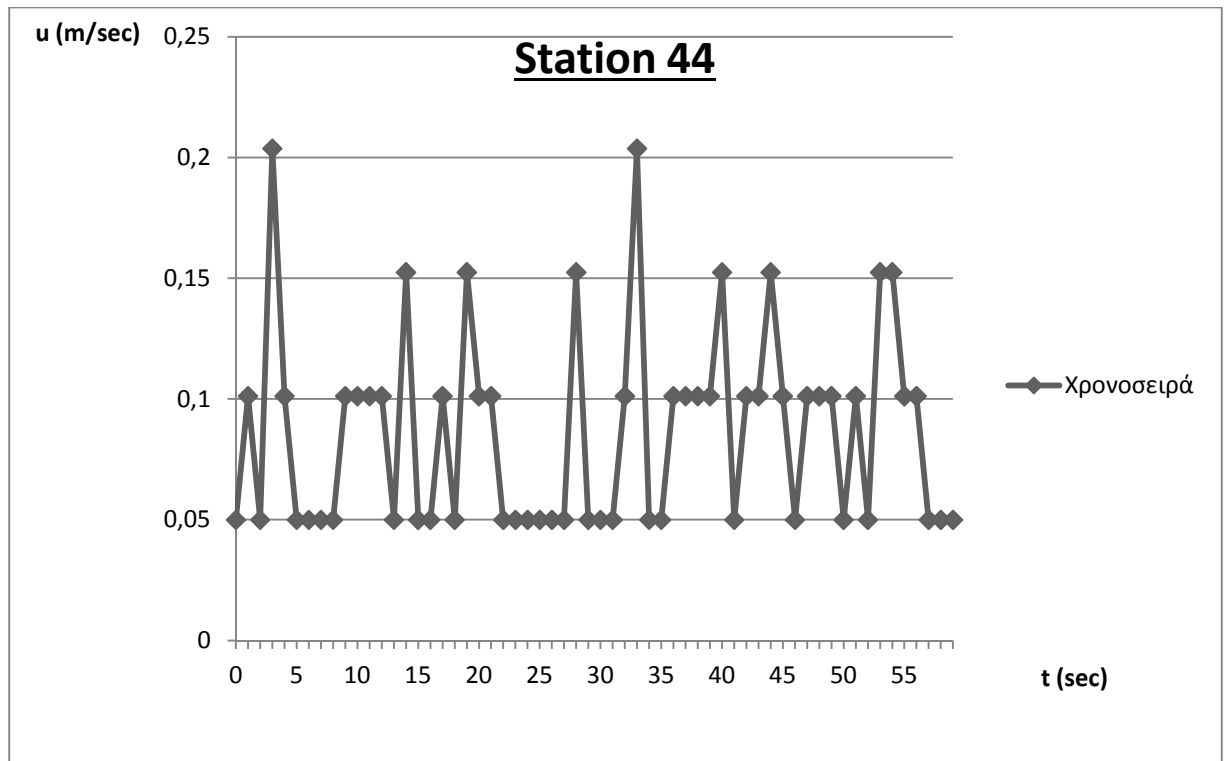
Διάγραμμα 3.16: Προφίλ ταχυτήτων σημείου 5



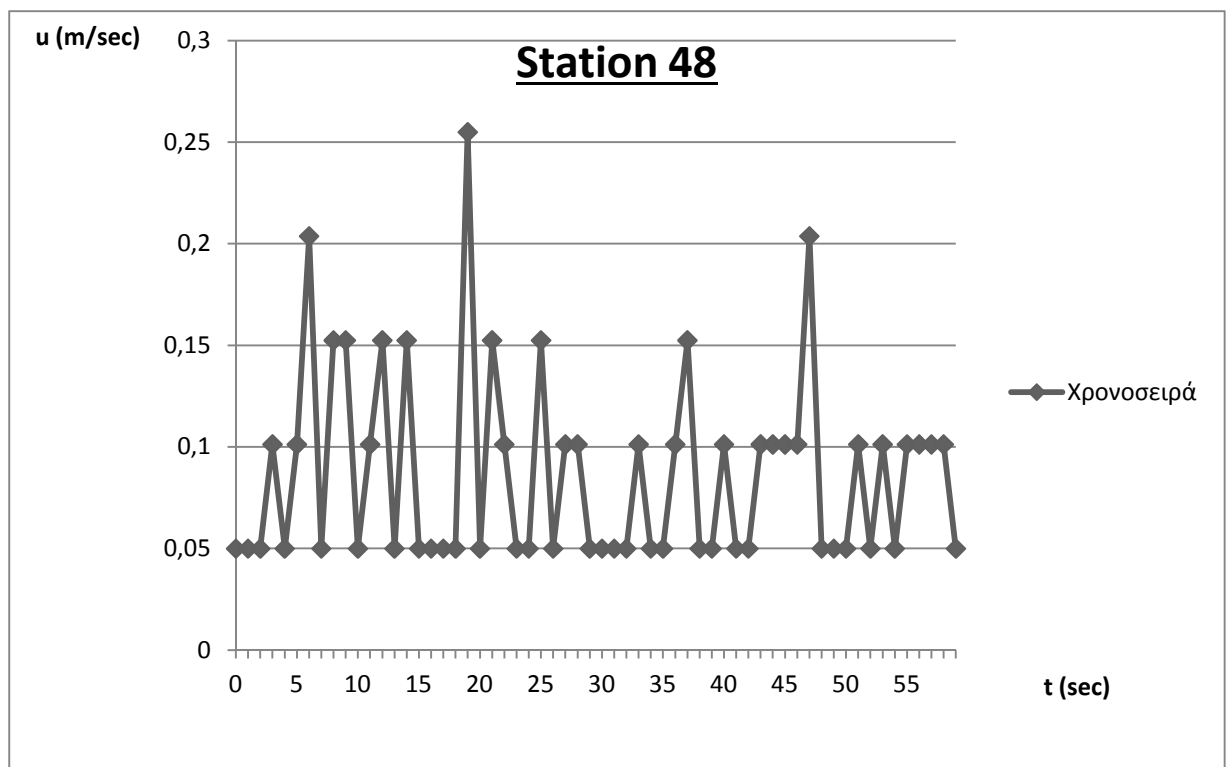
Διάγραμμα 3.17: Προφίλ ταχυτήτων σημείου 26



Διάγραμμα 3.18: Προφίλ ταχυτήτων σημείου 33



Διάγραμμα 3.19: Προφίλ ταχυτήτων σημείου 44



Διάγραμμα 3.20: Προφίλ ταχυτήτων σημείου 48

4. Θεωρητικό υπόβαθρο προγράμματος MIKE21 (BW)

4.1 Εισαγωγή

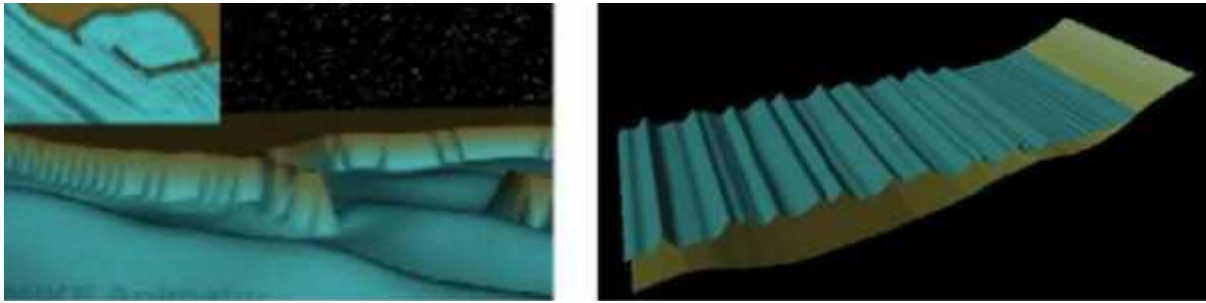
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι επιστημονικές βάσεις οι οποίες διέπουν το υπολογιστικό πρόγραμμα MIKE21 BW (όπου το BW σημαίνει Boussinesq Waves). Το πρόγραμμα αυτό αποτελεί προηγμένης τεχνολογίας πρότυπο αριθμητικό προσομοίωμα για τον υπολογισμό και την ανάλυση βραχέων και μακρών κυματισμών σε λιμενικές εγκαταστάσεις και παράκτιες ζώνες. Περιγράφονται οι εξισώσεις ορμής και συνέχειας, αναλυτικά το κριτήριο θραύσης (Madsen et al. 1997a) στο οποίο βασίζεται, καθώς και το αριθμητικό σχήμα επίλυσης του προγράμματος. Στόχος του κεφαλαίου είναι να αποδώσει το θεωρητικό υπόβαθρο του προγράμματος και να παρουσιάσει τα αποτελέσματά του, ώστε να επιτευχθεί η αντικειμενική σύγκριση αυτών με τις μετρήσεις πεδίου.

4.2 Γενική περιγραφή

Το MIKE21 BW εμπεριέχει δύο modules, ένα μονοδιάστατο (1DH) και ένα δισδιάστατο (2DH), τα οποία βασίζονται στην επίλυση των μετασχηματισμών της περιοχής του χρόνου των εξισώσεων τύπου Boussinesq (Σχήμα 4.1). Αυτές περιλαμβάνουν μη γραμμικά χαρακτηριστικά καθώς και διασπορά συχνοτήτων. Ουσιαστικά η διασπορά των συχνοτήτων εισάγεται στις εξισώσεις ποσότητας κίνησης (momentum equations) παίρνοντας υπόψη την επίδραση που έχουν οι κατακόρυφες επιταχύνσεις στην κατανομή πιέσεων.

Αμφότερα τα modules επιλύουν τις κλασσικές εξισώσεις τύπου Boussinesq χρησιμοποιώντας μια έκφραση ροής (flux-formulation) με βελτιστοποιημένα τα χαρακτηριστικά της γραμμικής διασποράς. Η νέα αναβαθμισμένη μορφή των εξισώσεων (Madsen et al. 1991 ; Madsen & Sorensen, 1992) κάνουν τα δύο modules ικανά για προσομοίωση της κατευθυντικής διάδοσης κυματοσειράς από τα βαθιά στα ρηχά νερά. Ο

μέγιστος επιτρεπόμενος λόγος θαλάσσιου βάθους προς μήκος κύματος στα βαθιά: $d/L_0 = 0,5$ (ή $kd = 3.1$, όπου kd είναι ο σχετικός αριθμός κύματος και αποτελεί δείκτη όρων διασποράς). Για την κλασσική μορφή των εξισώσεων τύπου Boussinesq ο μέγιστος επιτρεπόμενος λόγος θαλάσσιου βάθους προς μήκος κύματος στα βαθιά είναι: $d/L_0 = 0,22$ (ή $kd = 1,4$). Οι εξισώσεις του μοντέλου έχουν επεκταθεί (Madsen et al. 1997 ; Sorensen et al. 1998, 2004) για να υπολογίσουν μεταβολή της ακτογραμμής και θραύση κυματισμών.



Εικόνα 4.1: Απεικόνιση των δύο κυματικών module του λογισμικού MIKE 21 BW. Το δισδιάστατο (αριστερά) και το μονοδιάστατο (δεξιά).

Το 2DH BW module (δύο οριζόντιες διαστάσεις) επιλύει τις τροποποιημένες εξισώσεις τύπου Boussinesq μέσω ενός πεπλεγμένου αριθμητικού σχήματος πεπερασμένων διαφορών με τις μεταβλητές να ορίζονται πάνω σε έναν εναλλασσόμενο ορθογωνικό κάναβο. Το μοντέλο είναι ικανό να αναπαράγει τα περισσότερα συνδυαστικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα σε λιμενικές εγκαταστάσεις και παράκτιες ζώνες. Αυτά είναι:

- Διάθλαση (reflection)
- Ρήχωση (shoaling)
- Περίθλαση (diffraction)
- Μερική ανάκλαση (partial reflection)
- Μερική μετάδοση (partial transmission)
- Τριβή στον πυθμένα (bottom dissipation)
- Θραύση κυματισμών (wave breaking)
- Μεταβολή της ακτογραμμής (moving shoreline)
- Μη γραμμική αλληλεπίδραση κυμάτων (non – linear wave - wave interaction)
- Διασπορά συχνοτήτων (frequency spreading)
- Κατευθυντική διασπορά (directional spreading)

Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι φαινόμενα όπως η ομαδοποίηση κυμάτων (wave grouping), “surf beats”, δημιουργία δεσμευμένων χαμηλών και υψηλών συχνοτήτων (generation of subharmonics and super-harmonics) και αλληλεπιδράσεις τριάδων

συντονισμού (near-resonant triad interactions) μπορούν να εξετασθούν μέσω του λογισμικού MIKE 21 BW. Έτσι, λεπτομέρειες όπως η γένεση και η απελευθέρωση ταλαντώσεων χαμηλών συχνοτήτων λόγω μετασχηματισμού αρχικού κύματος περιγράφονται επαρκώς από το μοντέλο.

Η κυματική θραύση εφαρμόζεται μέσω του μοντέλου επιφανειακού κυλίνδρου για θραύση τύπου spilling, όπως περιγράψαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Η κίνηση ακτογραμμής βασίζεται στην ακόλουθη προσέγγιση: το υπολογιστικό πεδίο διευρύνεται τεχνικά αντικαθιστώντας την άκαμπτη ακτή με μία διαπερατή ακτή πολύ χαμηλού πορώδους. Κοντά στην κινούμενη ακτογραμμή η υδάτινη επιφάνεια εισέρχεται μαζί με τον πυθμένα και συνεχίζεται εντός της πορώδους ακτής, καθορίζοντας τη στιγμιαία θέση της ακτογραμμής από τη συγκεκριμένη γραμμή τομής.

Το 1DH module (σε μία οριζόντια χωρική διάσταση) επιλύει τις ενισχυμένες εξισώσεις Boussinesq μέσω μίας κλασικής μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων Galerkin με πεπλεγμένη παρεμβολή μεταβλητών σε εναλλασσόμενο και μη εναλλασσόμενο πλέγμα υπολογισμού. Οι μεταβολές της δυναμικής ζώνης θραύσης και της ζώνης διαβροχής προσομοιώνονται για οποιοδήποτε προφίλ ακτής μέσω αυτού του μοντέλου. Το μονοδιάστατο μοντέλο είναι ικανό να προσομοιώσει ικανοποιητικά όλα τα συνδυαστικά φαινόμενα της διδιάστατης έκδοσης. Το ζήτημα εμφάνισης υψηλότερης τάξης χωρικών διαφορικών αντιμετωπίζεται με γραμμικοποίηση των εξισώσεων Boussinesq αφού εισαχθεί μία επιπρόσθετη μεταβλητή και μία επιπρόσθετη αλγεβρική εξίσωση. Οι τελικές εξισώσεις εμπεριέχουν μόνο όρους με διαφορικά δεύτερης τάξης για τις χωρικές συντεταγμένες (Sørensen et al., 2004).

4.3 Βασικές εξισώσεις για το 2DH κυματικό μοντέλο Boussinesq του προγράμματος MIKE 21 BW

Τα μοντέλα Boussinesq του λογισμικού MIKE 21 BW επιλύουν, όπως προαναφέρθηκε, τις αναβαθμισμένες εξισώσεις Boussinesq εκφρασμένες σε μία ή δύο οριζόντιες διαστάσεις σε όρους της ανύψωσης ελεύθερης επιφάνειας ζ και των ολοκληρωμένων κατά το βάθος συνιστωσών ταχύτητας P και Q . Οι εξισώσεις για το 1DH BW module είναι:

Εξίσωση συνέχειας:

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

Εξίσωση ποσότητας κίνησης κατά x:

$$n \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial \left(\frac{P^2}{h} \right)}{\partial x} + \frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + n^2 g h \frac{\partial w}{\partial x} - n \left(B + \frac{1}{3} \right) d^2 \frac{\partial^3 P}{\partial x^3} - \frac{1}{3} d \frac{\partial d}{\partial x} \frac{\partial^2 P}{\partial x \partial t} - n^2 B g d^2 \frac{\partial w}{\partial x} + n^2 P \left[a + S \frac{|P|}{h} \right] + \frac{g P |P|}{h^2 C^2} = 0$$

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

Για λόγους πληρότητας αναφέρουμε και τις σχέσεις που χρησιμοποιούνται για το 2DH BW module:

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

Εξίσωση ποσότητας κίνησης κατά x:

$$n \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial \left(\frac{P^2}{h} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(\frac{PQ}{h} \right)}{\partial y} + \frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial x} + F_x n^2 gh \frac{\partial'}{\partial x} +$$

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

Εξίσωση ποσότητας κίνησης κατά γ:

$$n \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\frac{Q^2}{h} \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left(\frac{PQ}{h} \right)}{\partial x} + \frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial x} + F_y n^2 gh \frac{\partial'}{\partial x} +$$

$$+ n^2 Q \left[a + b \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{h} \right] + \frac{gQ \sqrt{P^2 + Q^2}}{h^2 C^2} + n \Psi_2 = 0$$

όπου οι όροι διασποράς Ψ_1 και Ψ_2 δίνονται από τις σχέσεις:

$$\Psi_1 = - \left(B + \frac{1}{3} \right) d^2 (P_{xxt} + Q_{xyt}) - n B g d^3 ({}'_{ttt} + {}'_{tty}) -$$

$$- dd_x \left(\frac{1}{3} P_{xt} + \frac{1}{6} Q_{yt} + n B g d (2'_{tt} + {}'_{yy}) \right) - dd_y \left(\frac{1}{6} Q_{xt} + n B g d'_{xy} \right)$$

$$\Psi_2 = - \left(B + \frac{1}{3} \right) d^2 (P_{xyt} + Q_{yyt}) - n B g d^3 ({}'_{yyy} + {}'_{tty}) -$$

$$- dd_y \left(\frac{1}{3} Q_{yt} + \frac{1}{6} P_{xt} + n B g d (2'_{yy} + {}'_{xx}) \right) - dd_x \left(\frac{1}{6} P_{yt} + n B g d'_{xy} \right)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις οι δείκτες x, γ και t υποδηλώνουν μερική παραγωγή στο χώρο και στο χρόνο, αντίστοιχα:

Παρακάτω επισημαίνουμε τους συμβολισμούς των εξισώσεων που προηγήθηκαν:

- P πυκνότητα ροής κατά x σε $m^3/(msec)$
- Q πυκνότητα ροής κατά y σε $m^3/(msec)$
- B όρος διασποράς Boussinesq
- F_x όρος οριζόντιας τάσης κατά x
- F_y όρος οριζόντιας τάσης κατά y
- x, y καρτεσιανές συντεταγμένες
- t χρόνος σε sec
- h συνολικό βάθος ίσο με $h=d + \zeta$ σε m
- d βάθος στη μέση στάθμη ηρεμίας σε m
- g βαρυτική επιτάχυνση σε m/sec^2
- n πορώδες
- C αριθμός αντίστασης Chezy σε $m^{1/2}/sec$
- α συντελεστής αντίστασης για στρωτή ροή σε πορώδες μέσο
- β συντελεστής αντίστασης για τυρβώδη ροή σε πορώδες μέσο
- ζ ανύψωση θαλάσσιας επιφάνειας πάνω από σημείο αναφοράς σε m

Οι όροι θραύσης R_{xx} , R_{yy} και R_{xy} αναλύονται στην ενότητα περιγραφής της προσομοίωσης της θραύσης από το λογισμικό.

Οι όροι οριζόντιας τάσης που αναφέραμε, περιγράφονται μέσω μίας σχέσης κλίσης τάσης (gradient-stress) η οποία δίνει:

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

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

4.4 Προσομοίωση θραύσης στο λογισμικό MIKE 21 BW

Ένας μηχανισμός για την προσομοίωση της απώλειας ενέργειας λόγω θραύσης, στα μοντέλα Boussinesq, είναι ο «επιφανειακός κύλινδρος» (surface roller). Η ιδέα αυτή, δηλαδή της επιρροής του επιφανειακού κυλίνδρου στην κίνηση του κυματισμού, προτάθηκε από τον Svendsen (1984). Οι Madsen et al. (1997), βασιζόμενοι στην αρχή ότι ο επιφανειακός κύλινδρος παίρνεται υπόψη σαν ένας όγκος νερού που μεταφέρεται από το κύμα με την ταχύτητα του κυματισμού, εξέλιξαν αυτό το κριτήριο.

Η αρχή αυτή είχε σαν αποτέλεσμα την κάθετη διανομή της οριζόντιας συνιστώσας της ταχύτητας. Θεωρώντας αυτό το προφίλ ταχυτήτων να ισχύει εξήγαγαν τις εξισώσεις (4.1), (4.2) και (4.3).

Οι όροι θραύσης R_{xx} , R_{yy} και R_{xy} αφορούν την προεξέχουσα ορμή που οφείλεται από την ανομοιόμορφη κατανομή ταχύτητας λόγω της παρουσίας του επιφανειακού κυλίνδρου και δίνονται από τις ακόλουθες εκφράσεις:

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

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

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

όπου $\delta = \delta(t, x, y)$ είναι το πάχος του επιφανειακού κυλίνδρου και c_x και c_y οι ταχύτητες του κυλίνδρου στις δύο διευθύνσεις κατά Madsen et al (1997a) και πιο πρόσφατα κατά Sørensen et al (2004).

