



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΕΠΑΝΩ ΑΠΟ ΥΦΑΛΟ
ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΗ

Ιωάννης Ν. Μαλγαρινός

Επιβλέπων: Κ. Μέμος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2013



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΕΠΑΝΩ ΑΠΟ ΥΦΑΛΟ
ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΗ

Ιωάννης Ν. Μαλγαρινός

Επιβλέπων: Κ. Μέμος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2013

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες προς τον κ. Κωνσταντίνο Μέμο, καθηγητή Ε.Μ.Π., για την επίβλεψη κατά την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας με τίτλο «Κυματική μετάδοση επάνω από ύφαλο κυματοθραύστη».

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κ. Αναστάσιο Μεταλληνό και κ. Μιχάλη Χονδρό, υποψήφιους διδάκτορες Ε.Μ.Π., για τις υποδείξεις και τις συμβουλές τους.

Τέλος, ευχαριστώ τους γονείς και τον αδελφό μου για τη συμπαράστασή τους μέχρι σήμερα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων που έχουν σχέση με τη μετάδοση κυματισμού κατάντι ύφαλου κυματοθραύστη. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Λιμενικών Έργων του Ε.Μ.Π. και πιο συγκεκριμένα στη διώρυγα μονοχρωματικών κυματισμών «Δ. Κοιλάκος».

Επίσης παρατίθενται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη χρήση δύο υπολογιστικών μοντέλων Boussinesq, για ύφαλο κυματοθραύστη με ή χωρίς πορώδες και τα ίδια ακριβώς κυματικά δεδομένα με τα οποία έγιναν και τα πειράματα.

Εξετάστηκε το αν τα αποτελέσματα από τα δύο μοντέλα Boussinesq συγκλίνουν ή αποκλίνουν από εκείνα των πειραματικών μετρήσεων και σε τι βαθμό συμβαίνει αυτό.

Πραγματοποιήθηκαν συνολικά 7 πειράματα με τη χρήση ενός ύφαλου κυματοθραύστη με πορώδες, ο οποίος ήταν σταθερός στη γεωμετρία του. Ο πειραματικός κυματοθραύστης φορτίστηκε από μια σειρά διαφορετικών μονοχρωματικών κυματισμών.

Έγινε επίσης σύγκριση μεταξύ των τιμών του συντελεστή μετάδοσης κυματισμού που προέκυψαν από τις πειραματικές μετρήσεις και των αντίστοιχων που υπολογίστηκαν από υπάρχουσες στη βιβλιογραφία εμπειρικές σχέσεις.

Τέλος, προτάθηκε μια εμπειρική σχέση για τον συντελεστή μετάδοσης κυματισμού με βάση τις πειραματικές μετρήσεις και συγκρίθηκε με τα αποτελέσματα του μοντέλου για διαπερατό κυματοθραύστη.

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων προκύπτει το συμπέρασμα ότι το υπολογιστικό μοντέλο Boussinesq με πορώδες δίνει αποτελέσματα για την κυματική μετάδοση που βρίσκονται πολύ κοντά στην πραγματικότητα, δηλαδή συγκλίνουν σε μεγάλο βαθμό με τα αποτελέσματα των πειραμάτων. Αντίθετα, το μοντέλο Boussinesq χωρίς πορώδες οδηγεί σε μια κυματική μετάδοση που απέχει σε σημαντικό βαθμό από αυτή που προέκυψε από τα πειράματα.

Η εμπειρική σχέση που προτάθηκε θα πρέπει να επαληθευθεί ή και να βελτιωθεί με βάση αντίστοιχες μετρήσεις που θα γίνουν μελλοντικά.

ABSTRACT

In this thesis, the results of experimental measurements related to wave propagation over a reef breakwater are presented. The experiments have been performed at the Laboratory of Harbor Works of the National Technical University of Athens and more specifically in the monochromatic wave canal named «D. Kilakos».

Moreover, the results obtained from the use of two computational Boussinesq models are presented, for the cases of reef breakwater with or without porosity and exactly the same wave data taken from the experiments.

It is investigated whether the results of the two Boussinesq models converge or deviate from the experimental measurements and to what extent this occurs.

In total, 7 experiments have been performed using a reef breakwater with porosity, which had stable geometry characteristics. The experimental breakwater has been loaded with a number of different monochromatic waves.

Furthermore, a comparison was made between the values of wave transmission coefficient obtained from experimental measurements and those calculated from existing empirical relationships found in literature.

Finally, an empirical relationship for the wave transmission coefficient is proposed which is based on the experimental measurements and it is compared with the results of the model for permeable breakwater.

A comparison of the results shows that the computational Boussinesq model with porosity gives results for wave transmission which are very close to reality, as those results approach with high accuracy the experimental data. On the other hand, the Boussinesq model without porosity leads to a wave transmission which is significantly different from the wave transmission obtained from the experiments.

The empirical relationship which is suggested here will have to be verified or even improved based on corresponding measurements to be made in the future.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
ABSTRACT	4
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	9
2.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ	9
2.2 ΜΕΤΑΛΟΣΗ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ	10
2.2.1 Γεωμετρία ύφαλου κυματοθραύστη	10
2.2.2 Παράμετροι κυματισμών	11
2.2.3 Κυματική μετάδοση και παράμετροι επιρροής	12
2.3 ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ	13
2.3.1 Γενικά	13
2.3.2 Ahrens (1987)	14
2.3.3 Van der Meer (1990)	14
2.3.4 D' Angremond et al. (1996)	15
2.3.5 Seabrook & Hall (1998)	16
2.3.6 Daemrich et al. (2002)	16
2.3.7 Bleck & Oumeraci (2002)	17
2.3.8 Εμπειρικές σχέσεις και διαπερατότητα	17
2.4 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ BOUSSINESQ	18
2.4.1 Βασικές εξισώσεις	18
2.4.2 Δημιουργία κυματισμών	21
2.4.3 Θραύση κυματισμών και τριβή πυθμένα	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ	26
3.1 ΟΜΟΙΟΤΗΤΑ	26
3.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΩΡΥΓΑ	29
3.2.1 Διαστάσεις – περιγραφή	29
3.2.2 Κυματογεννήτρια	31
3.2.3 Εύρος παραγόμενων κυματισμών	31
3.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΟΡΩΔΟΥΣ	33
3.4 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	36
4.1 ΓΕΝΙΚΑ	36
4.2 ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ	36
4.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΜΕΤΑΛΟΣΗΣ ΑΠΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟ BOUSSINESQ	37
4.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΜΕΤΑΛΟΣΗΣ ΑΠΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ	

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ	46
4.5 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΕΜΠΕΙΡΙΚΗ ΣΧΕΣΗ	57
4.5.1 Εύρεση εμπειρικής σχέσης	57
4.5.2 Σύγκριση προτεινόμενης σχέσης με μοντέλο Boussinesq	62
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	82
5.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΧΕΤΙΚΟΥ ΥΨΟΥΣ	82
5.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΟΡΩΔΟΥΣ	83
5.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΧΕΤΙΚΟΥ ΥΨΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΗ	84
5.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕ ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ	84
5.5 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΕΜΠΕΙΡΙΚΗ ΣΧΕΣΗ	85
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α - Διαγράμματα μοντέλου Boussinesq	86
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β - Φωτογραφίες	92
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	99
ΞΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	99
ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	101

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στη σύγχρονη εποχή υπάρχει πολλές φορές η ανάγκη να προστατευτεί μια παράκτια περιοχή από τα κύματα και τη διάβρωση που αυτά προκαλούν. Αυτή η ανάγκη καλύπτεται και με την κατασκευή παράκτιων έργων που ονομάζονται απεσπασμένοι κυματοθραύστες. Το πιο καινούργιο είδος κυματοθραυστών είναι οι ύφαλοι κυματοθραύστες οι οποίοι έχουν τη στέψη τους κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, σε αντίθεση με τους συμβατικούς, έξαλους κυματοθραύστες.

Οι ύφαλοι κυματοθραύστες προτιμώνται πολλές φορές έναντι των συμβατικών κυρίως διότι δεν αλλοιώνουν την αισθητική αξία της περιοχής στην οποία κατασκευάζονται. Κάθε παράκτια περιοχή έχει αισθητική αξία, πόσο μάλλον μια περιοχή που είναι τουριστική το καλοκαίρι, όπως συμβαίνει συχνά στη χώρα μας. Ένα άλλο πλεονέκτημά τους είναι ότι επιτρέπουν την κυκλοφορία των θαλάσσιων ρευμάτων στην υπήνεμη ζώνη τους και έτσι δεν έχουν αρνητικές επιδράσεις στην ποιότητα του θαλάσσιου νερού και στα διάφορα είδη ψαριών και φυτών που ζουν σε αυτό. Στα θετικά στοιχεία τους συγκαταλέγεται και το γεγονός ότι απαιτούν μικρότερες ποσότητες υλικών κατασκευής σε σχέση με τους έξαλους κυματοθραύστες, λόγω του ότι η στέψη τους βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας.

Όμως, οι ύφαλοι κυματοθραύστες έχουν και ορισμένα μειονεκτήματα. Ένα από τα πιο βασικά τους είναι ότι εμφανίζουν μειωμένη απόδοση όσον αφορά την προστασία έναντι των κυματισμών, σε σύγκριση με τα συμβατικά έργα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το μεγαλύτερο μέρος της κυματικής ενέργειας μεταδίδεται στην περιοχή γύρω από την ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας σε ηρεμία, μια περιοχή όπου οι ύφαλοι κυματοθραύστες απουσιάζουν. Ένα άλλο μειονέκτημά τους είναι ο αυξημένος κίνδυνος που δημιουργούν για τη ναυσιπλοΐα. Οι ύφαλοι κυματοθραύστες βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας με αποτέλεσμα να μην είναι άμεσα ορατοί από τα πλοία.

Ο βαθμός απόδοσης των ύφαλων κυματοθραυστών, δηλαδή ο βαθμός της αναμενόμενης μείωσης του προσπίπτοντος κυματισμού, εκφράζεται από τον συντελεστή μετάδοσης K_T . Προκειμένου να κατασκευαστεί ύφαλος κυματοθραύστης σε μια θέση πρέπει πρώτα να μπορεί να υπολογιστεί ο συντελεστής μετάδοσης με ακρίβεια.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται πειραματική διερεύνηση του συντελεστή μετάδοσης ύφालου κυματοθραύστη σε σχέση με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του, την περίοδο και το ύψος του προσπίπτοντος κυματισμού. Επίσης υπολογίζεται ο συντελεστής μετάδοσης με τη βοήθεια δύο μοντέλων Boussinesq, το ένα για διαπερατό και το άλλο για αδιαπέρατο έργο, με σκοπό τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά από τα πειράματα. Παρουσιάζονται ορισμένες εμπειρικές σχέσεις που έχουν σκοπό τον υπολογισμό του συντελεστή μετάδοσης και συγκρίνονται και αυτές με τις πειραματικές μετρήσεις. Επιπλέον, παρουσιάζεται μια νέα εμπειρική σχέση για τον συντελεστή μετάδοσης, η οποία προήλθε από τα πειράματα αυτής της εργασίας.

Στο κεφάλαιο 2 δίδεται το θεωρητικό υπόβαθρο που αφορά την κυματική μετάδοση, καθώς και ορισμένες εμπειρικές σχέσεις που δίνουν τον συντελεστή μετάδοσης κυματισμού. Επίσης, περιλαμβάνονται οι βασικές εξισώσεις που διέπουν το υπολογιστικό μοντέλο Boussinesq το οποίο χρησιμοποιείται για την επίλυση της κυματικής μετάδοσης με παρουσία κυματοθραύστη.

Στο κεφάλαιο 3 περιγράφονται οι πειραματικές διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν, αλλά και η διαδικασία λήψης των πειραματικών μετρήσεων. Καθορίζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μοντέλου και υπολογίζεται το πορώδες του.

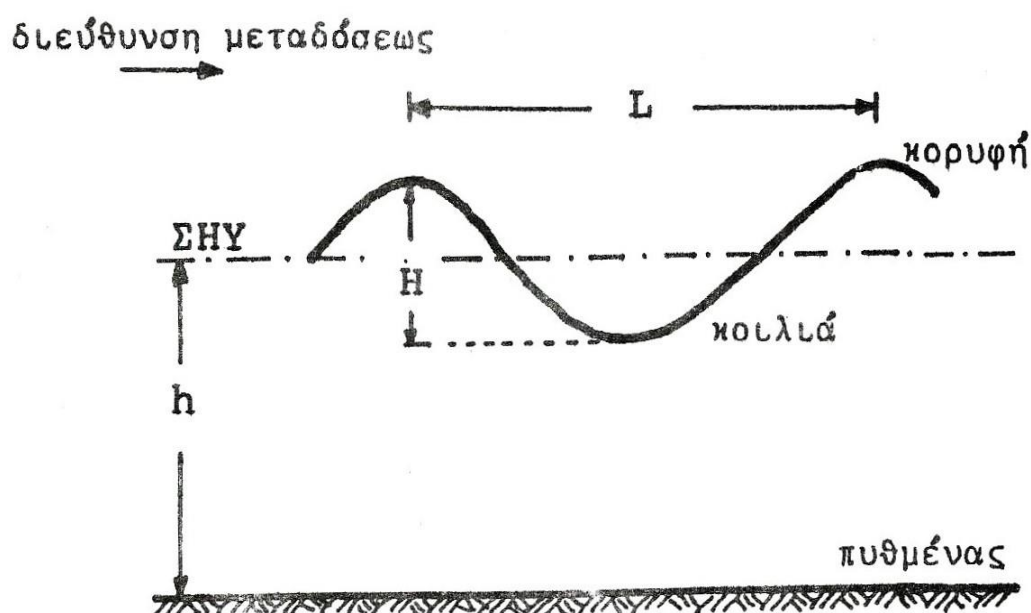
Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας σε σύγκριση με αυτά που προκύπτουν από την επίλυση του μοντέλου Boussinesq. Επίσης, συγκρίνονται με τιμές από τις εμπειρικές σχέσεις και προτείνεται μία νέα εμπειρική σχέση. Η νέα αυτή σχέση συγκρίνεται με το μοντέλο Boussinesq. Πραγματοποιείται ο σχολιασμός όλων των επί μέρους αποτελεσμάτων.

Τέλος, στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν για την κυματική μετάδοση και τους πιο βασικούς παράγοντες που την επηρεάζουν.

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ

Τα χαρακτηριστικά των δισδιάστατων μονοχρωματικών κυματισμών βαρύτητας ορίζονται ως εξής:



Σχήμα 2.1.1 – Τυπική διατομή κύματος

- **H (m):** Ύψος κύματος είναι η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ της κορυφής και της κοιλιάς του κύματος. Ισούται με το διπλάσιο του εύρους ταλάντωσης των σωματιδίων.
- **L (m):** Μήκος κύματος είναι η οριζόντια απόσταση μεταξύ δύο σωματιδίων, που βρίσκονται στην ίδια φάση ταλάντωσης. Μετράται κατά μήκος της διεύθυνσης μετάδοσης.
- **γ (m/m):** Καμπυλότητα ή κυρτότητα κύματος (H/L).
- **Μέτωπο κύματος:** Είναι ένα επίπεδο κάθετο προς το επίπεδο ταλάντωσης και εφαπτόμενο στη διατομή του κύματος.
- **Διεύθυνση μετάδοσεως (ή ακτίνα κύματος):** Είναι η κάθετη γραμμή προς το μέτωπο του κύματος η οποία κείται στο επίπεδο ταλάντωσης.

- **T (sec):** Περίοδος κύματος είναι ο χρόνος μιας πλήρους ταλάντωσης των σωματιδίων. Ορίζεται και σαν το χρονικό διάστημα μεταξύ της διελεύσεως δύο διαδοχικών κορυφών κύματος από ένα ορισμένο σημείο.
- **C (m/sec):** Ταχύτητα κύματος (ή ταχύτητα φάσεως) είναι η απόσταση, που διανύεται από το μέτωπο του κύματος στη μονάδα του χρόνου. Ορίζεται ως $C = L/T$.
- **Διατομή κύματος:** Είναι η κατακόρυφη διατομή του κατά τη διεύθυνση μετάδοσης.
- **Κορυφή κύματος:** Είναι το υψηλότερο σημείο του πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας σε ηρεμία.
- **Κοιλιά κύματος:** Είναι το χαμηλότερο σημείο του κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας σε ηρεμία.
- **h (m):** Βάθος νερού είναι η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας της θάλασσας σε ηρεμία πάνω από τον πυθμένα.
- **h/L (m/m):** Σχετικό βάθος νερού.
- **k (m⁻¹):** Αριθμός κύματος ($= 2\pi/L$).
- **ΣΗΥ:** Στάθμη Ηρεμούντος Ύδατος είναι η ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας σε ηρεμία.

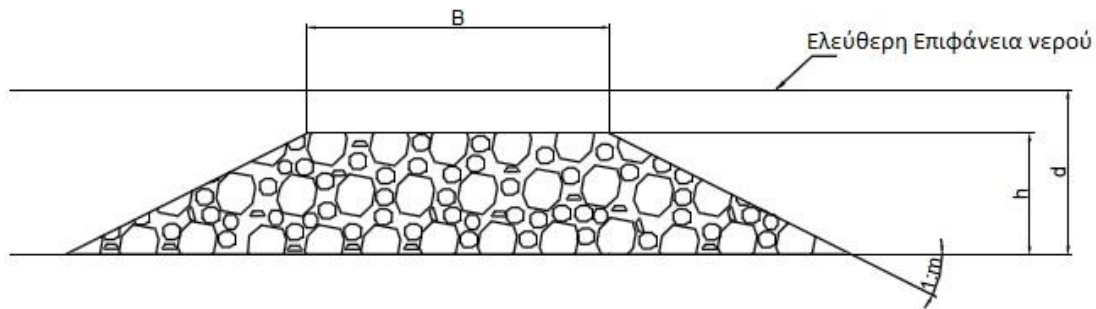
2.2 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ

2.2.1 Γεωμετρία ύφαλου κυματοθραύστη

Η γεωμετρία ενός ύφαλου κυματοθραύστη προσδιορίζεται από τα εξής χαρακτηριστικά μεγέθη:

- **h (m):** το ύψος του κυματοθραύστη (στον άξονά του)
- **d (m):** το βάθος του νερού στον προσήνεμο πόδα του κυματοθραύστη
- **B (m):** το πλάτος στέψης του κυματοθραύστη

- **F (m):** το ελεύθερο ύψος (ή ελεύθερο περιθώριο) του έργου που ορίζεται ως η διαφορά ανάμεσα στο βάθος του νερού στον προσήνεμο πόδα του κυματοθραύστη και στο ύψος του, δηλαδή ισχύει $F=d-h$
- **tanθ:** κλίση προσήνεμου πρανούς
- **tanβ:** κλίση υπήνεμου πρανούς



Σχήμα 2.2.1 – Χαρακτηριστικά μεγέθη ύφαλου κυματοθραύστη.

2.2.2 Παράμετροι κυματισμών

Μια κυματική παράμετρο αποτελεί το σχετικό βάθος νερού και χαρακτηρίζει τη θαλάσσια περιοχή που διαδίδονται οι κυματισμοί:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{L} \geq 0.50, \text{ βαθειά νερά} \\ 0.04 \leq \frac{d}{L} \leq 0.50, \text{ ενδιάμεσα νερά} \\ \frac{d}{L} \leq 0.04, \text{ ρηχά νερά} \end{array} \right.$$

Μια άλλη παράμετρος είναι το σχετικό ύψος κύματος το οποίο χρησιμοποιείται σε κριτήρια θραύσης. Το κριτήριο για μη θραυόμενο κυματισμό με επίπεδο κεκλιμένο πυθμένα, είναι:

$$\frac{H}{d} \ll 0.78$$

Ο αριθμός Iribarren ξ δίνεται από τη σχέση:

$$\xi = \frac{\tan \theta}{\sqrt{\frac{H}{L_0}}} = \frac{\tan \theta}{\sqrt{\frac{2\pi H}{gT^2}}} \quad (2.1)$$

όπου ισχύει:

- **H (m):** ύψος προσπίπτοντος κύματος
- **T (sec):** περίοδος κύματος
- **g (m/sec²):** επιτάχυνση της βαρύτητας
- **L₀ (m):** μήκος κύματος στα βαθιά νερά
- **θ (αδιάστατο):** κλίση προσήνεμου πρανούς ή πυθμένα

Ο αριθμός Iribarren εξαρτάται από το ύψος και την περίοδο κύματος, αλλά και την κλίση του πυθμένα ή πρανούς. Ανάλογα με την τιμή που θα προκύψει, γνωρίζουμε αν υπάρχει θραύση του κυματισμού ή όχι, το είδος της θραύσης και την αναρρίχηση.

2.2.3 Κυματική μετάδοση και παράμετροι επιρροής

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

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

$$K_T = \frac{H_t}{H_i} \quad (2.2)$$

όπου:

- **H_t (m):** ύψος μεταδιδόμενου κυματισμού στην υπήνεμη πλευρά
- **H_i (m):** ύψος προσπίπτοντος κυματισμού στην προσήνεμη πλευρά

Υπάρχουν αρκετές παράμετροι που έχουν σχέση με την κατασκευή ενός ύφαλου κυματοθραύστη και επηρεάζουν την αποτελεσματικότητά του. Οι κυριότερες είναι οι εξής:

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

Όμως, είναι γενικά αποδεκτό ότι η κρισιμότερη παράμετρος για τον υπολογισμό του συντελεστή μετάδοσης είναι το σχετικό ελεύθερο ύψος F/H_i . Τούτο συμβαίνει διότι η παράμετρος αυτή ελέγχει την κυματική ενέργεια που θα επιτραπεί να περάσει στην υπήνεμη πλευρά λόγω της θραύσης των κυμάτων λόγω ρήχωσης που ρυθμίζεται πλήρως από το F/H_i .

2.3 ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ

2.3.1 Γενικά

Εμπειρική σχέση ονομάζεται μια μαθηματική σχέση υπολογισμού η οποία στηρίζεται στην παρατήρηση και όχι σε κάποια θεωρία. Ορισμένες εμπειρικές σχέσεις αποτελούν απλά προσεγγίσεις πραγματικών προβλημάτων, ενώ άλλες έχουν πάψει να θεωρούνται πια εμπειρικές ύστερα από την δημιουργία νέων θεωριών που τυγχάνει να ικανοποιούνται από αυτές.

Παρακάτω παρουσιάζεται μια σειρά από εμπειρικές σχέσεις που έχουν σκοπό τον υπολογισμό του συντελεστή μετάδοσης K_T σε ύφαλους κυματοθραύστες. Η παρουσίασή τους γίνεται με χρονολογική σειρά.

2.3.2 Ahrens (1987)

Αποτελεί τον πρώτο αξιόπιστο εμπειρικό τύπο για τον συντελεστή μετάδοσης σε ύφαλους κυματοθραύστες και εκφράζεται ως εξής:

$$K_T = \frac{1.0}{1.0 + \left(\frac{h}{d}\right)^{1.188} \left(\frac{A}{dL}\right)^{0.261} \exp\left(0.529\left(\frac{F}{H}\right) + 0.00551\left(\frac{A^2}{D_{n50}^2 L}\right)\right)} \quad (2.3)$$

όπου:

- **h (m):** ύψος κυματοθραύστη
- **d (m):** βάθος νερού
- **A (m²):** επιφάνεια της διατομής του κυματοθραύστη
- **L (m):** μήκος κύματος σε βάθος νερού d
- **F (m):** ελεύθερο ύψος
- **H (m):** ύψος προσπίπτοντος κύματος
- **D_{n50} (m):** μέση ονομαστική διάμετρος λίθων θωράκισης

Η παραπάνω εξίσωση εφαρμόζεται για $F/H < 1$. Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη εμπειρική σχέση προέκυψε με βάση περισσότερες από 200 πειραματικές μετρήσεις με παρουσία κυματοθραύστη χαμηλής στέψης αποτελούμενο από λιθορριπή. Όλα τα πειράματα εκτελέστηκαν με ακανόνιστους (μη αρμονικούς) κυματισμούς και η στάθμη του νερού ήταν είτε στο ίδιο επίπεδο είτε χαμηλότερα από την αρχική στέψη του κυματοθραύστη. Έτσι, η χρήση της εξίσωσης υποτίθεται ότι γίνεται λαμβάνοντας υπόψη την τελική στέψη του κυματοθραύστη, η οποία βρίσκεται χαμηλότερα από τη στάθμη ηρεμίας του ύδατος λόγω φθοράς από ακραίες κυματικές συνθήκες.

2.3.3 Van der Meer (1990)

Ο Van der Meer (1990) κατέληξε στην εξής απλή έκφραση για τον K_T :

$$K_T = 0.8, \text{ για } 1.13 < F/H_i < 2.0$$

$$K_T = 0.46 + 0.3 \frac{F}{H_i}, \text{ για } -1.2 < F/H_i < 1.13 \quad (2.4)$$

$$K_T = 0.1, \text{ για } -2.0 < F/H_i < -1.2$$

Όπου $F > 0$ για ύφαλους κυματοθραύστες. Στην παραπάνω σχέση ο συντελεστής μετάδοσης K_T εξαρτάται μόνο από το σχετικό ελεύθερο ύψος F/H_i και μάλιστα γραμμικά. Συνεπώς δεν λαμβάνεται υπόψη η επίδραση διαφόρων δευτερευουσών παραμέτρων, οι οποίες είναι:

- το πλάτος στέψης του έργου
- η κλίση του ανάντι πρανούς
- το τοπικό μήκος κύματος
- η ενεργειακή απώλεια λόγω τριβής στον πυθμένα.

Αυτή η εμπειρική σχέση προήλθε από πειράματα με τη χρήση κυματοθραύστη κατασκευασμένου από λιθορριπή, ενώ η αρχική στέψη του κυματοθραύστη βρισκόταν χαμηλότερα από την επιφάνεια του νερού. Πάλι υποτίθεται ότι η εξίσωση εφαρμόζεται για την τελική στέψη του ύφαλου κυματοθραύστη που είναι ακόμα χαμηλότερα λόγω φθοράς.

2.3.4 D' Angremond et al. (1996)

Οι D' Angremond et al. (1996), ύστερα από ανάλυση σε πειραματικά δεδομένα και παρατηρήσεις σχετικά με ύφαλους κυματοθραύστες από λιθορριπή αλλά και από τεχνητούς ογκόλιθους (tetrapods), κατέληξαν στην εξής σχέση για τον K_T :

$$K_T = 0.4 \frac{F}{H_i} + A_{str} \left(\frac{B}{H_i} \right)^{-0.31} (1 - e^{-0.5\xi}) \quad (2.5)$$

Για $0.075 \leq K_T \leq 0.8$, όπου:

- $A_{str} = 0.64$, για διαπερατές κατασκευές από λιθορριπή (φυσικών ή τεχνητών ογκολίθων)

- $A_{str} = 0.8$, για λείες αδιαπέρατες κατασκευές (π.χ. θωράκιση γεμισμένη με ασφαλτικά ή μπλόκια από σκυρόδεμα)
- $A_{str} = 0.75$, στρώματα από σκυροδεμάτινα μπλόκια
- $A_{str} = 0.70$, για γεωφάσματα ή αμμόσακκους

Η παραπάνω σχέση εφαρμόζεται υπό την προϋπόθεση ότι ισχύει $-2.5 < F/H_i < 2.5$ και συσχετίζει τον συντελεστή μετάδοσης με το σχετικό πλάτος στέψης B/H_i , το σχετικό ελεύθερο ύψος F/H_i και την παράμετρο ομοιότητας θραύσης ξ (αριθμός Iribarren). Επίσης θα πρέπει να ισχύει $B/H_i < 10$ διότι έχει αποδειχθεί ότι το λάθος στην πρόβλεψη του K_T αυξάνει με το σχετικό πλάτος στέψης.

2.3.5 Seabrook & Hall (1998)

Ο Seabrook (1997) εκτέλεσε μια μεγάλη σειρά πειραμάτων όπου μελέτησε τη μετάδοση του κυματισμού πάνω από ύφαλους κυματοθραύστες. Σ' αυτή του την προσπάθεια μετέβαλε τις τιμές παραμέτρων όπως του ελεύθερου ύψους, του πλάτους στέψης, του βάθους θάλασσας και των χαρακτηριστικών των επερχόμενων κυμάτων. Έτσι οι Seabrook & Hall (1998) πρότειναν την εξής σχέση:

$$K_T = 1 - \exp\left(-0.65 \frac{F}{H_i} - 1.09 \frac{H_i}{B}\right) + 0.047 \frac{BF}{LD_{n50}} - 0.067 \frac{H_i F}{BD_{n50}} \quad (2.6)$$

Η παραπάνω σχέση ισχύει για $0 \leq BF/LD_{n50} \leq 7.08$ και $0 \leq FH_i/BD_{n50} \leq 2.14$. Ο όρος FH_i/BD_{n50} εκφράζει την επίδραση της τριβής πάνω στο υλικό του έργου, ενώ ο όρος BF/LD_{n50} αντιστοιχεί στη ροή μέσα στο πορώδες του κυματοθραύστη. Επιπλέον η συγκεκριμένη εμπειρική σχέση προέκυψε με βάση πειραματικές μετρήσεις με παρουσία ύφαλων κυματοθραυστών από λιθορριπή με στρώση θωράκισης από ογκόλιθους ονομαστικής διαμέτρου D_{n50} .

2.3.6 Daemrich et al. (2002)

Οι Daemrich et al. (2002) πραγματοποίησαν έρευνα σε πιο βαθιά νερά όπου αντιστοιχούν υψηλότερες τιμές για το σχετικό ελεύθερο ύψος F/H_i και επομένως και για τον συντελεστή μετάδοσης K_T . Κατέληξαν στην εξής έκφραση:

$$K_T = \tanh\left(\frac{2\pi F}{L_{op}}\right)^{0.262}, \text{ για } K_T \geq 0.8 \quad (2.7)$$

Αυτή η εξίσωση προήλθε από πειράματα με τη χρήση κυματοθραύστη τραπεζοειδούς διατομής, αποτελούμενου από λιθορριπή. Η στάθμη ηρεμίας του ύδατος βρισκόταν στο ίδιο επίπεδο ή ψηλότερα από την στέψη του κυματοθραύστη.