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

Ο χωρικός και χρονικός προσδιορισμός των κυλίνδρων βασίζεται σε μια γεωμετρική προσέγγιση που περιγράφηκε λεπτομερώς από τους Shaffer et al. (1993). Κατά τη μετάδοση από το αρχικό σημείο θραύσης σε μια κατάσταση 'bore' (τύπος παλιρροϊκού κύματος), η κρίσιμη γωνία ϕ , αλλάζει βαθμιαία από ϕ_B σε ϕ_0 ($\phi_0 < \phi_B$). Η στιγμιαία τιμή της ϕ εξαρτάται από την περίοδο του κυλίνδρου και ακολουθεί μια εκθετική χρονική μεταβολή:

$$\tan \phi(t) = \tan \phi_0 + (\tan \phi_B - \tan \phi_0) \exp \left[-\ln 2 \frac{t - t_B}{t_{1/2}} \right]$$

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

Ένα μειονέκτημα αυτού του προσδιορισμού των επιφανειακών κυλίνδρων είναι ότι επιπλέον με το $\tan\phi_B$ στηρίζεται σε τρεις παραμέτρους ϕ_0 , f_δ , και $t_{1/2}$. Οι Madsen et al. (1997) δοκιμάζοντας διαφορετικές τιμές για την κάθε παράμετρο κατέληξαν στα επόμενα:

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

Η ταχύτητα κυματισμού c , η οποία θεωρείται ταυτόσημη με την ταχύτητα κυλίνδρου, είναι μια ουσιαστική παράμετρος της μεθόδου «επιφανειακού κυλίνδρου». Οι Schaffer et al. (1993) χρησιμοποίησαν τη σχέση:

$$c = f_v \sqrt{gh} \quad \text{για } f_v=1.3$$

Η οποία δίνει καλά αποτελέσματα για απλούς κυματισμούς (εντός της ζώνης θραύσης) όχι όμως και για σύνθετους. Γι' αυτό οι Madsen et al. (1997) χρησιμοποίησαν μια καινούρια προσέγγιση προσδιορίζοντας την ταχύτητα c αμφίδρομα από το στιγμιαίο κυματικό πεδίο. Υποθέτοντας ότι η ελεύθερη επιφάνεια μπορεί να εκφραστεί σαν $\zeta = \zeta(\omega t - k_x x - k_y y)$ που αντιστοιχεί σε διάδοση απλού κυματικού πεδίου. Με τον ορισμό:

$$(c_x, c_y) = (k_x, k_y) \frac{\xi}{k^2}$$

Όπου k ο αριθμός κύματος και ω η γωνιακή συχνότητα. Σε όρους της ελεύθερης επιφάνειας αυτό μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\begin{pmatrix} c_x \\ c_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \partial' / \partial x \\ \partial' / \partial y \end{pmatrix} \frac{-\partial' / \partial t}{(\partial' / \partial x)^2 + (\partial' / \partial y)^2}$$

Το οποίο εφαρμόζεται στο υψηλότερο σημείο του μετώπου του κύματος.

Η μέθοδος αυτή κατάφερε να δώσει καλές τιμές για την ταχύτητα τόσο για τους απλούς όσο και για τους σύνθετους κυματισμούς, Όμως ένα γενικό πρόβλημα με κάθε αμφίδρομο προσδιορισμό της ταχύτητας είναι ότι μπορεί να οδηγήσει σε αστάθειες και θορύβους κάνοντας απαραίτητη τη χρήση low pass φίλτρων.

Για την κατεύθυνση θ του κυλίνδρου υπάρχουν δύο διαφορετικοί τύποι στο MIKE 21 BW:

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

4.5 Οριακές συνθήκες

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

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

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

Όπου a , r είναι σταθερές προς προσδιορισμό και N_{sponge} ο αριθμός των γραμμών απορρόφησης.

Παραπλεύρως του απορροφητικού πεδίου 'sponge layer' τοποθετείται μια γραμμή γένεσης των κυμάτων σύνθετων ή και μονοχρωματικών (wave generation line) σε εκείνο το όριο το οποίο θεωρούμε ότι εισάγεται το κυματικό πεδίο σε οποιαδήποτε κατεύθυνση ως προς το χώρο προσομοίωσης.

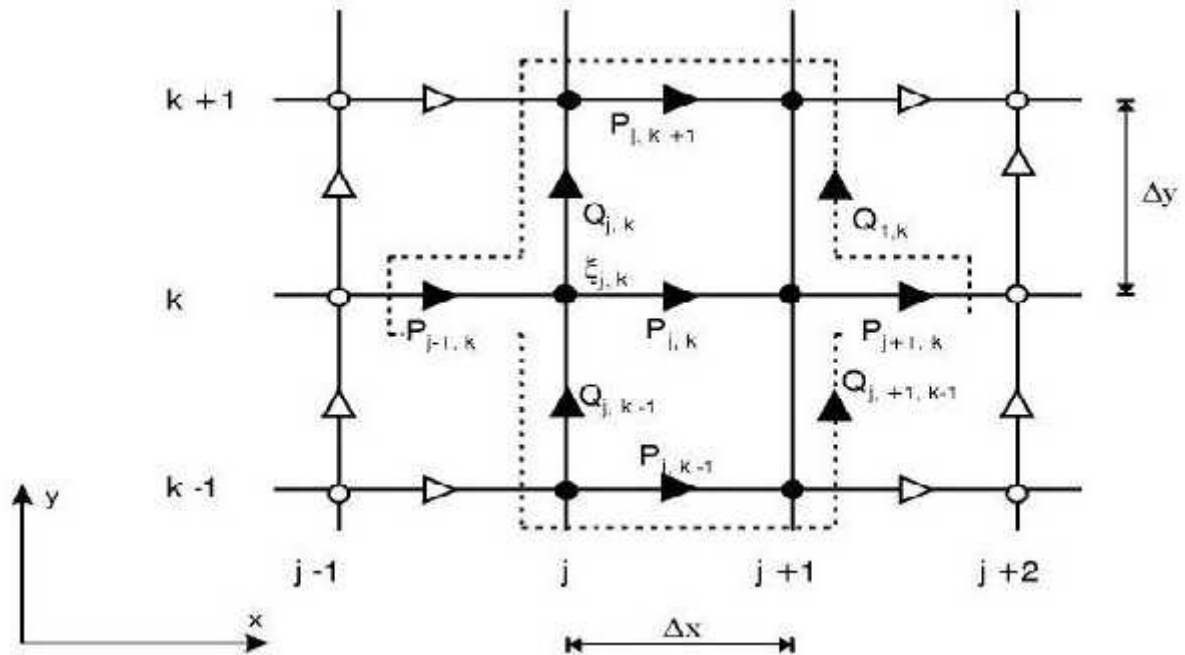
4.6 Αριθμητική εφαρμογή

4.6.1 Κυματικό μοντέλο Boussinesq μία οριζόντια διάσταση MIKE 21 BW

Για το μονοδιάστατο module του λογισμικού χρησιμοποιείται για την επίλυση του 1DH συστήματος εξισώσεων, μία μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, η οποία μπορεί να αποδώσει σοβαρά σφάλματα ειδικά σε περιπτώσεις εφαρμογής ίσης τάξης συναρτήσεων παρεμβολής για τον υπολογισμό παροχών και ανύψωσης, και άρα χρησιμοποιείται μικτή παρεμβολή για τη λήψη σταθερών λύσεων. Αυτό σημαίνει ότι στοιχεία με τετραγωνικές παροχές και γραμμική ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και επιπρόσθετοι όροι εμφανίζονται σε αυτήν την κατεύθυνση, οπότε επιστρατεύονται πλέον κατά περίπτωση κατάλληλα σχήματα επίλυσης ενώ αξίζει να σημειωθεί ότι το παρόν μοντέλο υποστηρίζει σταθερό και μεταβαλλόμενο πλέγμα (mesh) για επίτευξη μέγιστου βαθμού προσαρμοστικότητας.

4.6.2 Κυματικό μοντέλο Boussinesq σε δύο οριζόντιες διαστάσεις MIKE 21 BW

Η αριθμητική μέθοδος που επιστρατεύεται από το λογισμικό βασίζεται σε ένα σχήμα που ονομάζεται SYSTEM 21, που πρωτοεισήχθη από τους Abbott et al (1978). Από τότε αυτό το εύχρηστο σχήμα βρίσκεται σε συνεχή βελτίωση (Madsen et al, 1991 και Madsen και Sørensen, 1992). Οι διαφορικές εξισώσεις διακριτοποιούνται χωρικά σε έναν ορθογωνικό τμηματικό κάνναβο όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα4.2). Οι βαθμωτές ποσότητες όπως η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας ορίζονται ευθέως στους κόμβους του καννάβου, ενώ τα διανυσματικά μεγέθη ορίζονται στο μέσο γειτονικών κόμβων (επί των πλευρών βρόχων).



Σχήμα 4.2: Απεικόνιση καννάβου για το 2DH module του λογισμικού MIKE 21 BW.

Η ολοκλήρωση στο χρόνο γίνεται μέσω ενός πεπλεγμένου χρονικού σχήματος. Ο εφαρμοζόμενος αλγόριθμος είναι εναλλασσόμενης διεύθυνσης ή Alternative Direction Implicit (ADI), που χρησιμοποιεί μία τεχνική τύπου “fractional-step” και “side-feeding” (semilinearization of non-linear terms), ενώ το τελικό τριδιαγώνιο σύστημα λύνεται με τη μέθοδο του αλγορίθμου “double-sweep”.

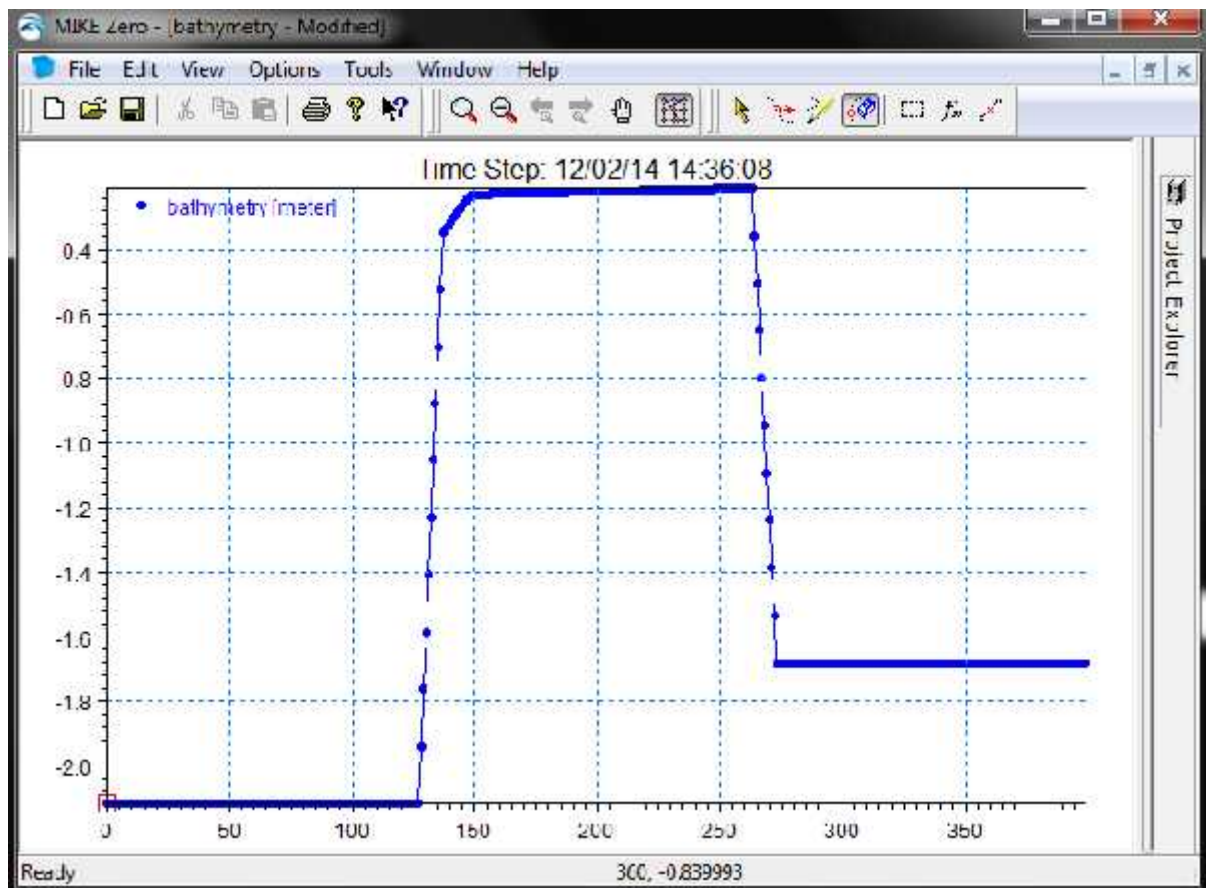
5. Υπολογιστικό πρόγραμμα MIKE21 (BW)

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βήματα εισαγωγής των δεδομένων και των βασικών παραμέτρων στο πρόγραμμα MIKE21 καθώς και η εισαγωγή της κυματικής διαταραχής με βάση τις επικρατούσες συνθήκες τις ημέρες των μετρήσεων.

5.1 Εφαρμογή MIKE 21 BW

Αρχικά επιλέγεται το MIKE 21 BW 1DH module για λόγους καλύτερης προσομοίωσης της κυματικής διαταραχής της υπό μέτρησης διατομής. Επιλέχθηκε διατομή της οποίας ήταν γνωστή η ακριβής γεωμετρία, άνηκε στο ύψαλο τμήμα του φυσικού εμποδίου και είχαν γίνει μετρήσεις ταχυτήτων τουλάχιστον σε τρία σημεία κατά μήκος της – ανάντη, κατάντη και ένα πάνω στη στέψη.

Έτσι προέκυψε να εισαχθεί η βαθυμετρία της διατομής του Σχήματος 5.1 που βρίσκεται στα πρώτα είκοσι δύο μέτρα του κυματοθραύστη και είναι υπό γωνία 45° ώστε η κυματική διαταραχή να την διατρέχει κάθετα. Αξίζει να σημειωθεί ότι για απλοποιητικούς λόγους θεωρήσαμε τον πυθμένα οριζόντιο.



Σχήμα 5.1 Κατασκευή βαθυμετρίας με χωρικό βήμα $\Delta x = 0.05$.

Στη συνέχεια καθορίζεται το χρονικό βήμα διακριτικοποίησης ($\Delta t = 0.005 \text{ sec}$) και ο αριθμός των χωρικών βημάτων ($N = 24001$). Έχοντας ήδη εισάγει το χωρικό βήμα στο προηγούμενο στάδιο μέσω της βαθυμετρίας ($\Delta x = 0.05 \text{ m}$), το MIKE 21 αυτόματα υπολογίζει τον αριθμό Courant (στην προκειμένη περίπτωση $= 0.44 < 0.5$).

Μετά την εισαγωγή των βασικών παραμέτρων, προσδιορίζονται τα δεδομένα του calibration ως εξής:

- Εισάγεται η κυματική διαταραχή από τα MIKE21 TOOLS, επιλέγοντας το ύψος κύματος, την περίοδο κύματος, το βάθος νερού στο οποίο θα βρίσκεται η γεννήτρια κυματισμών. Τα υπό μέτρηση και σύγκριση σημεία έχουν μέγιστο βάθος $h = 0.23 \text{ m}$ και το μήκος κύματος της περιοχής για όλες τις ημέρες μέτρησης ήταν $L = 6 \text{ m}$. Άρα επιλέχθηκε η θεωρία Stokes 5th order καθώς η διατομή μας βρίσκεται σε ρηγά νερά [$\max(h/L) = 0.038$]. Πραγματοποιήθηκαν διάφορες δοκιμές με διαφορετικό ύψος κύματος και σταθερή περίοδο $T = 2 \text{ sec}$.

- Στη συνέχεια καθορίζονται με το ίδιο εργαλείο MIKE21 TOOLS οι στοιβάδες απορρόφησης (sponge layer). Επιλέγοντας τον αριθμό των στοιβάδων ίσο με 10, το πρόγραμμα κατασκευάζει τα απορροφητικά όρια στα άκρα του αριθμητικού πεδίου.
- Επίσης στην προσπάθεια ορθότερης προσομοίωσης της έντονης θραύσης που πραγματοποιείται πάνω και κατόντη της κατασκευής, κρίθηκε απαραίτητη η εισαγωγή φίλτρου (filtering). Επιλέγοντας τον αριθμό των κελιών στην περιοχή του κυματοθραύστη ίσο με 0.5, το πρόγραμμα αποσβένει περισσότερη ενέργεια και πετυχαίνει μια μεγαλύτερη θραύση.

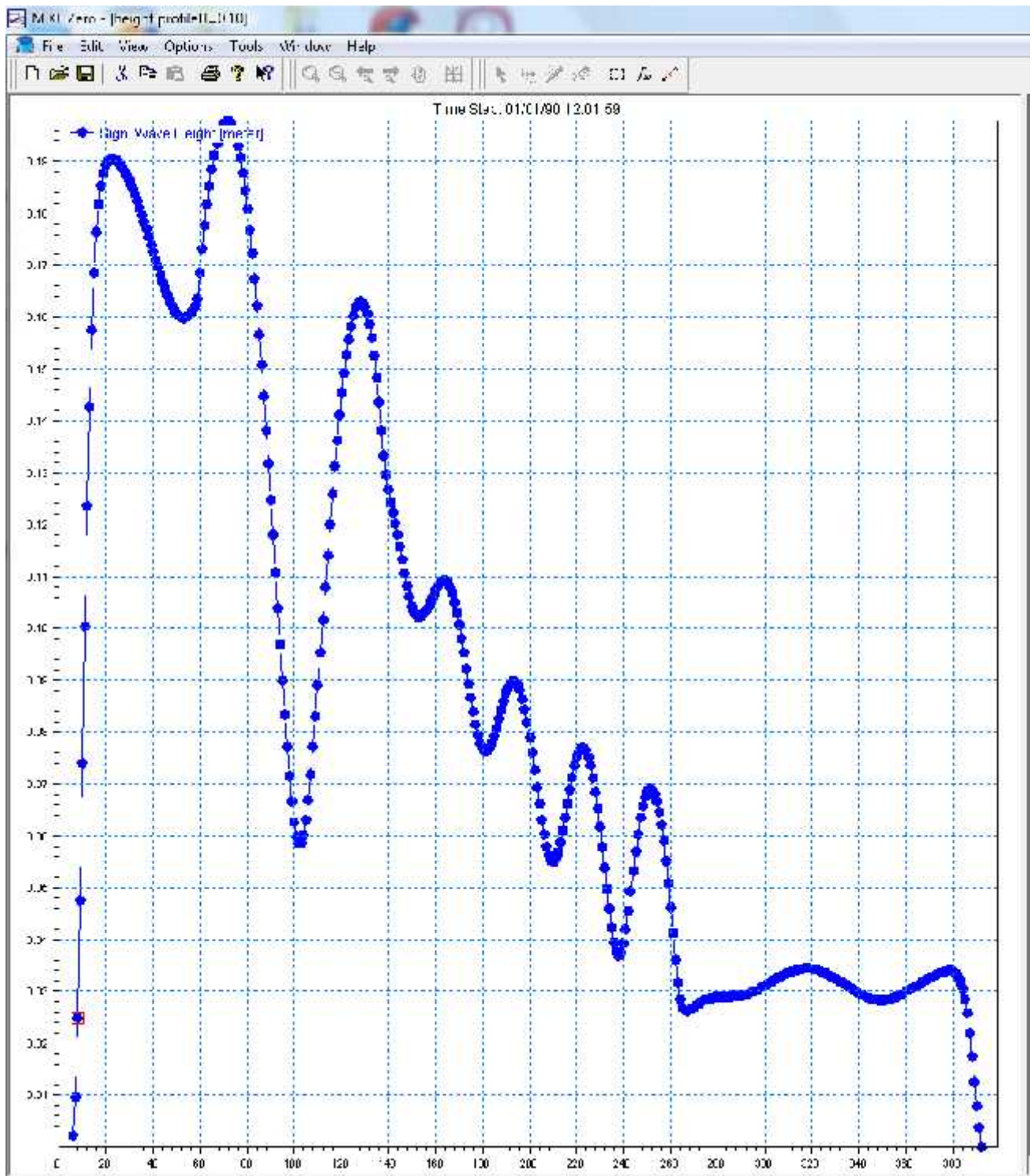
Τέλος καθορίζονται τα σημεία του πεδίου στα οποία απαιτούνται οι χρονοσειρές της ροής (P flux) δηλαδή στους σταθμούς 5 (137 point) , 33 (149point), 44 (259point) και η διαμόρφωση των υψών κύματος σε σχέση με τη βαθυμετρία. Μετά τον προσδιορισμό των παραπάνω βημάτων το πρόγραμμα είναι έτοιμο για προσομοίωση και εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

5.2 Διαγράμματα – Σχολιασμός αποτελεσμάτων

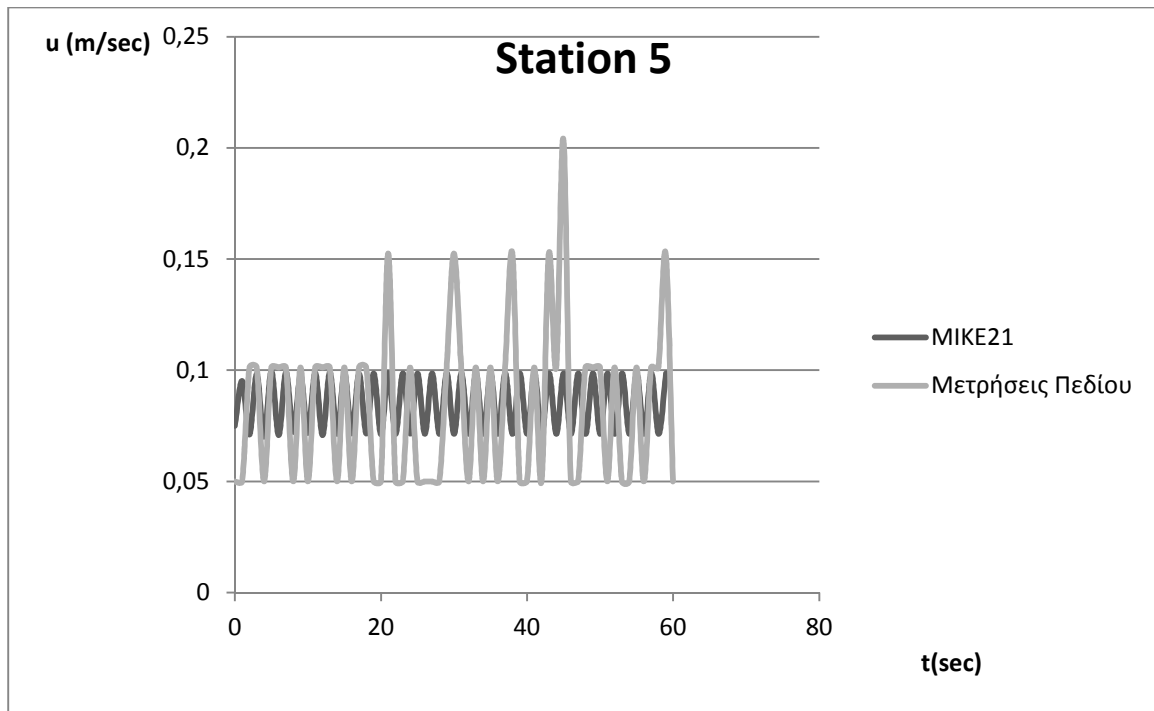
Στην παρούσα παράγραφο παρατίθενται για κάθε διαφορετική αριθμητική εφαρμογή το προφίλ του ύψους κύματος σε σχέση με τη βαθυμετρία και παρουσιάζονται σε κοινούς άξονες οι χρονοσειρές ταχύτητας για τα τρία υπό μελέτη σημεία της διατομής, όπως προκύπτουν από τις μετρήσεις πεδίου και την εφαρμογή του προγράμματος MIKE21. Επιπρόσθετα υπολογίζονται παράμετροι της στατιστικής ανάλυσης των παραπάνω για μια πληρέστερη σύγκριση μεταξύ τους.