2.3.7 Bleck & Oumeraci (2002)

Οι Bleck & Oumeraci (2002) διερεύνησαν την κυματική μετάδοση πάνω από ύφαλο κυματοθραύστη ορθογωνικής διατομής και οδηγήθηκαν στην εξής σχέση:

$$K_T = 1.0 - 0.83e^{(-0.72\frac{F}{H_i})} \quad (2.8)$$

Στην παραπάνω έκφραση ο συντελεστής μετάδοσης K_T εξαρτάται μόνο από την κρισιμότερη παράμετρο που είναι το σχετικό ελεύθερο ύψος F/H_i . Η συγκεκριμένη εξίσωση προέκυψε ύστερα από πειραματικές μετρήσεις με παρουσία μοντέλου ύφαλου κυματοθραύστη που αποτελείτο από ένα κουτί σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου. Στα πειράματα το ύψος του ύφαλου κυματοθραύστη πήρε τις τιμές $h=0.4, 0.5, 0.6\text{m}$, ενώ το βάθος νερού ήταν $d=0.7\text{m}$.

2.3.8 Εμπειρικές σχέσεις και διαπερατότητα

Ένα στοιχείο που πρέπει να επισημανθεί πριν την εφαρμογή των παραπάνω εμπειρικών σχέσεων για τον υπολογισμό του συντελεστή μετάδοσης, είναι το αν και πως λαμβάνεται υπόψη η διαπερατότητα του ύφαλου κυματοθραύστη από την κάθε

σχέση. Έτσι, με βάση τις παραπάνω περιγραφές και εξισώσεις προκύπτει ότι οι εμπειρικές σχέσεις οι οποίες δεν λαμβάνουν υπόψη τη διαπερατότητα (πορώδες) του έργου είναι αυτές των Van der Meer (1990), Daemrich et al. (2002) και Bleck & Oumeraci (2002). Επομένως οι υπόλοιπες 3 εμπειρικές σχέσεις λαμβάνουν υπόψη τη διαπερατότητα του ύφαλου κυματοθραύστη, αλλά όχι με άμεσο και ακριβή τρόπο (πχ μέσω του πορώδους n). Οι σχέσεις των Ahrens (1987) και Seabrook & Hall (1998) εμμέσως μέσω της ονομαστικής διαμέτρου των λίθων θωράκισης D_{n50} , ενώ εκείνη των D' Angremond et al. (1996) μέσω του συντελεστή A_{str} που παίρνει διαφορετικές τιμές ανάλογα με το υλικό κατασκευής.

2.4 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ BOUSSINESQ

2.4.1 Βασικές εξισώσεις

Το ομοίωμα τύπου Boussinesq περιέχει εξισώσεις ανώτερης τάξης με βελτιωμένα χαρακτηριστικά διασποράς. Στις εξισώσεις αυτές προστίθενται και άλλοι όροι όταν εξετάζεται η μετάδοση κυματισμών πάνω από διαπερατές κατασκευές, έτσι ώστε να περιγραφεί η αλληλεπίδραση των κυματισμών με τη ροή μέσα στο πορώδες μέσο. Σε μονοδιάστατη μορφή οι εξισώσεις συνέχειας και ορμής γράφονται αντίστοιχα (Avgeris et al., 2004):

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial[(d+\eta) \cdot u]}{\partial x} + n \cdot \frac{\partial(d_s \cdot u_s)}{\partial x} = 0 \quad (2.9)$$

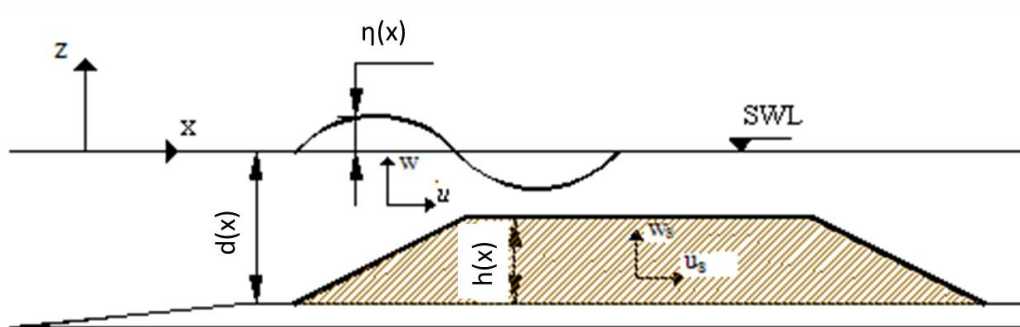
$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + g \cdot \frac{\partial \eta}{\partial x} = & \frac{d^2}{3} \cdot \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} + d \cdot \frac{\partial d}{\partial x} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} + B \cdot d^2 \cdot \left(\frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} + g \cdot \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} \right) + 2 \cdot B \cdot d \cdot \\ \frac{\partial d}{\partial x} \cdot \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} + g \cdot \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} \right) + n \cdot d \cdot \left(\frac{\partial d_s}{\partial x} \cdot \frac{\partial^2 u_s}{\partial x \partial t} + \frac{1}{2} \cdot d_s \cdot \frac{\partial^3 u_s}{\partial x^2 \partial t} \right) \end{aligned} \quad (2.10)$$

Οι παράμετροι των παραπάνω εξισώσεων ορίζονται ως εξής:

- **u:** μέση, ολοκληρωμένη στο βάθος οριζόντια ταχύτητα
- **η :** ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας

- **d**: βάθος νερού
- **B**: συντελεστής διασποράς
- **n**: πορώδες (για συμπαγείς κατασκευές είναι $n=0$)
- **u_s** : μέση, ολοκληρωμένη στο βάθος οριζόντια ταχύτητα ρευστού στο πορώδες μέσο
- **d_s** : πάχος πορώδους μέσου

Αυτές οι μεταβλητές παριστάνονται γραφικά στο επόμενο σχήμα (Σχ. 2.4.1.1):



Σχήμα 2.4.1.1 – Ορισμός βασικών μεταβλητών εξισώσεων Boussinesq.

Με την προσθήκη των όρων διασποράς της μορφής $B \cdot f(u)$ και $B \cdot f(\eta)$, είναι εφικτή η εφαρμογή του ομοιώματος σε μεγαλύτερο εύρος βαθών. Ο συντελεστής διασποράς B λαμβάνει την τιμή $1/15$, για την οποία σύμφωνα με τους Madsen & Sorensen (1992), η εξίσωση διασποράς προσεγγίζει με μεγαλύτερη ακρίβεια την αντίστοιχη εξίσωση της γραμμικής θεωρίας.

Οι εξισώσεις (2.9) και (2.10) επιλύονται στην περίπτωση πορώδους κυματοθραύστη σε συνδυασμό με μια ολοκληρωμένη στο βάθος εξίσωση ορμής Darcy – Forchheimer για την ροή στο εσωτερικό του κυματοθραύστη. Υποθέτοντας ότι $O[(h_s/L)^2] \ll 1$, η δισδιάστατη, ολοκληρωμένη στο βάθος εξίσωση ορμής, διατυπωμένη σε όρους της ταχύτητας ρευστού u_s ($u_D = n \cdot u_s$, u_D : ταχύτητα Darcy) γράφεται:

$$c_r \cdot \frac{\partial u_s}{\partial t} + u_s \cdot \frac{\partial u_s}{\partial x} = -g \cdot \frac{\partial \eta}{\partial x} - n \cdot \alpha_1 \cdot u_s - n^2 \cdot \alpha_2 \cdot u_s \cdot |u_s| \quad (2.11)$$

Η παραπάνω εξίσωση ονομάζεται μη γραμμική εξίσωση μακρών κυματισμών για πορώδη μέσα. Ο τέταρτος όρος στην εξίσωση (2.11) ονομάζεται όρος Darcy, ενώ ο τελευταίος ονομάζεται όρος Forchheimer και προστίθεται στην εξίσωση συνέχειας για να ληφεί υπόψη η μη γραμμική συμπεριφορά της διαφοράς πίεσης σε σχέση με την ταχύτητα. Αυτό συμβαίνει σε περιπτώσεις υψηλής ταχύτητας ρευστού σε πορώδη μέσα, όταν η επιρροή της αδράνειας είναι μεγάλη.

Επίσης στην παραπάνω εξίσωση, c_r : αδρανειακός συντελεστής, ο οποίος δίνεται από τη σχέση (van Gent, 1995):

$$c_r = 1 + c_m = 1 + \gamma \cdot \frac{1-n}{n} \quad (2.12)$$

όπου είναι:

- c_m : συντελεστής πρόσθετης μάζας
- γ : εμπειρικός συντελεστής που σχετίζεται με την πρόσθετη μάζα

Οι συντελεστές πορώδους αντίστασης α_1 και α_2 υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις (Sollitt & Cross, 1972):

$$\alpha_1 = \frac{v}{K} \quad (2.13)$$

$$\alpha_2 = \frac{C_f}{\sqrt{K}} \quad (2.14)$$

όπου ισχύει:

- v (**m²/sec**): κινηματικό ιξώδες
- C_f : αδιάστατη παράμετρος
- K (**m²**): γεωμετρική διαπερατότητα

Η τελευταία παράμετρος προκύπτει από τη σχέση (van Gent, 1994, 1995, Burcharth & Andersen, 1995):

$$K = \frac{d_{50}^2 \cdot n^3}{\alpha(1-n)^2} \quad (2.15)$$

όπου είναι:

- **α** : εμπειρικός συντελεστής
- **d_{50}** : η μέση διάμετρος του υλικού

Ο van Gent (1995) κατέληξε στην επόμενη έκφραση για τον υπολογισμό του C_f :

$$C_f = \beta \cdot \frac{1-n}{n} \cdot \frac{\sqrt{K}}{d_{50}} \quad (2.16)$$

όπου:

- **β** : εμπειρικός συντελεστής

Για τους αδιάστατους συντελεστές α , β και γ υπάρχουν προτεινόμενες τιμές που προέρχονται από ορισμένες ερευνητικές εργασίες (Madsen, 1974, Vidal et al., 1988, van Gent, 1995) και έχουν σχέση με το είδος του υλικού και την κλίμακα μεγέθους των στερεών σωματιδίων. Ο επόμενος πίνακας (Πιν. 1) περιλαμβάνει τις τιμές που προέκυψαν από τις πειραματικές μετρήσεις του van Gent (1995):

Πίνακας 1 – Προτεινόμενοι συντελεστές συναρτήσεων των χαρακτηριστικών του υλικού (van Gent, 1995)

Υλικό	d_{50}	n	α	β
Ακανόνιστο λιθοσύντριμμα	0.0610	0.442	1791	0.55
Ημισφαιρικό λιθοσύντριμμα	0.0487	0.454	0	0.88
Σφαιρικό λιθοσύντριμμα	0.0488	0.393	1066	0.29
Ακανόνιστο λιθοσύντριμμα	0.0202	0.449	1662	1.07
Ακανόνιστο λιθοσύντριμμα	0.0310	0.388	1007	0.63
Σφαίρες	0.0460	0.476	2070	0.69

2.4.2 Δημιουργία κυματισμών

Η παραγωγή της κυματικής διαταραχής στο υπολογιστικό πεδίο πραγματοποιείται με τη χρήση της μεθόδου της συνάρτησης πηγής των Wei et al. (1999), η οποία είναι τροποποιημένη από τους Memos et al. (2005) έτσι ώστε να είναι

συμβατή με τις εξισώσεις που χρησιμοποιούνται στο παρόν ομοίωμα. Αυτή η μέθοδος συνδυάζεται με την τοποθέτηση στοιβάδας απορρόφησης στο ανάντι όριο του πεδίου. Η συνάρτηση πηγής έχει την εξής έκφραση:

$$f_s(x, t) = F(t) \cdot e^{-\beta_s \cdot (x-x_s)^2} \quad (2.17)$$

όπου είναι:

- x_s : η θέση του κέντρου της πηγής στον άξονα x
- β_s : συντελεστής σχήματος της πηγής

Η τιμή του β_s υπολογίζεται ως εξής:

$$\beta_s = \frac{80}{(\delta \cdot L)^2} \quad (2.18)$$

όπου ισχύει:

- δ : παίρνει την τιμή 0.3
- L : μήκος κύματος

Η συνάρτηση πηγής έχει εξίσωση της μορφής:

$$F(t) = \sum_{i=1}^N D_{s_i} [\cos(\omega_i \cdot t) + \sin(\omega_i \cdot t)] \quad (2.19)$$

όπου έχουμε:

- N : το πλήθος των διαμερίσεων του φάσματος στην περιοχή των συχνοτήτων
- D_{s_i} : εύρος της συνάρτησης πηγής
- ω : γωνιακή συχνότητα

Το εύρος της συνάρτησης πηγής προκύπτει από τη σχέση:

$$D_{s_i} = \frac{2 \cdot \eta_{0_i} \cdot (1+B \cdot (k_i \cdot d)^2) \cdot (\omega^2 + B \cdot g \cdot k_i^4 \cdot d^3)}{\omega \cdot k \cdot I_1 \left[1 + \left(B + \frac{1}{3} \right) \cdot (k_i \cdot d)^2 \right]} \quad (2.20)$$

όπου:

- η_0 : εύρος κύματος, ισούται με $H/2$
- k : αριθμός κύματος

Το I_1 προκύπτει ως εξής:

$$I_1 = \sqrt{\frac{\pi}{\beta_s}} \cdot e^{\left[-\frac{k_t^2}{4\beta_s}\right]} \quad (2.21)$$

Στην περίπτωση μοναχικών κυματισμών η εισαγωγή της διαταραχής γίνεται χρησιμοποιώντας τις αναλυτικές σχέσεις που προτείνουν οι Wei & Kirby (1995).

2.4.3 Θραύση κυματισμών και τριβή πυθμένα

Προκειμένου να προσομοιωθεί το φαινόμενο της αλλοίωσης της κυματικής ενέργειας από τις διεργασίες της θραύσης και της τριβής του πυθμένα, εισάγονται στην εξίσωση της ορμής δύο επιπλέον όροι:

$$u_t + \dots = \left(\frac{d^2+2\cdot d\cdot\eta}{3}\right) \cdot \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} + \dots + E_b - \frac{\tau_b}{\rho} \quad (2.22)$$

Σχετικά με τη θραύση, ο E_b είναι ένας όρος τυρβώδους συνεκτικότητας που με βάση τη μέθοδο του συντελεστή τυρβώδους συνεκτικότητας (Kennedy et al., 2000), υπολογίζεται ως εξής:

$$E_b = \frac{1}{d+\eta} \cdot (v_e \cdot [(d+\eta) \cdot u]_x)_x \quad (2.23)$$

Για τον συντελεστή τυρβώδους συνεκτικότητας v_e , ο οποίος εξαρτάται από τη θέση και το χρόνο, ισχύει:

$$v_e = B_b \cdot \delta_b^2 \cdot (d+\eta) \cdot \eta_t \quad (2.24)$$

όπου είναι:

- δ_b : συντελεστής μήκους ανάμιξης που ισούται με 1.2

Όσο για την μεταβλητή B_b , αυτή καθορίζει την πραγματοποίηση της θραύσης και παίρνει τιμές από 0 ως 1. Η B_b προκύπτει ως εξής:

$$B_b = \begin{cases} 1, & \eta_t \geq 2\eta_t^* \\ \frac{\eta_t}{\eta_t^*} - 1, & \eta_t^* < \eta_t < 2\eta_t^* \\ 0, & \eta_t \leq \eta_t^* \end{cases} \quad (2.25)$$

Η παράμετρος η_t^* προσδιορίζει την έναρξη και το πέρας της θραύσης και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\eta_t^* = \begin{cases} \eta_t^{(F)}, & t \geq T^* \\ \eta_t^{(I)} + \frac{t-t_0}{T^*} \cdot (\eta_t^{(F)} - \eta_t^{(I)}), & 0 < t - t_0 < T^* \end{cases} \quad (2.26)$$

όπου ισχύει:

- T^* : μεταβατικός χρόνος, ισούται με $5\sqrt{d/g}$
- t_0 : χρονική στιγμή έναρξης θραύσης ($\eta_t > \eta_t^{(I)}$)
- $t-t_0$: διάρκεια θραύσης
- $\eta_t^{(I)}$: ισούται με $0.35\sqrt{g \cdot d}$
- $\eta_t^{(F)}$: είναι ίσο με $0.15\sqrt{g \cdot d}$

Η διατμητική τάση πυθμένα προκύπτει από μια σχέση της μορφής:

$$\tau_b = \frac{1}{d+\eta} \cdot f_w \cdot u \cdot |u| \quad (2.27)$$

όπου:

- f_w : συντελεστής τριβής πυθμένα, παίρνει τιμές από 10^{-3} έως 10^{-2} και οι μεγαλύτερες από αυτές αντιστοιχούν σε πυθμένα από χοντρόκοκκο υλικό

Οι βασικές εξισώσεις επιλύονται σε δύο διαδοχικά στάδια με ένα σχήμα πεπερασμένων διαφορών ανώτερης τάξης (Wei & Kirby, 1995). Στο πρώτο στάδιο

εφαρμόζεται ένα ρητό σχήμα εκτίμησης τρίτης τάξης, Adams – Bashforth, ενώ στη συνέχεια γίνεται εφαρμογή ενός πεπλεγμένου σχήματος διόρθωσης τέταρτης τάξης, Adams – Moulton, έως ότου υπάρξει σύγκλιση.

Η επίλυση των εξισώσεων Boussinesq έγινε με τη χρήση ενός αλγόριθμου γραμμένου σε γλώσσα FORTRAN, ο οποίος ήταν διαθέσιμος από το εργαστήριο Λιμενικών Έργων. Σε αυτό τον αλγόριθμο τοποθετούνταν ως αρχικές τιμές το ύψος κυματισμού ανάντι του κυματοθραύστη, το πορώδες, η περίοδος του κυματισμού και το βάθος νερού. Ο υπολογιστικός αλγόριθμος επέστρεφε ως αποτέλεσμα την ανύψωση της επιφάνειας του νερού σε σημείο κατάντι του κυματοθραύστη συναρτήσει του χρόνου. Επίσης ως δεδομένο στον παραπάνω αλγόριθμο εισάγεται και η διάμετρος των λίθων του έργου, η οποία στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία κρατήθηκε σταθερή και ίση με 0.08m (τιμή από τα πειράματα).

3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ

3.1 ΟΜΟΙΟΤΗΤΑ

Η μελέτη της κυματικής μετάδοσης σε ύφαλο κυματοθραύστη θα γίνει με πειραματικές μεθόδους δηλαδή με την κατασκευή του ομοιώματος. Το ομοίωμα και οι απαιτούμενες μετατροπές του έχουν χαμηλό κόστος, ενώ το ίδιο μελετάται εύκολα. Με το ομοίωμα μπορούν να αναπαρασταθούν οι συνθήκες του περιβάλλοντος και οι πολύπλοκες διεργασίες που συμβαίνουν στην κυματική μετάδοση στο πραγματικό έργο.

Μεταξύ πρωτότυπου και ομοιώματος υπάρχουν αναλογίες που ονομάζονται ομοιότητες (γεωμετρικής, κινηματικής, δυναμικής τάξης). Σε όμοια συστήματα υπάρχει αμφιμονοσήμαντη αντιστοιχία μεταξύ των στοιχείων τους και τα αντίστοιχα μεγέθη, στοιχεία λέγονται ομόλογα. Η ομοιότητα μεταξύ πρωτότυπου και ομοιώματος μπορεί να είναι μόνο γεωμετρική ή κινηματική ή δυναμική. Για να φανεί ποιο είδος ομοιότητας πρέπει να υπάρχει μεταξύ πρωτότυπου και ομοιώματος απαιτείται προσεκτική εξέταση του προβλήματος. Οι συνθήκες ομοιότητας είναι σχέσεις που μεταφράζουν τις ομοιότητες μεταξύ του πρωτότυπου και ομοιώματος. Διακρίνονται τρία είδη ομοιότητας:

- 1) Γεωμετρική ομοιότητα: Αναφέρεται στην ομοιότητα των σχημάτων των δύο συστημάτων. Στη γεωμετρική ομοιότητα απαιτείται σταθερός λόγος των ομόλογων (αντίστοιχων) γραμμικών διαστάσεων. Ο λόγος των ομόλογων γραμμικών διαστάσεων (σταθερά) ορίζεται ως η γεωμετρική κλίμακα ή κλίμακα μηκών.
- 2) Κινηματική ομοιότητα: Όταν δύο συστήματα είναι κινηματικά όμοια τότε τα ομόλογα (αντίστοιχα) σωματίδια βρίσκονται σε ομόλογες (αντίστοιχες) θέσεις στις ομόλογες χρονικές στιγμές. Απ' αυτό προκύπτει ότι:
 - Σε σταθερή ροή οι τροχιές των σωματιδίων είναι καμπύλες γεωμετρικά όμοιες.
 - Ο λόγος των χρόνων στους οποίους διανύονται ομόλογα διαστήματα είναι σταθερός και λέγεται κλίμακα χρόνων (Γ. Νουτσόπουλος – Γ. Χριστοδούλου, 1996).

3) Δυναμική ομοιότητα: Δύο συστήματα είναι δυναμικά όμοια, αν οι συνολικές δυνάμεις, αλλά και οι επιμέρους συνιστώσες που ασκούνται σε ομόλογα ρευστά στοιχεία είναι ανάλογες. Δηλαδή ο λόγος των αντίστοιχων δυνάμεων συνισταμένων, συνιστωσών σε ομόλογα ρευστά στοιχεία διατηρείται σταθερός. Τα δυναμοπολύγωνα σε αντίστοιχα σημεία στα δύο συστήματα είναι γεωμετρικά όμοια.

Αν μεταξύ δύο συστημάτων υπάρχει όμοια κατανομή μάζας και κινηματική ομοιότητα, τότε από τη σχέση $F = m \cdot \gamma$ εξασφαλίζεται ο σταθερός λόγος των συνολικών δυνάμεων σε ομόλογα ρευστά στοιχεία. Άρα απαιτείται κατ' αρχήν ομοιότητα μάζας και κινηματική ομοιότητα. Επιπλέον πρέπει να διατηρηθεί σταθερός και ο λόγος των επιμέρους συνιστωσών δυνάμεων.

Ο κυματισμός θεωρείται ως ροή, με μία ή περισσότερες ελεύθερες επιφάνειες, μέσα στο πεδίο βαρύτητας, ενώ η θάλασσα ως πραγματικό ασυμπίεστο ρευστό. Η ροή περιγράφεται από τις εξισώσεις κίνησης Navier – Stokes και την εξίσωση συνέχειας. Οι δυνάμεις που δρουν σε ένα ρευστό σωματίδιο είναι δυνάμεις αδράνειας, πίεσης, ιξώδους και βαρύτητας. Οι αδιάστατοι αριθμοί Reynolds και Froude ορίζονται ως εξής:

$$R = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} = \text{δυνάμεις αδράνειας} / \text{δυνάμεις συνεκτικότητας} \quad (3.1)$$

$$F = \frac{V}{\sqrt{D \cdot g}} = \text{δυνάμεις αδράνειας} / \text{δυνάμεις βαρύτητας} \quad (3.2)$$

όπου ισχύει:

D (m): χαρακτηριστική γραμμική διάσταση

V (m/s): χαρακτηριστική ταχύτητα ροής

ρ (kg/m³): πυκνότητα ρευστού

μ (kg/ms): συνεκτικότητα του ρευστού

g (m/s²): επιτάχυνση της βαρύτητας

Οι αδιάστατοι αριθμοί δίνουν ένα μέτρο του σχετικού μεγέθους της συγκεκριμένης συνιστώσας και της επίδρασης που έχει στη ροή. Η αριθμητική τιμή του αριθμού του Froude δίνει μια τάξη μεγέθους της σπουδαιότητας που έχει η

δύναμη της βαρύτητας στη ροή. Έχει ιδιαίτερη σημασία σε ροές με ελεύθερη επιφάνεια γιατί διέπονται από τη βαρύτητα.

Η δυναμική ομοιότητα σημαίνει ότι τα τετράπλευρα των δυνάμεων πάνω σε ομόλογα ρευστά σωματίδια είναι όμοια. Δηλαδή ο λόγος δύο οποιωνδήποτε δυνάμεων από τις τέσσερις είναι ίδιος στις δύο ροές. Άρα η πλήρης ομοιότητα δύο ροών σε ελεύθερη επιφάνεια απαιτεί δύο συνθήκες:

$$R_1 = R_2 \quad (\text{συνθήκη του Reynolds}) \quad (3.3)$$

$$F_1 = F_2 \quad (\text{συνθήκη του Froude}) \quad (3.4)$$

Πρακτικά δύο ροές με ελεύθερη επιφάνεια έχουν μία μόνο συνθήκη ομοιότητας, τη συνθήκη του Froude.

$$\frac{V_1^2}{g \cdot L_1} = \frac{V_2^2}{g \cdot L_2} \rightarrow \frac{V_2}{V_1} = \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \quad (3.5)$$

Ταχύτητα $V = L \cdot T^{-1}$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{L_2}{L_1} \cdot \frac{T_2^{-1}}{T_1^{-1}} = \frac{L_2}{L_1} \cdot \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{L_2}{L_1}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.6)$$

Δηλαδή:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{L_2}{L_1} \cdot \left(\frac{L_1}{L_2}\right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{L_2}{L_1}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.7)$$

Η σχέση (2.3) δίνει την περίοδο των κυμάτων που πρέπει να φορτίσουν το ομοίωμα (όπου έχει επιλεγθεί η γεωμετρική κλίμακα).

3.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΩΡΥΓΑ

3.2.1 Διαστάσεις – περιγραφή

Η διώρυγα κυματισμών βαρύτητας που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση των πειραματικών μετρήσεων βρίσκεται στο Εργαστήριο Λιμενικών Έργων του ΕΜΠ στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου. Έχει σχήμα ορθογωνίου παραλληλογράμμου με διαστάσεις (Βερναρδάκης, 1990):

- Καθαρό μήκος: 27.00m
- Καθαρό πλάτος: 0.60m
- Καθαρό ύψος: 1.53m
- Πάχος τοιχείου: 0.21m

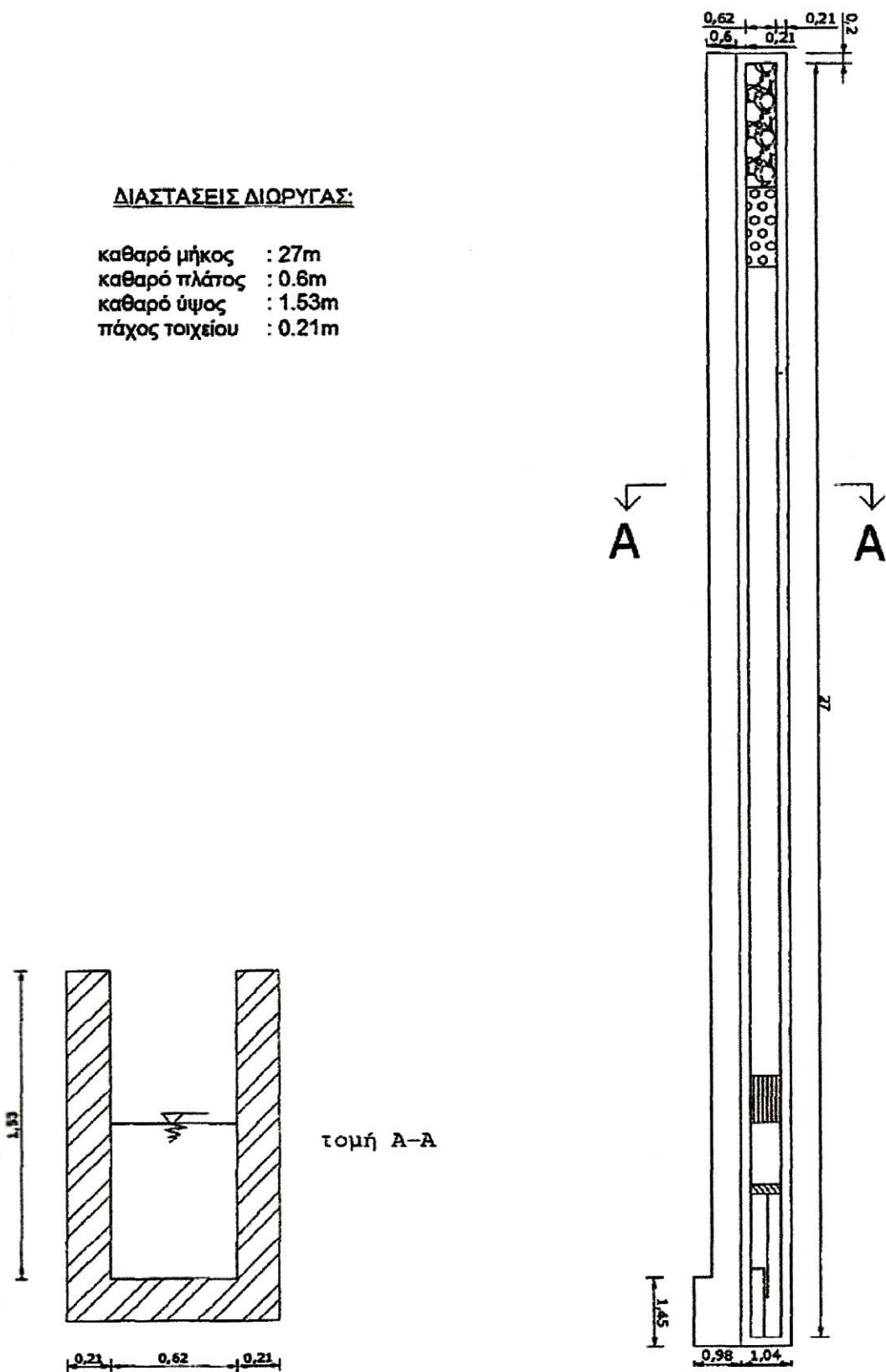
Η διώρυγα είναι κατασκευασμένη από οπλισμένο σκυρόδεμα με διατομή ανεστραμμένου Π και στηρίζεται ως συνεχής δοκός σε βάθρο από οπλισμένο σκυρόδεμα ύψους 0.80m. Στα δύο άκρα της διώρυγας υπάρχει αποσβεστήρας κυμάτων. Αυτός αποτελείται από πρανές με κροκάλες μέσης διαμέτρου 5cm που καλύπτεται με ψιλό συρματόπλεγμα για να εμποδίζεται η μετακίνησή τους.