5.2.1 1^η ομάδα αποτελεσμάτων

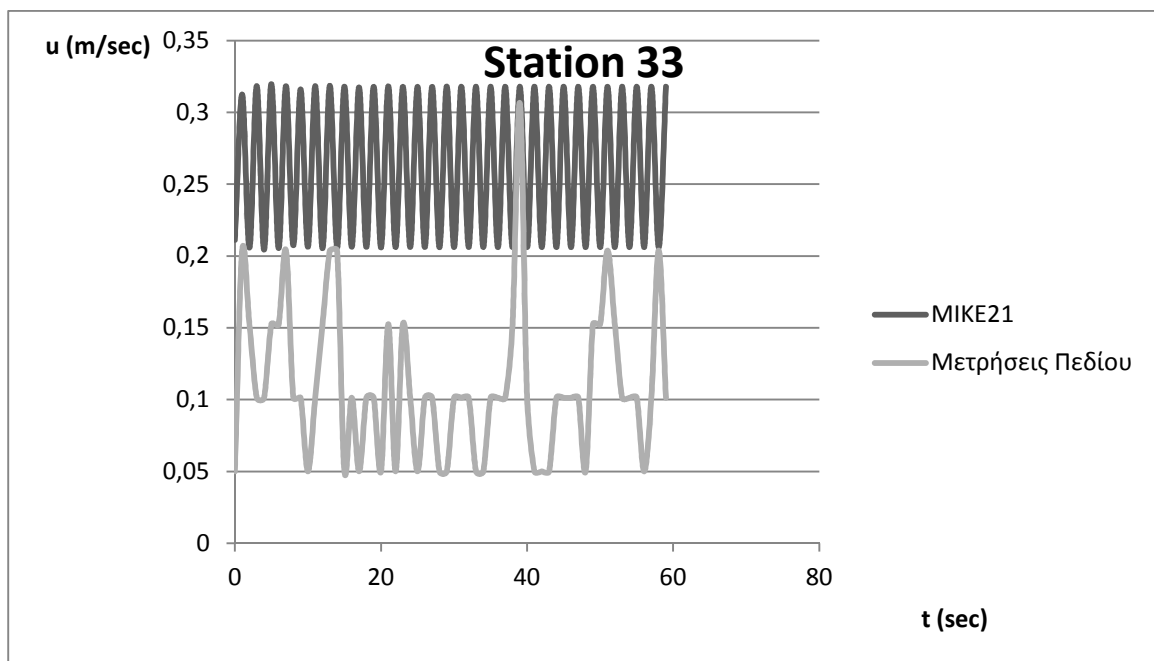
Η πρώτη ομάδα μετρήσεων που πραγματοποιήθηκε στις 25/06/2013 προσομοιώθηκε στο πρόγραμμα MIKE21 με $H=0.10\text{m}$ και εξήγαγε το παρακάτω προφίλ υψών κύματος και τις ακόλουθες χρονοσειρές ταχυτήτων.



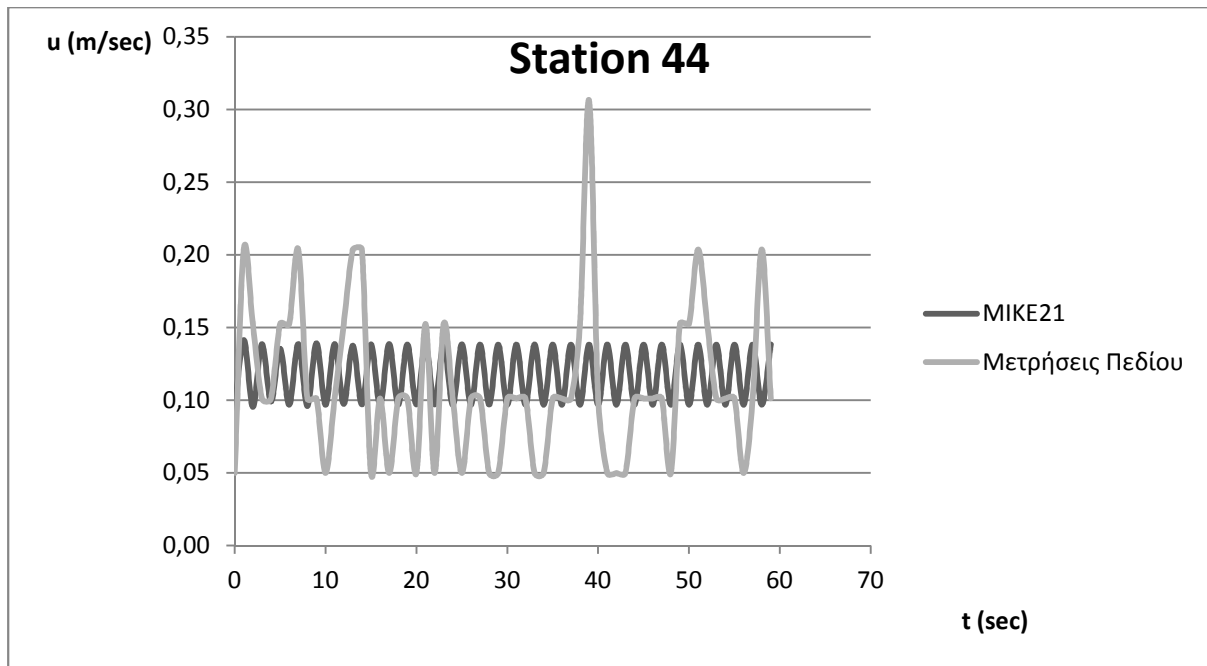
Σχήμα 5.2 Προφίλ υψών κύματος με $H=0.10 - 1^{\text{η}}$ ομάδα μετρήσεων



Σχήμα 5.3 Σύγκριση χρονοσειρών για 1^η ομάδα μετρήσεων – Σημείο 5

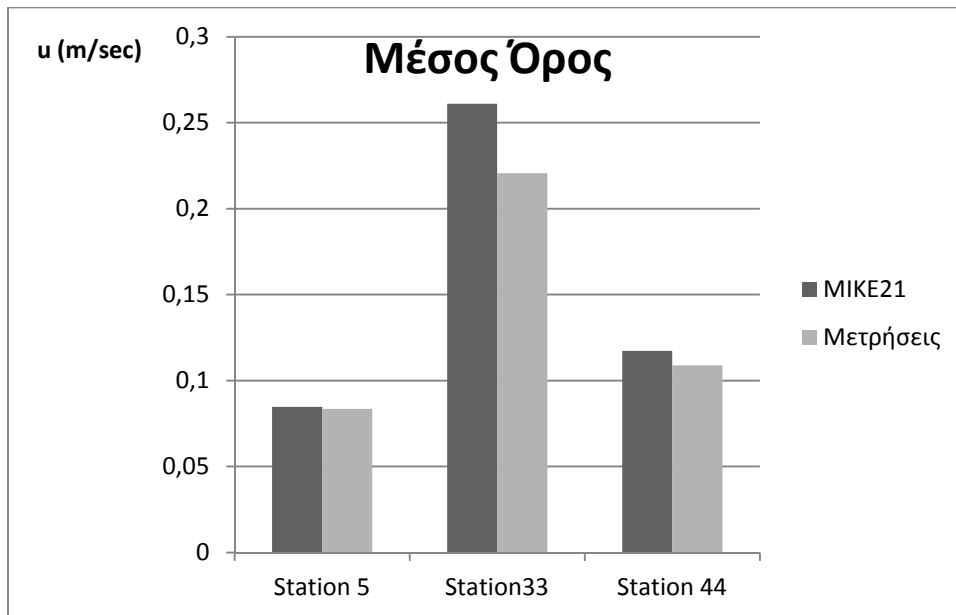


Σχήμα 5.4 Σύγκριση χρονοσειρών για 1^η ομάδα μετρήσεων – Σημείο 33

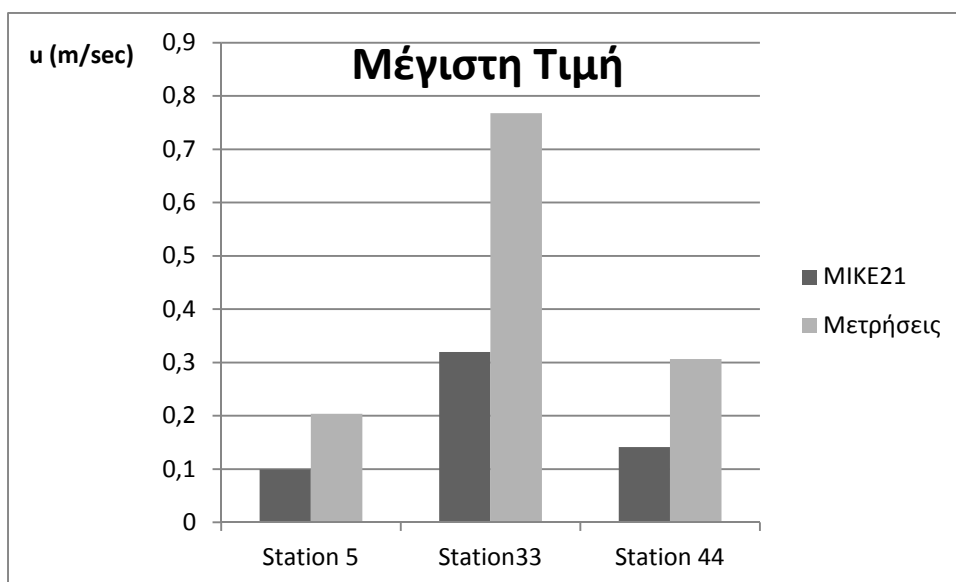
Σχήμα 5.5 Σύγκριση χρονοσειρών για 1^η ομάδα μετρήσεων – Σημείο 44

Στατιστική Παράμετρος / Αριθμός Σημείου		Μέσος Όρος	Μέγιστη Τιμή
Station 5	ΜΙΚΕ21	0,08472	0,099463
	Μετρήσεις	0,0836	0,20372
Station33	ΜΙΚΕ21	0,261022	0,319648
	Μετρήσεις	0,22052	0,76736
Station 44	ΜΙΚΕ21	0,117172	0,141297
	Μετρήσεις	0,1088	0,3062

Πίνακας 5.1 Στατιστικές παράμετροι για 1^η ομάδα μετρήσεων.



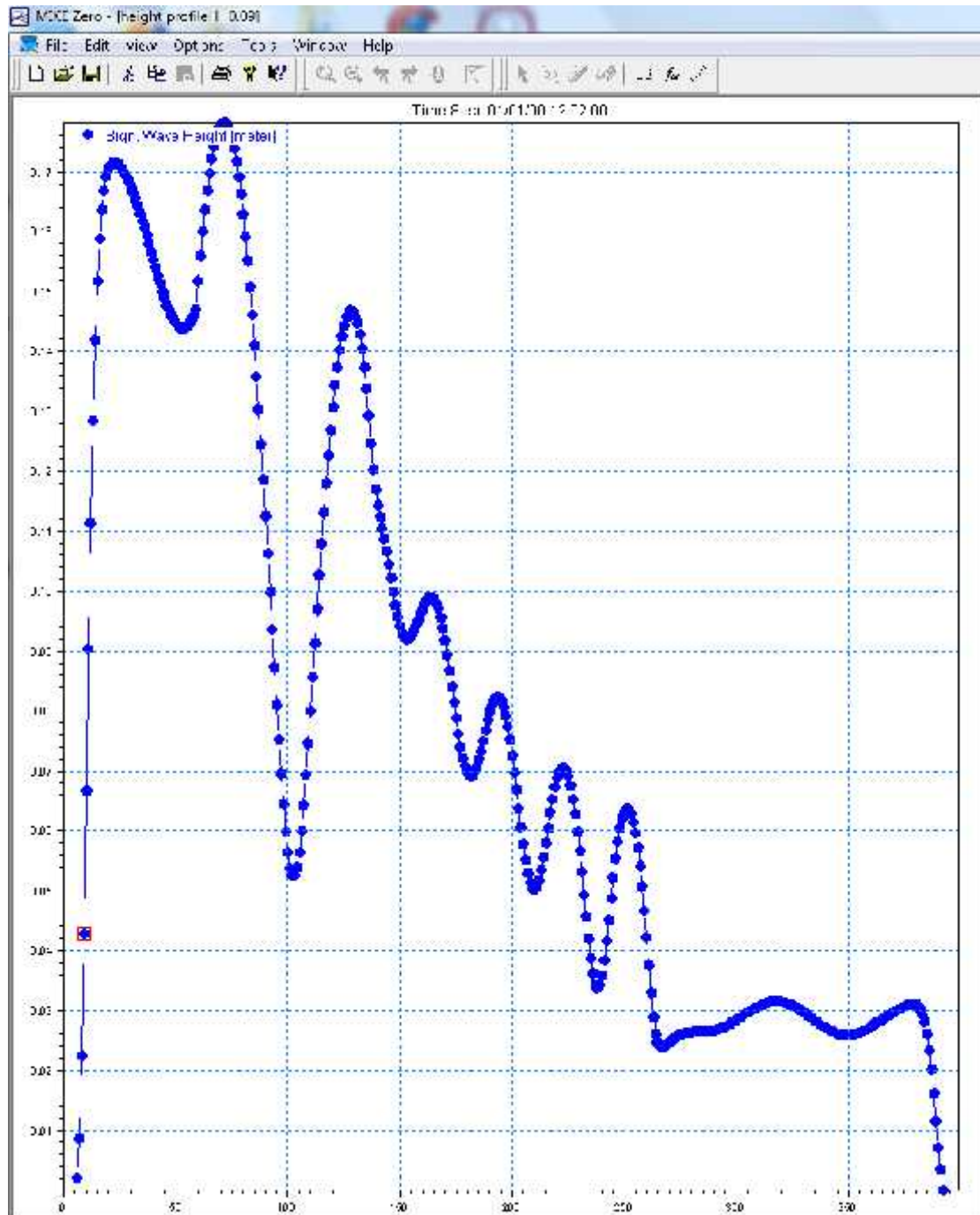
Σχήμα 5.6 Σύγκριση μέσων όρων για 1^η ομάδα μετρήσεων.



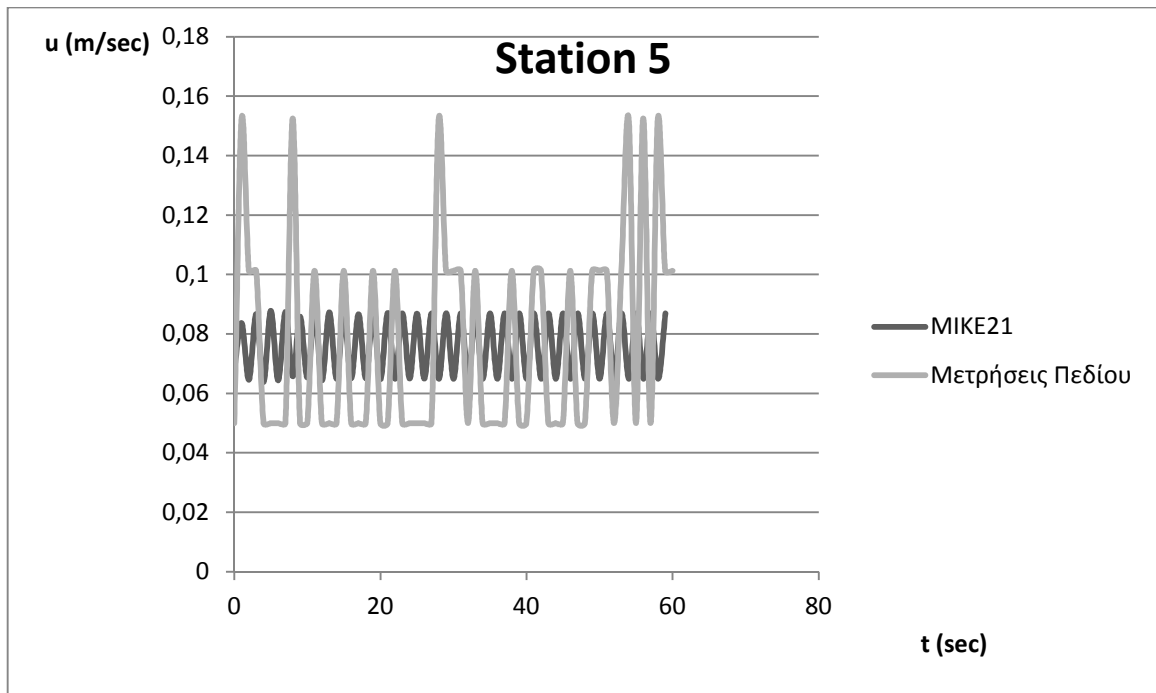
Σχήμα 5.7 Σύγκριση μέγιστης τιμής για 1^η ομάδα μετρήσεων.

5.2.2 2^η ομάδα αποτελεσμάτων

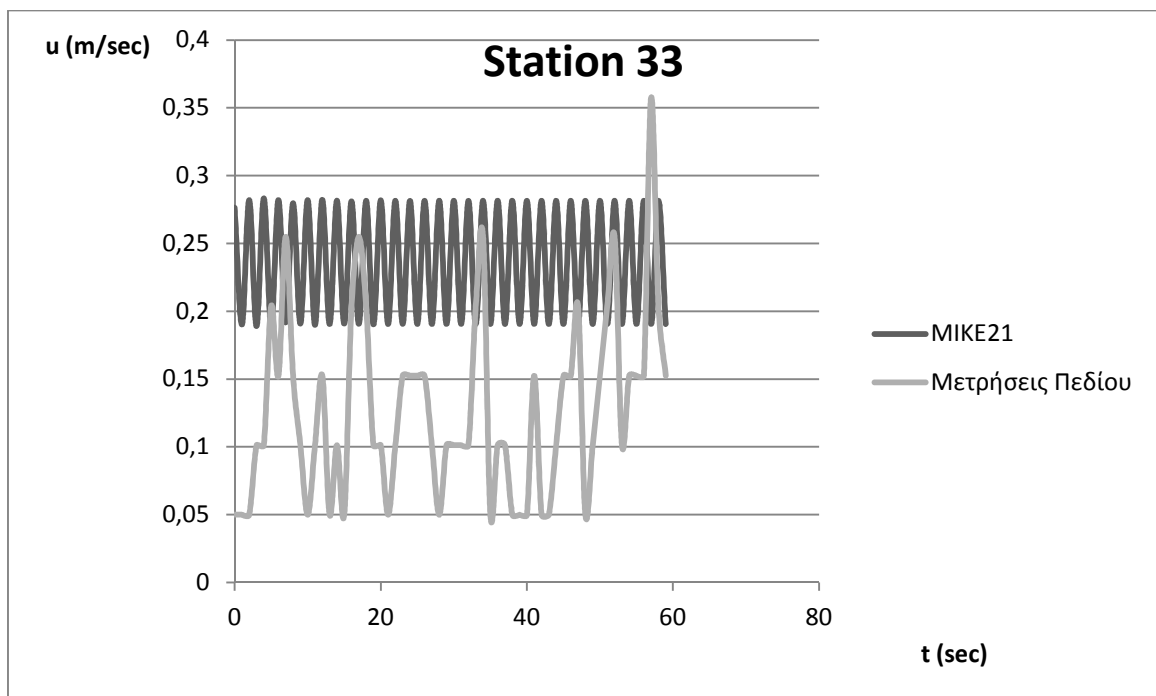
Η δεύτερη ομάδα μετρήσεων που πραγματοποιήθηκε στις 05/07/2013 προσομοιώθηκε στο πρόγραμμα MIKE21 με $H=0.90\text{m}$ και εξήγαγε το παρακάτω προφίλ υψών κύματος και τις ακόλουθες χρονοσειρές ταχυτήτων.