Στην περιοχή όπου γίνονται οι μετρήσεις και σε απόσταση 5.75m από το αριστερό άκρο, υπάρχουν δύο διαφανή παράθυρα από plexiglass που επιτρέπουν την άμεση παρατήρηση των παραγόμενων κυμάτων και τη φωτογράφιση αυτών. Στο δεξί άκρο της διώρυγας, είναι εγκατεστημένη η κυματογεννήτρια που χρησιμοποιείται για την παραγωγή των κυματισμών. Κατά μήκος της διώρυγας, σε απόσταση ένα μέτρο περίπου από το πτερύγιο της κυματογεννήτριας υπάρχει κατασκευή από παράλληλες, διάτρητες, μεταλλικές πλάκες διαστάσεων 1.0m x 1.0m. Χρησιμεύει στο να αποσβένει τις πλευρικές διαταραχές, να περιορίζεται το φαινόμενο της περίθλασης και να γίνεται αποκατάσταση της δισδιάστατης ροής.

Η διώρυγα τροφοδοτείται με νερό από ένα σωλήνα που καταλήγει στο αριστερό άκρο της. Η εκκένωσή της γίνεται από δύο φρεάτια που βρίσκονται στα δύο άκρα της διώρυγας.

ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΔΙΩΡΥΓΑΣ:

καθαρό μήκος : 27m
καθαρό πλάτος : 0.6m
καθαρό ύψος : 1.53m
πάχος τοιχείου : 0.21m



Σχήμα 3.2.1.1 – Τομή και κάτοψη πειραματικής διώρυγας

3.2.2 Κυματογεννήτρια

Η κυματογεννήτρια βρίσκεται στο ένα άκρο της διώρυγας και είναι τοποθετημένη σε βάθρο από οπλισμένο σκυρόδεμα διαστάσεων 1.45m x 0.56m και πάχους 0.18m. Αποτελείται από τον ηλεκτρικό κινητήρα, το κιβώτιο ταχυτήτων, το μετατροπέα της κίνησης και το περύγιο.

Ο ηλεκτρικός κινητήρας έχει ισχύ 2.2KW και δουλεύει στις 1420 στροφές ανά λεπτό, με τάση 220V, 8.7A ή 380V, 5A.

Στο μετατροπέα της κίνησης μεταβάλλεται η εκκεντρότητα της ράβδου που μεταφέρει την κίνηση στο περύγιο. Ο λόγος μείωσης της κίνησης είναι 1/10. Η κυκλική ανοξείδωτη μεταλλική ράβδος για την τελική μετάδοση της κίνησης του περυσίου έχει διάμετρο 5cm και μήκος 2.70m.

Το περύγιο του κυματιστήρα έχει διαστάσεις 1.35m x 0.59m και είναι κατασκευασμένο από ελαφρύ ξύλο πάχους 6cm. Εκτελεί ταλάντωση και παράγει τους κυματισμούς.

Οι ταχύτητες καθορίζουν τη συχνότητα κίνησης του περυσίου της κυματογεννήτριας, η οποία ταυτίζεται με τη συχνότητα των παραγόμενων κυματισμών. Η εκκεντρότητα της ράβδου καθορίζει το εύρος ταλάντωσης του περυσίου της κυματογεννήτριας και δεν επηρεάζει τη συχνότητα των παραγόμενων κυματισμών παρά μόνο το ύψος τους.

3.2.3 Εύρος παραγόμενων κυματισμών

Η βαθμονόμηση της διώρυγας κυματισμών βαρύτητας του Εργαστηρίου Λιμενικών Έργων έδωσε τα εξής συμπεράσματα για τα όρια των παραγόμενων κυματισμών (Βερναρδάκης, 1990):

Πίνακας 3.2.3.1 – Όρια παραγόμενων κυματισμών

d (m)	H_{min} (cm)	H_{max} (cm)
0.40	1.12	12.20
0.50	1.38	16.20
0.60	2.20	20.00
0.70	1.90	23.70

Η περίοδος T των κυματισμών εξαρτάται από την ταχύτητα V , ενώ δεν εξαρτάται από την εκκεντρότητα του κυματιστήρα και συμπίπτει με μεγάλη ακρίβεια με την περίοδο ταλάντωσης του περυγίου του κυματιστήρα. Το εύρος των παραγόμενων κυματισμών για κάθε βάθος νερού d , κυμαίνεται από 0.53sec έως 2.12sec. Σε εύρος περιόδων $T\alpha$, από 2.12sec (αντιστοιχεί σε ταχύτητα κυματιστήρα $V=0$), έως 1.04sec (αντιστοιχεί σε ταχύτητα κυματιστήρα $V=4$), παρατηρούνται σχεδόν πάντα αρμονικοί κυματισμοί.

Για την ταχύτητα $V=4$ ($T=1.04\text{sec}$) της κυματογεννήτριας, το ύψος των παραγόμενων κυματισμών αυξάνει όσο αυξάνει η εκκεντρότητα E του κυματιστήρα. Για μεγαλύτερες ταχύτητες ($V>4$) παρατηρείται πτώση του ύψους κύματος, η οποία γίνεται πιο απότομη όσο αυξάνει η εκκεντρότητα. Τα μέγιστα ύψη κυματισμών που μπορούν να παραχθούν στη διώρυγα, παρατηρούνται για εκκεντρότητα $E=3000$ της κυματογεννήτριας (Βερναρδάκης, 1990).

Με τη χρήση της μεθόδου της γραμμικής παρεμβολής και γνωρίζοντας ότι για $V=0$ είναι $T\alpha=2.12\text{sec}$ και για $V=4$ είναι $T=1.04\text{sec}$, έχουμε τον παρακάτω πίνακα αντιστοιχίας ταχυτήτων κυματιστήρα και περιόδων παραγόμενων κυματισμών:

Πίνακας 3.2.3.2 – Ταχύτητες κυματιστήρα – περίοδοι παραγόμενων κυματισμών

V	T (sec)
0	2.12
1	1.85
2	1.58
3	1.31
4	1.04

Στην παρούσα εργασία ο κυματιστήρας χρησιμοποιήθηκε για $V=0$, $V=1$, $V=2$ και $V=3$ που αντιστοιχούν σε περιόδους κυματισμών $T\alpha=2.12\text{sec}$, $T\alpha=1.85\text{sec}$, $T\alpha=1.58\text{sec}$ και $T\alpha=1.31\text{sec}$.

3.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΟΡΩΔΟΥΣ

Για τον υπολογισμό του πορώδους και των πυκνοτήτων του υλικού του μοντέλου, δοχείο αμελητέου βάρους γεμίζεται με νερό και ζυγίζεται. Υπολογίζεται ο όγκος του δοχείου από τη μάζα του νερού:

$$V_{\text{δοχ}} = V_w = M_w \cdot \rho_w \quad (3.8)$$

Το δοχείο (άδειο) πληρώνεται με δείγμα από το υλικό, άρα ο ολικός όγκος του πορώδους υλικού $V_{\text{ολ}}$ είναι $V_{\text{δοχ}}$. Ο ολικός όγκος ισούται με τον όγκο των κενών συν τον όγκο των στερεών:

$$V_{\text{ολ}} = V_{\text{κεν}} + V_s \quad (3.9)$$

Ζυγίζεται και βρίσκεται έτσι η μάζα του υλικού που είναι ίση και με τη μάζα των στερεών:

$$M_{\text{ολ}} = M_s + M_a = M_s \quad (3.10)$$

Στο δοχείο μπαίνει νερό που καταλαμβάνει όλο τον όγκο των κενών και αυτό ζυγίζεται πάλι $M_{\text{ολ}w}$. Αφαιρώντας τους λίθους και ζυγίζοντας το νερό που μένει M'_w υπολογίζεται ο όγκος του δηλαδή ο όγκος των κενών.

$$V_{\text{κεν}} = V'_w = M'_w \cdot \rho_w \quad (3.11)$$

Το πορώδες δηλαδή ο λόγος του όγκου των κενών προς τον ολικό όγκο του υπολογίζεται ως:

$$n = \frac{V_{\text{κεν}}}{V_{\text{ολ}}} \quad (3.12)$$

Η πυκνότητα του συμπαγούς πετρώματος υπολογίζεται ως:

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (3.13)$$

Η πυκνότητα του υλικού υπολογίζεται από:

$$\rho = \frac{M_{ολ}}{V_{ολ}} \quad (3.14)$$

Για το υλικό του κυματοθραύστη μετρήθηκε: $M_w=11.95\text{kg}$, $M_{ολ}=16\text{kg}$, $M_{ολ,w}=22\text{kg}$ και $M'_w=6\text{kg}$. Με βάση τα παραπάνω η τιμή του πορώδους είναι $n=0.52$.

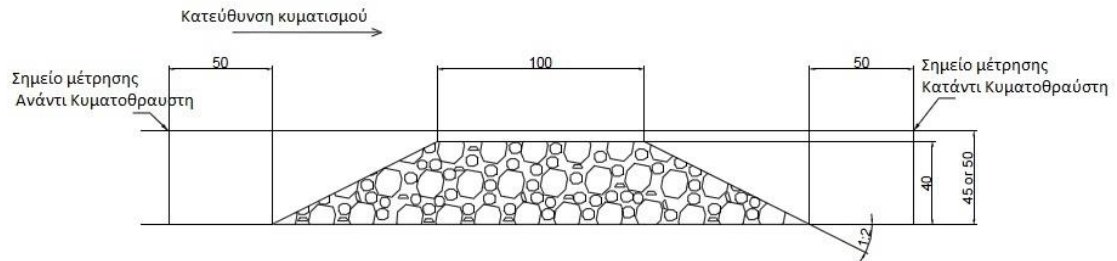
3.4 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Οι πειραματικές μετρήσεις αποσκοπούν στην καταγραφή του ύψους κύματος ανάντι και κατάντι του ύφαλου κυματοθραύστη έτσι ώστε να γίνεται γνωστός ο συντελεστής μετάδοσης K_T στην κάθε περίπτωση. Η κυματική μετάδοση μελετάται για δύο διαφορετικά βάθη νερού, αλλά και για μια σειρά από διαφορετικούς εισερχόμενους κυματισμούς.

Οι μετρήσεις του ύψους κύματος έγιναν με ανάγνωση σε κατάλληλα τοποθετημένους κατακόρυφους γνώμονες. Οι γνώμονες βρίσκονταν σε θέσεις πριν και μετά το μοντέλο και πιο συγκεκριμένα σε απόσταση 50cm από την αρχή και το πέρας του. Η ακρίβεια των οπτικών παρατηρήσεων στους γνώμονες θεωρήθηκε αρκετά καλή διότι έγιναν με μεγάλη προσοχή και με επαρκή αριθμό επαναλήψεων.

Για την παραγωγή των κυματισμών χρησιμοποιήθηκε η κυματογεννήτρια της διώρυγας στο εργαστήριο. Ο κυματιστήρας χρησιμοποιήθηκε για ταχύτητες $V=0$, $V=1$, $V=2$ και $V=3$ που αντιστοιχούν σε περιόδους κυματισμών $T_a=2.12\text{sec}$, $T_a=1.85\text{sec}$, $T_a=1.58\text{sec}$ και $T_a=1.31\text{sec}$. Το βάθος νερού πήρε τις τιμές 50cm και 45cm κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Το πλάτος στέγης του ύφαλου κυματοθραύστη ήταν ίσο με 1m, ενώ η κλίση των πρανών του ήταν $\frac{1}{2}$. Το ύψος του κυματοθραύστη ήταν ίσο με 40cm.

Η διάταξη του ύφαλου κυματοθραύστη που χρησιμοποιήθηκε, φαίνεται στο παρακάτω σχήμα,



Σχήμα 3.4.1 – Διάταξη ύφαλου κυματοθραύστη στον οποίο έγιναν τα πειράματα.

4. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

4.1 ΓΕΝΙΚΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή μετάδοσης που προέκυψαν στην παρούσα εργασία. Αρχικά, παρουσιάζονται τα τεχνικά δεδομένα των πειραματικών μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν. Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα των πειραμάτων συγκρίνονται με αυτά που προκύπτουν από το υπολογιστικό μοντέλο Boussinesq. Έπειτα, ο συντελεστής μετάδοσης συγκρίνεται με αυτόν που υπολογίζεται από ορισμένες υπάρχουσες εμπειρικές σχέσεις και τέλος προτείνεται μία νέα εμπειρική σχέση με βάση τα πειραματικά δεδομένα.

4.2 ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Στον παρακάτω πίνακα απεικονίζονται τα τεχνικά δεδομένα των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν:

Πίνακας 4.2 – Χαρακτηριστικά μεγέθη των πειραματικών διατάξεων

α/α	d (cm)	h (cm)	T (sec)	n
1	50	40	2.12	0.52
2	50	40	1.85	0.52
3	50	40	1.58	0.52
4	50	40	1.31	0.52
5	45	40	2.12	0.52
6	45	40	1.85	0.52
7	45	40	1.58	0.52

Τα σύμβολα του παραπάνω πίνακα ορίζονται ως εξής:

- **d (cm):** Βάθος νερού στη διάρρυγα
- **h (cm):** Ύψος μοντέλου ύφαλου κυματοθραύστη

- **T (sec):** Περίοδος παραγόμενων κυματισμών
- **n (αδιάστατο):** Πορώδες μοντέλου ύφαλου κυματοθραύστη

Ο συντελεστής μετάδοσης K_T πήρε διάφορες τιμές στα πειράματα και μάλιστα κυμάνθηκε μεταξύ των τιμών 0.56 και 0.86. Επίσης, έγινε έλεγχος για μια σειρά από διαφορετικές κυματικές συνθήκες διότι με την γνώση του συντελεστή μετάδοσης έχουμε και ένα μέτρο για την ικανότητα του ύφαλου κυματοθραύστη να παρέχει προστασία από τους κυματισμούς.

4.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΑΠΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟ BOUSSINESQ

Πίνακας 4.3.1

Στον πίνακα 4.3.1 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή μετάδοσης κυματισμού K_T που προέκυψαν από τις πειραματικές μετρήσεις και οι αντίστοιχες που υπολογίστηκαν με το μοντέλο Boussinesq για ύφαλο κυματοθραύστη με πορώδες. Επίσης σε αυτόν τον πίνακα περιέχονται ορισμένα βασικά δεδομένα των πειραμάτων, όπως ο αύξων αριθμός, το βάθος νερού d και το ύψος κυματοθραύστη h που αντιστοιχούν σε κάθε πείραμα. Έπειτα παρουσιάζονται τα ύψη κύματος ανάντι και κατάντι του κυματοθραύστη που αντιστοιχούν στις πειραματικές μετρήσεις και στο μοντέλο Boussinesq. Το ύψος κύματος ισούται κάθε φορά με τη διαφορά ανάμεσα στην μέγιστη και ελάχιστη ανύψωση της επιφάνειας του νερού, η_{max} και η_{min} αντίστοιχα. Στην τελευταία στήλη του πίνακα φαίνεται το ποσοστό απόκλισης (%) της τιμής του K_T που υπολογίστηκε με το μοντέλο Boussinesq σε σχέση με εκείνη που προέκυψε από το αντίστοιχο πείραμα. Το πορώδες του ύφαλου κυματοθραύστη ήταν $n=0.52$ κατά τη διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων και η ίδια τιμή χρησιμοποιήθηκε ως δεδομένο στο μοντέλο Boussinesq.

Α/α πειράματος	Βάθος νερού d (cm)	Ύψος κυματοθραύστη h (cm)	Ανάτη ύψος κυματισμού (cm) (μέτρηση)		Κατάτη ύψος κυματισμού (cm) (μέτρηση)		Κατάτη ύψος κυματισμού (cm) (Boussinesq)		K _T (μέτρηση)	K _T (Boussinesq με πορώδες)	Ποσοστό Απόκλισης (%)
			η_{max}	η_{min}	H_i	H_t	η_{max}	η_{min}			
1	50	40	η_{max}	153.5	η_{max}	14.5	η_{max}	3.5	0.86	0.86	0.0
			η_{min}	147	η_{min}	8.9	η_{min}	-2			
			H_i	6.5	H_t	5.6	H_t	5.6			
2	50	40	η_{max}	154.5	η_{max}	16	η_{max}	3.1	0.75	0.73	3.3
			η_{min}	146.5	η_{min}	10	η_{min}	-3			
			H_i	8	H_t	6	H_t	5.8			
3	50	40	η_{max}	154.5	η_{max}	15.8	η_{max}	3.3	0.66	0.65	1.6
			η_{min}	145	η_{min}	9.5	η_{min}	-3			
			H_i	9.5	H_t	6.3	H_t	6.2			
4	50	40	η_{max}	155	η_{max}	16	η_{max}	2.6	0.64	0.58	8.6
			η_{min}	144	η_{min}	9	η_{min}	-4			
			H_i	11	H_t	7	H_t	6.4			
5	45	40	η_{max}	146.5	η_{max}	18.7	η_{max}	1.7	0.75	0.68	10.0
			η_{min}	142.5	η_{min}	15.7	η_{min}	-1			
			H_i	4	H_t	3	H_t	2.7			
6	45	40	η_{max}	148.5	η_{max}	19	η_{max}	1.9	0.61	0.60	2.9
			η_{min}	142.8	η_{min}	15.5	η_{min}	-2			
			H_i	5.7	H_t	3.5	H_t	3.4			
7	45	40	η_{max}	149	η_{max}	19.3	η_{max}	1.9	0.56	0.52	7.1
			η_{min}	141.5	η_{min}	15.1	η_{min}	-2			
			H_i	7.5	H_t	4.2	H_t	3.9			

Πίνακας 4.3.1 – Σύγκριση συντελεστή μετάδοσης από πειραματικές μετρήσεις και μοντέλο Boussinesq με πορώδες.

Όπως φαίνεται από τον παραπάνω πίνακα, τα αποτελέσματα που παίρνουμε από την επίλυση του μοντέλου Boussinesq πλησιάζουν με υψηλή ακρίβεια τις τιμές που προέκυψαν από τις πειραματικές μετρήσεις, τόσο για $h/d = 0.8$ (4 πρώτα πειράματα) όσο και για $h/d = 0.89$ (τα επόμενα 3). Μόνο στην περίπτωση 5 υπάρχει διαφορά της τάξης του 10%, ενώ στην περίπτωση 1 το σχετικό σφάλμα είναι 0%. Αυτό δηλώνει την αξιοπιστία που μπορούμε να έχουμε στα αποτελέσματα του μοντέλου, κάτι που μας δίνει τη δυνατότητα για περαιτέρω σχολιασμό χρησιμοποιώντας το.

Πίνακας 4.3.2

Στον πίνακα 4.3.2 παρουσιάζονται τα ίδια στοιχεία με τον προηγούμενο πίνακα, αλλά με μία βασική διαφορά. Στο μοντέλο Boussinesq έχει πλέον τεθεί $n=0$, δηλαδή επιλύεται για ύφαλο κυματοθραύστη χωρίς πορώδες (αδιαπέρατο), έτσι ώστε να γίνει σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων και με αυτή την περίπτωση και να φανεί αν και κατά πόσο ο μηδενισμός του πορώδους επηρεάζει τις τιμές του συντελεστή μετάδοσης κυματισμού.

Α/α πειράματος	Βάθος νερού d (cm)	Ύψος κυματοθραύστη h (cm)	Ανάτη ύψος κυματισμού (cm) (μέτρηση)		Κατάτη ύψος κυματισμού (cm) (μέτρηση)		Κατάτη ύψος κυματισμού (cm) (Boussinesq)		K _T (μέτρηση)	K _T (Boussinesq χωρίς πορώδες)	Ποσοστό Απόκλισης (%)
			η _{max}	η _{min}	H _i	H _t	η _{max}	η _{min}			
1	50	40	η _{max}	153.5	η _{max}	14.5	η _{max}	4.4	0.86	1.32	53.6
			η _{min}	147	η _{min}	8.9	η _{min}	-4.2			
			H _i	6.5	H _t	5.6	H _t	8.6			
2	50	40	η _{max}	154.5	η _{max}	16	η _{max}	4.5	0.75	1.15	53.3
			η _{min}	146.5	η _{min}	10	η _{min}	-4.7			
			H _i	8	H _t	6	H _t	9.2			
3	50	40	η _{max}	154.5	η _{max}	15.8	η _{max}	5.4	0.66	1.05	58.7
			η _{min}	145	η _{min}	9.5	η _{min}	-4.6			
			H _i	9.5	H _t	6.3	H _t	10			
4	50	40	η _{max}	155	η _{max}	16	η _{max}	6	0.64	1.04	62.9
			η _{min}	144	η _{min}	9	η _{min}	-5.4			
			H _i	11	H _t	7	H _t	11.4			
5	45	40	η _{max}	146.5	η _{max}	18.7	η _{max}	2.3	0.75	1.20	60.0
			η _{min}	142.5	η _{min}	15.7	η _{min}	-2.5			
			H _i	4	H _t	3	H _t	4.8			
6	45	40	η _{max}	148.5	η _{max}	19	η _{max}	2.4	0.61	0.88	42.9
			η _{min}	142.8	η _{min}	15.5	η _{min}	-2.6			
			H _i	5.7	H _t	3.5	H _t	5			
7	45	40	η _{max}	149	η _{max}	19.3	η _{max}	2.7	0.56	0.73	31.0
			η _{min}	141.5	η _{min}	15.1	η _{min}	-2.8			
			H _i	7.5	H _t	4.2	H _t	5.5			

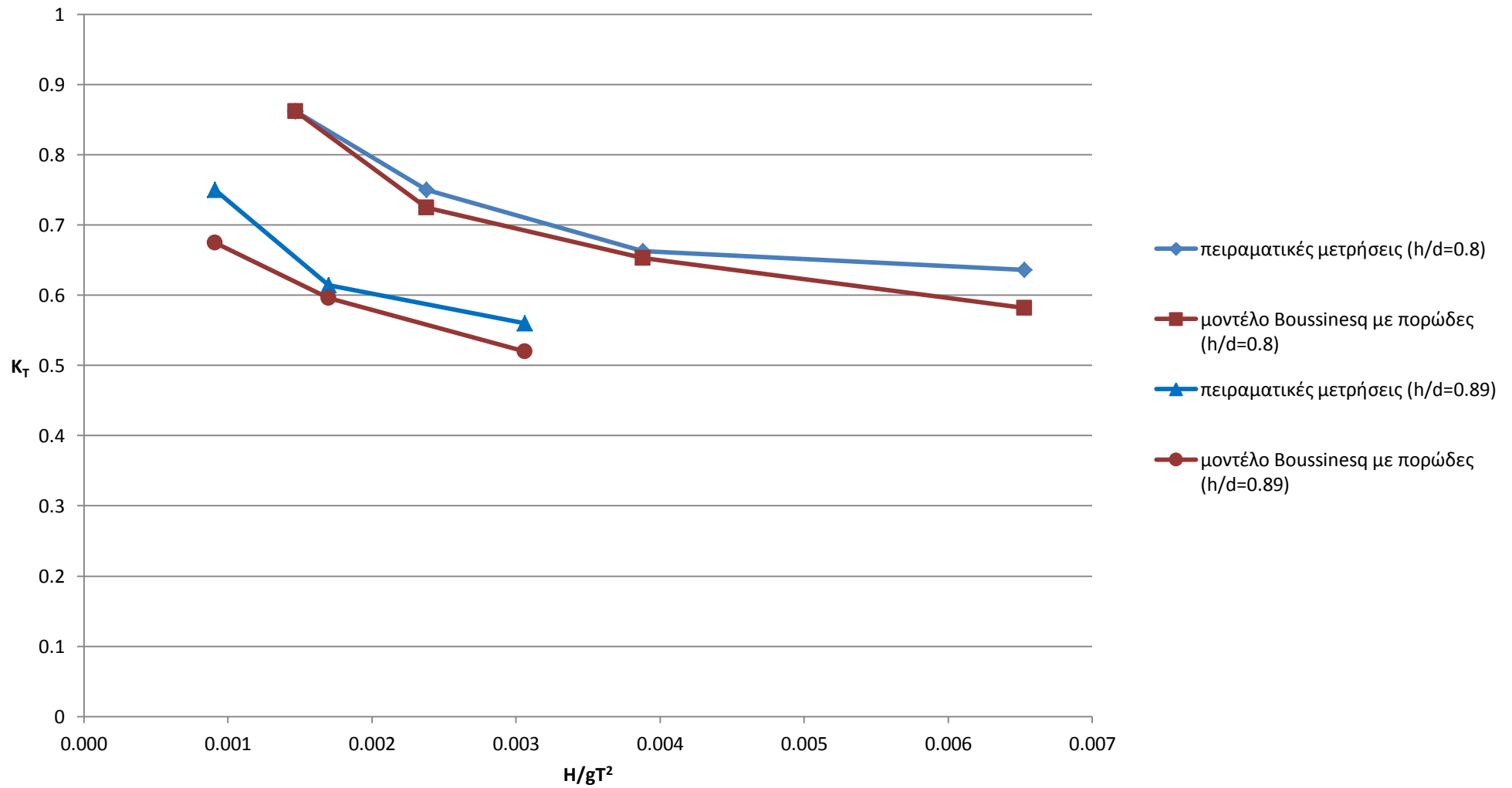
Πίνακας 4.3.2 – Σύγκριση συντελεστή μετάδοσης από πειραματικές μετρήσεις και μοντέλο Boussinesq χωρίς πορώδες.

Στον παραπάνω πίνακα φαίνεται καθαρά ότι για την περίπτωση αδιαπέρατου έργου ($n=0$) ο συντελεστής μετάδοσης αυξάνεται αισθητά. Χαρακτηριστικό είναι ότι η τιμή του στις 5 από τις 7 περιπτώσεις ξεπερνάει τη μονάδα, κάτι που σημαίνει ότι ο ύφαλος κυματοθραύστης όχι μόνο δεν αποσβένει το κύμα, αλλά επιφέρει την αύξησή του. Το μοντέλο Boussinesq βοήθησε στην εξαγωγή αυτού του συμπεράσματος, χωρίς τη διεξαγωγή περαιτέρω πειραμάτων.

Διάγραμμα 4.3.3

Στο διάγραμμα 4.3.3 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή μετάδοσης που προέκυψαν με βάση τις πειραματικές μετρήσεις και το υπολογιστικό μοντέλο Boussinesq με πορώδες συναρτήσει της αδιάστατης ποσότητας H/gT^2 . Το πορώδες είναι $n=0.52$ τόσο για τις πειραματικές μετρήσεις όσο και για το μοντέλο Boussinesq. Το σχετικό ύψος κυματοθραύστη είναι $h/d=0.8$ για τις 4 πρώτες πειραματικές μετρήσεις και $h/d=0.89$ για τις υπόλοιπες 3.

Επίσης στο διάγραμμα 4.3.3 υπάρχουν δύο ξεχωριστοί κλάδοι τόσο για την καμπύλη των πειραματικών μετρήσεων όσο και για την καμπύλη του μοντέλου Boussinesq. Ο ένας κλάδος αντιστοιχεί στις 4 πρώτες πειραματικές μετρήσεις με $h/d=0.8$ και ο άλλος κλάδος αντιστοιχεί στις 3 επόμενες πειραματικές μετρήσεις με $h/d=0.89$, κάτι που σημαίνει ότι η παράμετρος του σχετικού ύψους κυματοθραύστη h/d ασκεί τη δική της επιρροή στον συντελεστή μετάδοσης K_T .