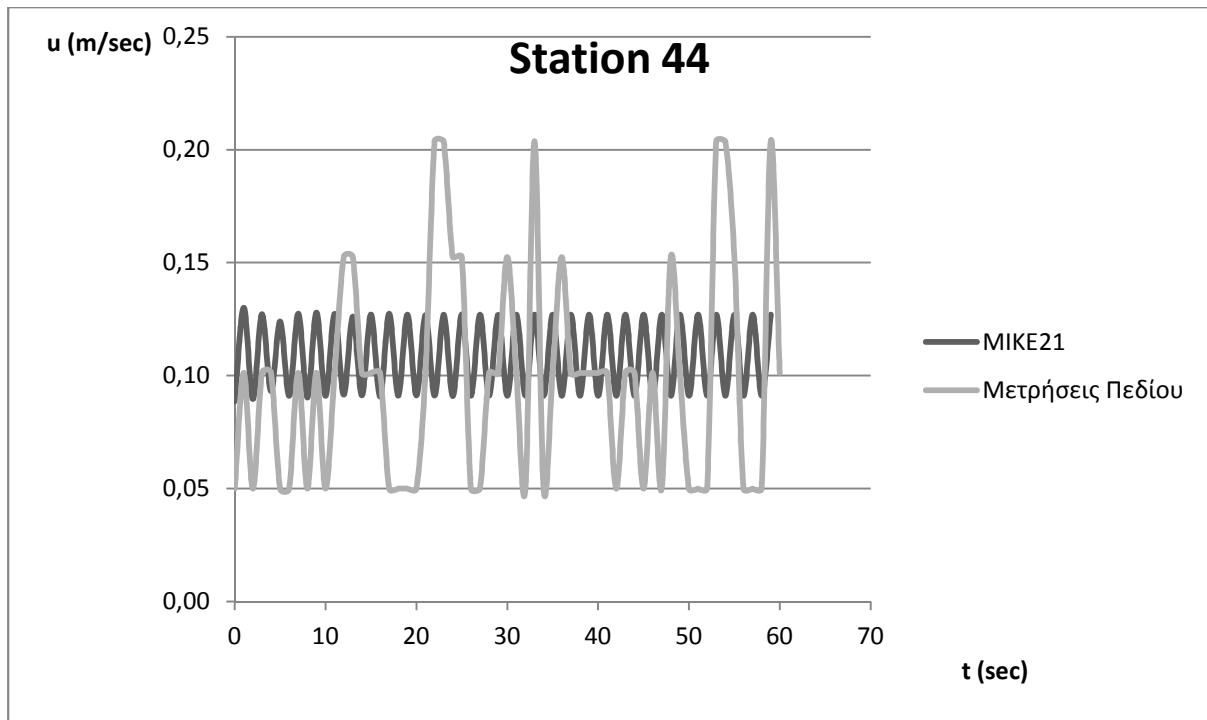
Σχήμα 5.8 Προφίλ υψών κύματος για $H=0.90$ – 2^η ομάδα μετρήσεων



Σχήμα 5.9 Σύγκριση χρονοσειρών για 2^η ομάδα μετρήσεων – Σημείο 5

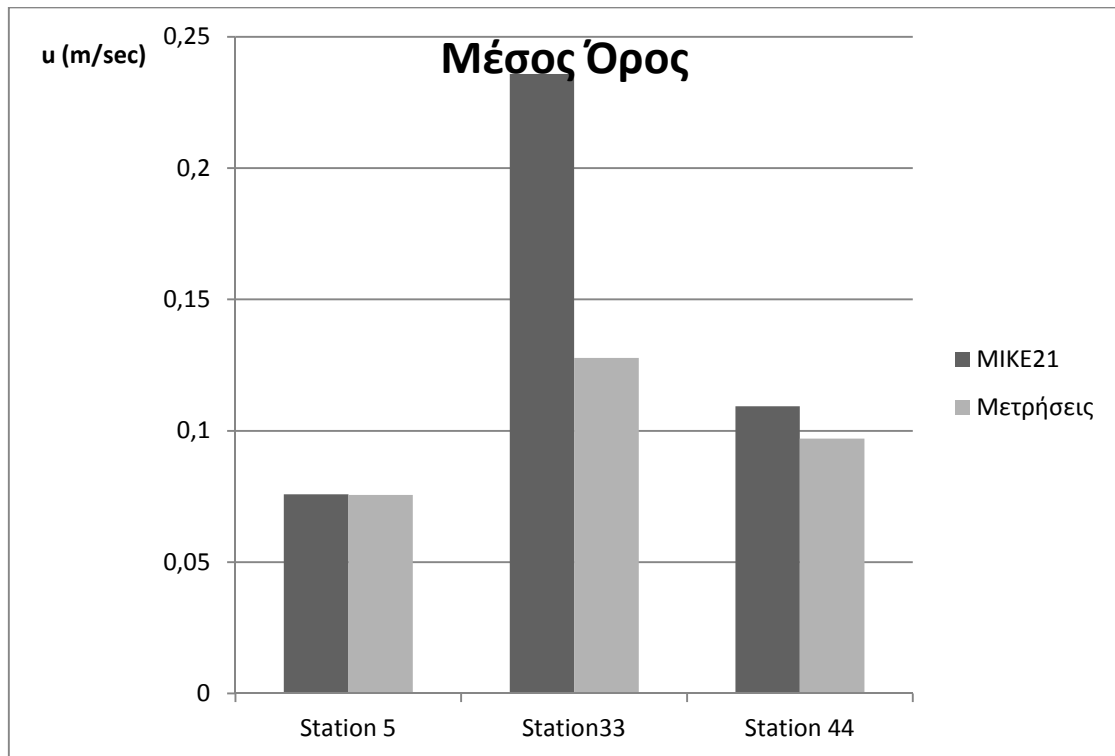


Σχήμα 5.11 Σύγκριση χρονοσειρών για 2^η ομάδα μετρήσεων – Σημείο 33

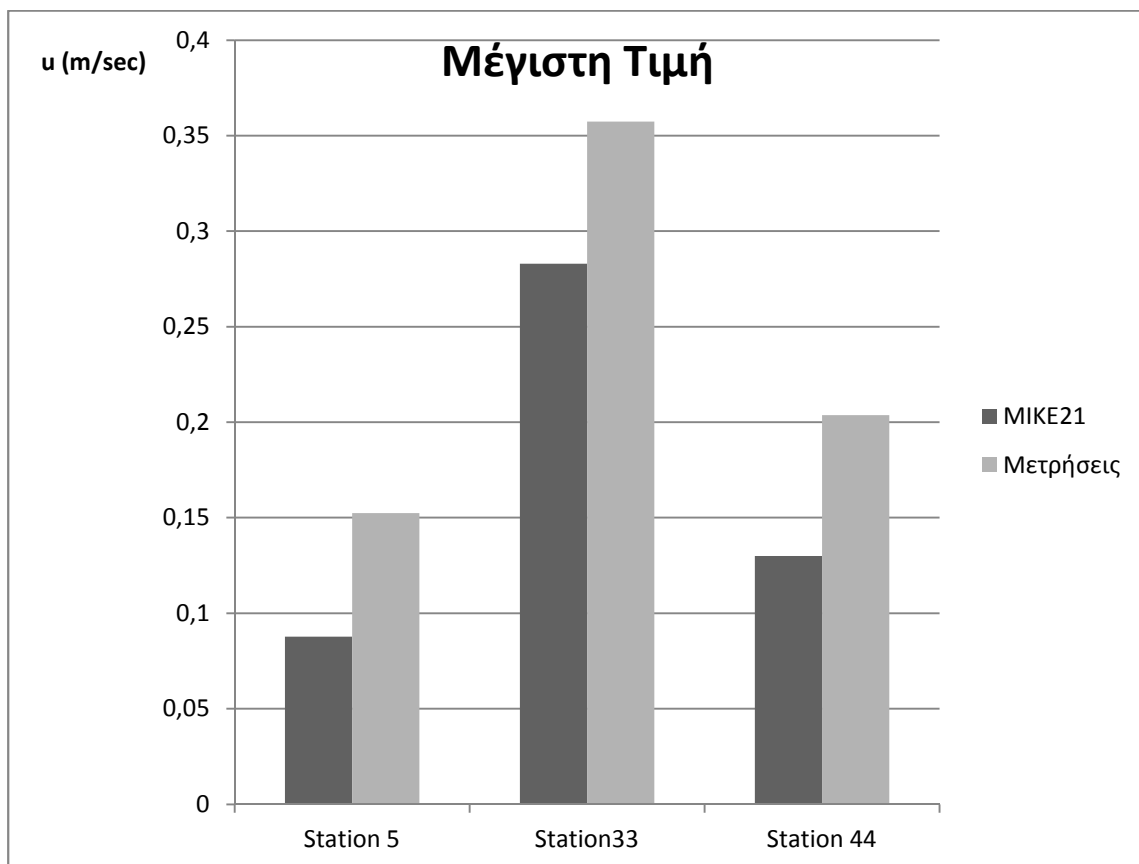
Σχήμα 5.10 Σύγκριση χρονοσειρών για 2^η ομάδα μετρήσεων – Σημείο 44

Στατιστική Παράμετρος / Αριθμός Σημείου		Μέσος Όρος	Μέγιστη Τιμή
Station 5	MIKE21	0,075886	0,087785
	Μετρήσεις	0,07564	0,15248
Station33	MIKE21	0,235825	0,283018
	Μετρήσεις	0,127714	0,35744
Station 44	MIKE21	0,109288	0,130031
	Μετρήσεις	0,09706	0,20372

Πίνακας 5.2 Στατιστικές Παράμετροι για 2^η ομάδα μετρήσεων



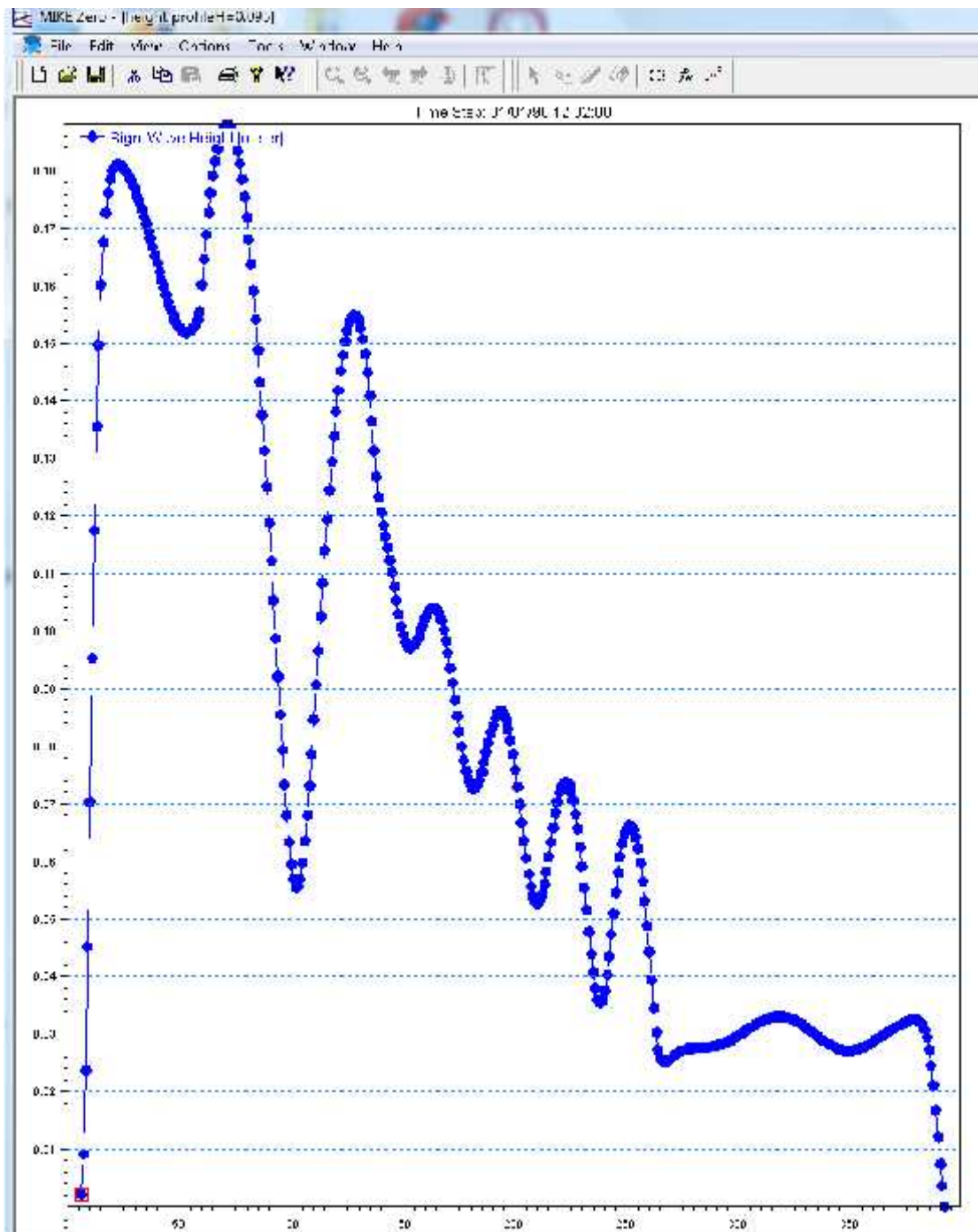
Σχήμα 5.12 Σύγκριση μέσων όρων για 2^η ομάδα μετρήσεων



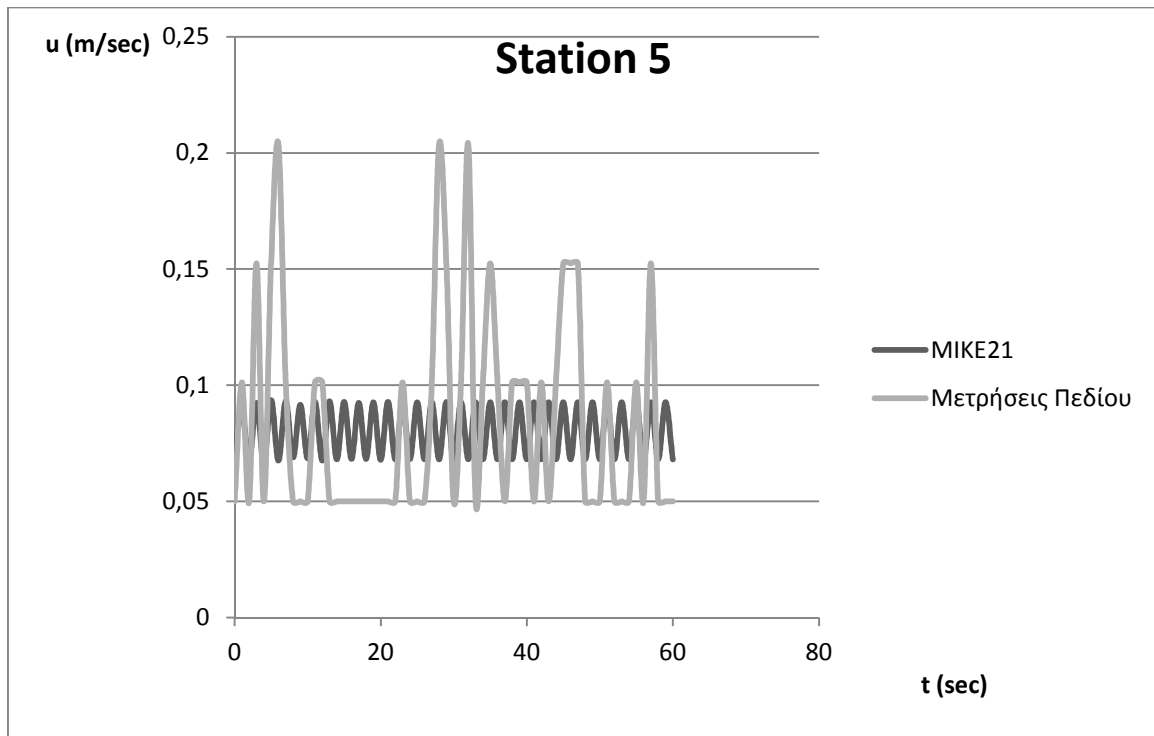
Σχήμα 5.13 Σύγκριση μέγιστων τιμών για 2^η ομάδα μετρήσεων

5.2.3 3^η ομάδα αποτελεσμάτων

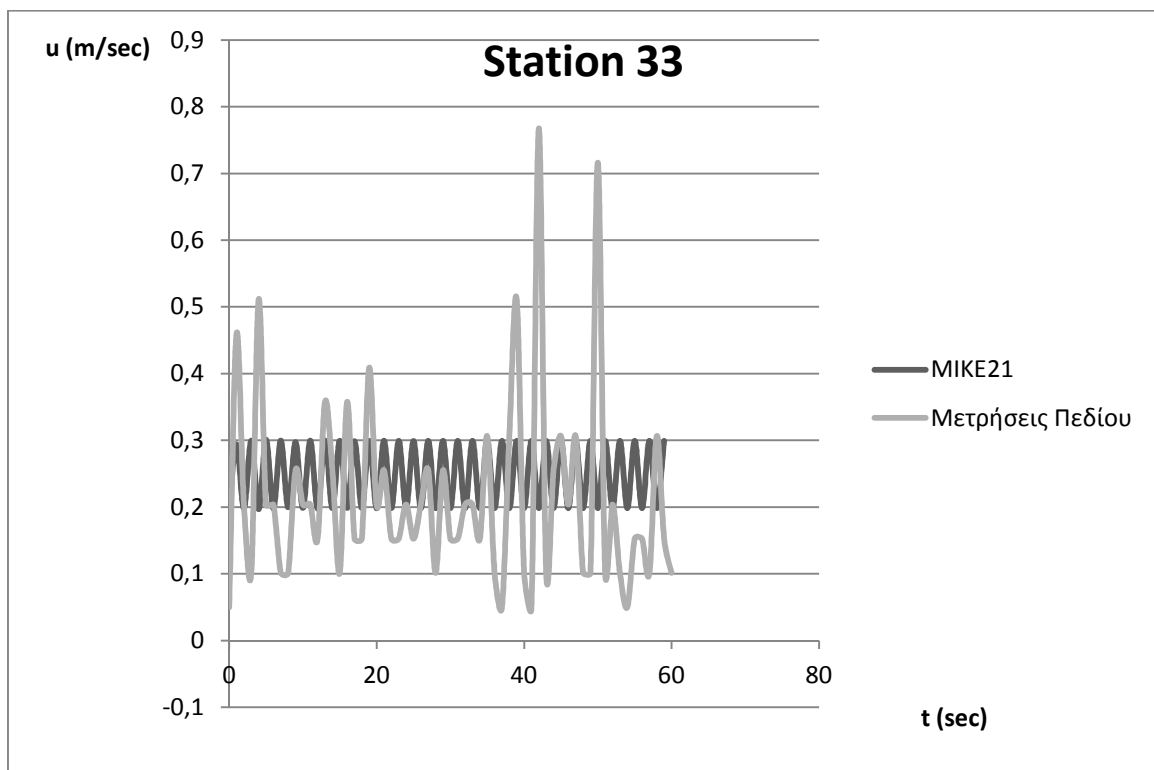
Η τρίτη ομάδα μετρήσεων που πραγματοποιήθηκε στις 13/07/2013 προσομοιώθηκε στο πρόγραμμα MIKE21 με $H=0.095\text{m}$ και εξήγαγε το παρακάτω προφίλ υψών κύματος και τις ακόλουθες χρονοσειρές ταχυτήτων.



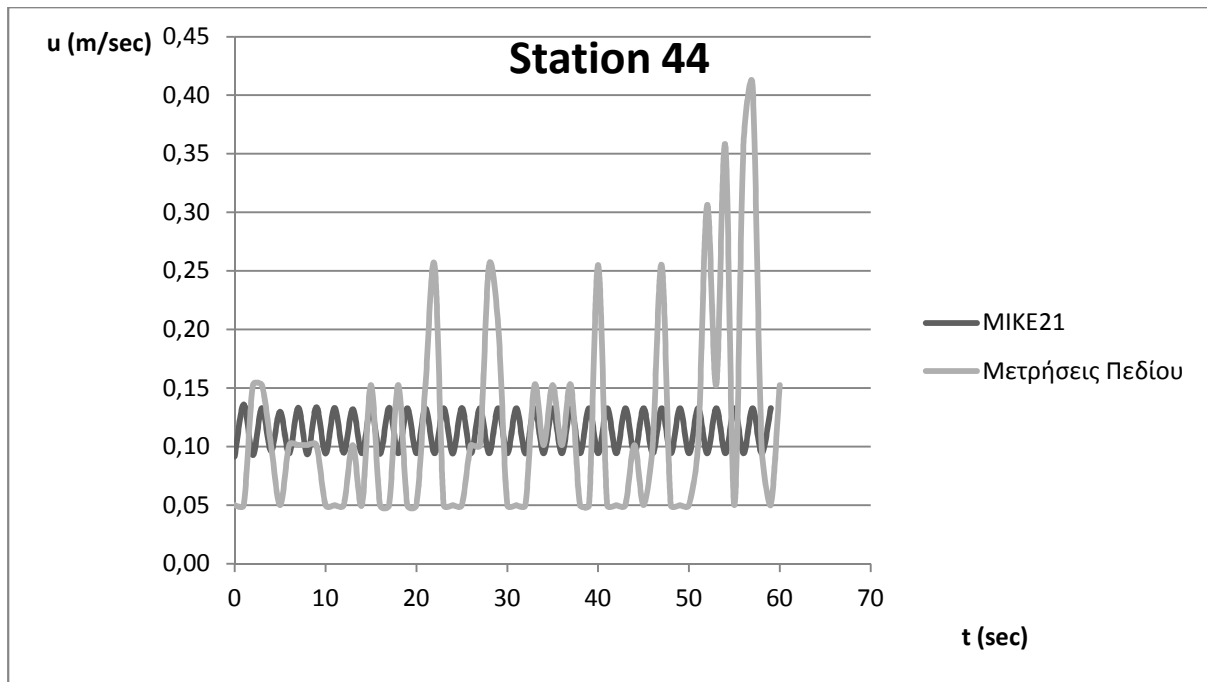
Σχήμα 5.14 Προφίλ υψών κύματος H=0.095 για 3^η ομάδα μετρήσεων.