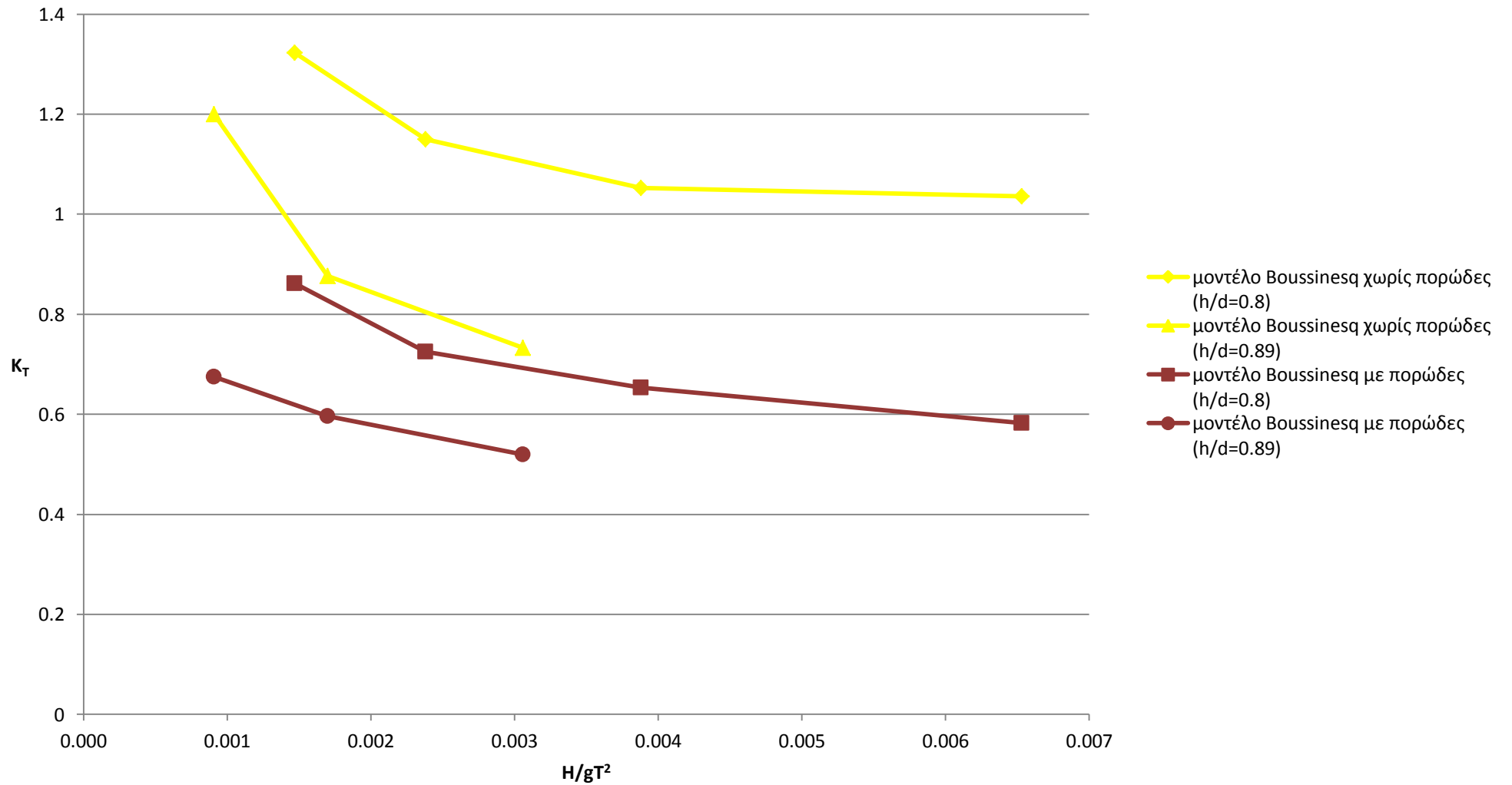


Διάγραμμα 4.3.3 – Σύγκριση συντελεστή μετάδοσης από πειραματικές μετρήσεις και μοντέλο Boussinesq με πορώδες.

Όπως φαίνεται από το παραπάνω διάγραμμα, οι τιμές του συντελεστή μετάδοσης που προήλθαν από τις πειραματικές μετρήσεις προσεγγίζουν σε μεγάλο βαθμό τις τιμές που υπολογίστηκαν από το μοντέλο Boussinesq με πορώδες. Μάλιστα ορισμένες τιμές είναι τόσο κοντά η μια στην άλλη που σχεδόν ταυτίζονται μεταξύ τους.

Διάγραμμα 4.3.4

Στο διάγραμμα 4.3.4 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή μετάδοσης που προέκυψαν με βάση το υπολογιστικό μοντέλο Boussinesq με πορώδες και χωρίς πορώδες συναρτήσει της αδιάστατης ποσότητας H/gT^2 . Στο μοντέλο Boussinesq χωρίς πορώδες τέθηκε $n=0$, σε αντίθεση με το μοντέλο Boussinesq με πορώδες όπου τέθηκε $n=0.52$, δηλαδή όσο είναι το πορώδες και στις πειραματικές μετρήσεις. Το σχετικό ύψος κυματοθραύστη είναι $h/d=0.8$ για τους 4 πρώτους υπολογισμούς και $h/d=0.89$ για τους υπόλοιπους 3.



Διάγραμμα 4.3.4 – Σύγκριση συντελεστή μετάδοσης από μοντέλο Boussinesq με πορώδες και χωρίς πορώδες.

Όπως φαίνεται, οι τιμές του συντελεστή μετάδοσης που προέκυψαν με βάση το μοντέλο Boussinesq με πορώδες είναι σημαντικά μικρότερες από τις αντίστοιχες τιμές που προήλθαν από το μοντέλο Boussinesq χωρίς πορώδες. Από αυτό το γεγονός φαίνεται πόσο μεγάλη σημασία έχει η ύπαρξη του πορώδους σε έναν ύφαλο κυματοθραύστη σχετικά με τη μετάδοση κυματισμών πάνω από αυτόν.

Επιπλέον παρατηρείται η ύπαρξη δύο ξεχωριστών κλάδων στις καμπύλες των δύο συγκρινόμενων μοντέλων Boussinesq. Όπως και στο προηγούμενο διάγραμμα, ο ένας κλάδος αντιστοιχεί στις 4 πρώτες πειραματικές μετρήσεις με $h/d=0.8$ και ο άλλος κλάδος αντιστοιχεί στις 3 υπόλοιπες πειραματικές μετρήσεις με $h/d=0.89$. Αυτό δείχνει και πάλι ότι η παράμετρος του σχετικού ύψους κυματοθραύστη h/d έχει επίδραση στον συντελεστή μετάδοσης K_T .

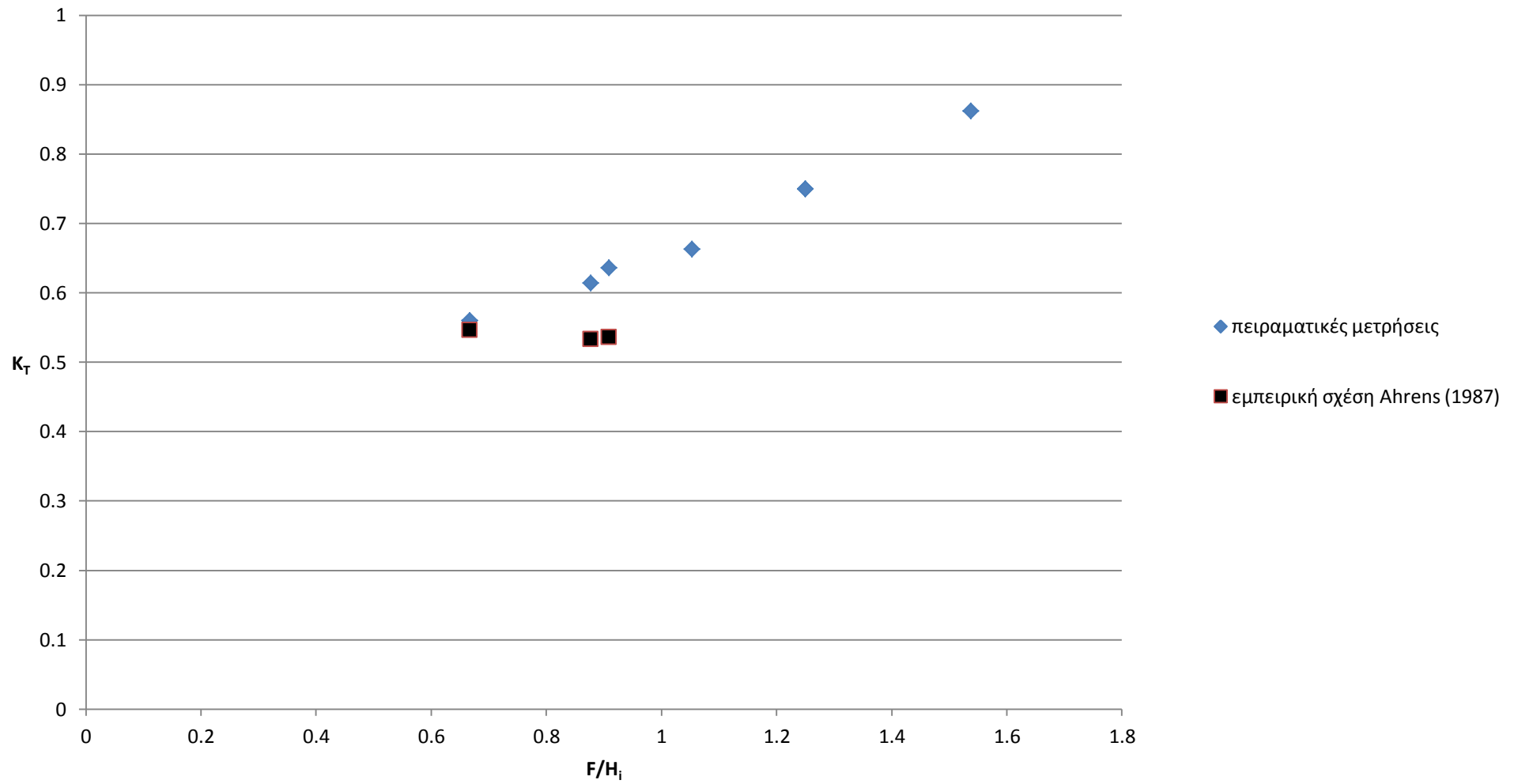
Όμως, στο συγκεκριμένο διάγραμμα πρέπει να επισημάνω ακόμα ένα στοιχείο. Η διαφορά ανάμεσα στους δύο κλάδους της καμπύλης για το μοντέλο Boussinesq χωρίς πορώδες, είναι περίπου διπλάσια σε σχέση με την αντίστοιχη διαφορά για το μοντέλο Boussinesq με πορώδες. Αυτό σημαίνει ότι το σχετικό ύψος κυματοθραύστη ασκεί μεγαλύτερη επιρροή στο συντελεστή μετάδοσης για ένα αδιαπέρατο έργο απ' ό,τι για ένα έργο με πορώδες.

4.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΑΠΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ

Διάγραμμα 4.4.1

Στο διάγραμμα 4.4.1 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή μετάδοσης που προέκυψαν με βάση τις πειραματικές μετρήσεις και την εμπειρική σχέση Ahrens (1987) συναρτήσεως του σχετικού ελεύθερου ύψους. Στο διάγραμμα αυτό παρουσιάζονται μόνο τρεις (3) τιμές της εμπειρικής σχέσης Ahrens, καθώς αυτή ισχύει για τιμές του $F/H < 1$. Το σχετικό ύψος κυματοθραύστη είναι $h/d=0.8$ ή 0.89

(ανάλογα με την πειραματική μέτρηση) και το πορώδες του ύφालου κυματοθραύστη είναι $n=0.52$.

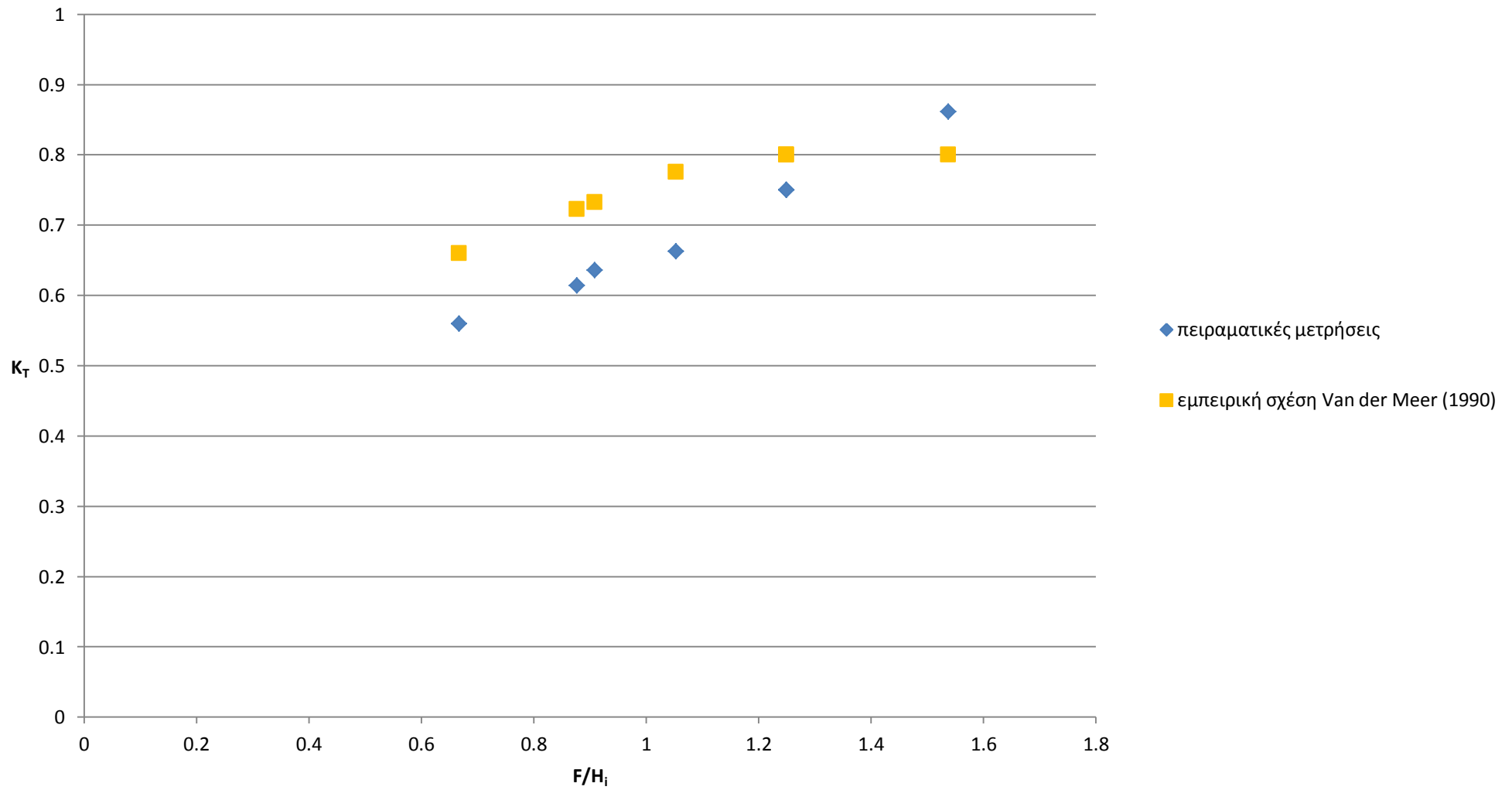


Διάγραμμα 4.4.1 – Σύγκριση συντελεστή μετάδοσης από πειραματικές μετρήσεις και εμπειρική σχέση Ahrens (1987).

Όπως φαίνεται, οι τιμές του συντελεστή μετάδοσης που προήλθαν από τις πειραματικές μετρήσεις βρίσκονται αρκετά κοντά στις αντίστοιχες τιμές που προέκυψαν από την εμπειρική σχέση Ahrens (1987). Είναι χαρακτηριστικό το γεγονός ότι στο ένα από τα τρία ζεύγη τιμών έχουμε σχεδόν ταύτιση.

Διάγραμμα 4.4.2

Στο διάγραμμα 4.4.2 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή μετάδοσης που προέκυψαν με βάση τις πειραματικές μετρήσεις και την εμπειρική σχέση Van der Meer (1990) συναρτήσεως του σχετικού ελεύθερου ύψους. Το σχετικό ύψος κυματοθραύστη είναι $h/d=0.8$ ή 0.89 (ανάλογα με την πειραματική μέτρηση) και το πορώδες του ύφαλου κυματοθραύστη είναι $n=0.52$.

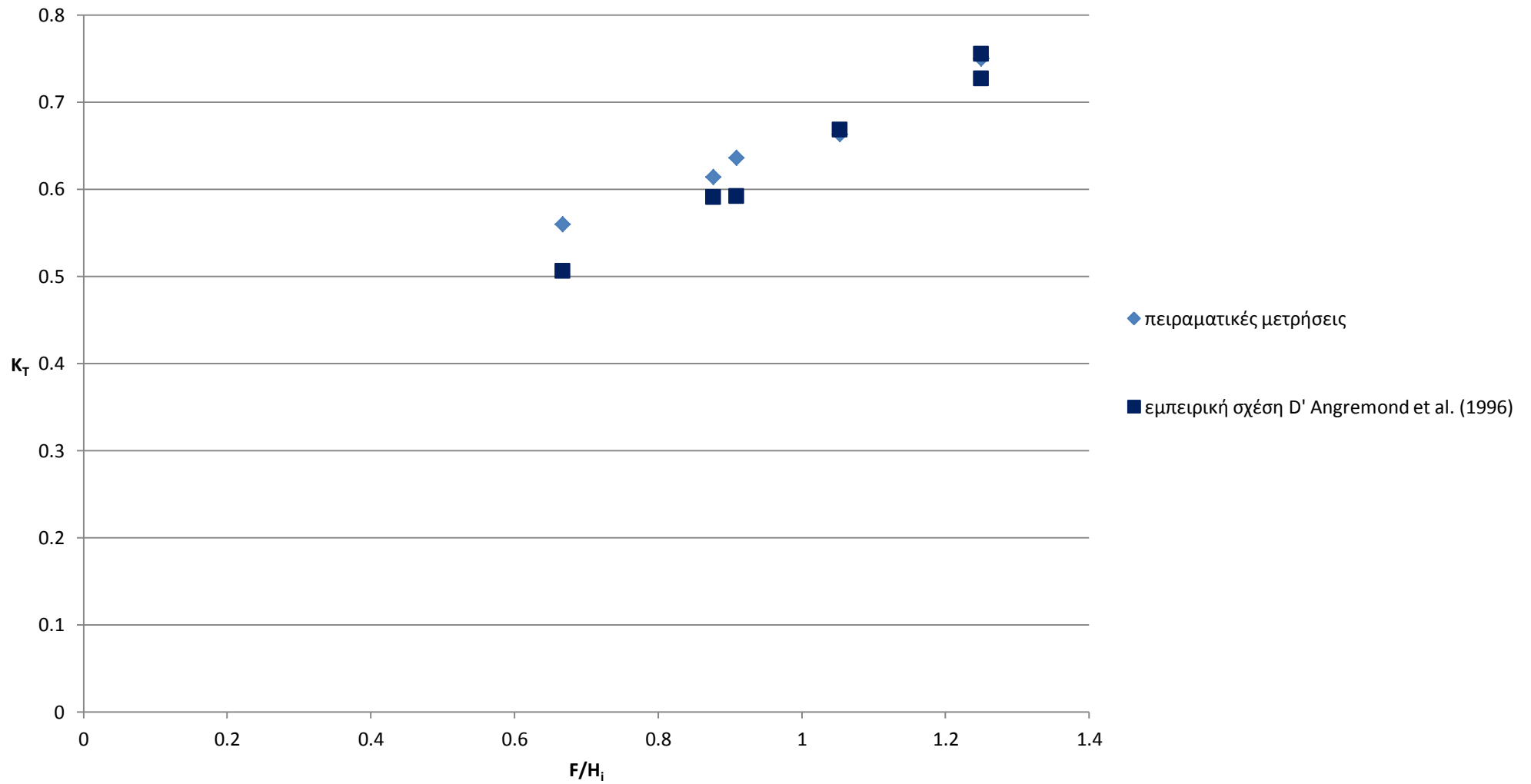


Διάγραμμα 4.4.2 – Σύγκριση συντελεστή μετάδοσης από πειραματικές μετρήσεις και εμπειρική σχέση Van der Meer (1990).

Όπως φαίνεται, οι τιμές του συντελεστή μετάδοσης που προήλθαν από τις πειραματικές μετρήσεις είναι γενικά μικρότερες από τις τιμές που υπολογίστηκαν με βάση την εμπειρική σχέση Van der Meer (1990). Ωστόσο η απόκλιση της μιας τιμής από την άλλη δεν είναι σημαντική και παρατηρείται επίσης ότι αυτή η απόκλιση παραμένει σχεδόν σταθερή για το διάστημα $F/H_i=0.6\sim 1.1$.

Διάγραμμα 4.4.3

Στο διάγραμμα 4.4.3 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή μετάδοσης που προέκυψαν με βάση τις πειραματικές μετρήσεις και την εμπειρική σχέση D' Angremond et al. (1996) συναρτήσεως του σχετικού ελεύθερου ύψους. Το σχετικό ύψος κυματοθραύστη είναι $h/d=0.8$ ή 0.89 (ανάλογα με την πειραματική μέτρηση) και το πορώδες του ύφαλου κυματοθραύστη είναι $n=0.52$.

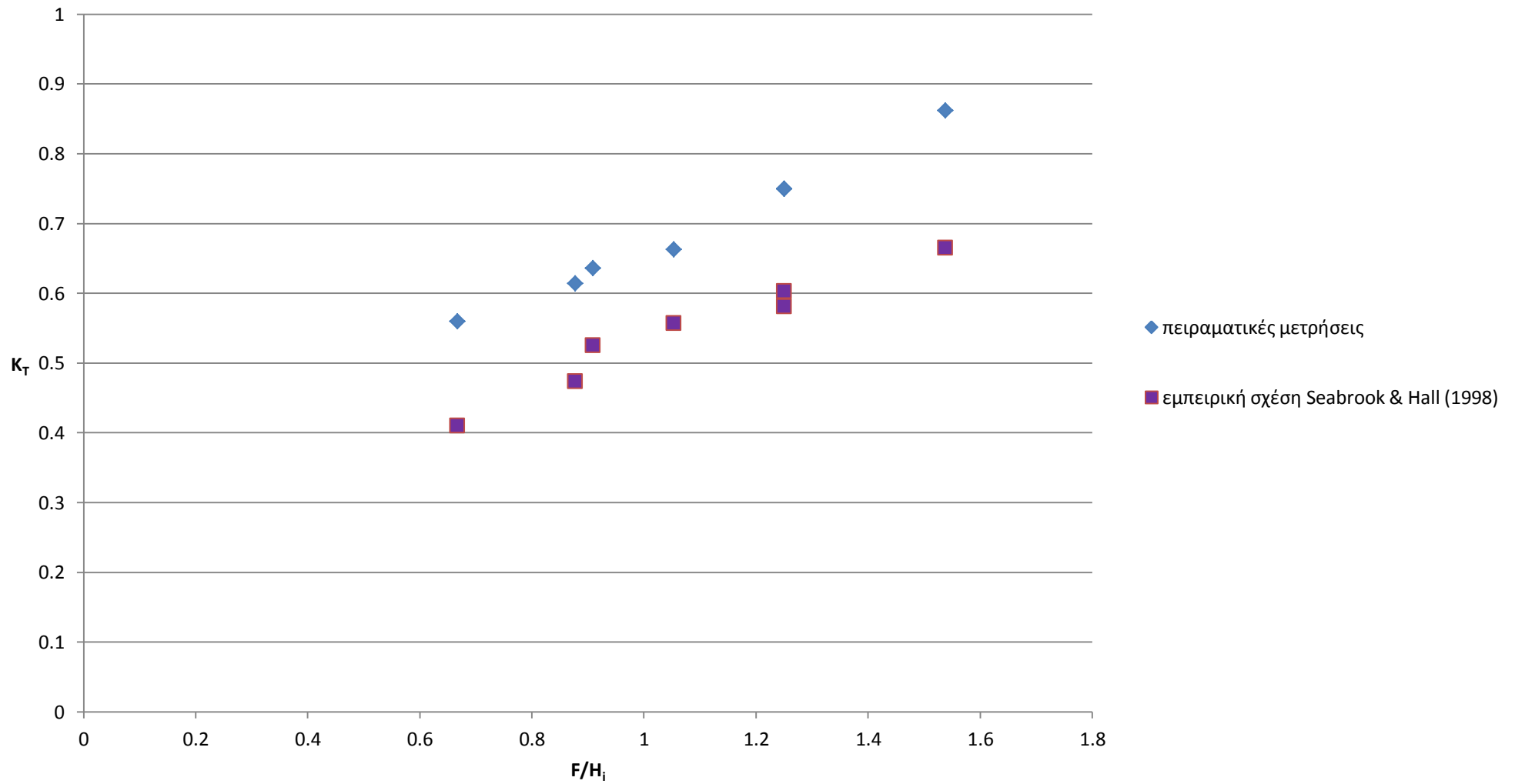


Διάγραμμα 4.4.3 – Σύγκριση συντελεστή μετάδοσης από πειραματικές μετρήσεις και εμπειρική σχέση D' Angremond et al. (1996).

Οι τιμές του συντελεστή μετάδοσης που προήλθαν από τις πειραματικές μετρήσεις προσεγγίζουν σε μεγάλο βαθμό αυτές που υπολογίστηκαν με την εμπειρική σχέση D' Angremond et al. (1996). Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι ορισμένες τιμές βρίσκονται τόσο κοντά που σχεδόν ταυτίζονται μεταξύ τους.

Διάγραμμα 4.4.4

Στο διάγραμμα 4.4.4 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή μετάδοσης που προέκυψαν με βάση τις πειραματικές μετρήσεις και την εμπειρική σχέση Seabrook & Hall (1998) συναρτήσει του σχετικού ελεύθερου ύψους. Το σχετικό ύψος κυματοθραύστη είναι $h/d=0.89$ ή 0.8 (ανάλογα με την πειραματική μέτρηση) και το πορώδες του ύφαλου κυματοθραύστη είναι $n=0.52$.

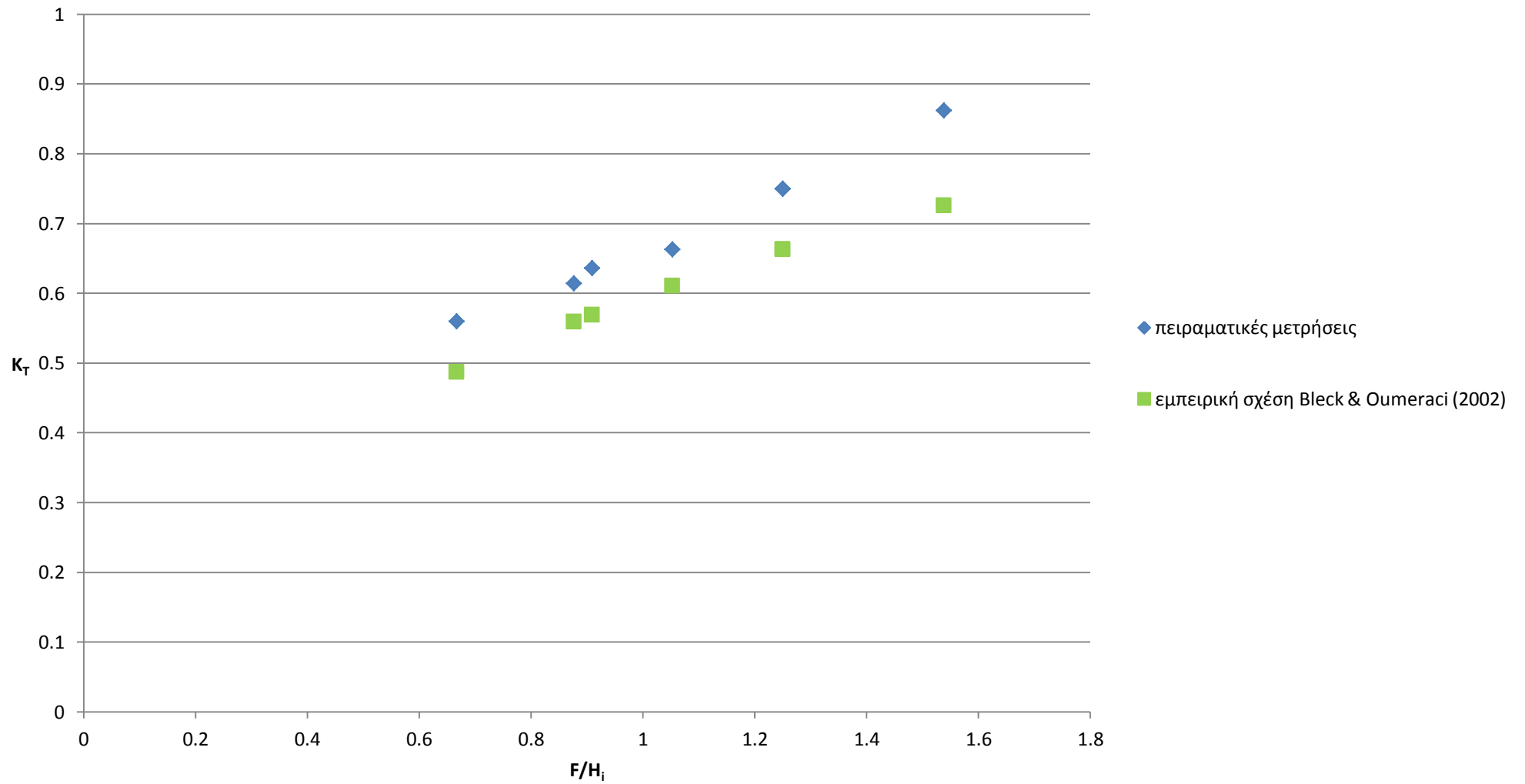


Διάγραμμα 4.4.4 – Σύγκριση συντελεστή μετάδοσης από πειραματικές μετρήσεις και εμπειρική σχέση Seabrook & Hall (1998).

Οι τιμές του συντελεστή μετάδοσης που προέκυψαν με βάση τις πειραματικές μετρήσεις είναι γενικά μεγαλύτερες από τις τιμές που υπολογίστηκαν από την εμπειρική σχέση Seabrook & Hall (1998). Οι αποκλίσεις μεταξύ των τιμών δεν είναι πολύ μικρές, αλλά ούτε και ιδιαίτερα μεγάλες.

Διάγραμμα 4.4.5

Στο διάγραμμα 4.4.5 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή μετάδοσης που προέκυψαν με βάση τις πειραματικές μετρήσεις και την εμπειρική σχέση Bleck & Oumeraci (2002) συναρτήσει του σχετικού ελεύθερου ύψους. Το σχετικό ύψος κυματοθραύστη είναι $h/d=0.89$ ή 0.8 (ανάλογα με την πειραματική μέτρηση) και το πορώδες του ύφαλου κυματοθραύστη είναι $n=0.52$.