Σχήμα 5.15 Σύγκριση χρονοσειρών για 3^η ομάδα μετρήσεων – Σημείο 5

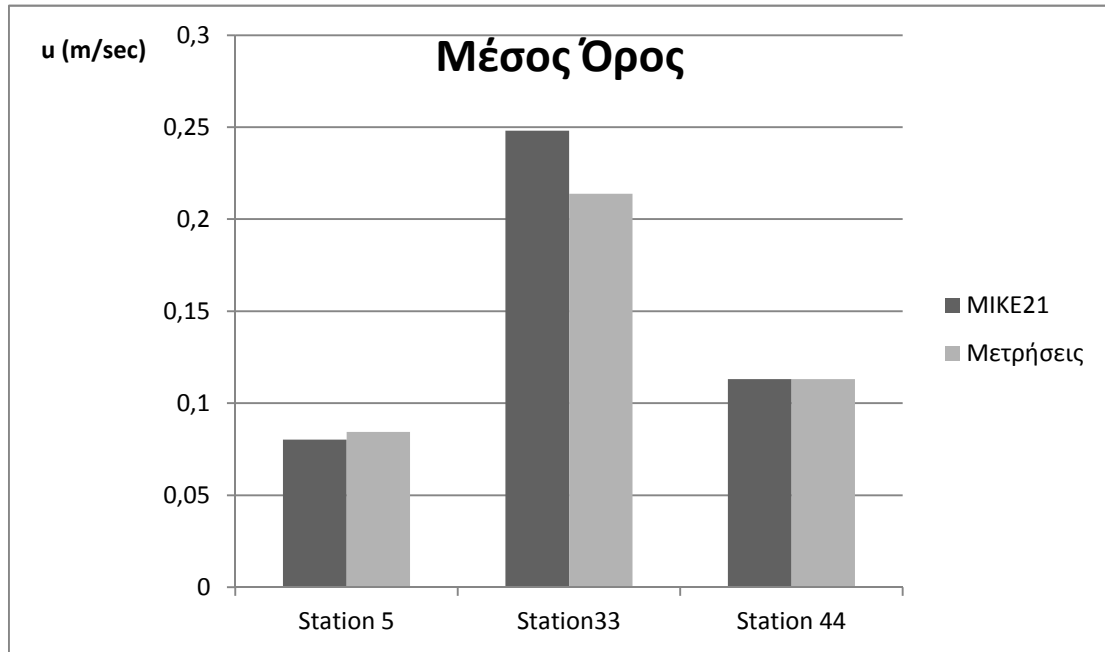


Σχήμα 5.16 Σύγκριση χρονοσειρών για 3^η ομάδα μετρήσεων – Σημείο 33

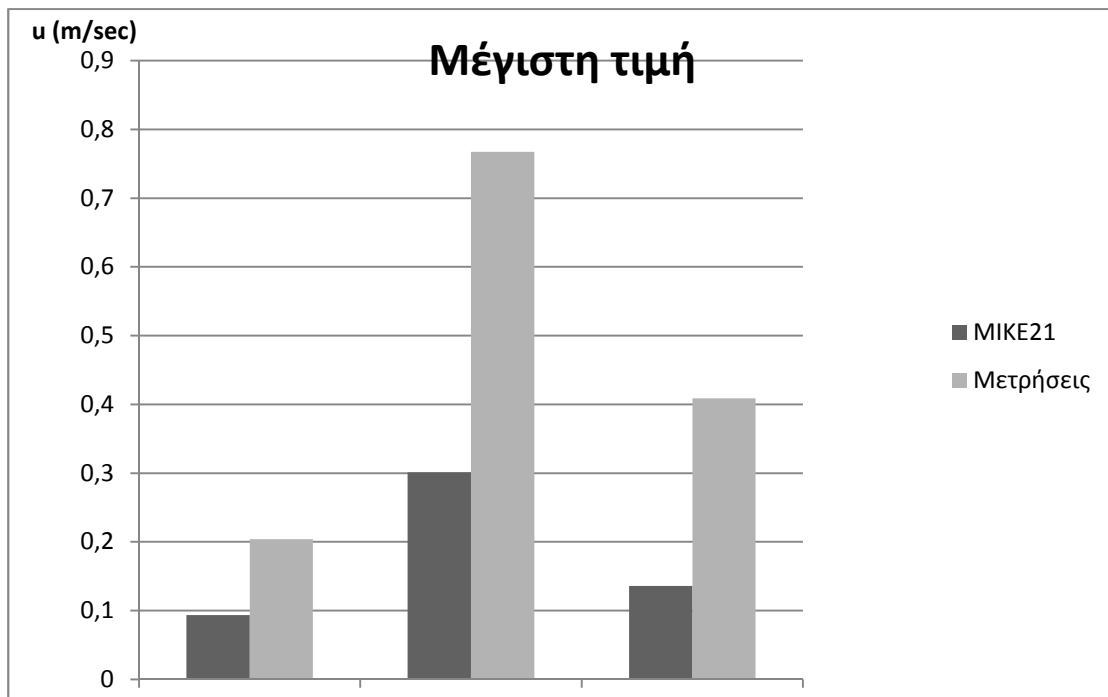
Σχήμα 5.17 Σύγκριση χρονοσειρών για 3^η ομάδα μετρήσεων – Σημείο 44

Στατιστική Παράμετρος / Αριθμός Σημείου		Μέσος Όρος	Μέγιστη Τιμή
Station 5	ΜΙΚΕ21	0,080202	0,093577
	Μετρήσεις	0,08444	0,20372
Station33	ΜΙΚΕ21	0,248094	0,30121
	Μετρήσεις	0,2138	0,76736
Station 44	ΜΙΚΕ21	0,113093	0,135837
	Μετρήσεις	0,11468	0,40868

Πίνακας 5.3 Στατιστικές παράμετροι για 3^η ομάδα μετρήσεων.



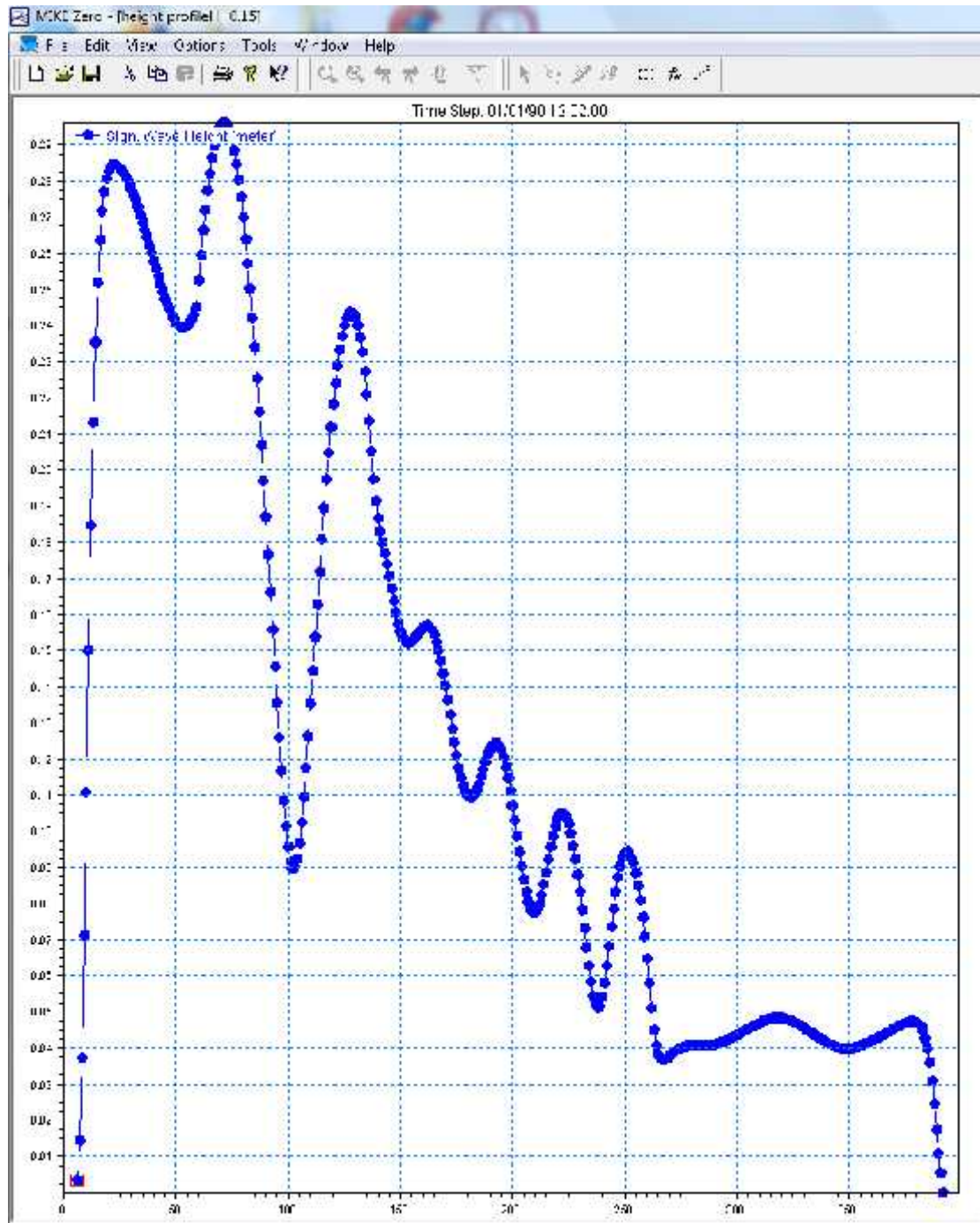
Σχήμα 5.17 Σύγκριση μέσων όρων για 3^η ομάδα μετρήσεων.



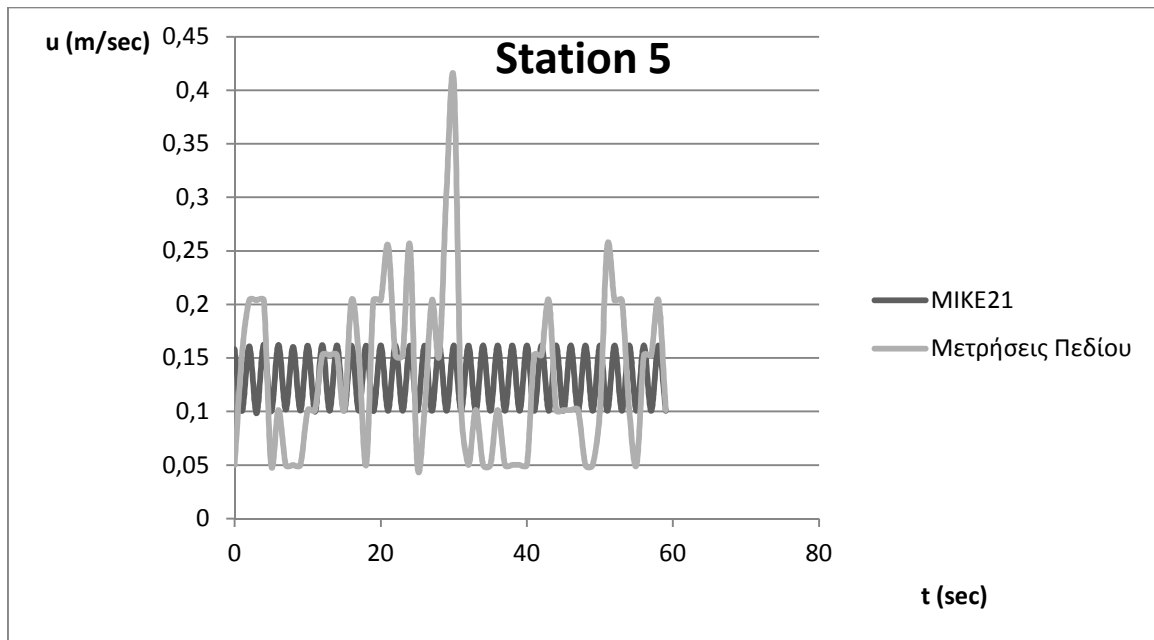
Σχήμα 5.18 Σύγκριση μέγιστων τιμών για 3^η ομάδα μετρήσεων.

5.2.4 4^η ομάδα αποτελεσμάτων

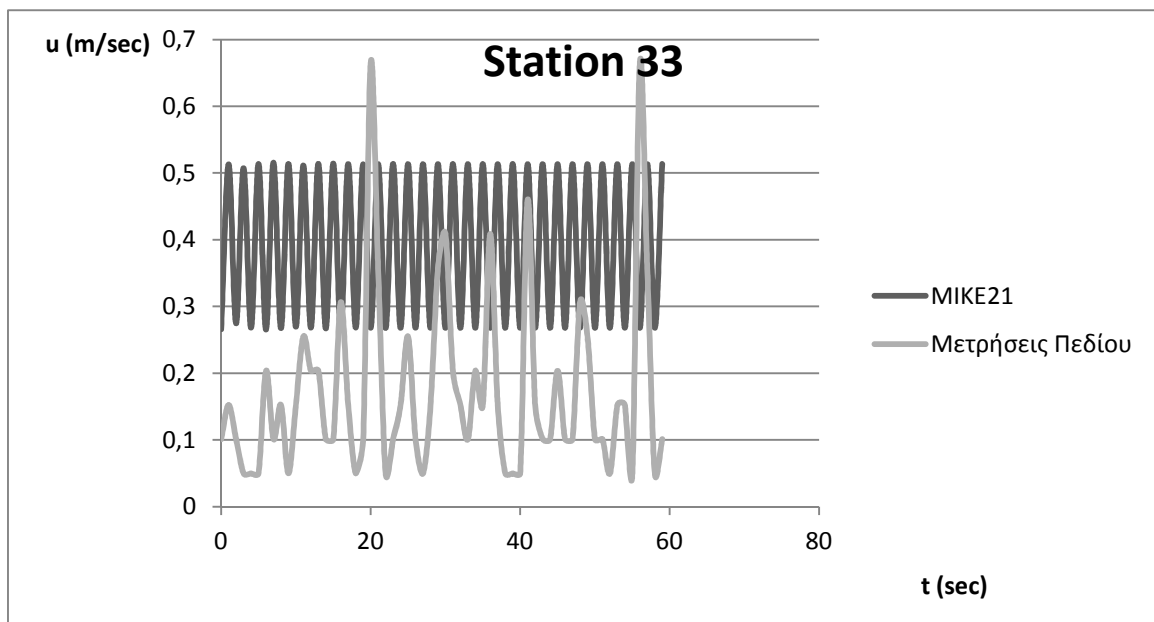
Η τέταρτη ομάδα μετρήσεων που πραγματοποιήθηκε στις 19/07/2013 προσομοιώθηκε στο πρόγραμμα MIKE21 με $H=0.15\text{m}$ και εξήγαγε το παρακάτω προφίλ υψών κύματος και τις ακόλουθες χρονοσειρές ταχυτήτων.



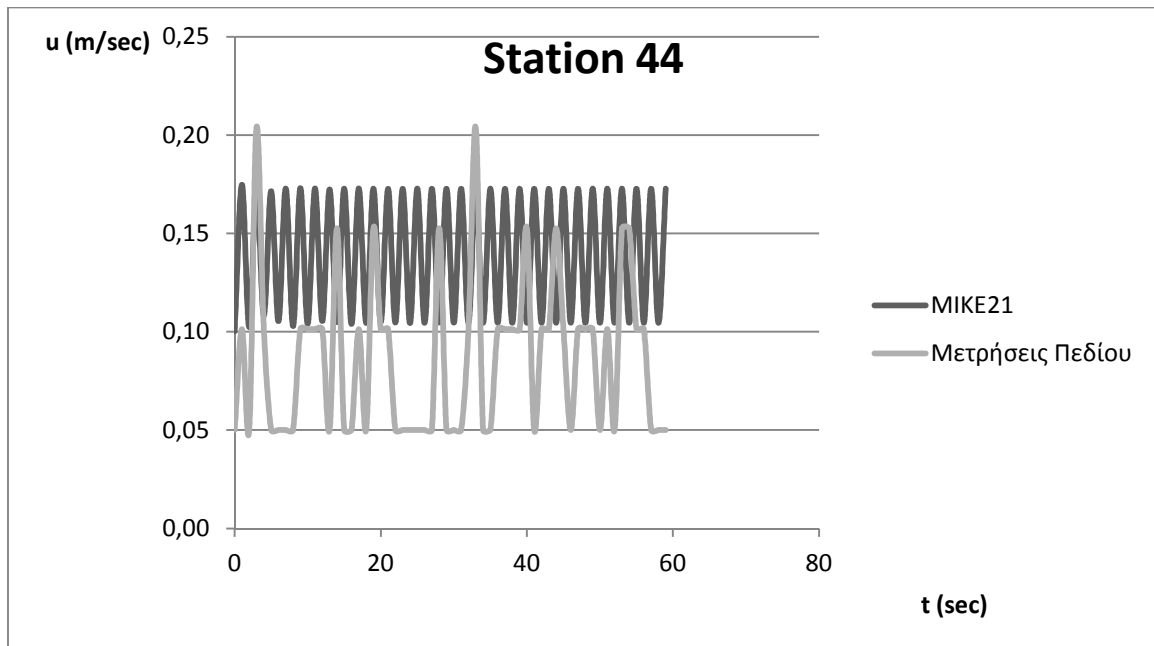
Σχήμα 5.19 Προφίλ υψών κύματος για $H=0.15\text{m}$ για 4^η ομάδα μετρήσεων.



Σχήμα 5.20 Σύγκριση χρονοσειρών για 4^η ομάδα μετρήσεων

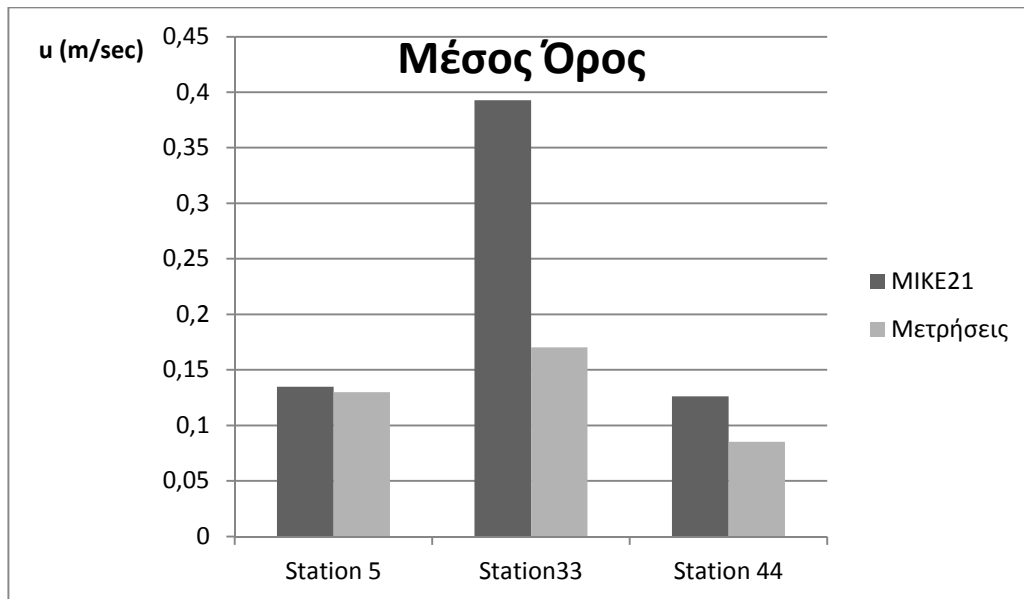


Σχήμα 5.21 Σύγκριση χρονοσειρών για 4^η ομάδα μετρήσεων

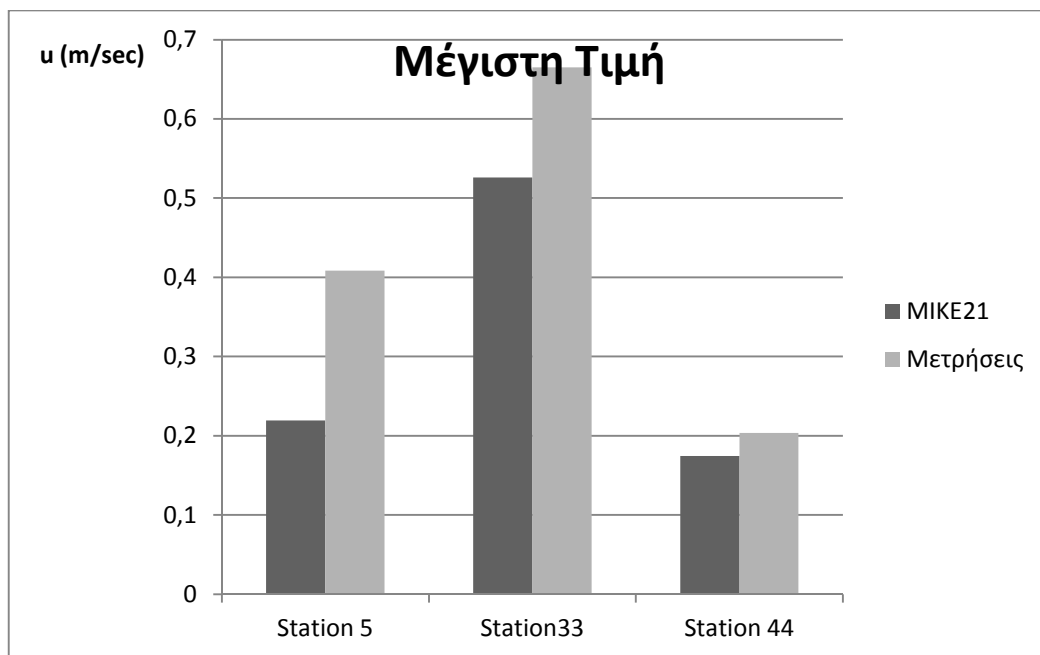
Σχήμα 5.22 Σύγκριση χρονοσειρών για 4^η ομάδα μετρήσεων

Στατιστική Παράμετρος Αριθμός Σημείου		Μέσος Όρος	Μέγιστη Τιμή
Station 5	MIKE21	0,134665819	0,219566
	Μετρήσεις	0,129820328	0,40868
Station33	MIKE21	0,392866949	0,526030435
	Μετρήσεις	0,170140328	0,66488
Station 44	MIKE21	0,126234121	0,174690476
	Μετρήσεις	0,085300328	0,20372

Πίνακας 5.4 Στατιστικές παράμετροι για 4^η ομάδα μετρήσεων.



Σχήμα 5.23 Σύγκριση μέσων όρων για 4^η ομάδα μετρήσεων



Σχήμα 5.24 Σύγκριση μέγιστης τιμής για 4^η ομάδα μετρήσεων.