Διάγραμμα 4.4.5 – Σύγκριση συντελεστή μετάδοσης από πειραματικές μετρήσεις και εμπειρική σχέση Bleck & Oumeraci (2002).

Οι τιμές του συντελεστή μετάδοσης που προέκυψαν με βάση τις πειραματικές μετρήσεις είναι γενικά μεγαλύτερες από τις τιμές που υπολογίστηκαν από την εμπειρική σχέση Bleck & Oumeraci. Βέβαια οι αποκλίσεις μεταξύ των τιμών είναι αρκετά μικρές, ιδιαίτερα για το διάστημα $F/H_i=0.6\sim 1.3$.

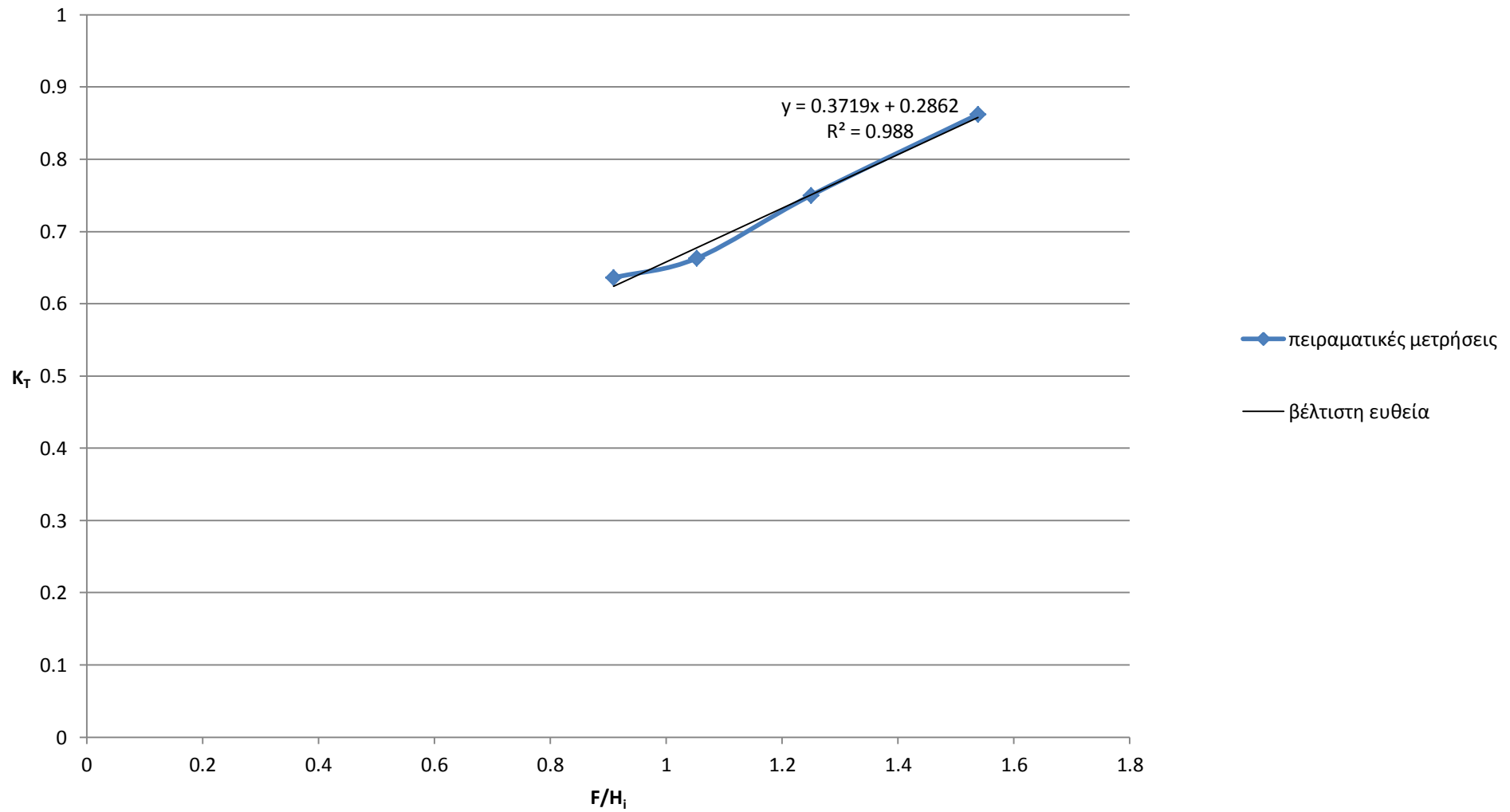
Από τα παραπάνω διαγράμματα, είναι ξεκάθαρο ότι η εμπειρική σχέση των D' Angremond et al πλησιάζει σε πολύ μεγάλο βαθμό τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας. Αυτή η σχέση είναι μία από τις τρεις που λαμβάνουν υπόψη το πορώδες. Οι άλλες δύο παρόλα αυτά (Ahrens και Seabrook et al) απέχουν απ' τα πειραματικά δεδομένα. Η επόμενη εμπειρική σχέση κατά σειρά προσέγγισης των αποτελεσμάτων είναι αυτή των Bleck και Oumeraci. Αυτό που πρέπει να τονιστεί είναι ότι όλες οι εμπειρικές σχέσεις υποεκτιμούν το συντελεστή μετάδοσης που προέκυψε από τα πειράματα, εκτός από τη σχέση του Van der Meer η οποία υπερεκτιμά το συντελεστή μετάδοσης, κυρίως για την περιοχή F/H_i από 0.6 έως 1.2.

4.5 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΕΜΠΕΙΡΙΚΗ ΣΧΕΣΗ

4.5.1 Εύρεση εμπειρικής σχέσης

Διάγραμμα 4.5.1.1

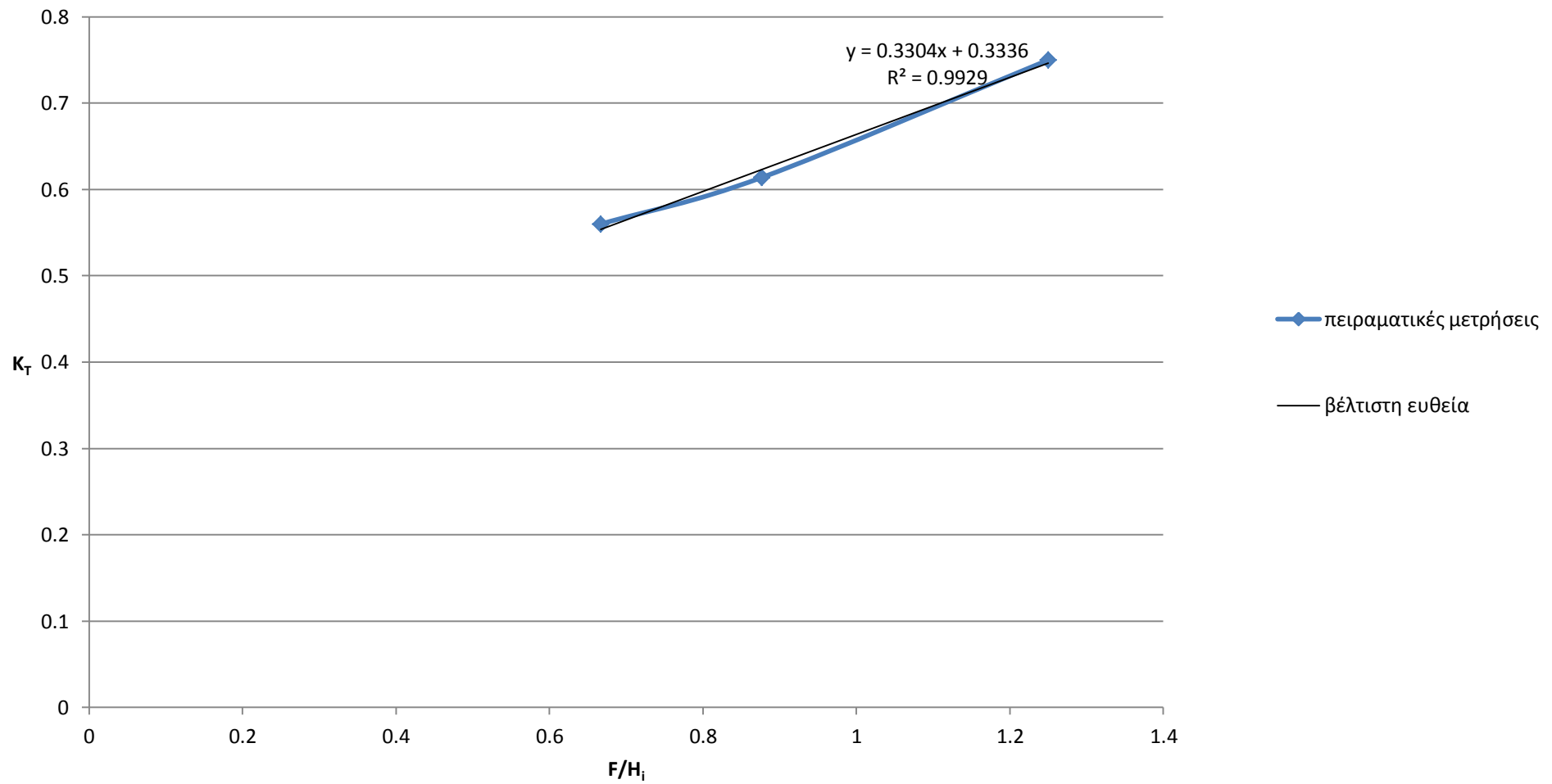
Στο διάγραμμα 4.5.1.1 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή μετάδοσης που προέκυψαν με βάση τις 4 πρώτες πειραματικές μετρήσεις και η βέλτιστη σε αυτές ευθεία ($1^{η}$ τάξεως) όπως προέκυψε από γραμμική παρεμβολή συναρτήσεων του σχετικού ελεύθερου ύψους. Το σχετικό ύψος κυματοθραύστη είναι $h/d=0.8$ και το πορώδες του ύφαλου κυματοθραύστη είναι $n=0.52$.



Διάγραμμα 4.5.1.1 – Συντελεστής μετάδοσης από πειραματικές μετρήσεις και η βέλτιστη ευθεία για $h/d=0.8$.

Διάγραμμα 4.5.1.2

Στο διάγραμμα 4.5.1.2 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή μετάδοσης που προέκυψαν με βάση τις υπόλοιπες 3 πειραματικές μετρήσεις και η βέλτιστη σε αυτές ευθεία (1^{ης} τάξεως) όπως προέκυψε από γραμμική παρεμβολή συναρτήσεων του σχετικού ελεύθερου ύψους. Το σχετικό ύψος κυματοθραύστη είναι $h/d=0.89$ και το πορώδες του ύφαλου κυματοθραύστη είναι $n=0.52$.



Διάγραμμα 4.5.1.2 – Συντελεστής μετάδοσης από πειραματικές μετρήσεις και η βέλτιστη ευθεία για $h/d=0.89$.

Σύμφωνα με τα δύο τελευταία διαγράμματα και παρατηρώντας ότι ο συντελεστής μετάδοσης επηρεάζεται αρκετά από το πορώδες n και από το σχετικό ύψος h/d της κατασκευής, μπορεί να προταθεί μια νέα εμπειρική σχέση για τον συντελεστή μετάδοσης K_T . Αυτή η σχέση θα είναι συνάρτηση των n και h/d , αλλά και της κρισιμότερης παραμέτρου που είναι το σχετικό ελεύθερο ύψος F/H_i . Επιλέγω να είναι γραμμικής μορφής η εμπειρική σχέση έτσι ώστε να ταιριάζει με τις βέλτιστες ευθείες των δύο παραπάνω διαγραμμάτων. Έστω ότι έχει την εξής μορφή:

$$K_T = \left(\alpha - \beta \cdot \frac{h}{d} \right) \cdot \frac{F}{H_i} + \left(\gamma + \delta \cdot \frac{h}{d} \right) \cdot (1 - n)$$

όπου α, β, γ και δ σταθερές

Λαμβάνοντας υπόψη αυτή τη σχέση και τις δυο παραπάνω βέλτιστες ευθείες, λύνω το σύστημα 4 εξισώσεων με 4 αγνώστους που προκύπτει και καταλήγω στην εξής εμπειρική σχέση:

$$K_T = \left(0.72 - 0.44 \cdot \frac{h}{d} \right) \cdot \frac{F}{H_i} + \left(\frac{h}{d} - 0.2 \right) \cdot (1 - n)$$

όπου είναι:

- **h (m):** ύψος ύφαλου κυματοθραύστη
- **d (m):** βάθος νερού
- **F (m):** ελεύθερο ύψος κυματοθραύστη
- **H_i (m):** ύψος κύματος ανάντι του κυματοθραύστη
- **n:** πορώδες ύφαλου κυματοθραύστη

4.5.2 Σύγκριση προτεινόμενης σχέσης με μοντέλο Boussinesq

Για τη διαπίστωση της ακρίβειας της σχέσης που προέκυψε, καθώς και πώς αυτή επηρεάζεται από την αλλαγή του πορώδους σε έναν ύφαλο κυματοθραύστη, θεωρήθηκε σωστό να συγκριθεί με αποτελέσματα που προέκυψαν από την επίλυση του μοντέλου Boussinesq για διάφορες τιμές του πορώδους n , του σχετικού ύψους h/d , καθώς και του σχετικού ελεύθερου ύψους F/H_i κυματοθραύστη. Πιο συγκεκριμένα, επιλύθηκαν 36 διαφορετικές περιπτώσεις στο μοντέλο Boussinesq, με τιμές $h/d = 0.8, 0.9$, $F/H_i = 0.7, 1, 1.2$ και $n = 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$ (επιπλέον και $n=0.1, 0.7$ για $h/d=0.9$). Επιπλέον επιχειρήθηκε η επίλυση του μοντέλου και με ακραίες τιμές του πορώδους, $n=0.8, 0.9, 1$, οι οποίες δεν έχουν φυσική σημασία αλλά απλά χρησιμοποιήθηκαν για λόγους σύγκρισης. Με αυτές τις ακραίες τιμές προέκυψαν μη ικανοποιητικά αποτελέσματα (είτε το μοντέλο Boussinesq δεν έδινε λύση είτε έδινε πολύ μεγάλες τιμές) κι έτσι δεν συμπεριλαμβάνονται παρακάτω τα αντίστοιχα διαγράμματα.

Πίνακες 4.5.2.1 – 4.5.2.2

Στους πίνακες 4.5.2.1 – 4.5.2.2 απεικονίζονται οι τιμές των δεδομένων που εισήχθησαν στο μοντέλο Boussinesq για την επίλυση της κυματικής μετάδοσης πάνω από ύφαλο κυματοθραύστη με ύψος ίδιο με αυτό των πειραμάτων, $h=40\text{cm}$. Ο πρώτος πίνακας περιέχει τα δεδομένα για σχετικό ύψος κυματοθραύστη $h/d=0.8$, ενώ ο δεύτερος για $h/d=0.9$. Στην τελευταία στήλη παρουσιάζεται ο λόγος F/d ο οποίος δεν πρέπει να υπερβαίνει την τιμή 0.25 προκειμένου ο ύφαλος κυματοθραύστης να λειτουργεί κανονικά και να μειώνει την κυματική ενέργεια στα κατάντι του.

Πίνακας 4.5.2.1 – Δεδομένα μοντέλου Boussinesq για $h/d=0.8$.

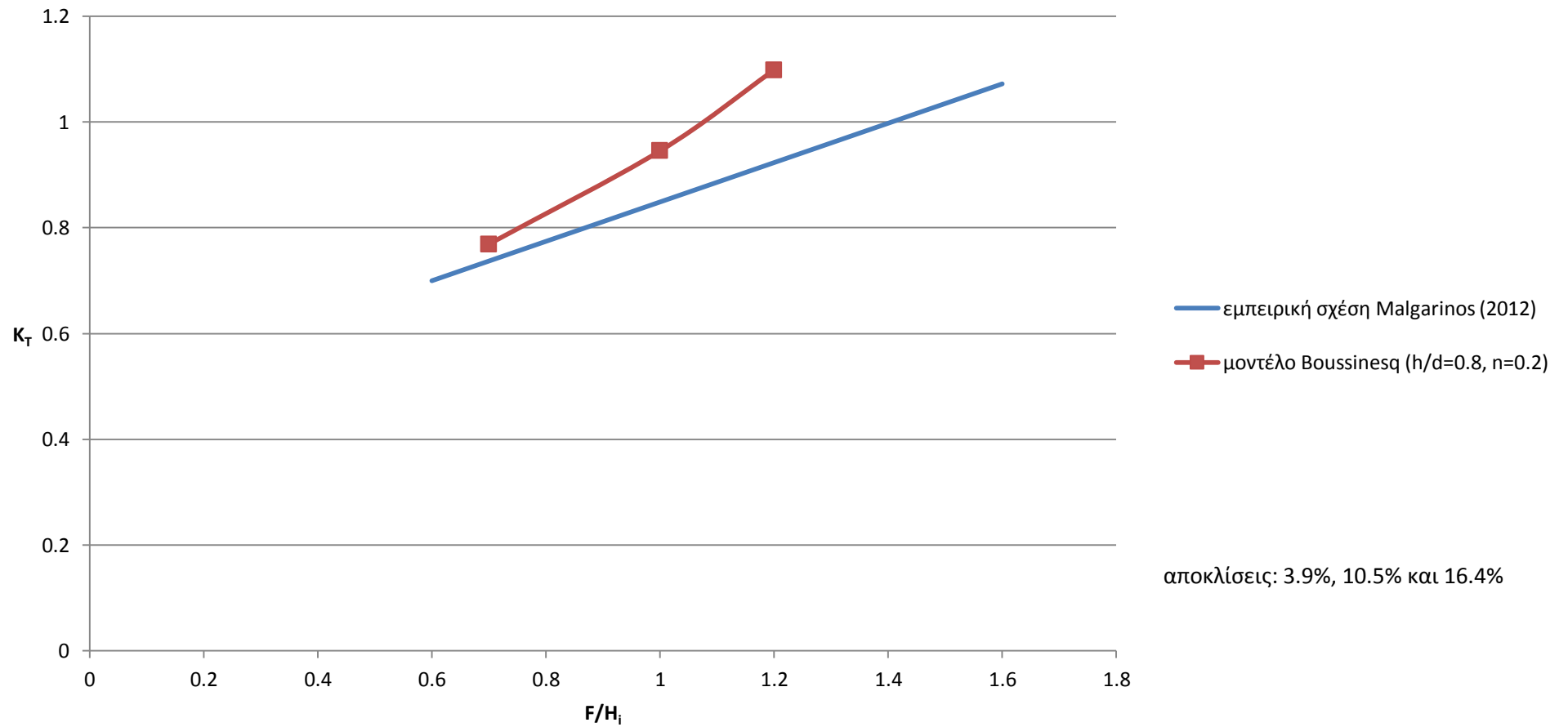
h/d	F/H_i	n	d (cm)	F (cm)	H_i (cm)	F/d
0.8	0.7	0.2	50	10	14.3	0.2
0.8	0.7	0.3	50	10	14.3	0.2
0.8	0.7	0.4	50	10	14.3	0.2
0.8	0.7	0.5	50	10	14.3	0.2
0.8	0.7	0.6	50	10	14.3	0.2
0.8	1	0.2	50	10	10.0	0.2
0.8	1	0.3	50	10	10.0	0.2
0.8	1	0.4	50	10	10.0	0.2
0.8	1	0.5	50	10	10.0	0.2
0.8	1	0.6	50	10	10.0	0.2
0.8	1.2	0.2	50	10	8.3	0.2
0.8	1.2	0.3	50	10	8.3	0.2
0.8	1.2	0.4	50	10	8.3	0.2
0.8	1.2	0.5	50	10	8.3	0.2
0.8	1.2	0.6	50	10	8.3	0.2

Πίνακας 4.5.2.2 – Δεδομένα μοντέλου Boussinesq για $h/d=0.9$.

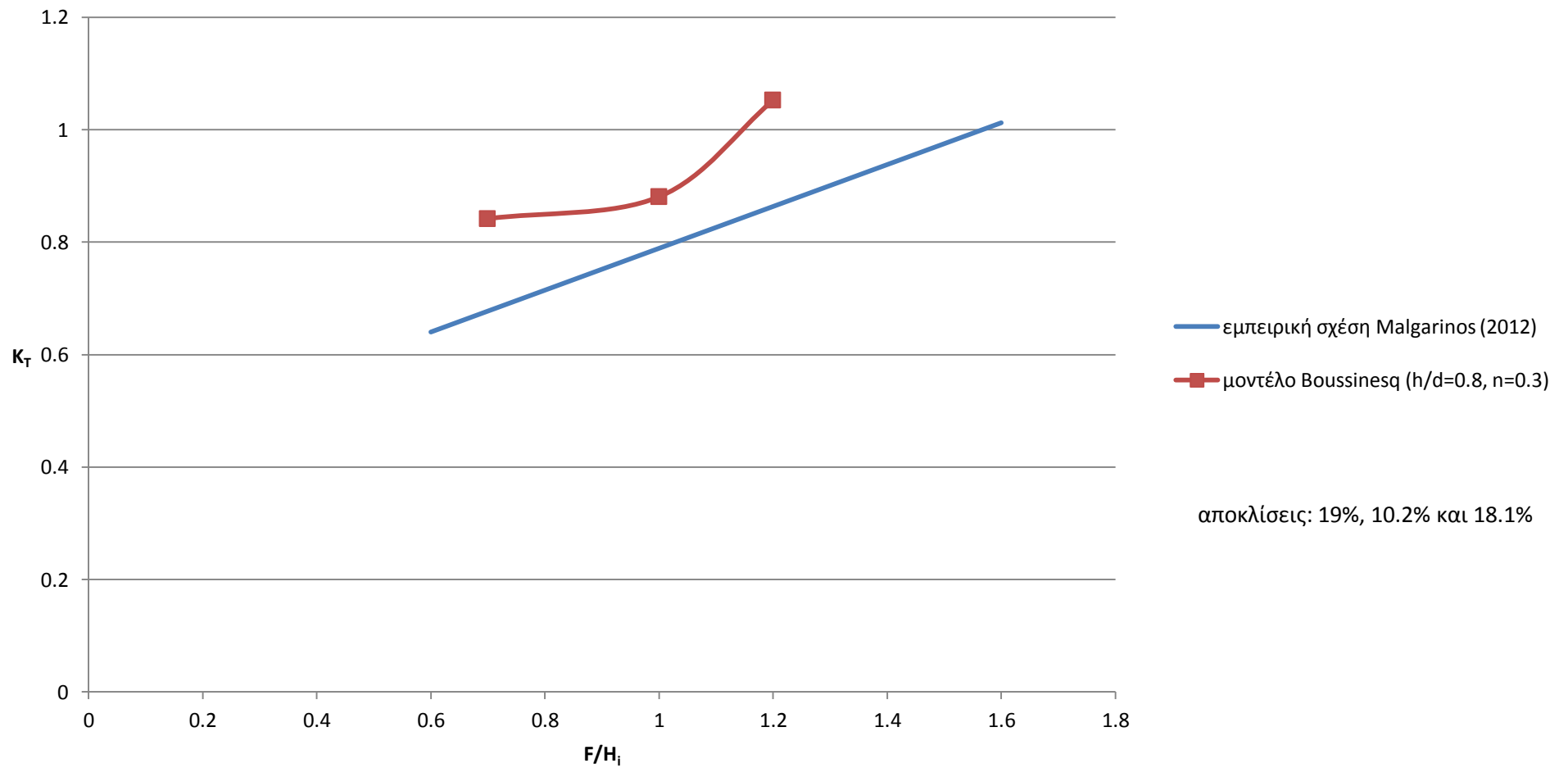
h/d	F/H_i	n	d (cm)	F (cm)	H_i (cm)	F/d
0.9	0.7	0.1	44.4	4.4	6.3	0.1
0.9	0.7	0.2	44.4	4.4	6.3	0.1
0.9	0.7	0.3	44.4	4.4	6.3	0.1
0.9	0.7	0.4	44.4	4.4	6.3	0.1
0.9	0.7	0.5	44.4	4.4	6.3	0.1
0.9	0.7	0.6	44.4	4.4	6.3	0.1
0.9	0.7	0.7	44.4	4.4	6.3	0.1
0.9	1	0.1	44.4	4.4	4.4	0.1
0.9	1	0.2	44.4	4.4	4.4	0.1
0.9	1	0.3	44.4	4.4	4.4	0.1
0.9	1	0.4	44.4	4.4	4.4	0.1
0.9	1	0.5	44.4	4.4	4.4	0.1
0.9	1	0.6	44.4	4.4	4.4	0.1
0.9	1	0.7	44.4	4.4	4.4	0.1
0.9	1.2	0.1	44.4	4.4	3.7	0.1
0.9	1.2	0.2	44.4	4.4	3.7	0.1
0.9	1.2	0.3	44.4	4.4	3.7	0.1
0.9	1.2	0.4	44.4	4.4	3.7	0.1
0.9	1.2	0.5	44.4	4.4	3.7	0.1
0.9	1.2	0.6	44.4	4.4	3.7	0.1
0.9	1.2	0.7	44.4	4.4	3.7	0.1

Διαγράμματα 4.5.2.3 – 4.5.2.18

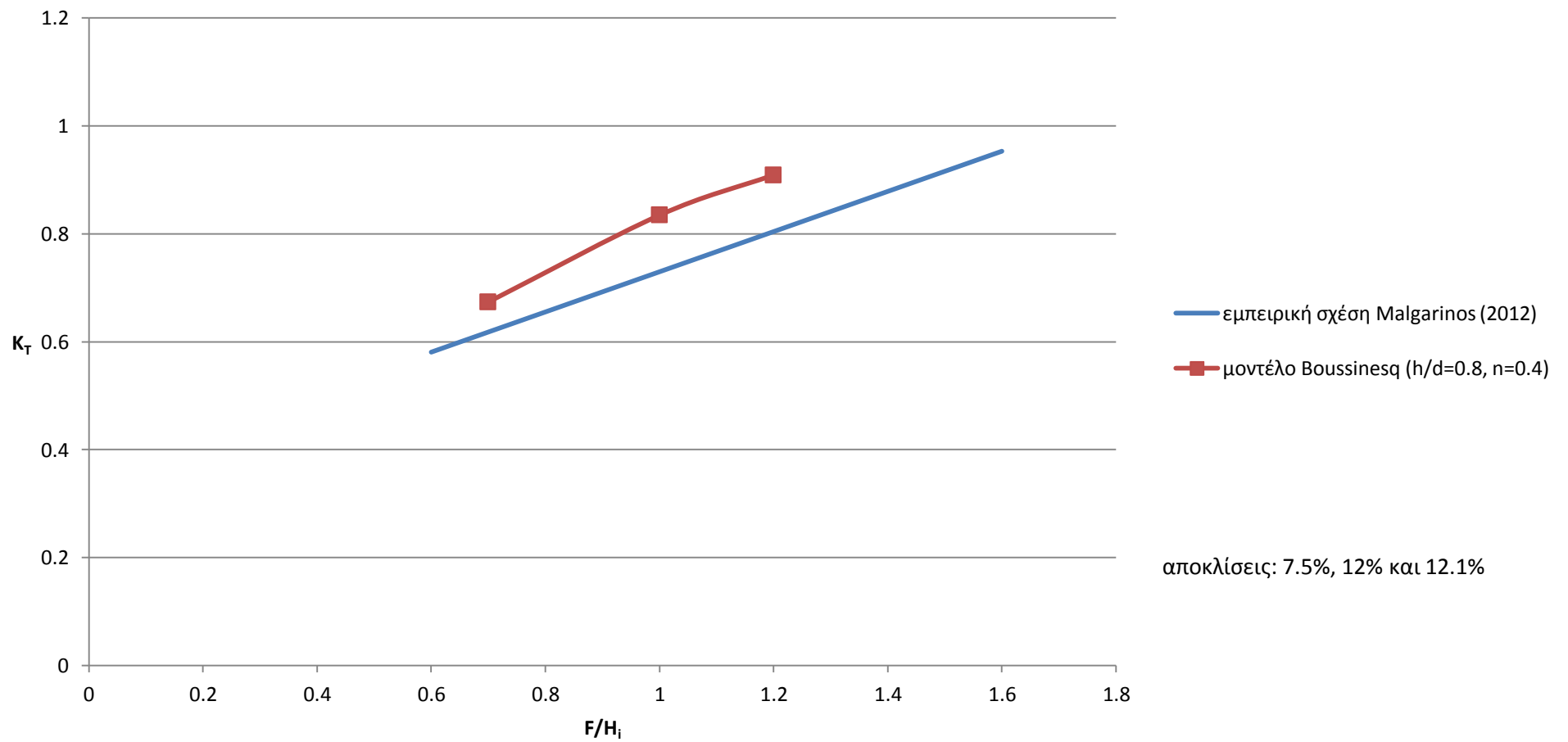
Στα διαγράμματα 4.5.2.3 – 4.5.2.18 φαίνονται οι τιμές του συντελεστή μετάδοσης που υπολογίστηκαν από το μοντέλο Boussinesq και την προτεινόμενη εμπειρική σχέση με βάση τα δεδομένα των δύο παραπάνω πινάκων 4.5.2.1 και 4.5.2.2. Ο συντελεστής μετάδοσης K_T απεικονίζεται ως συνάρτηση του σχετικού ελεύθερου ύψους F/H_i . Η προτεινόμενη σχέση αναπαριστάται στα διαγράμματα από μία ευθεία γραμμή διότι αυτή είναι η μορφή της, ενώ το μοντέλο Boussinesq από τα επιμέρους σημεία των υπολογισμών, ενωμένα με καμπύλες μεταξύ τους. Στο τέλος κάθε σειράς διαγραμμάτων, τόσο για $h/d=0.8$ όσο και για $h/d=0.9$, υπάρχουν δύο διαγράμματα που απεικονίζουν συγκεντρωτικά όλα τα αποτελέσματα του μοντέλου Boussinesq και της προτεινόμενης σχέσης, αντίστοιχα. Επίσης σε κάθε διάγραμμα έχουν σημειωθεί οι τιμές των αποκλίσεων (επί τοις εκατό) των αποτελεσμάτων της προτεινόμενης εμπειρικής σχέσης από τα αποτελέσματα του μοντέλου Boussinesq.