5.2.5 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω διαγράμματα, στα ανάντη και κατόντη σημεία του κυματοθραύστη υπάρχει γενικά καλή συμφωνία ανάμεσα στις εν λόγω μέσες τιμές ταχυτήτων των τεσσάρων ομάδων μετρήσεων, με τις αποκλίσεις που εμφανίζονται να είναι σχετικά μικρές και μέσα στα αναμενόμενα και επιτρεπτά όρια. Οι αποκλίσεις μπορούν να αποδοθούν σε διάφορους επιμέρους παράγοντες. Για τα ίδια σημεία (station 5, station 44) παρατηρούνται μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ των μέγιστων τιμών του προγράμματος και των μετρήσεων και για τις τέσσερις ομάδες, με αυτές των μετρήσεων να είναι εμφανώς μεγαλύτερες. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στη φυσική άναρχη γεωμετρία του κυματοθραύστη. Συγκεκριμένα, ο υπό εξέταση κυματοθραύστης χαρακτηρίζεται στην επιφάνεια του από μικρές και μεγάλες προεξοχές, οι οποίες είναι αιτία αποκόλλησης της ροής και συχνής εμφάνισης φαινομένων τύρβης. Αυτά, σε αντίθεση με τα αποτελέσματα του προγράμματος, επηρέασαν και συνυπολογίστηκαν στις σημειακές μετρήσεις πεδίου, με αποτέλεσμα αυτές να εμφανίζουν μεγαλύτερη διακύμανση και μεγαλύτερη μέγιστη τιμή.

Στα σημεία πάνω στη στέψη (Station 33) η σύγκριση των μετρήσεων με τα αποτελέσματα του προγράμματος MIKE 21 είναι μη ικανοποιητική με μεγάλες αποκλίσεις. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στο ότι το συγκεκριμένο πρόγραμμα δεν διαθέτει τροποποιήσεις των εξισώσεων του για ύφαλο κυματοθραύστη με απότομη κλίση μετώπων, και δεν προσομοιώνει με ακρίβεια τη θραύση.

Τέλος αξίζει να σχολιαστεί η πολύ ικανοποιητική απεικόνιση του προφίλ των υψών των κυμάτων και στις τέσσερις ομάδες μετρήσεων. Τα διαγράμματα 5.2, 5.4, 5.14, 5.19 σχεδόν ταυτίζονται με την εικόνα των υψών που καταγράφηκε στις ψηφιακές ταινίες κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Συγκεκριμένα παρατηρείται απότομη πτώση του ύψους κύματος σε απόσταση σχεδόν δύο μέτρα πριν τον κυματοθραύστη και εμφάνιση στάσιμου κύματος, ενώ σχεδόν δύο μέτρα μετά την κατασκευή ξεκινά η απόσβεση ενέργειας και η μείωση του ύψους κύματος.

6. Γενικά συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

6.1 Σύνοψη συμπερασμάτων

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μία προσπάθεια κατανόησης των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα γύρω από ένα ύφαλο κυματοθραύστη σε ό,τι αφορά το υδροδυναμικό πεδίο ταχυτήτων. Επίσης περιλαμβάνει μία σύντομη καταγραφή όλων των αντίστοιχων προσπαθειών που έχουν πραγματοποιηθεί στο χώρο της έρευνας.

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο βασικής έρευνας του Εργαστηρίου Λιμενικών Έργων του Ε.Μ.Π. και περιλαμβάνει την πρώτη σειρά αριθμητικών μετρήσεων πεδίου της ευρύτερης αυτής διερεύνησης. Βασίστηκε σε μία σειρά μετρήσεων ταχυτήτων γύρω από φυσικό εμπόδιο, που θεωρήθηκε και εξετάστηκε ως ύφαλος κυματοθραύστης, καθώς και στην αριθμητική προσομοίωση του ίδιου φυσικού εμποδίου. Στο μοντέλο ελέγχθηκαν κυματισμοί με ποικίλες χαρακτηριστικές παραμέτρους και όσο το δυνατόν πιο κοντά στις επικρατούσες κυματικές συνθήκες κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, με στόχο την ορθότερη σύγκριση των δύο αποτελεσμάτων και τον σωστότερο έλεγχο της απόδοσης του μοντέλου.

Από την εν λόγω σύγκριση προέκυψε ότι το εμπορικό πρόγραμμα MIKE21 (BW) αποτυγχάνει να καταγράψει επακριβώς το υδροδυναμικό πεδίο γύρω από μια ύφαλη κατασκευή σε ρηχά νερά. Αυτό αποδίδεται στην ιδιομορφία των οριακών συνθηκών του προγράμματος καθώς και στο ότι οι λειτουργίες του δεν είναι ικανές να προσομοιώσουν τη πραγματική ιδιάζουσα γεωμετρία του ύφαλου κυματοθραύστη που χαρακτηρίζεται από μη λεία επιφάνεια και κατακόρυφα μέτωπα.

Πάραυτα μπορεί να θεωρηθεί ικανό στην πρόβλεψη μέσω ταχυτήτων σε ανάντη και κατάντη σημεία αφού οι αποκλίσεις ήταν σχετικά μικρές και μέσα σε επιτρεπτά και αναμενόμενα όρια. Έτσι το MIKE21 μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα πρώτο εργαλείο

πρόβλεψης μελλοντικών ταχυτήτων, δίνοντας μια ορθή αξιολόγηση του ύφαλου κυματοθραύστη ως βιότοπο.

6.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Τα αποτελέσματα που επεξεργαστήκαμε για την εξαγωγή των παραπάνω συμπερασμάτων προέκυψαν από αριθμητικές μετρήσεις πεδίου 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 έρευνας, ώστε η διαδικασία να καταστεί περισσότερο αποτελεσματική και καρποφόρα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση θα μπορούσε η περίοδος κύματος να μετρηθεί με ειδικό όργανο για κάθε ημέρα μέτρησης. Έτσι θα προέκυπταν περισσότερα και πιο ακριβή αποτελέσματα από το πρόγραμμά αφού η περίοδος κύματος θα αποτελούσε άλλη μία παράμετρο εισαγωγής. Επίσης θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί το πρόγραμμα MIKE21 2DH το οποίο θα παρήγαγε μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα του υδροδυναμικού πεδίου σε δύο διευθύνσεις.

Τέλος, μακριά από τα πλαίσια εκπόνησης μια διπλωματικής εργασίας και σε επίπεδο έρευνας θα μπορούσε να χρησιμοποιηθούν για τη σύγκριση τα εμπορικά προγράμματα CFD (Computational Fluid Dynamics) που είναι ικανά να προσομοιώσουν πλήρως τη σημειακή γεωμετρία και να λάβουν υπόψη τους φαινόμενα αποκόλλησης ροής, τύρβης και πιο έντονης θραύσης.

7. Βιβλιογραφία

Παρακάτω δίνεται μία καταγραφή των δημοσιεύσεων, συγγραμάτων, εργασιών και βιβλίων, στα οποία βασίστηκε η ανάπτυξη της παρούσας εργασίας. Οι αναφορές ταξινομούνται αλφαβητικά:

- Afentoulis V., 2013 “Αριθμητική διερεύνηση της εντατικοποίησης της κυματικής δράσης στα κατάντη μόλου λιμένα” Διπλωματική εργασία ΕΜΠ.
- Avgeris I, Karambas T.V. and Prinos P., 2004. “Boussinesq modeling of wave interaction with porous submerged breakwaters”.Coastal Engineering. ICCE, Lisbon, Portugal
- Avgeris, I., 2001. “Wave propagation in coastal zone”. In: National Technical University of Athens, library
- Avgeris, I., Karambas, Th.V. and Prinos, P., 2004. “Boussinesq Modeling of Wave interaction with Porous Submerged Breakwaters”, In: Proceedings of 29th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, pp. 604-616.
- Avgeris, I., Karambas, Th., Prinos, P., Koutitas, Ch., Belloti, G., Briganti, R., Brocchini, M., 2004. DELOS Internal Report, “Flow Description (WP 2.1), Final Phase-Resolving Boussinesq- Type Models (D42)” (August 2004).
- Avgeris, I., Karambas, Th., Prinos, P., Koutitas, Ch., Belloti, G., Briganti, R. rocchini, M., 2004. DELOS Internal Report, Flow Description (WP 2.1), Final Phase-Resolving Boussinesq-Type Models (D42)T (August 2004).
- Boussinesq, J., 1872. “Theory des ondes et des remous qui se propagent le long d’un canal rectangulaire horizontal, en communicant au liquid contenu dans ce canal des vitesses sensiblement pareilles de la surface au fond”. In: Journal de Mathematiques Pures et Appliques Serie. 17, 55-108.
- CEM, Coastal Engineering Mamual, 2008, In: <http://chl.erdc.usace.army.mil/cem>
- Chapman, B., Ilic, S., Simmonds, D., Chadwick, A., 1999. “Physical model evaluation of the hydrodynamics produced around a permeable breakwater scheme”. Proceedings of the International Conference on Coastal Structures, pp. 803–812.
- Chondros, M. “Διάδοση και θραύση κυματισμών στην παράκτια ζώνη”, Μεταπτυχιακή Εργασία. Βιβλιοθήκη Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου

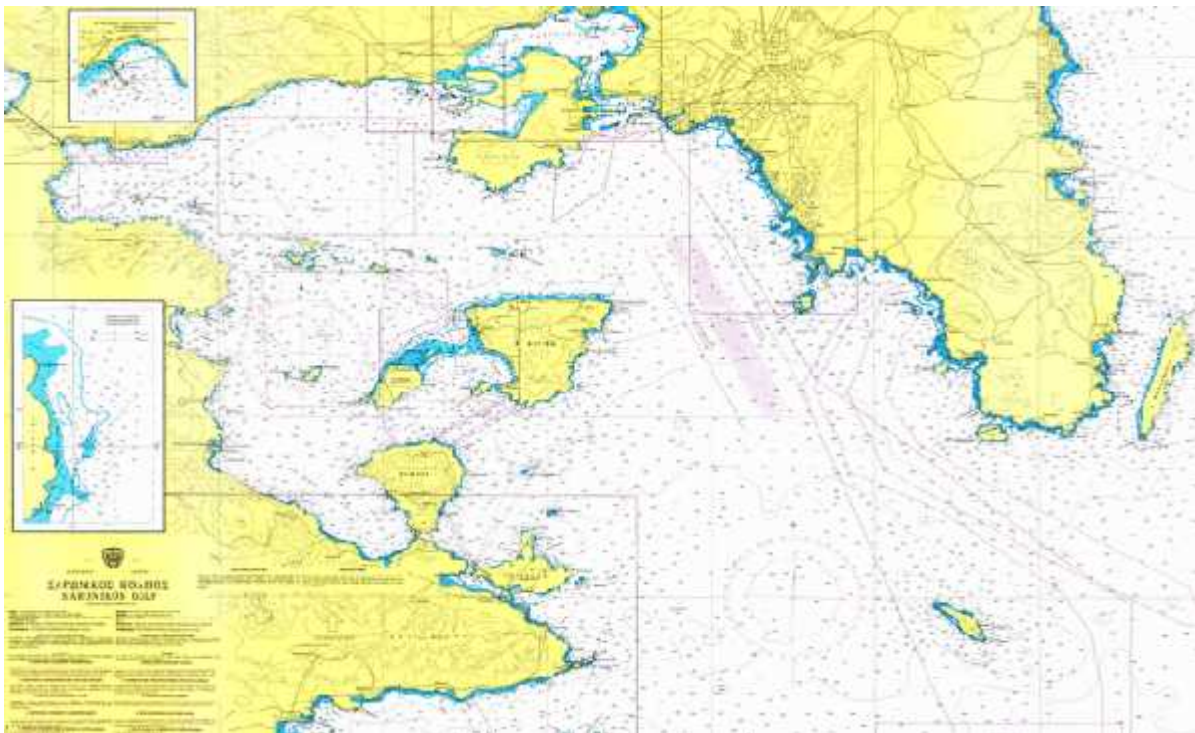
- Dean, R.G., 1974. "Evaluation and Development of Water Wave Theories for Engineering Applications". In: Coastal Engineering Research Center, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Special Report No.1.
- Dean, R.G., Dalrymple, R.A., 1991. "Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists". In: World Scientific Pub. Co., Teaneck, NJ.
- DHI (2005), MIKE21 User guide and Reference Manual, Danish Hydraylic Institute, Water and Environment, Denmark.
- Geopacks, The Geography Specialists, Operation Manual.
- Johnson HK. (2006). "Wave Modeling in the Vicinity of Submerged Breakwaters", Coastal Engineering, Vol 53, pp 39-48.
- Kapsalis A. 2007. «Το υδροδυναμικό Πεδίο στο εσωτερικό Διαπερατών Ύφαλων κυματοθραυστών», Μεταπτυχιακή Εργασία. Βιβλιοθήκη Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.
- Kapsalis A. and Memos C., 2008. "Hydrodynamic field inside a permeable submerged breakwater". 4rth National Conference of Management and Improvement of Coastal Zone, Lesvos, Greece
- Kennedy, A.B., Chen, Q., Kirby, J.T. and Dalrymple, R.A. (2000). "Boussinesq Modeling of Wave Transformation, Breaking, and Runup. I: 1D.", *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, Vol. 126, No. 1, pp. 39-47.
- Kontaxi C. and Memos C., 2005. "Submerged breakwaters as artificial habitats", XXXI IAHR Congress
- Koutitas, C., 1994. "Εισαγωγή στην παράκτια τεχνική και τα λιμενικά έργα". In: Βιβλιοθήκη Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.
- Kriezis E.E, Th.V. Karambas, P. Prinos, A. Tilegrafos, X. Gironella and C. Mösso, 1999. "Reflection and transmission for submerged and rubble-mound breakwater". Proceedings of the International Conference on Coastal Structures, pp. 689–696
- Madsen P.A., Bingham, H.B., Liu, H., 2002. "A new Boussinesq method for fully nonlinear waves from shallow to deep water". In: J. Fluid Mech. (2002), vol. 462, pp. 1-30.
- Madsen, P.A., Bingham, H.B., Schäffer, H.A., 2003. "Boussinesq type formulations for fully nonlinear and extremely dispersive water waves: derivation and analysis". In: Proc. R. Soc. Lond., A. 459, 1075–1104.
- Madsen, P.A, Murray, R., Sorensen, O.R., 1991. "A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics". In: Coastal Engineering, 15: 371-388.
- Madsen, P.A., Schäffer, H.A., 1998. "Higher-order Boussinesq-type equations for surface gravity waves: derivation and analysis". In: Phil. Trans. R. Soc

- Makris, Ch. and Memos, C., 2007. "Wave Transmission over Submerged Breakwaters: Performance of Formulae and Models", Proceedings 17th ISOPE Conference, International Society of Offshore (Ocean) and Polar Engineering (ISOPE), Lisbon, Portugal, , pp. 2613-2620.
- Memos, C.D., 2005. «Μαθήματα Λιμενικών έργων», Συμμετρία, Αθήνα
- Memos, C.D., 2005. "Notes on sea-hydrodynamics". In: NTUA, library.
- Memos, C.D., Karambas, Th.V. and Avgeris, I. (2005). "Irregular Wave Transformation in the Nearshore Zone: Experimental Investigations and Comparison with a Higher Order Boussinesq Model", Ocean Engineering, 32, pp. 1465-148.
- Metallinos A. "Πεδιο ταχυτητων λογω κυματισμων στο εσωτερικο υφαλης κατασκευης", Μεταπτυχιακή Εργασία. Βιβλιοθήκη Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου.
- Moutzouris K.I. 2009, «Θαλάσσια Υδραυλική», Εκδόσεις ΕΜΠ
- Schäffer, H.A., 2003. "Accurate determination of internal kinematics from numerical wave model results". In: Coastal Engineering 50, pp. 199-211.
- Schäffer, H.A., 2004. "Another step towards a post-Boussinesq wave model". In: 29th Int. Conf. on Coastal Engineering, ASCE.
- Schäffer, H.A., Madsen, P.A., 1995. "Further enhancements of Boussinesqtype equations". In: Coastal Engineering, Vol. 26, Issues 1-2, Pages 1-14.
- Stokes, G.G., 1847. "On the Theory of Oscillatory Waves". In: Trans. Camb. Phil. Soc., Vol 8, pp 441-455.

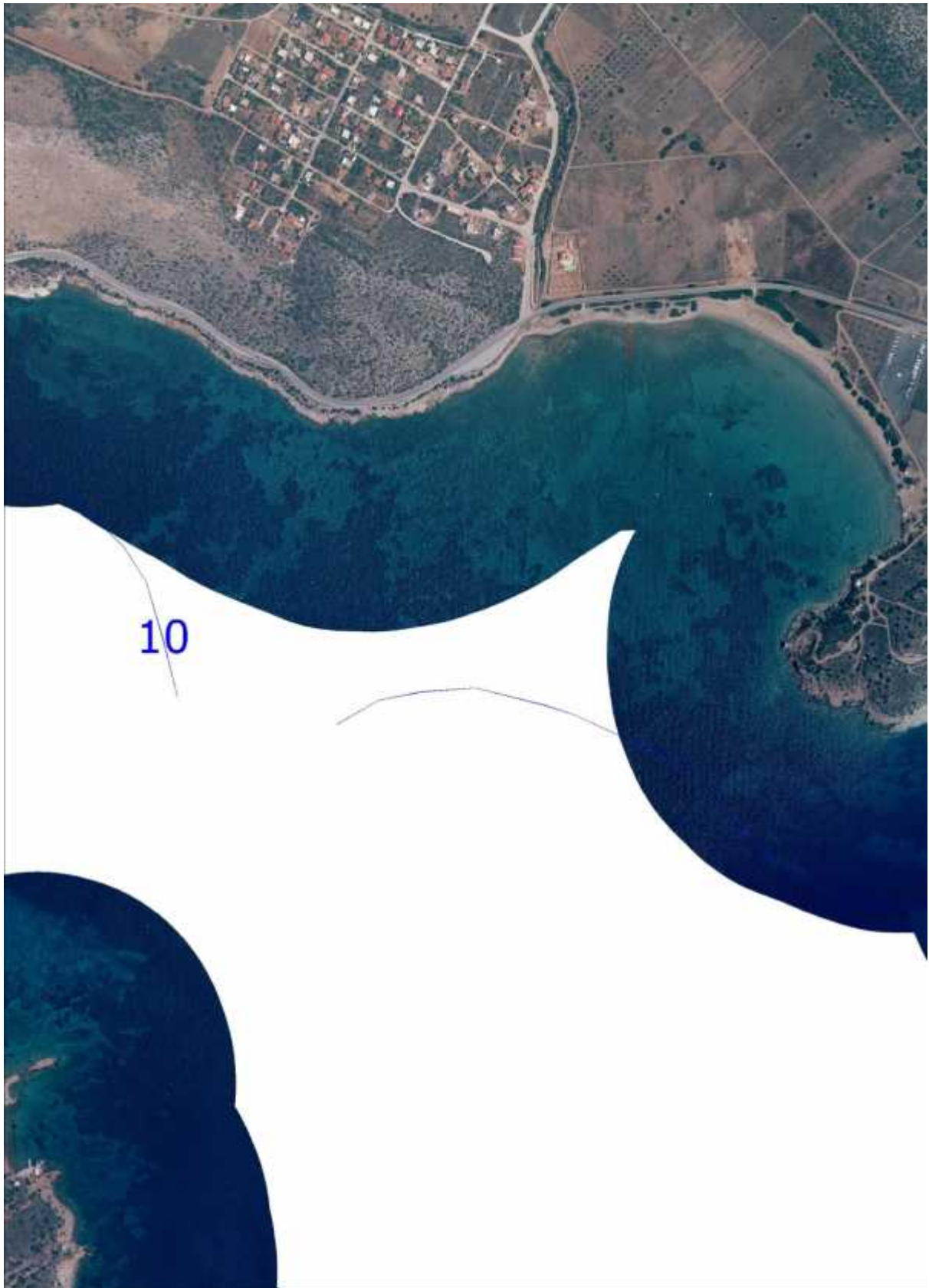
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α



Εικόνα 1 Παραλία υπό εξέταση ύψαλου κυματοθραύστη.



Εικόνα 2 Χάρτης Σαρωνικού



Εικόνα 3 Σχεδίαση ισοβαθών στα ανοιχτά του ύφαλου κυματοθραύστη.