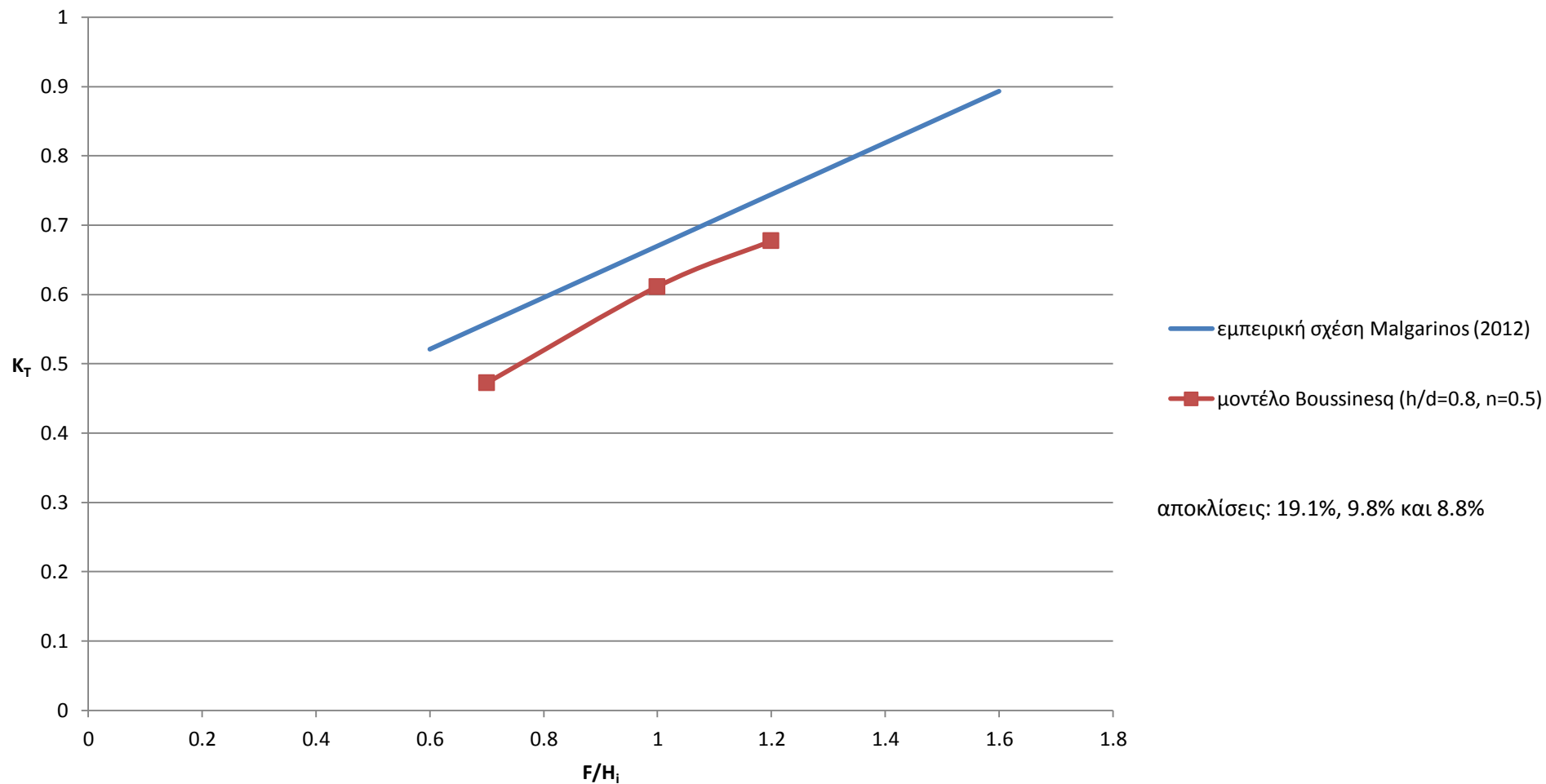
Διάγραμμα 4.5.2.3 – Σύγκριση συντελεστή μετάδοσης από την προτεινόμενη εμπειρική σχέση και το μοντέλο Boussinesq για $h/d=0.8$ και $n=0.2$.



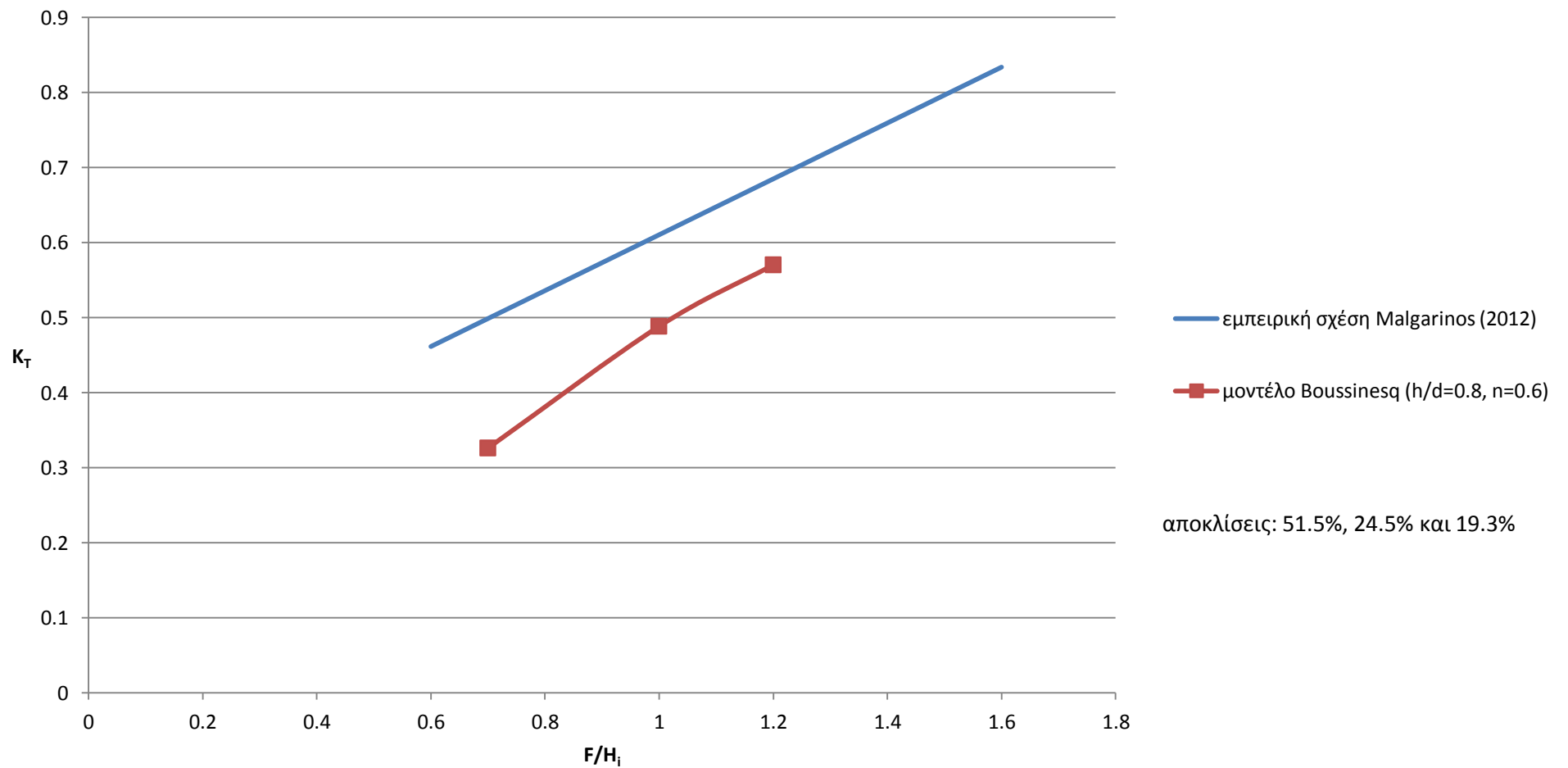
Διάγραμμα 4.5.2.4 – Σύγκριση συντελεστή μετάδοσης από την προτεινόμενη εμπειρική σχέση και το μοντέλο Boussinesq για $h/d=0.8$ και $n=0.3$.



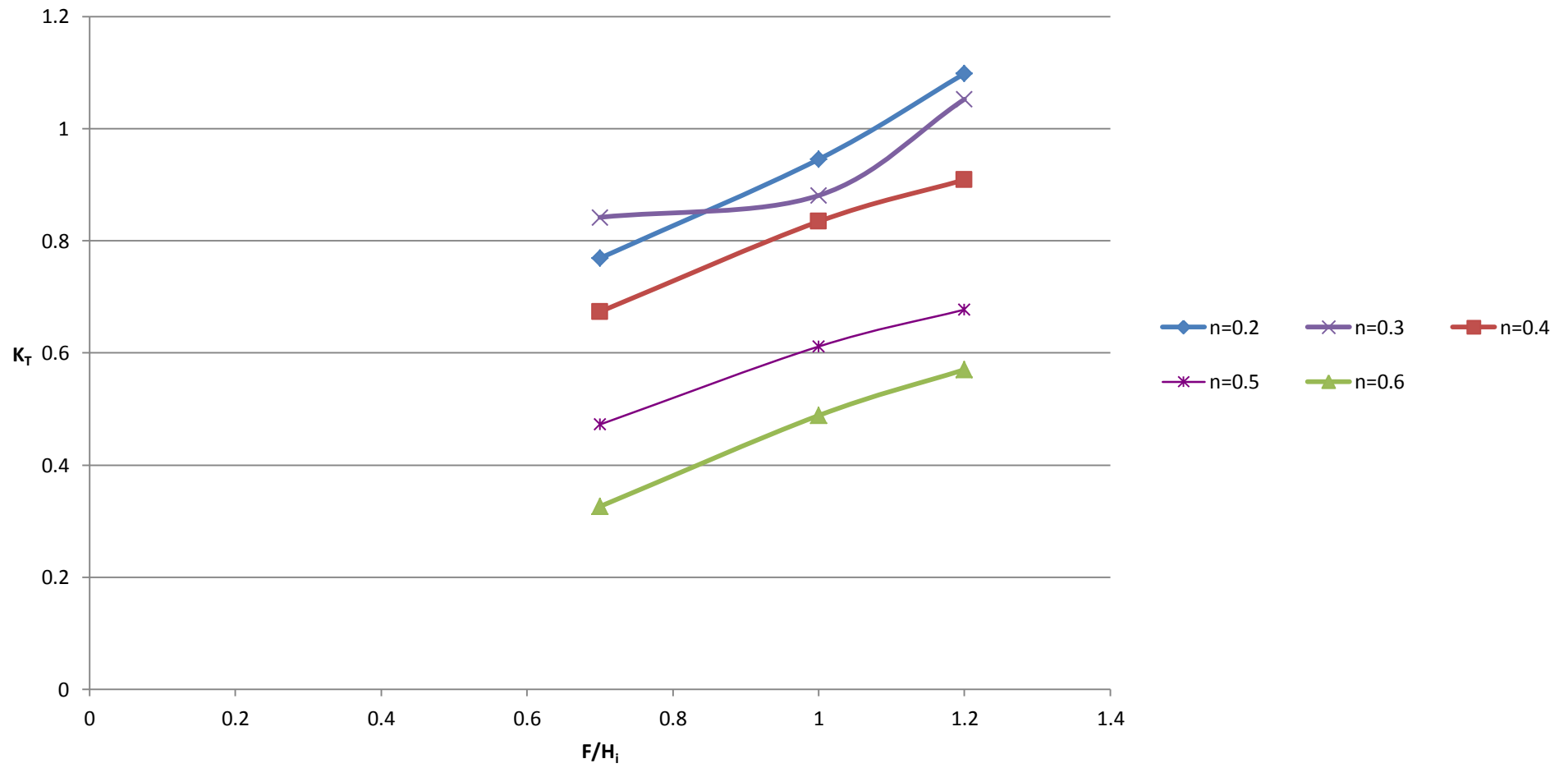
Διάγραμμα 4.5.2.5 – Σύγκριση συντελεστή μετάδοσης από την προτεινόμενη εμπειρική σχέση και το μοντέλο Boussinesq για $h/d=0.8$ και $n=0.4$.



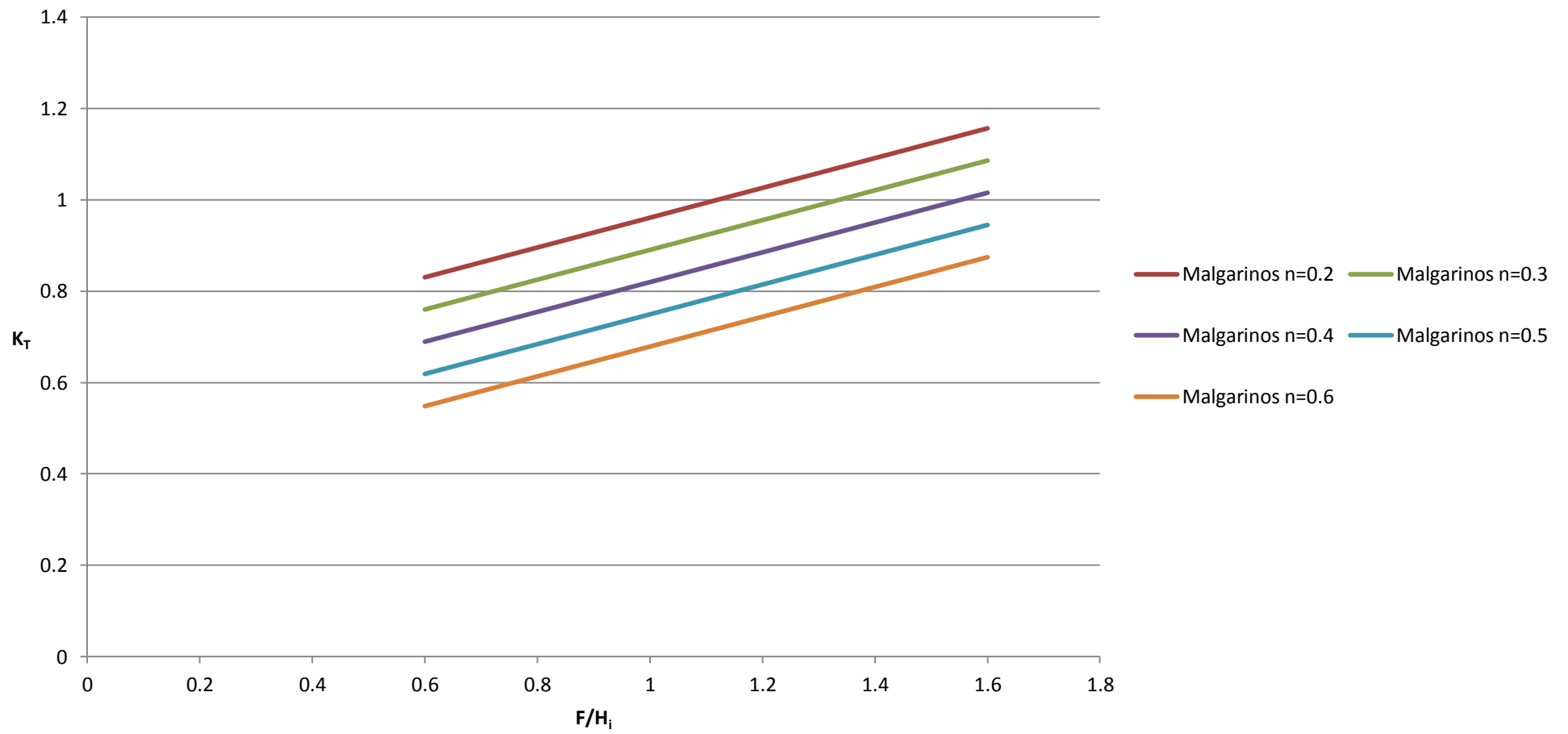
Διάγραμμα 4.5.2.6 – Σύγκριση συντελεστή μετάδοσης από την προτεινόμενη εμπειρική σχέση και το μοντέλο Boussinesq για h/d=0.8 και n=0.5.



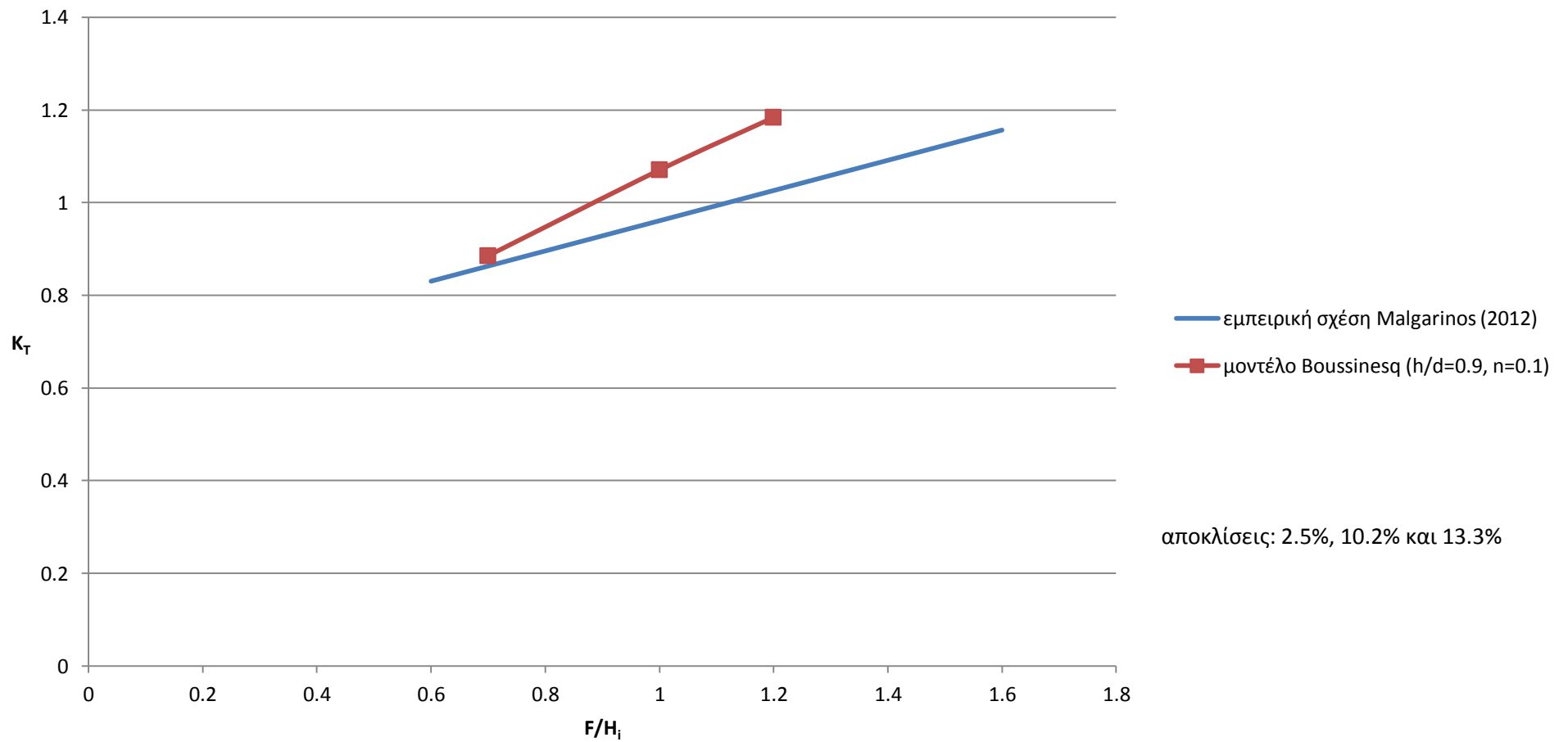
Διάγραμμα 4.5.2.7 – Σύγκριση συντελεστή μετάδοσης από την προτεινόμενη εμπειρική σχέση και το μοντέλο Boussinesq για $h/d=0.8$ και $n=0.6$.



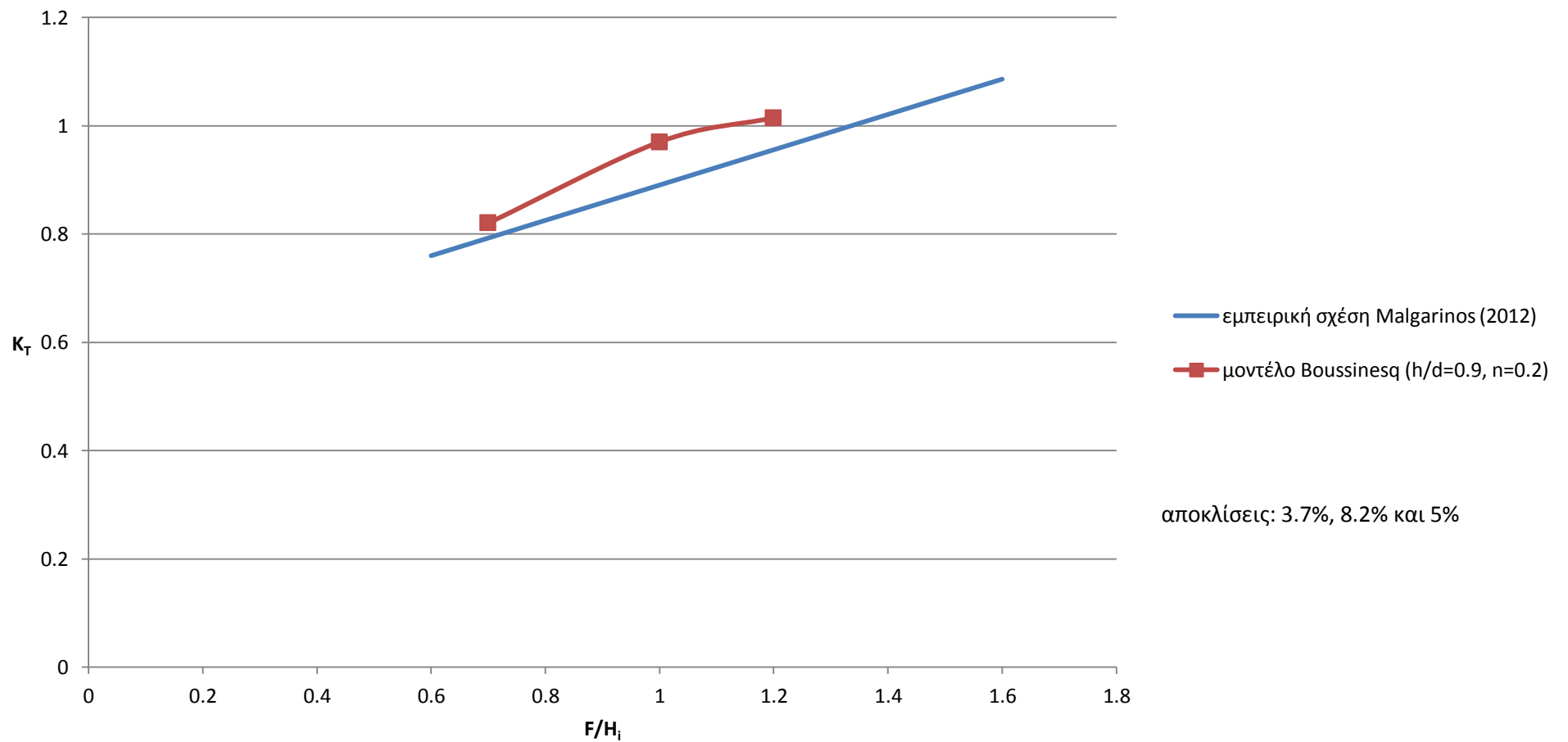
Διάγραμμα 4.5.2.8 – Σύγκριση συντελεστή μετάδοσης από το μοντέλο Boussinesq για $h/d=0.8$ και $n=0.2\sim 0.6$.



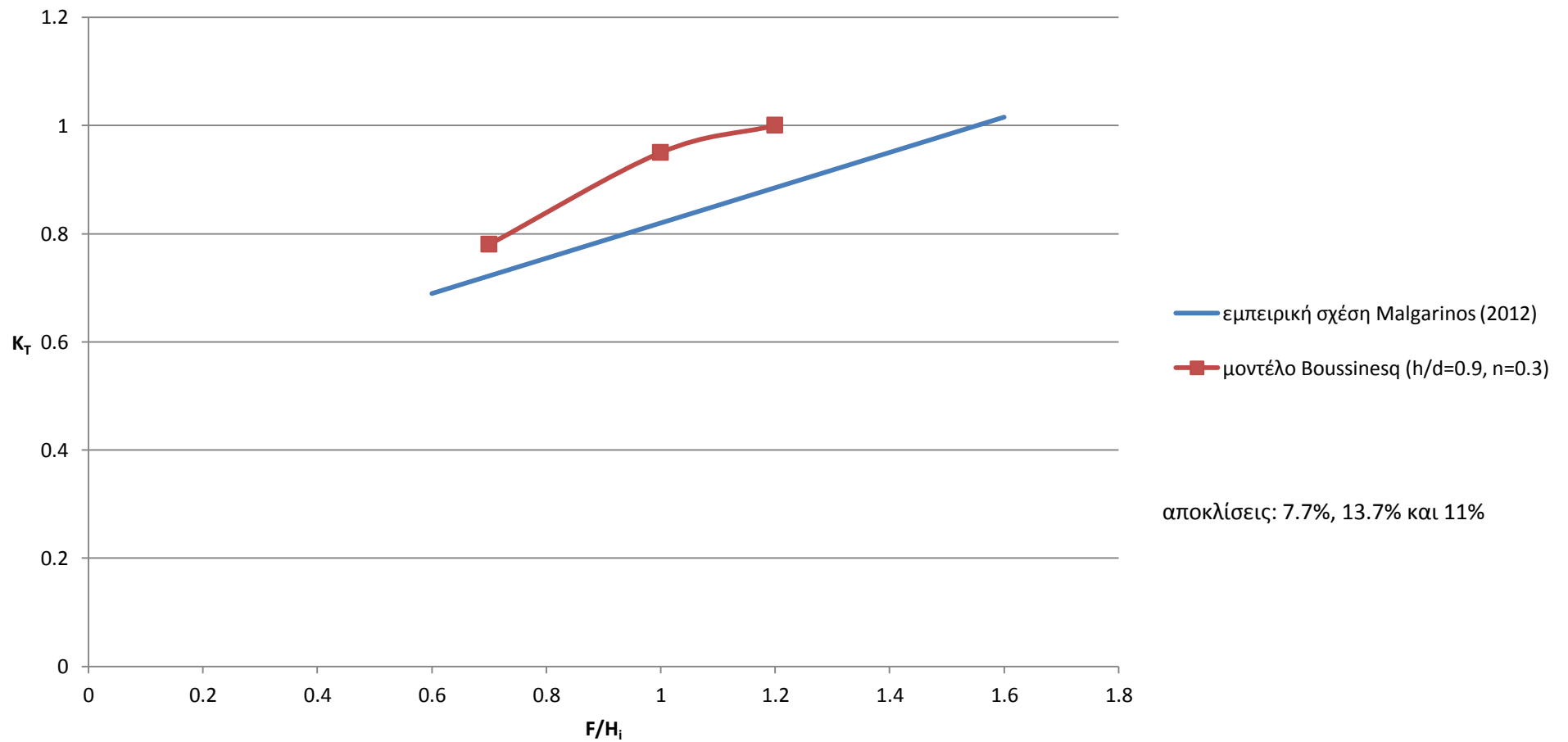
Διάγραμμα 4.5.2.9 – Σύγκριση συντελεστή μετάδοσης από την προτεινόμενη εμπειρική σχέση για $h/d=0.8$ και $n=0.2\sim 0.6$.



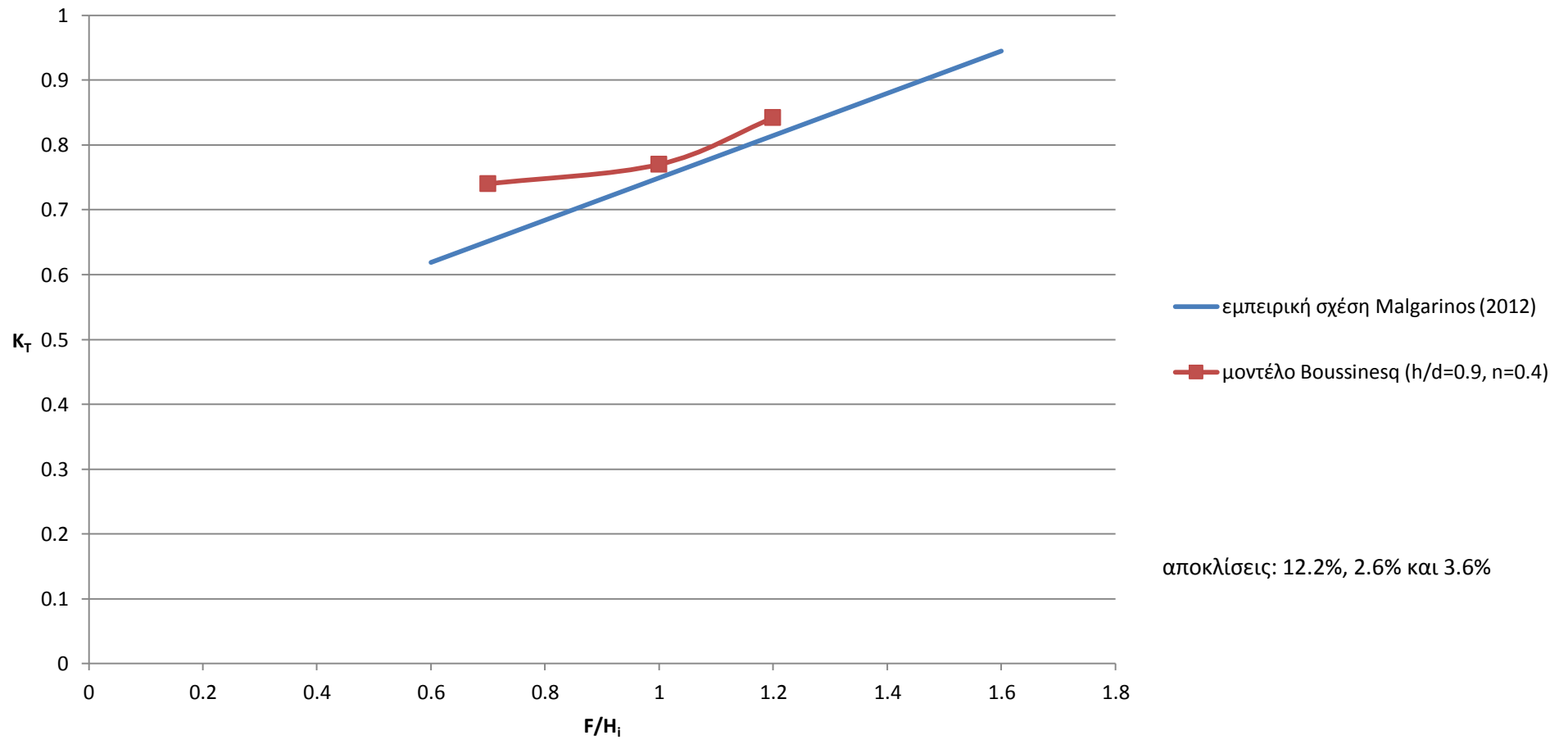
Διάγραμμα 4.5.2.10 – Σύγκριση συντελεστή μετάδοσης από την προτεινόμενη εμπειρική σχέση και το μοντέλο Boussinesq για $h/d=0.9$ και $n=0.1$.



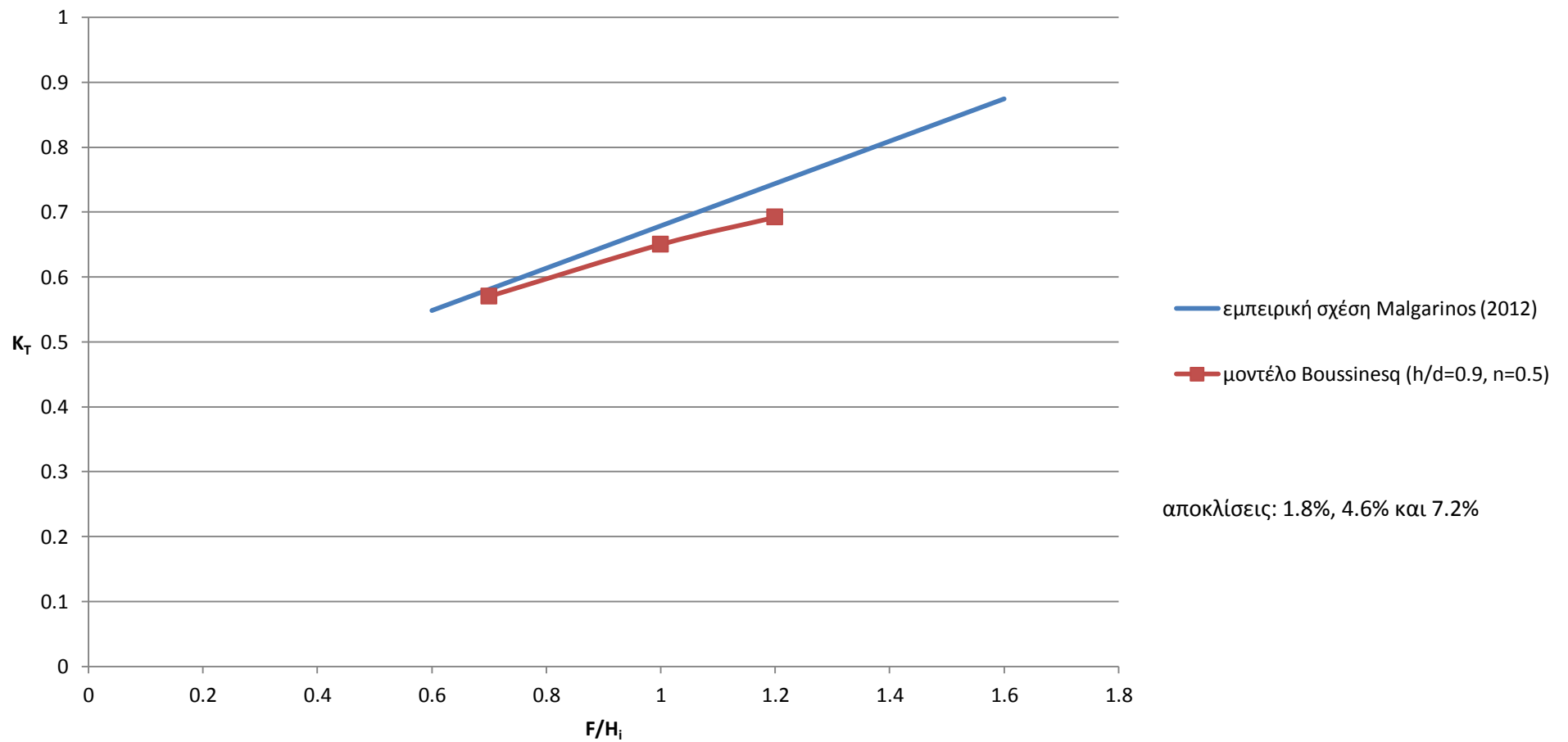
Διάγραμμα 4.5.2.11 – Σύγκριση συντελεστή μετάδοσης από την προτεινόμενη εμπειρική σχέση και το μοντέλο Boussinesq για $h/d=0.9$ και $n=0.2$.



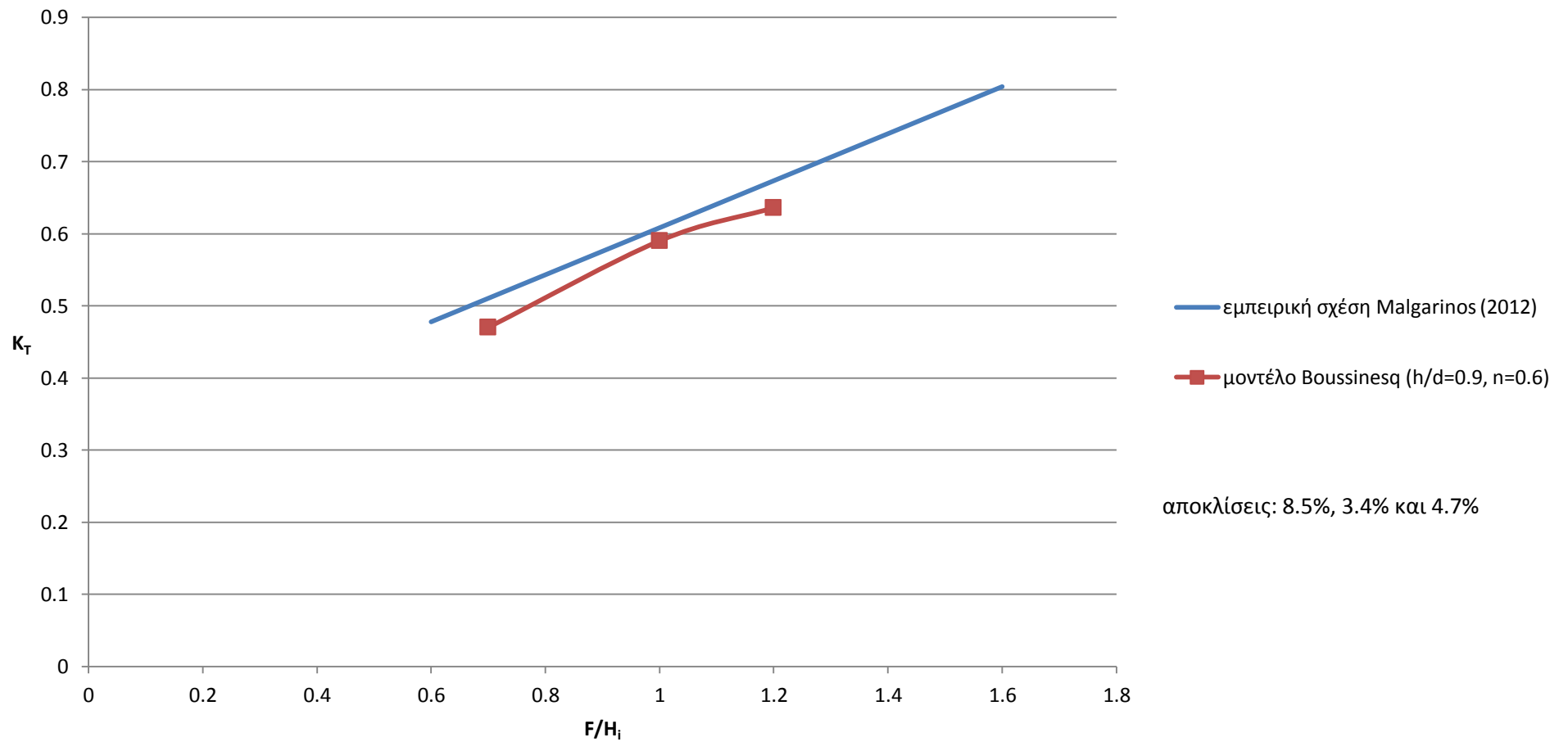
Διάγραμμα 4.5.2.12 – Σύγκριση συντελεστή μετάδοσης από την προτεινόμενη εμπειρική σχέση και το μοντέλο Boussinesq για $h/d=0.9$ και $n=0.3$.



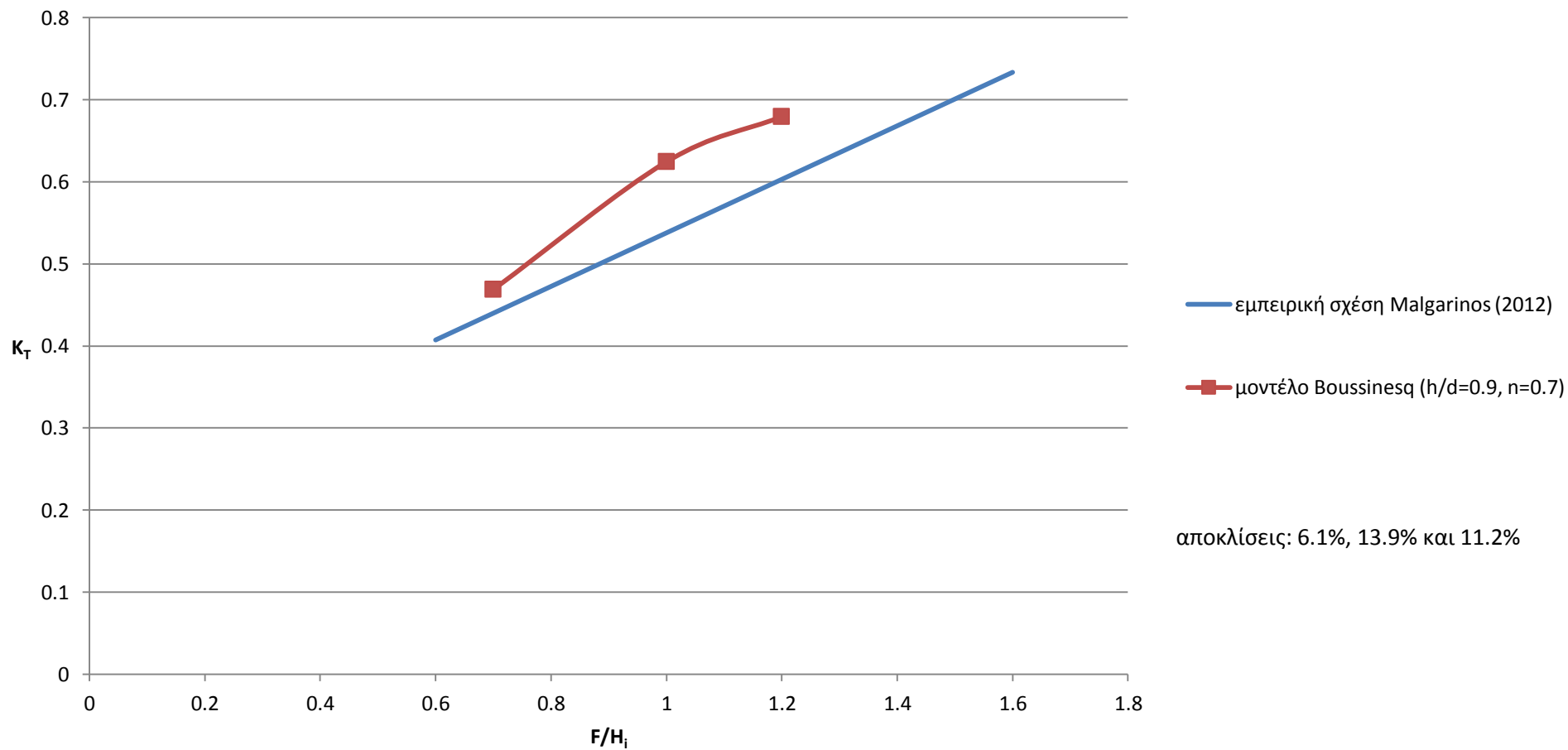
Διάγραμμα 4.5.2.13 – Σύγκριση συντελεστή μετάδοσης από την προτεινόμενη εμπειρική σχέση και το μοντέλο Boussinesq για $h/d=0.9$ και $n=0.4$.



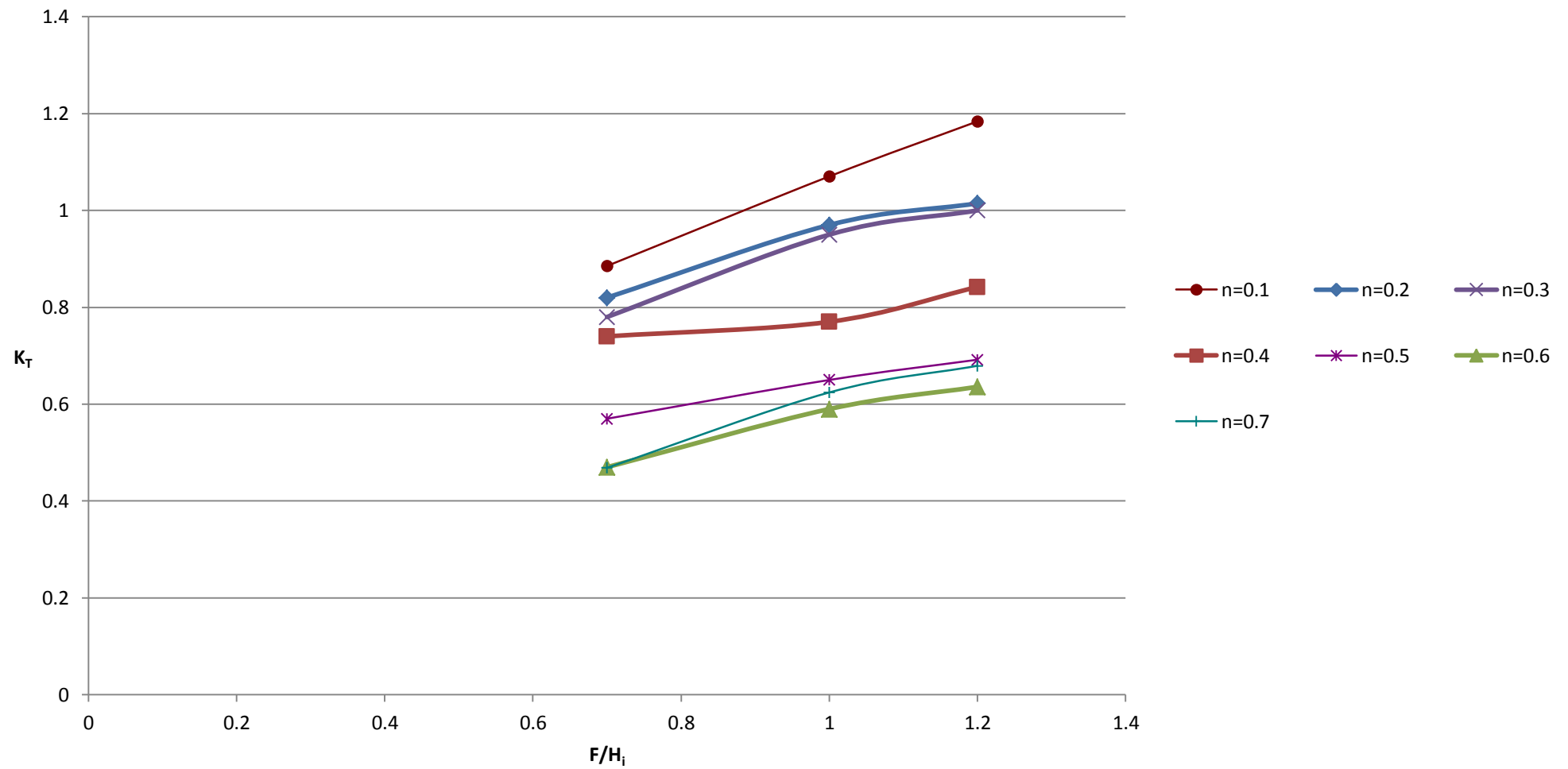
Διάγραμμα 4.5.2.14 – Σύγκριση συντελεστή μετάδοσης από την προτεινόμενη εμπειρική σχέση και το μοντέλο Boussinesq για $h/d=0.9$ και $n=0.5$.



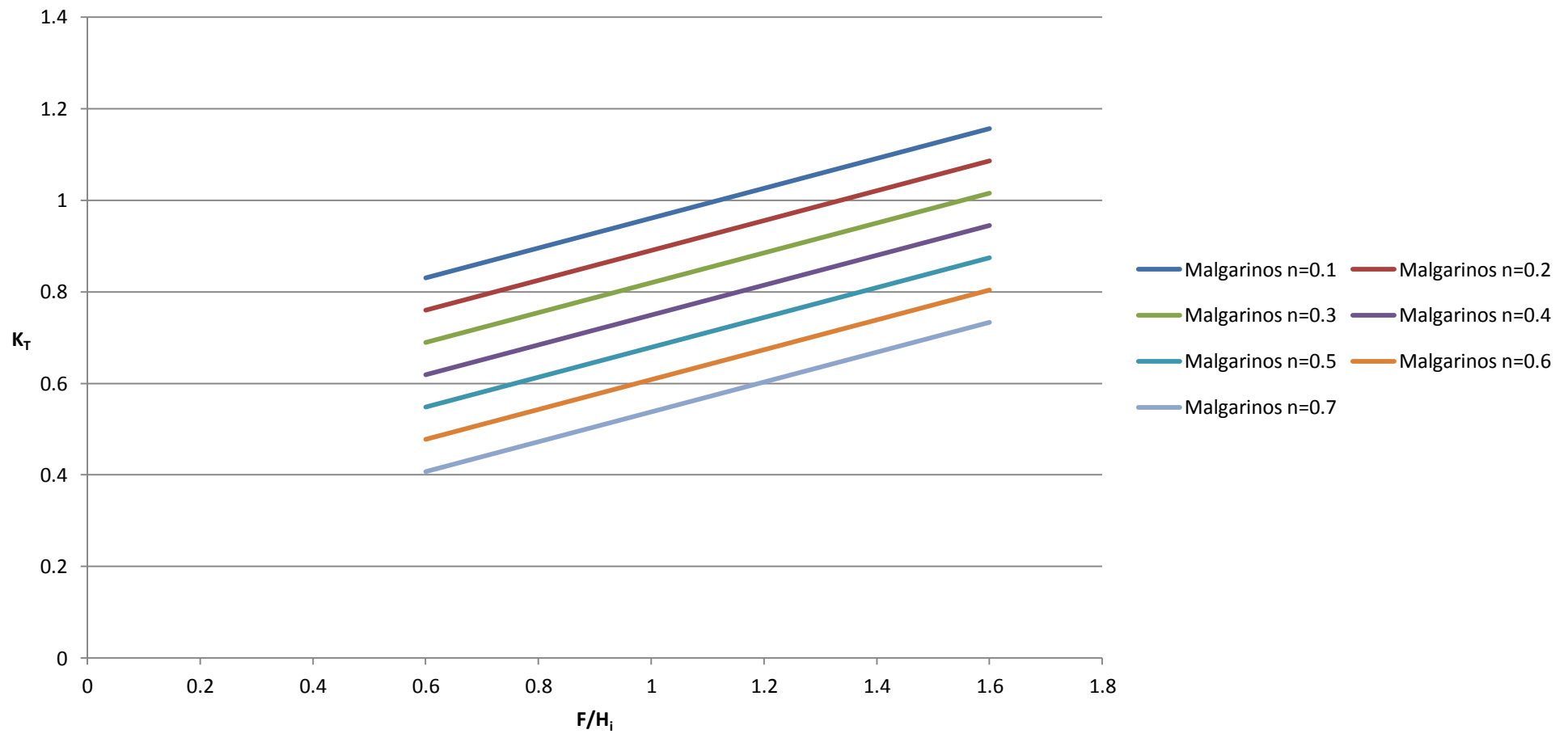
Διάγραμμα 4.5.2.15 – Σύγκριση συντελεστή μετάδοσης από την προτεινόμενη εμπειρική σχέση και το μοντέλο Boussinesq για $h/d=0.9$ και $n=0.6$.



Διάγραμμα 4.5.2.16 – Σύγκριση συντελεστή μετάδοσης από την προτεινόμενη εμπειρική σχέση και το μοντέλο Boussinesq για $h/d=0.9$ και $n=0.7$.



Διάγραμμα 4.5.2.17 – Σύγκριση συντελεστή μετάδοσης από το μοντέλο Boussinesq για $h/d=0.9$ και $n=0.1\sim 0.7$.



Διάγραμμα 4.5.2.18 – Σύγκριση συντελεστή μετάδοσης από την προτεινόμενη εμπειρική σχέση για $h/d=0.9$ και $n=0.1\sim 0.7$.

Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται ότι για τιμές πορώδους $n=0.2, 0.3$ και 0.4 η προτεινόμενη εμπειρική σχέση υποεκτιμά τον συντελεστή μετάδοσης K_T σε σχέση με το μοντέλο Boussinesq (όπως ισχύει και για $n=0.1$ στην περίπτωση $h/d=0.9$), ενώ για πορώδες $n=0.5$ και 0.6 τον υπερεκτιμά (τόσο για $h/d=0.8$ όσο και για 0.9). Αυτό δείχνει ότι μειώνοντας το πορώδες, η μετακίνηση της προτεινόμενης σχέσης προς μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή μετάδοσης είναι καθαρά μικρότερη από αυτή που προβλέπει το μοντέλο Boussinesq.

Επίσης, από τα παραπάνω διαγράμματα μπορεί να εξαχθεί ότι η προτεινόμενη σχέση πλησιάζει περισσότερο τα αποτελέσματα του Boussinesq για $h/d=0.9$ από αυτά με $h/d=0.8$. Αυτό φαίνεται και από τις τιμές της απόκλισης που παρουσιάζονται στα διαγράμματα.

Στα διαγράμματα με τιμή πορώδους $n=0.5$ η προτεινόμενη σχέση πλησιάζει σε πολύ μεγάλο βαθμό τα αποτελέσματα του μοντέλου, κάτι που ήταν αναμενόμενο, καθώς στα πειράματα που εκτελέστηκαν η τιμή του πορώδους ήταν 0.52 .

Επιπλέον, από τα συγκεντρωτικά διαγράμματα του μοντέλου Boussinesq προκύπτει ότι αυξανόμενου του πορώδους ο συντελεστής μετάδοσης K_T μειώνεται, και οι καμπύλες του συντελεστή μετατοπίζονται προς τα κάτω. Η μετατόπιση αυτή και για τις δύο περιπτώσεις h/d είναι μεγαλύτερη για αύξηση του πορώδους από 0.4 σε 0.5 . Μοναδική ανακολουθία στα παραπάνω φαίνεται ότι αποτελεί το διάγραμμα με τιμή πορώδους $n=0.7$ για $h/d=0.9$, το οποίο βρίσκεται ελαφρώς πιο πάνω από το διάγραμμα με $n=0.6$. Είναι επίσης φανερό ότι αυξανόμενου του σχετικού ελεύθερου ύψους F/H_i ο συντελεστής μετάδοσης αυξάνεται.

Τέλος, από τα συγκεντρωτικά διαγράμματα της προτεινόμενης εμπειρικής σχέσης εύκολα συμπεραίνεται ότι αυξανόμενου του πορώδους μειώνεται ο συντελεστής μετάδοσης, κάτι που αναμενόταν λόγω του ότι η εξάρτησή τους είναι γραμμική.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνάται πειραματικά ο συντελεστής μετάδοσης K_T των κυματισμών σε ύφαλο κυματοθραύστη με πορώδες. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται η επιρροή του ελεύθερου ύψους και της κυματικής περιόδου στον συντελεστή μετάδοσης. Επίσης συγκρίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα με τα αντίστοιχα από το αριθμητικό μοντέλο Boussinesq με πορώδες, αλλά και με αυτά που προκύπτουν από κάποιες εμπειρικές σχέσεις. Μια άλλη σημαντική σύγκριση που γίνεται, είναι αυτή ανάμεσα στα αποτελέσματα του μοντέλου Boussinesq με πορώδες και σε αυτά του μοντέλου Boussinesq χωρίς πορώδες. Τέλος, παρουσιάζεται μια καινούργια εμπειρική σχέση για τον υπολογισμό του συντελεστή μετάδοσης, η οποία βασίζεται στις πειραματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας. Η σχέση αυτή συγκρίνεται επίσης με το μοντέλο Boussinesq για μια σειρά τιμών των βασικών παραμέτρων της κυματικής μετάδοσης.

Τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται ξεχωριστά στις 5 ενότητες που ακολουθούν.

5.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΧΕΤΙΚΟΥ ΥΨΟΥΣ

Παρατηρώντας τα διαγράμματα 4.4.1 - 4.4.5 γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι αυξάνομένου του σχετικού ύψους F/H_i αυξάνεται και η τιμή του συντελεστή μετάδοσης κυματισμού K_T . Συνεπώς, για μεγάλες τιμές του σχετικού ύψους έχουμε μικρότερη απόσβεση του κυματισμού, κάτι που δεν είναι επιθυμητό, καθώς δεν προσφέρεται επαρκής προστασία από τα κύματα.

5.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΟΡΩΔΟΥΣ

Η ύπαρξη του πορώδους στον κυματοθραύστη προκαλεί αισθητή μείωση στον συντελεστή μετάδοσης κυματισμού σε σχέση με την τιμή στο αντίστοιχο αδιαπέρατο έργο. Αυτό φαίνεται καθαρά στο διάγραμμα 4.3.4 όπου με την παρουσία πορώδους στον κυματοθραύστη, η κυματική μετάδοση μειώθηκε περίπου κατά 40% ως προς το αντίστοιχο μέγεθος για αδιαπέρατο έργο στην περίπτωση $h/d=0.8$, ενώ κατά 30% στην περίπτωση $h/d=0.89$, αντίστοιχα. Η χρήση του μοντέλου Boussinesq για την εξαγωγή αυτών των ποιοτικών συμπερασμάτων μπορεί να θεωρηθεί σωστή, καθώς αποδείχθηκε προηγουμένως ότι το συγκεκριμένο μοντέλο προσομοιάζει επαρκώς την κυματική μετάδοση ανάντι και κατάντι ενός κυματοθραύστη, καθώς τα αποτελέσματα της χρήσης των εξισώσεων πλησιάζουν τις πειραματικές τιμές με μεγάλη ακρίβεια (διάγραμμα 4.3.3).

Το πορώδες που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο μοντέλο Boussinesq κυμαίνεται για $h/d=0.8$ από 0.2 έως 0.6, ενώ για $h/d=0.9$ κυμαίνεται από 0.1 έως 0.7. Και στις δύο περιπτώσεις που αναλύθηκαν δηλαδή $h/d=0.8$ και $h/d=0.9$ φαίνεται ότι αυξάνοντας το πορώδες ο συντελεστής μετάδοσης μειώνεται. Αυτό συμβαίνει και για τις τρεις περιπτώσεις του σχετικού ελεύθερου ύψους ($F/H_i=0.7, 1$ και 1.2). Γενικά από τη βιβλιογραφία δεν μπορεί να εξαχθεί ένα βέβαιο συμπέρασμα για τη συμπεριφορά του συντελεστή μετάδοσης σε σχέση με το πορώδες καθώς άλλοι συμφωνούν με τα συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής (Παπάκου, 2008), ενώ άλλοι αναφέρουν ότι δεν υπάρχει κάποια εξάρτηση (Μακρής, 2007).

Για μεγαλύτερες τιμές πορώδους από 0.7 το μοντέλο Boussinesq δεν έχει φυσικά αποτελέσματα. Αυτό κατά κάποιο τρόπο είναι φυσιολογικό γιατί στην πραγματικότητα πορώδες που τείνει στη μονάδα δεν υπάρχει (δηλαδή ο όγκος των κενών πρακτικά δεν μπορεί να είναι ίσος με τον συνολικό όγκο του έργου). Για τιμές πορώδους μικρότερες του 0.1 το μοντέλο Boussinesq πάλι δεν έχει φυσικά αποτελέσματα.