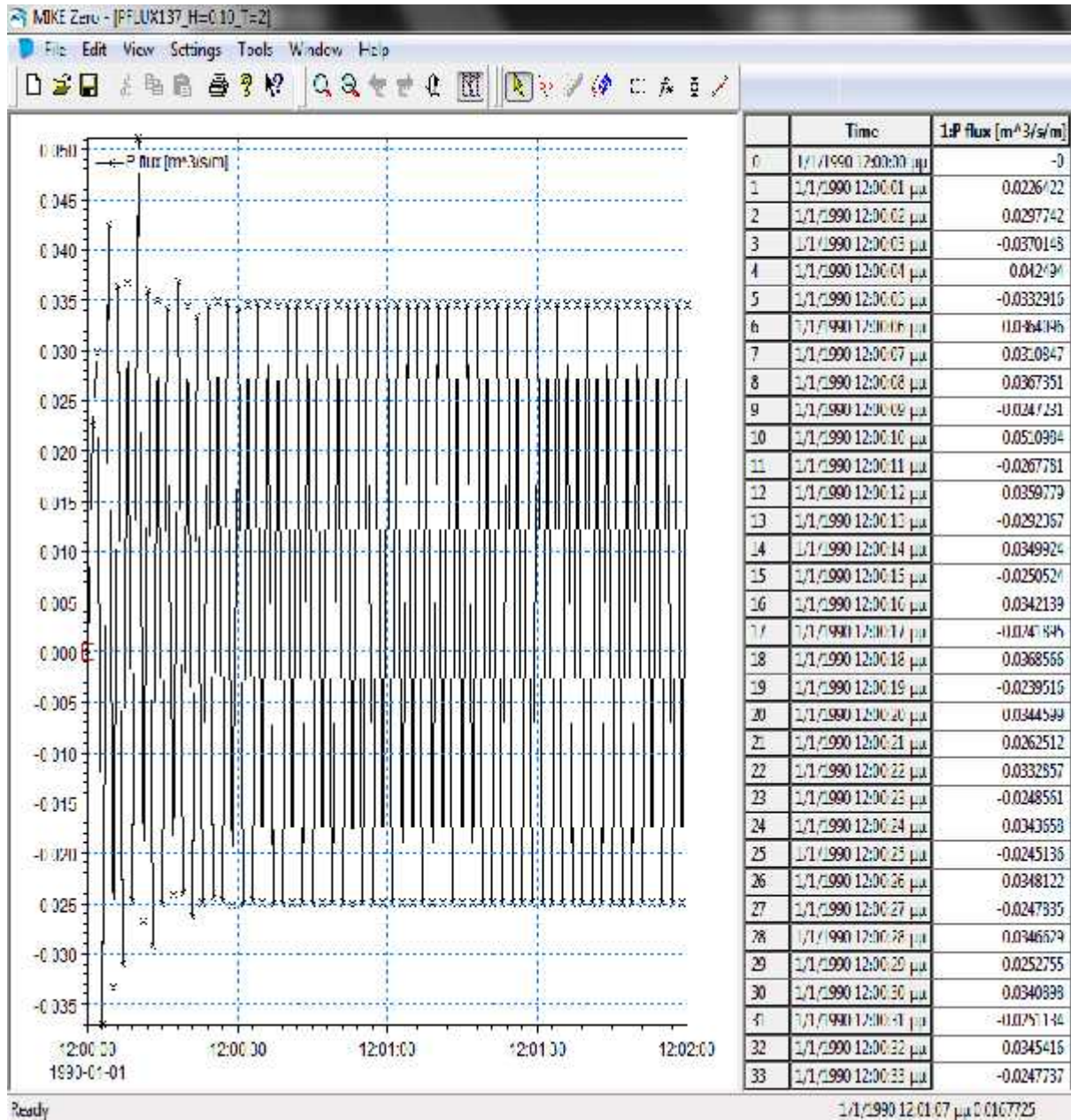


Εικόνα 4 Προσήνεμο αριστερό πρανές

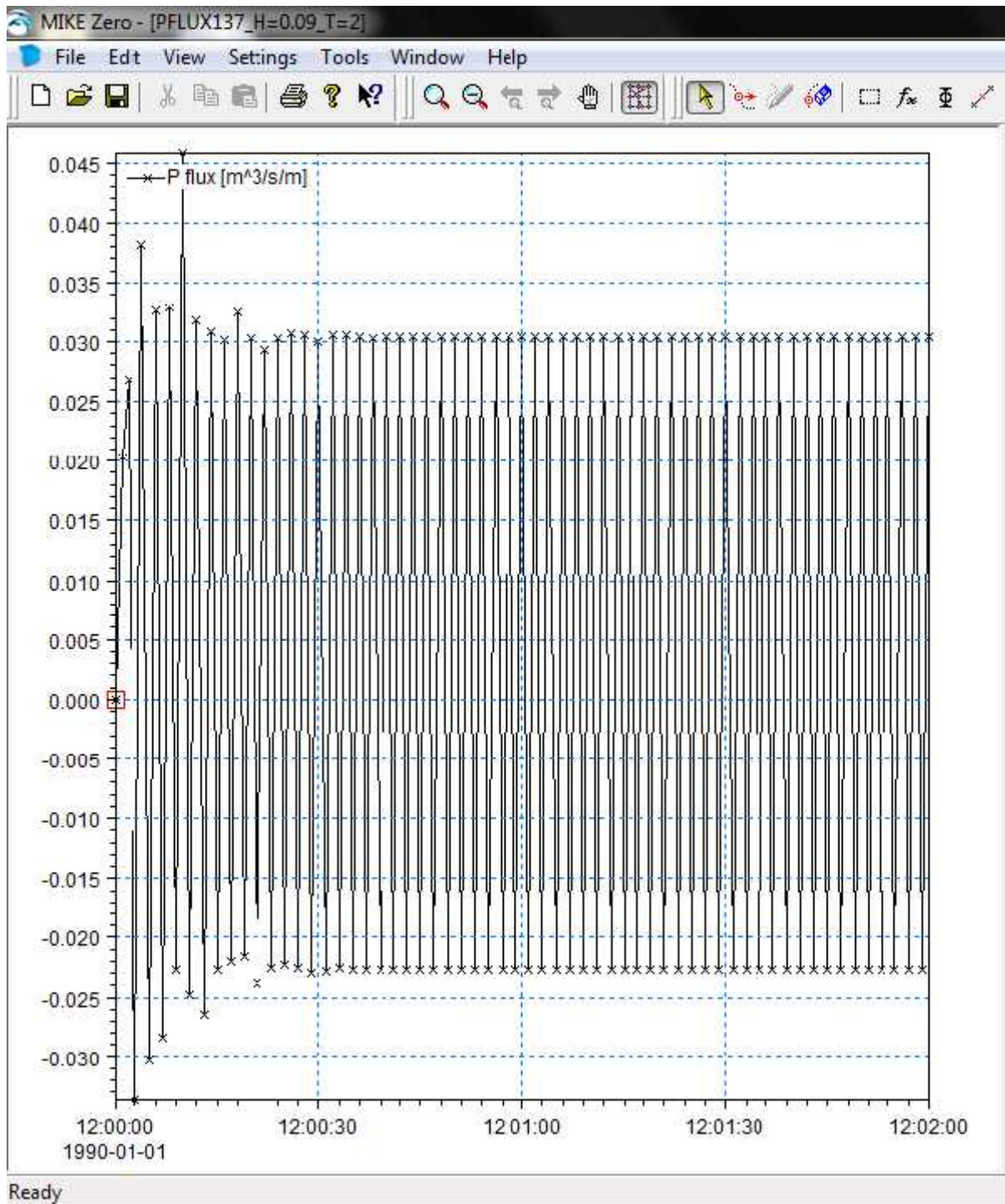


Εικόνα 5 Υπήνεμο δεξί πρανές

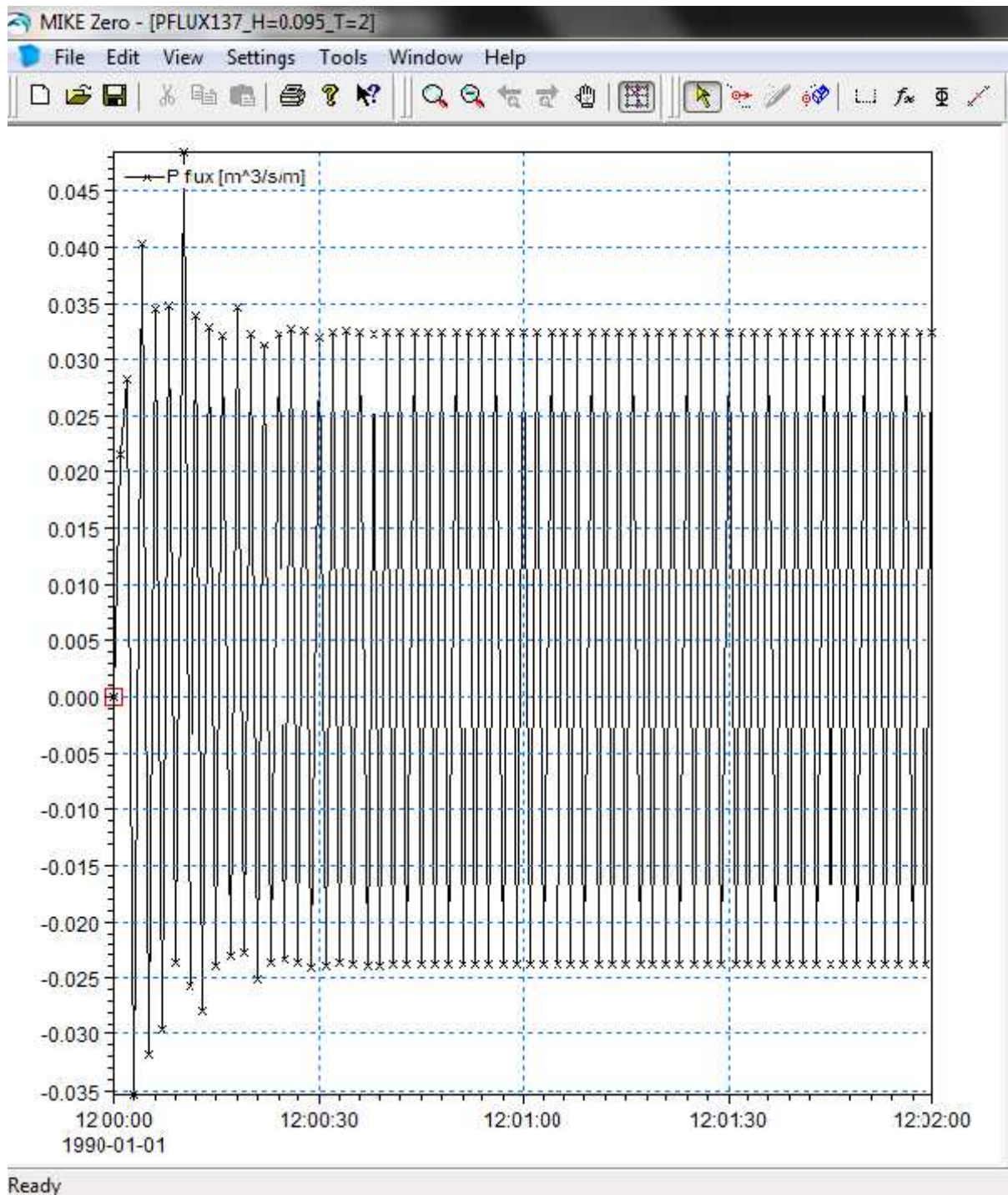
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β



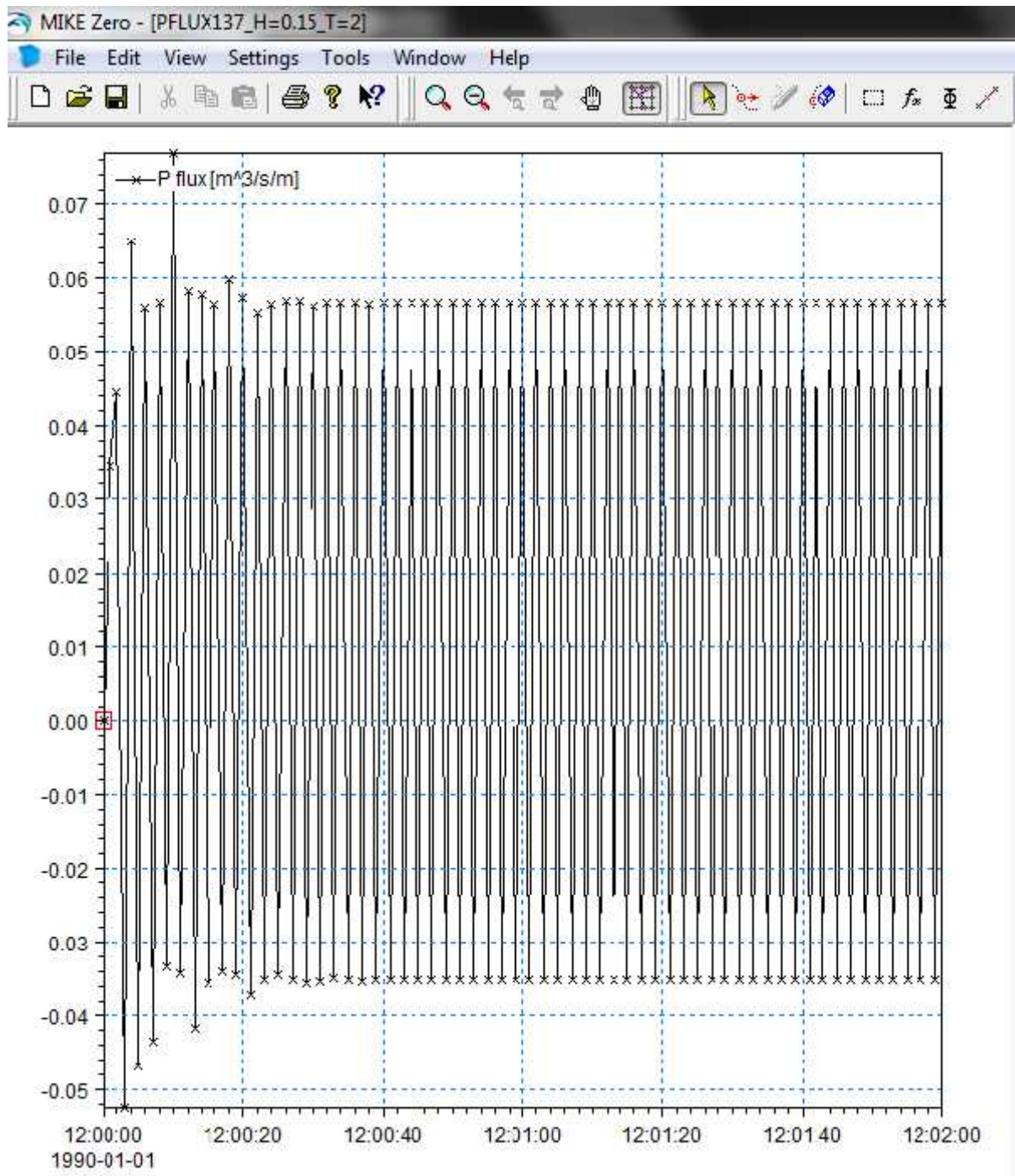
Εικόνα 1 P Flux – Station 5 – 1^η ομάδα μέτρησης



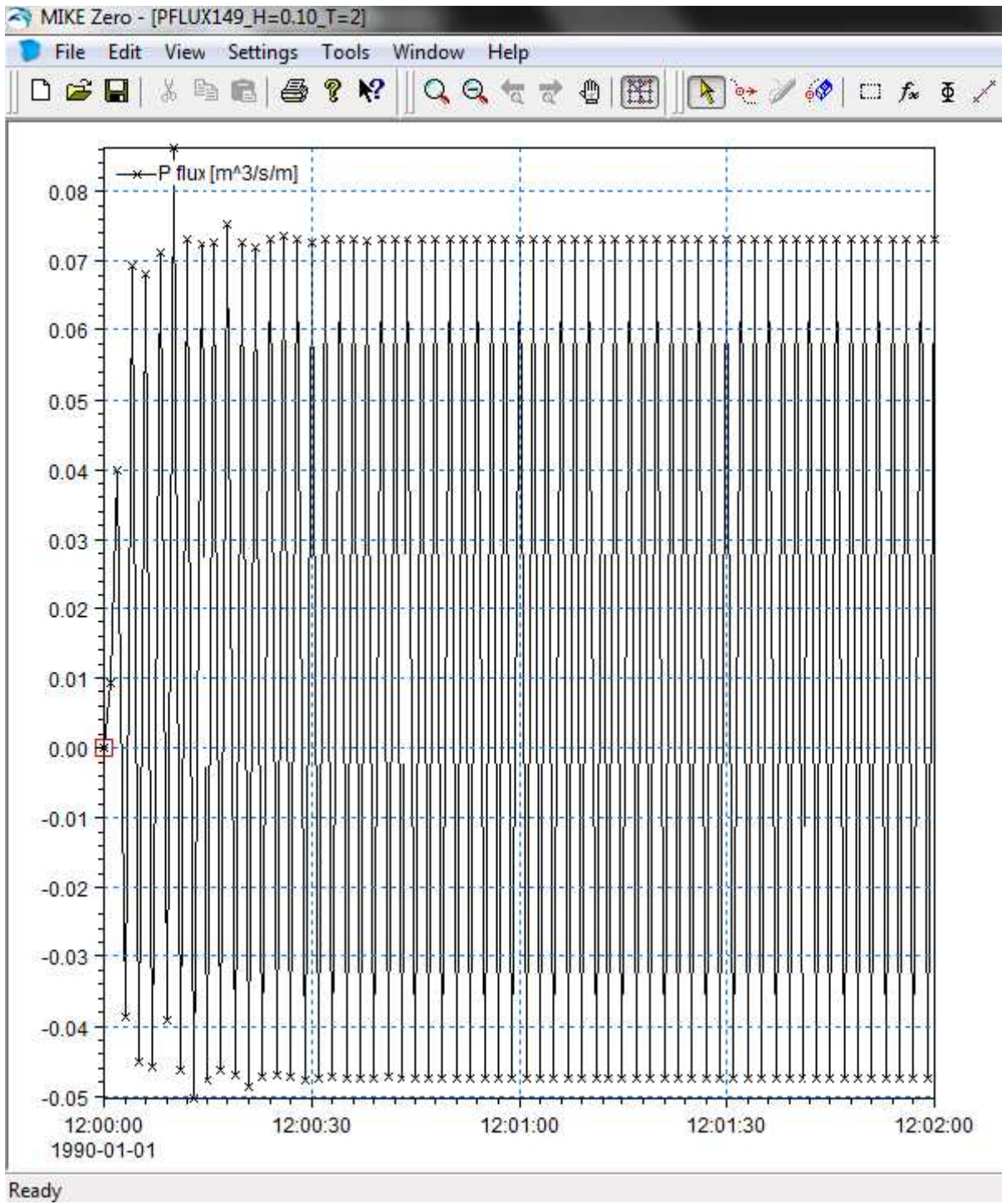
Εικόνα 2 P Flux – Station 5 – 2^η ομάδα μέτρησης



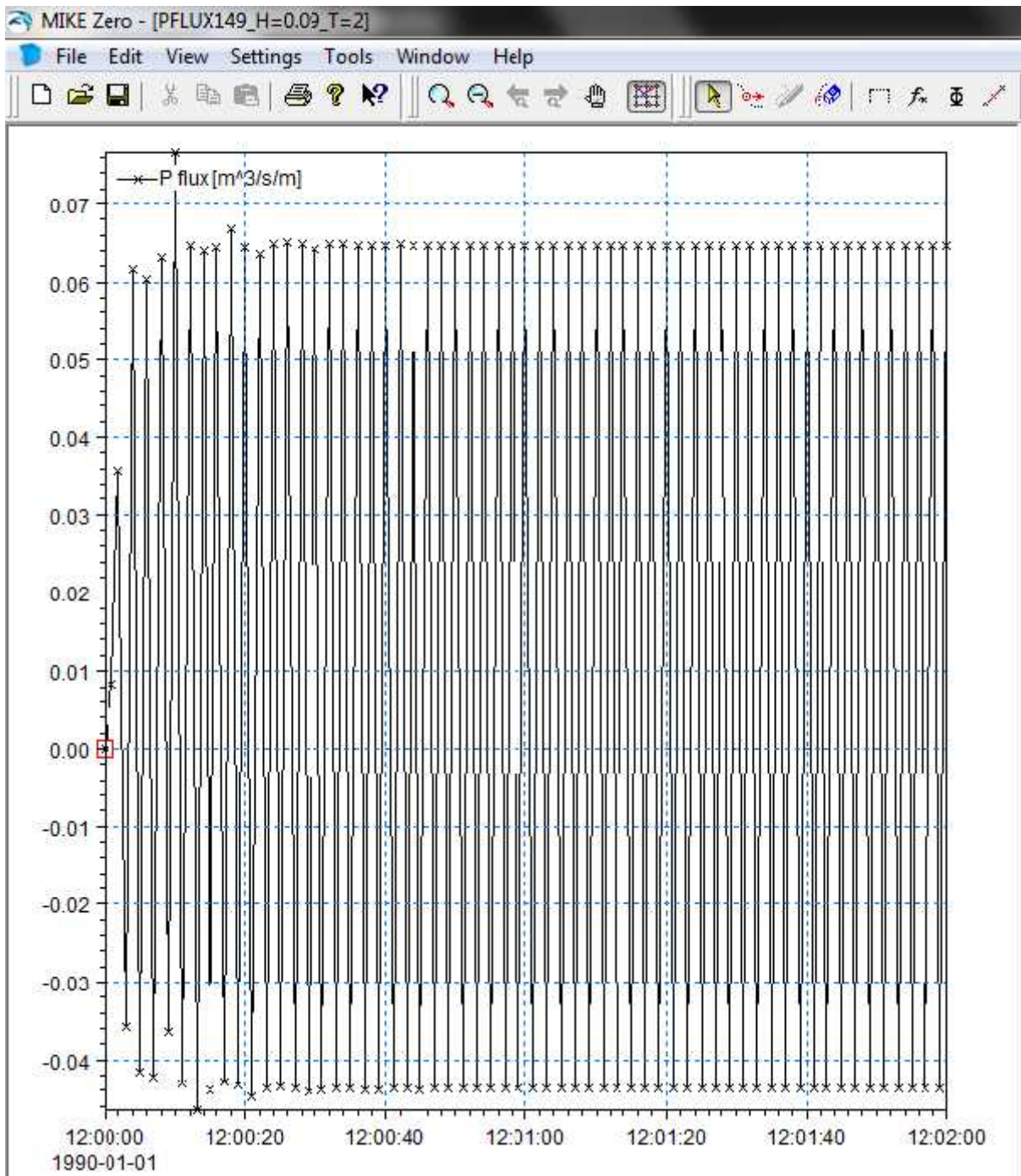
Εικόνα 3 P Flux – Station 5 – 3^η ομάδα μέτρησης



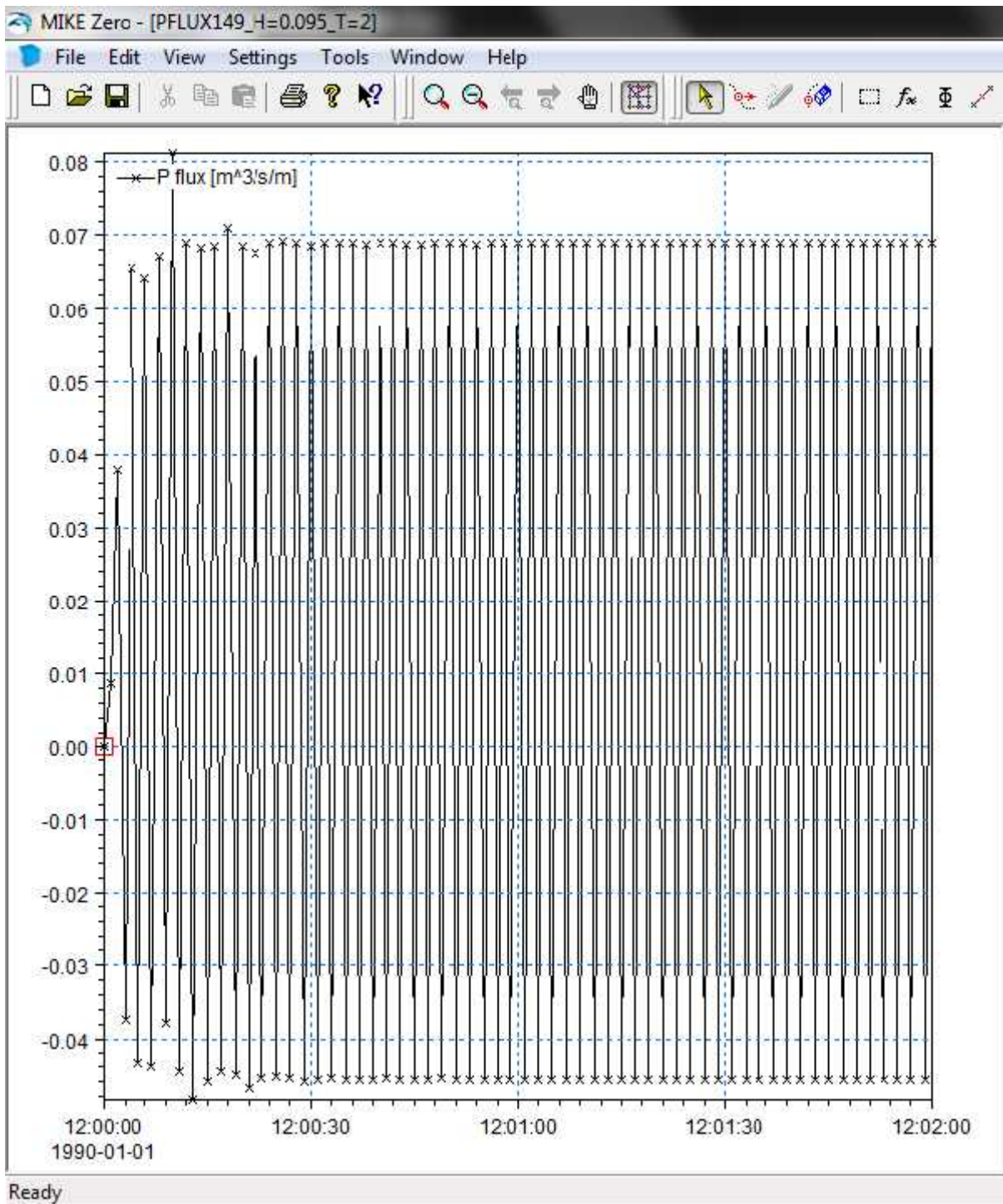
Εικόνα 4 P Flux – Station 5 – 4^η ομάδα μέτρησης



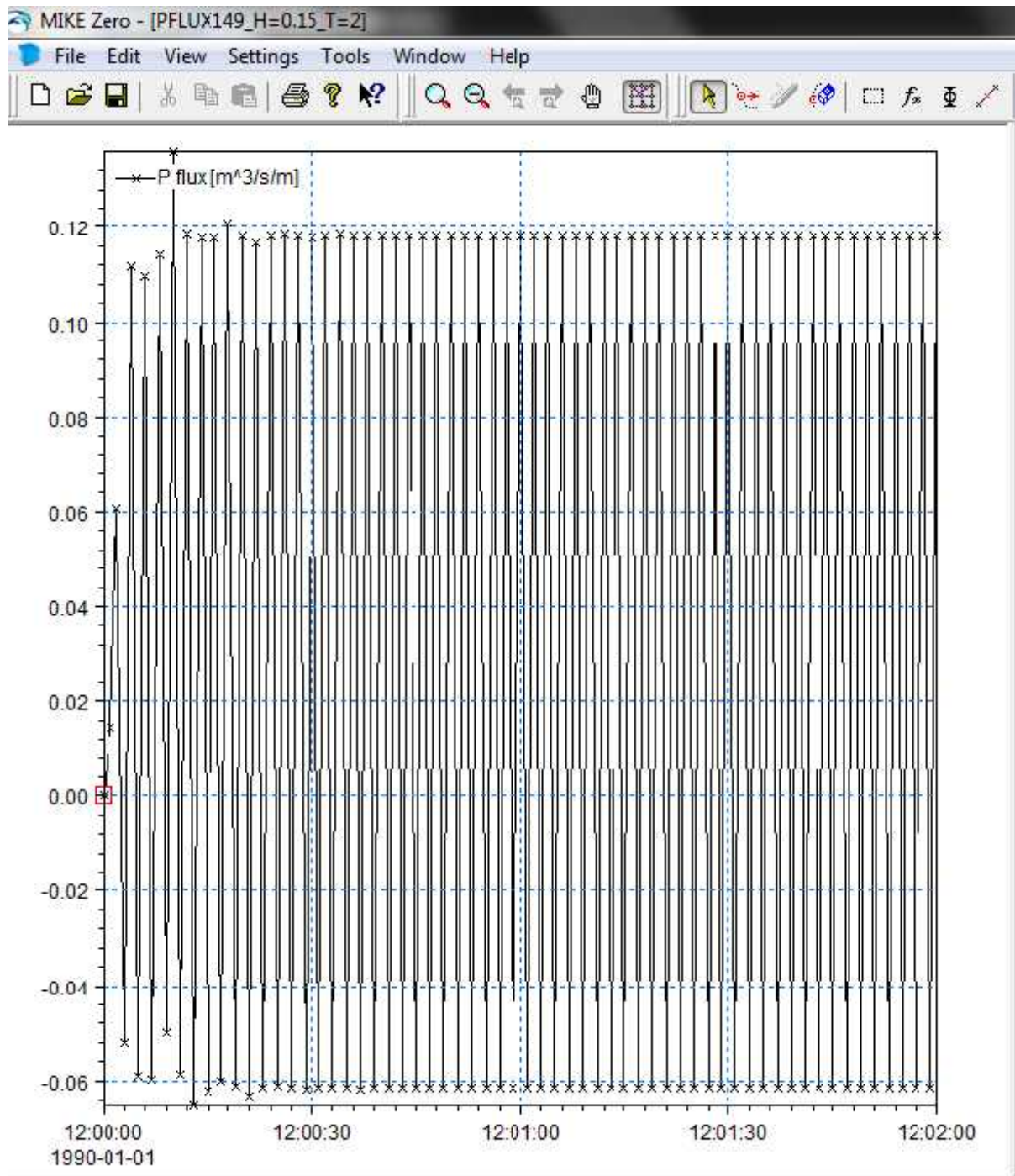
Εικόνα 5 P Flux – Station 33 – 1^η ομάδα μέτρησης



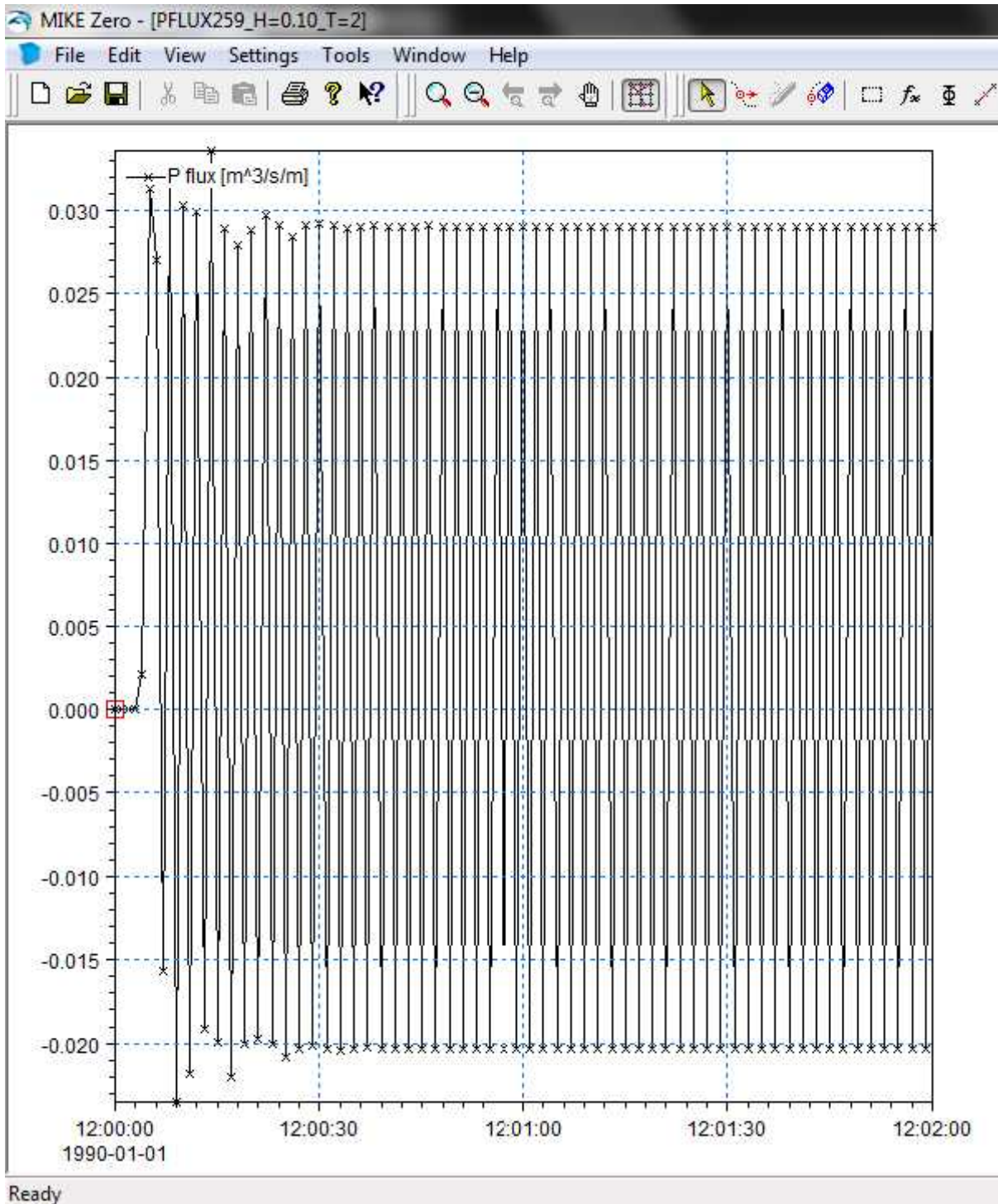
Εικόνα 6 P Flux – Station 33 – 2^η ομάδα μέτρησης



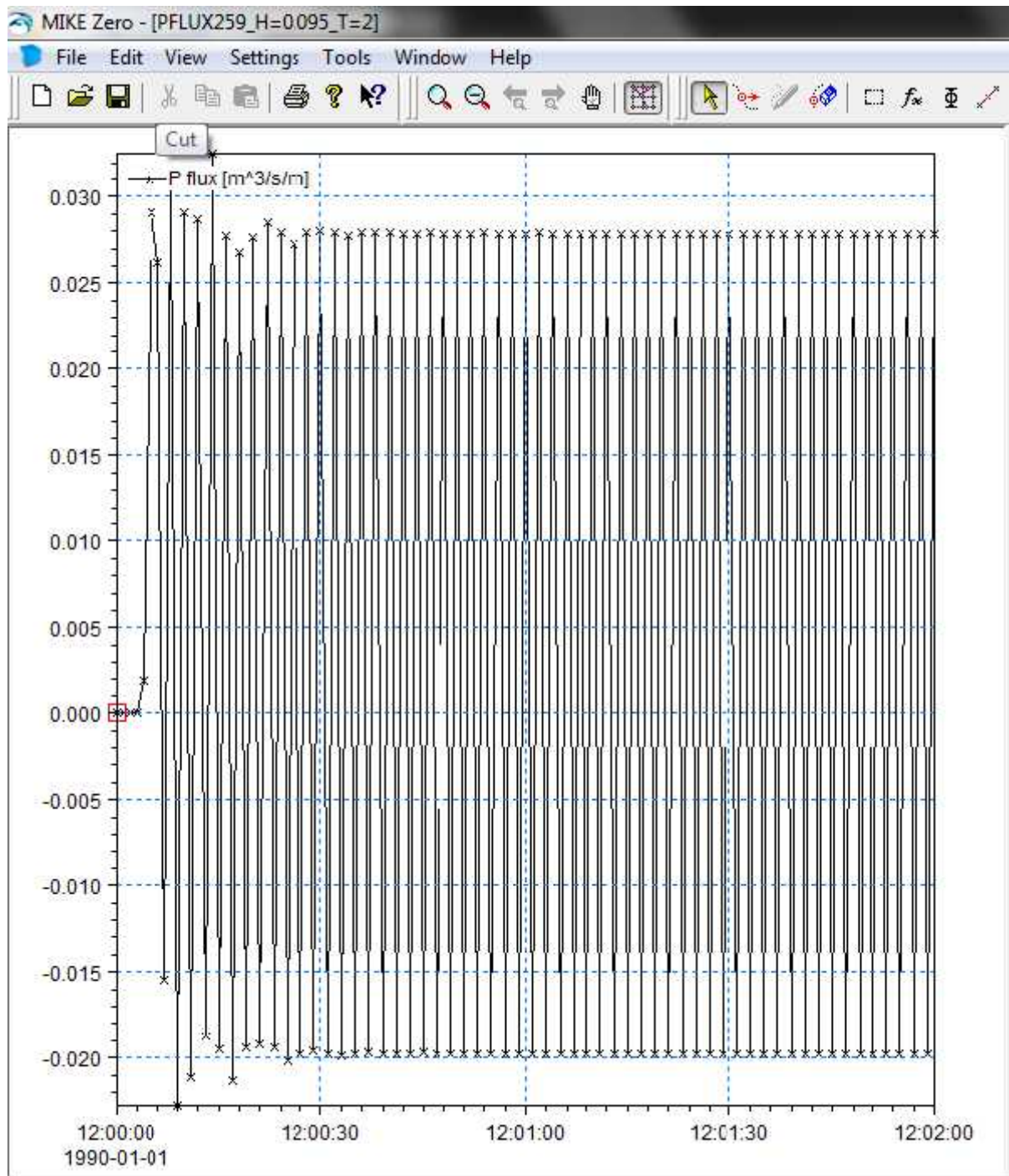
Εικόνα 7 P Flux – Station 33 – 3^η ομάδα μέτρησης



Εικόνα 8 P Flux – Station 33 – 4^η ομάδα μέτρησης

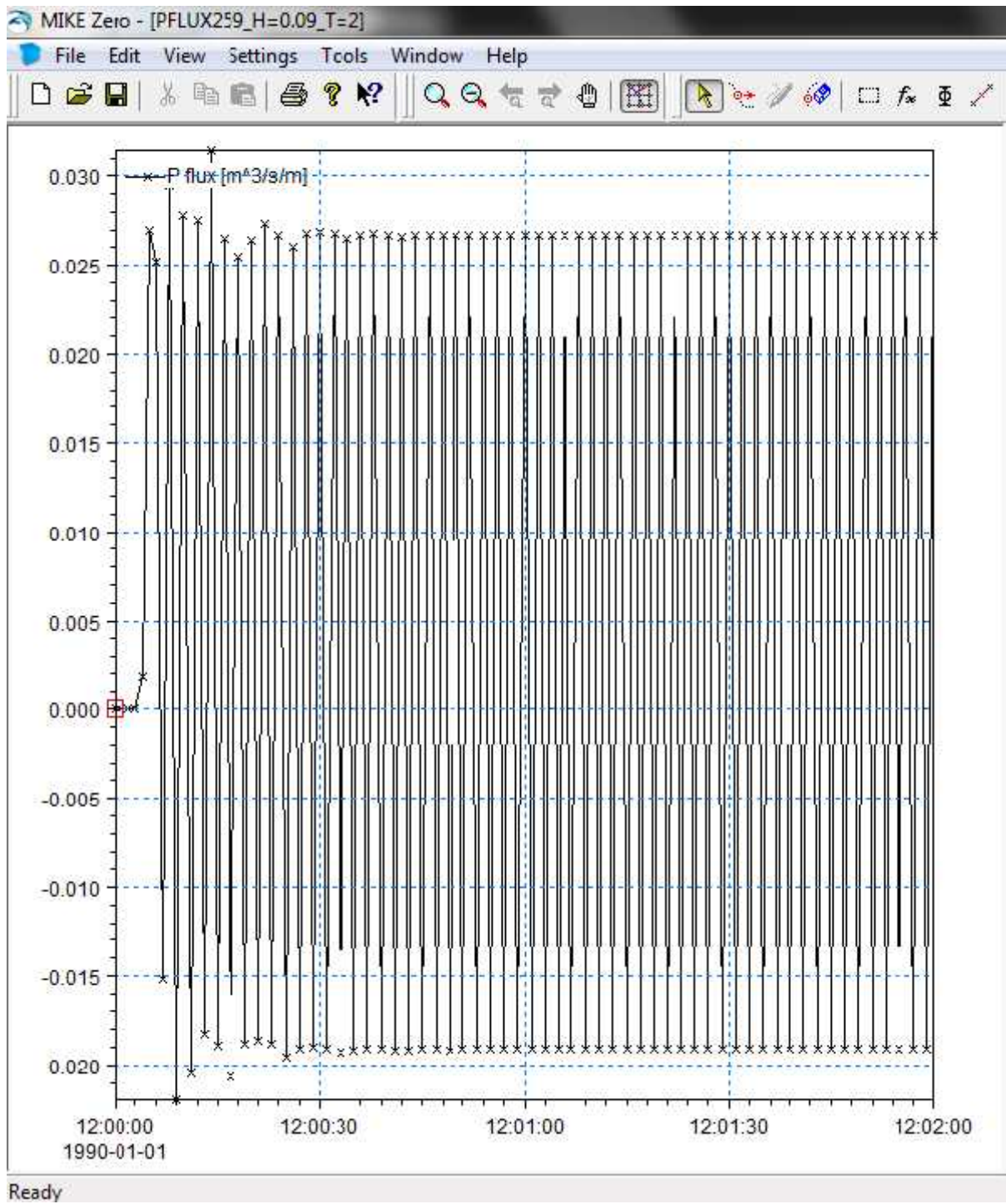


Εικόνα 9 P Flux – Station 44 – 1^η ομάδα μέτρησης

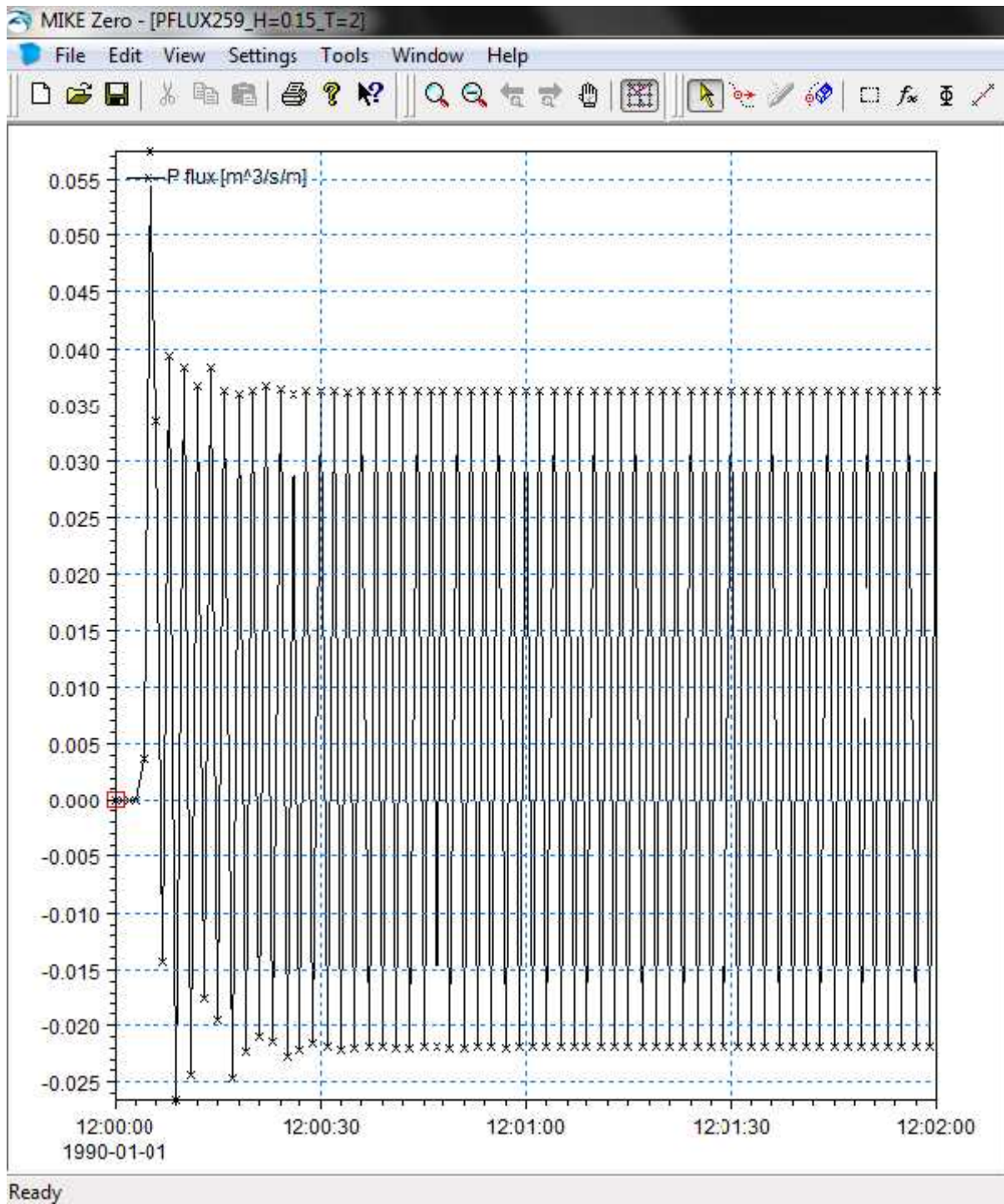


Cut the selection and put it on the Clipboard

Εικόνα 10 P Flux – Station 44 – 2^η ομάδα μέτρησης



Εικόνα 11 P Flux – Station 44 – 3^η ομάδα μέτρησης



Εικόνα 12 P Flux – Station 44 – 4^η ομάδα μέτρησης