Είναι επίσης χαρακτηριστικό ότι σε αδιαπέρατο ύφαλο κυματοθραύστη οι τιμές του συντελεστή μετάδοσης κυματισμού ξεπερνούν τη μονάδα, ειδικά για μικρές τιμές του ύψους του προσπίπτοντος κύματος. Αυτό όπως έχει αναφερθεί οφείλεται στο φαινόμενο της ρήχωσης. Η ύπαρξη πορώδους συνεπώς βοηθάει στη σημαντική

μείωση του συντελεστή μετάδοσης, σε τιμές μικρότερες της μονάδας, λόγω της τυρβώδους διήθησης και τριβής στον πυθμένα.

5.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΧΕΤΙΚΟΥ ΎΨΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΗ

Η αύξηση του σχετικού ύψους κυματοθραύστη h/d επηρεάζει αισθητά τον συντελεστή μετάδοσης κυματισμού. Όπως εύκολα προκύπτει από το διάγραμμα 4.3.4, αύξηση του σχετικού ύψους επιφέρει μείωση του συντελεστή μετάδοσης. Πιο συγκεκριμένα, μια αύξηση της τάξης του 10% για το σχετικό ύψος (h/d από 0.8 σε 0.89) προκαλεί περίπου 25% μείωση στον συντελεστή μετάδοσης. Γίνεται συνεπώς κατανοητό ότι για μεγάλο σχετικό ύψος κυματοθραύστη (πιο κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια) έχουμε μεγαλύτερη απόσβεση του κυματισμού.

Επίσης φαίνεται καθαρά ότι για αδιαπέρατο έργο η επίδραση του σχετικού ύψους στον συντελεστή μετάδοσης είναι ακόμα μεγαλύτερη. Πιο συγκεκριμένα, για αύξηση κατά 10% του σχετικού ύψους, η μείωση του συντελεστή μετάδοσης είναι περίπου 36%. Γίνεται δηλαδή αντιληπτό ότι η ύπαρξη κυματοθραύστη με μεγαλύτερο σχετικό ύψος είναι ευνοϊκή τόσο στην περίπτωση αδιαπέρατου έργου όσο και σε κυματοθραύστη με πορώδες.

5.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕ ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ

Από τη σύγκριση των τιμών του συντελεστή μετάδοσης από τις πειραματικές μετρήσεις με τις αντίστοιχες από τις 5 εμπειρικές σχέσεις που εξετάστηκαν, προκύπτουν ορισμένα βασικά συμπεράσματα.

Πρώτον, οι τιμές του συντελεστή μετάδοσης που προέκυψαν με βάση τις πειραματικές μετρήσεις βρίσκονται αρκετά κοντά σε εκείνες που υπολογίστηκαν από τις εμπειρικές σχέσεις, στις περισσότερες περιπτώσεις. Η εμπειρική σχέση που προσεγγίζει περισσότερο τις πειραματικές μετρήσεις είναι αυτή των D' Angremond et

al. (1996), ενώ μετά ακολουθούν οι σχέσεις των Bleck & Oumeraci (2002) και Ahrens (1987) οι οποίες δίνουν πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα. Όμως, η τελευταία εμπειρική σχέση έχει περιορισμένη σχετικά εφαρμογή λόγω του περιορισμού της $F/H_i < 1$. Η εμπειρική σχέση Van der Meer (1990) έδωσε τιμές που είναι, σχεδόν όλες, μεγαλύτερες από αυτές των πειραματικών μετρήσεων.

Δεύτερον, υπάρχει ομοιότητα όσον αφορά την κλίση του διαγράμματος που αντιστοιχεί στις πειραματικές μετρήσεις με τα διαγράμματα των εμπειρικών σχέσεων. Τις περισσότερες φορές η διαφορά μεταξύ των αντιστοιχών τιμών παραμένει σχεδόν σταθερή με αποτέλεσμα οι δύο σημειοσειρές να είναι περίπου παράλληλες μεταξύ τους.

Τρίτον, για σχετικά μεγάλες τιμές του F/H_i και πιο συγκεκριμένα για $F/H_i > 1.1$, παρατηρείται ότι αυξάνεται όλο και περισσότερο η απόκλιση μεταξύ των τιμών που προήλθαν από τις πειραματικές μετρήσεις και εκείνων που υπολογίστηκαν από ορισμένες εμπειρικές σχέσεις. Αυτό το φαινόμενο εμφανίζεται κατά τη σύγκριση των πειραματικών μετρήσεων με τις εμπειρικές σχέσεις Bleck & Oumeraci (2002) και Seabrook & Hall (1998).

5.5 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΕΜΠΕΙΡΙΚΗ ΣΧΕΣΗ

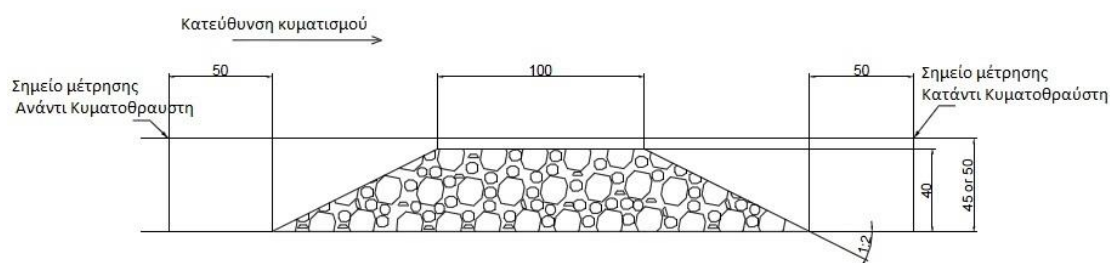
Η εμπειρική σχέση που προτάθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία προέκυψε με γραμμική παρεμβολή από τις πειραματικές μετρήσεις που είχαν διαφορετικές τιμές σχετικού ύψους κυματοθραύστη.

Κατά τη σύγκριση της εμπειρικής σχέσης με τα αποτελέσματα από το μοντέλο Boussinesq διαπιστώθηκε ότι αυτή προσεγγίζει πολύ καλά τις περιπτώσεις h/d και n που είναι κοντά στα πειράματα (0.8-0.89 και 0.52 αντίστοιχα). Για τιμές που απέχουν από αυτές, θεωρείται αναγκαία η λήψη περαιτέρω πειραματικών μετρήσεων, παρόλα αυτά η πειραματική σχέση μπορεί να δώσει ποιοτικά κάποιες αντιπροσωπευτικές τιμές του συντελεστή μετάδοσης.

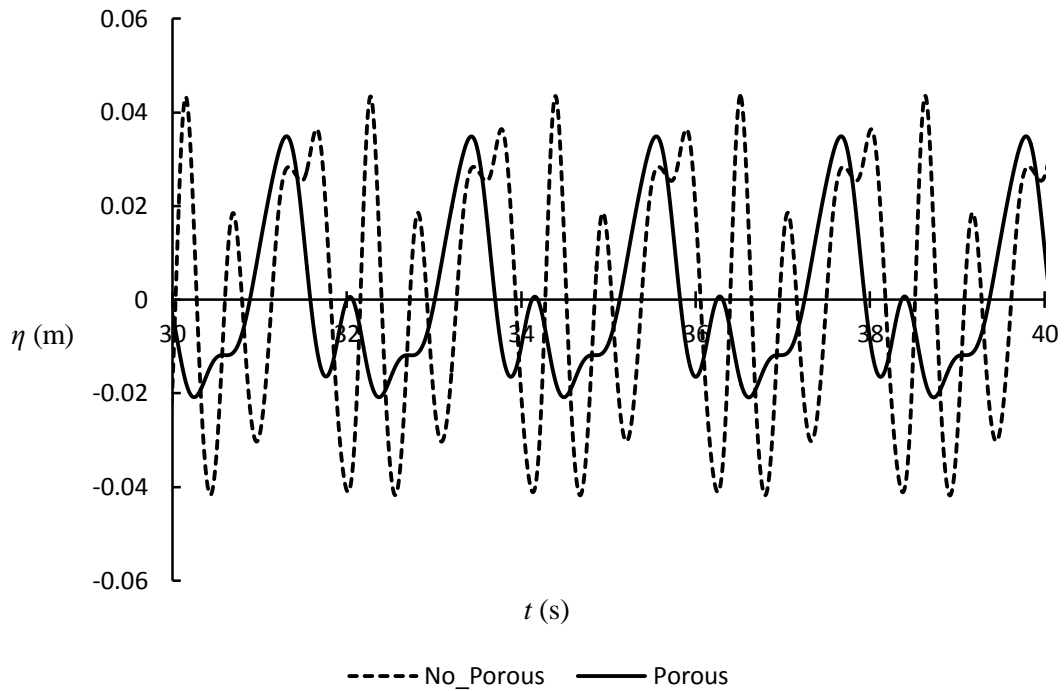
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Διαγράμματα μοντέλου Boussinesq

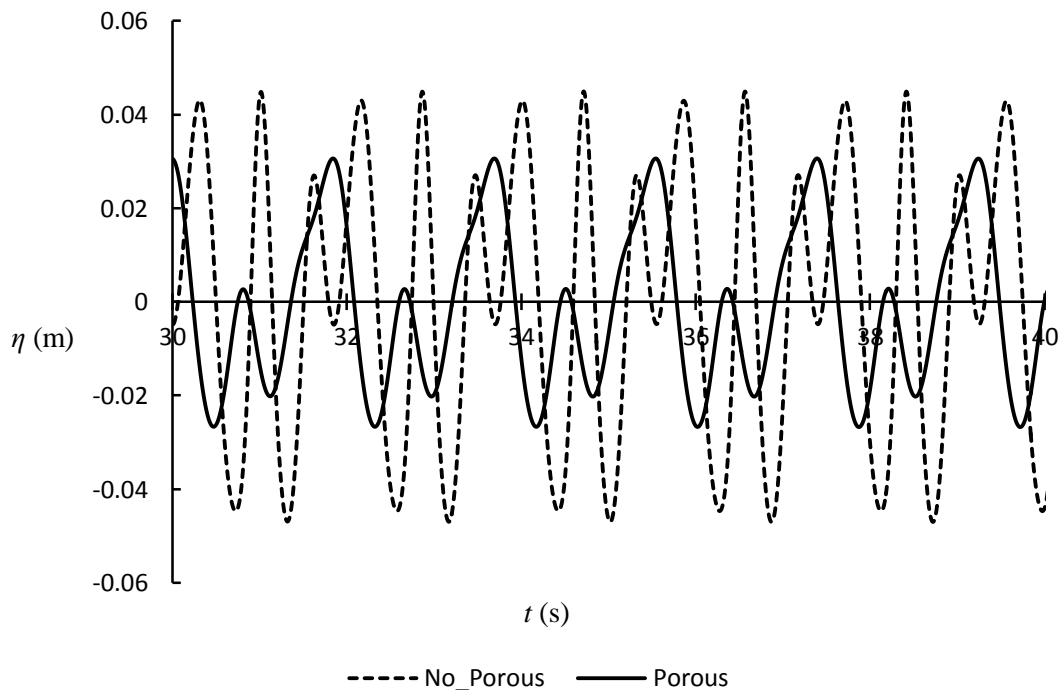
Στο παράρτημα αυτό παρουσιάζονται τα διαγράμματα που δίνουν την ανύψωση της επιφάνειας του νερού σε σημείο κατάντι του ύφαλου κυματοθραύστη συναρτήσει του χρόνου όπως προέκυψαν από την επίλυση του μοντέλου Boussinesq για τις 7 διαφορετικές περιπτώσεις κυματικής μετάδοσης που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 4. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η διάταξη του μοντέλου ύφαλου κυματοθραύστη που χρησιμοποιήθηκε και το σημείο (στα δεξιά) στο οποίο υπολογίστηκαν οι ανυψώσεις της επιφάνειας του νερού από το μοντέλο Boussinesq.



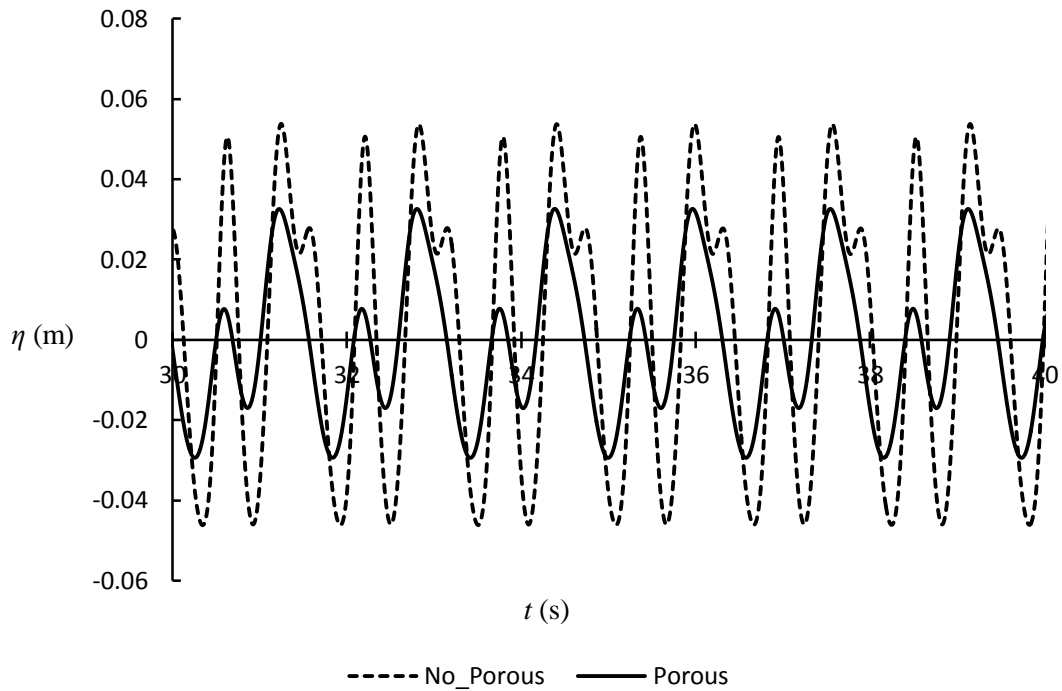
Σχήμα 1 – Διάταξη μοντέλου ύφαλου κυματοθραύστη και σημεία όπου έγιναν μετρήσεις και υπολογισμοί.



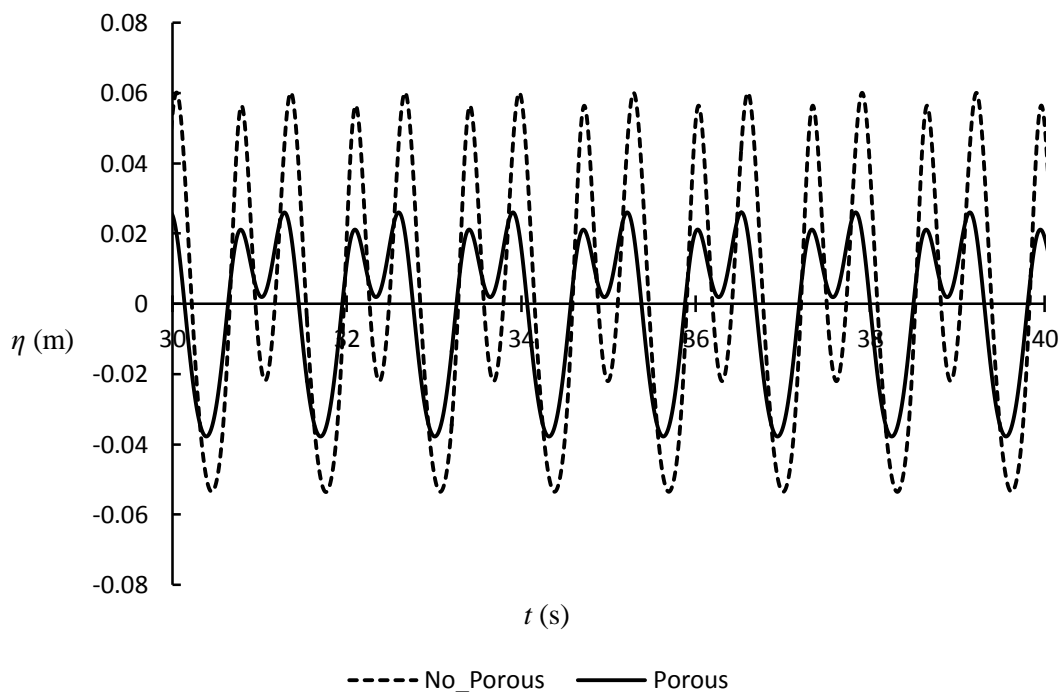
Διάγραμμα 1 – Ανύψωση της επιφάνειας του νερού συναρτήσει του χρόνου που αντιστοιχεί στο 1^ο πείραμα (δεδομένα $H_i=6.5\text{cm}$, $T=2.12\text{s}$, $d=50\text{cm}$).



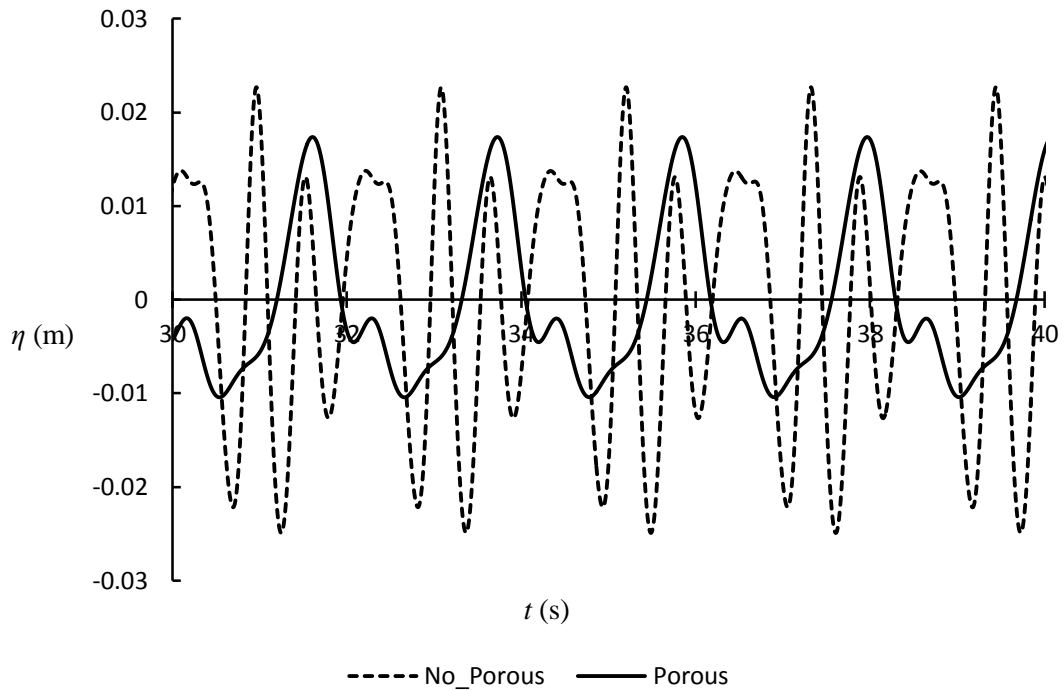
Διάγραμμα 2 – Ανύψωση της επιφάνειας του νερού συναρτήσει του χρόνου που αντιστοιχεί στο 2^ο πείραμα (δεδομένα $H_i=8\text{cm}$, $T=1.85\text{s}$, $d=50\text{cm}$).



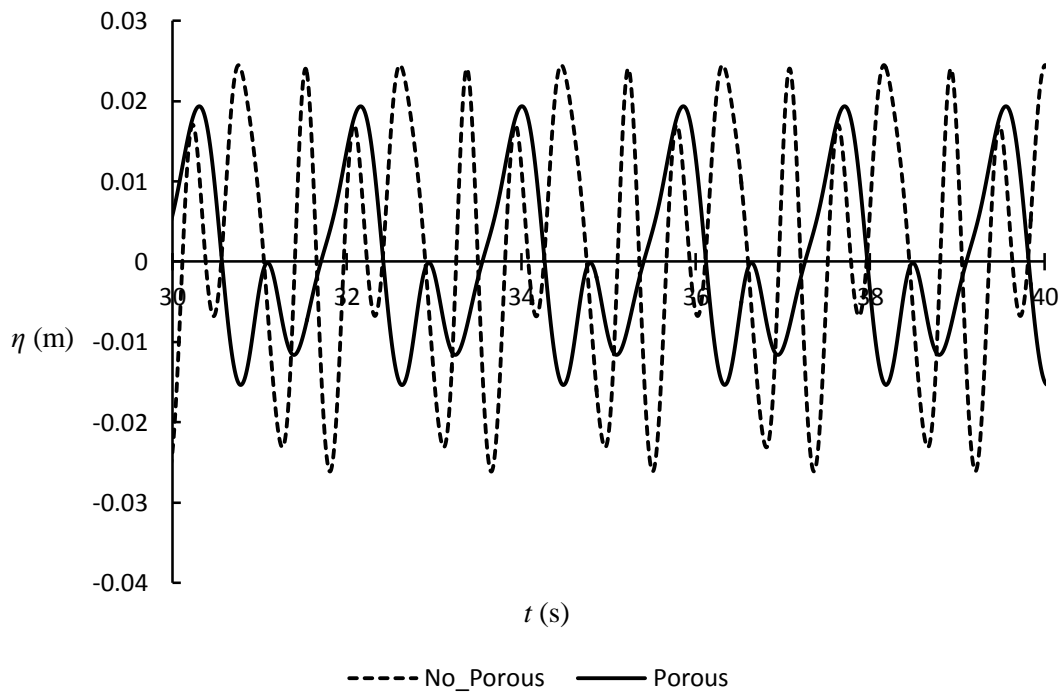
Διάγραμμα 3 – Ανύψωση της επιφάνειας του νερού συναρτήσει του χρόνου που αντιστοιχεί στο 3^ο πείραμα (δεδομένα $H_i=9.5\text{cm}$, $T=1.58\text{s}$, $d=50\text{cm}$).



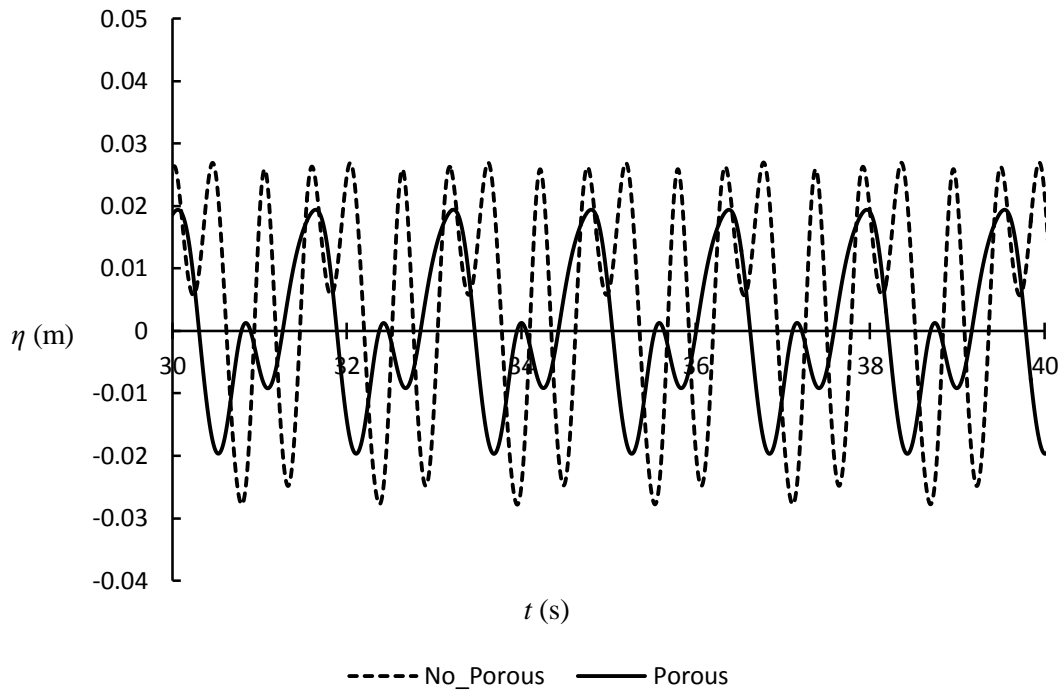
Διάγραμμα 4 – Ανύψωση της επιφάνειας του νερού συναρτήσει του χρόνου που αντιστοιχεί στο 4^ο πείραμα (δεδομένα $H_i=11\text{cm}$, $T=1.31\text{s}$, $d=50\text{cm}$).



Διάγραμμα 5 – Ανύψωση της επιφάνειας του νερού συναρτήσει του χρόνου που αντιστοιχεί στο 5^ο πείραμα (δεδομένα $H_i=4\text{cm}$, $T=2.12\text{s}$, $d=45\text{cm}$).



Διάγραμμα 6 – Ανύψωση της επιφάνειας του νερού συναρτήσει του χρόνου που αντιστοιχεί στο 6^ο πείραμα (δεδομένα $H_i=5.7\text{cm}$, $T=1.85\text{s}$, $d=45\text{cm}$).



Διάγραμμα 7 – Ανύψωση της επιφάνειας του νερού συναρτήσει του χρόνου που αντιστοιχεί στο 7^ο πείραμα (δεδομένα $H_i=7.5\text{cm}$, $T=1.58\text{s}$, $d=45\text{cm}$).

Παρατηρώντας αυτά τα διαγράμματα φαίνεται ότι η μορφή τους αλλοιώνεται αρκετά στην περίπτωση όπου έχουμε πορώδες στο υπολογιστικό μοντέλο Boussinesq. Έτσι αποδεικνύεται με έναν ακόμη τρόπο το πόσο μεγάλο ρόλο παίζει το πορώδες στην κυματική μετάδοση πάνω από έναν ύφαλο κυματοθραύστη.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Φωτογραφίες

Στο συγκεκριμένο παράρτημα παρουσιάζονται οι φωτογραφίες που απεικονίζουν την πειραματική διάρρυγα και τα πιο βασικά της στοιχεία.



Φωτ. 1 – Η πειραματική διάρρυγα όπως φαίνεται κοιτώντας από την άκρη που βρίσκεται η κυματογεννήτρια (με κόκκινο χρώμα). Ευδιάκριτο είναι και το περύγιο του κυματιστήρα.



Φωτ. 2 – Η κυματογεννήτρια της διάρρυγας πάνω σε βάθρο από σκυρόδεμα.



Φωτ. 3 – Βαθμονομημένος γνώμονας σε σημείο ανάντι του ύφαλου κυματοθραύστη για τη λήψη πειραματικών μετρήσεων (με οπτική παρατήρηση).



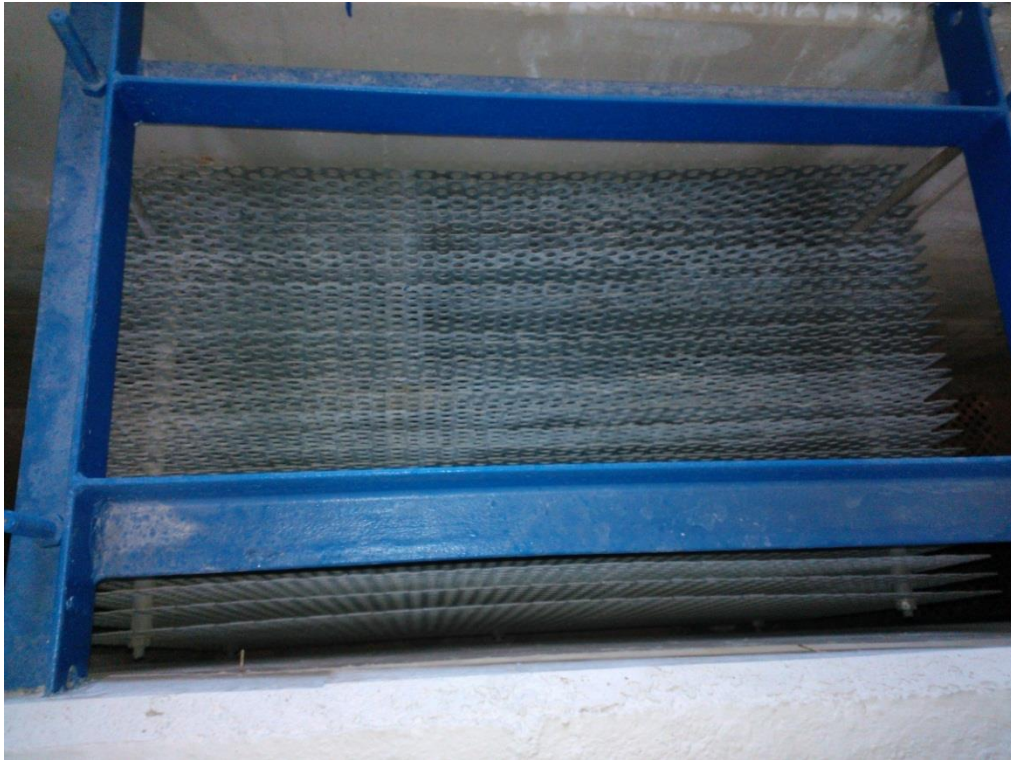
Φωτ. 4 – Ο ύφαλός κυματοθραύστης της πειραματικής διάρρυγας όπως φαίνεται κοιτώντας από πάνω.



Φωτ. 5 – Το άλλο άκρο της πειραματικής διώρυγας. Εδώ φαίνεται ο αποσβεστήρας κυματικής ενέργειας που αποτελείται από λίθους και ένας κίτρινος σωλήνας από όπου γίνεται η είσοδος νερού στη διώρυγα.



Φωτ. 6 – Το πρώτο άκρο της διώρυγας με την κυματογεννήτρια, έναν αποσβεστήρα κυματισμών και το περύγιο του κυματιστήρα.



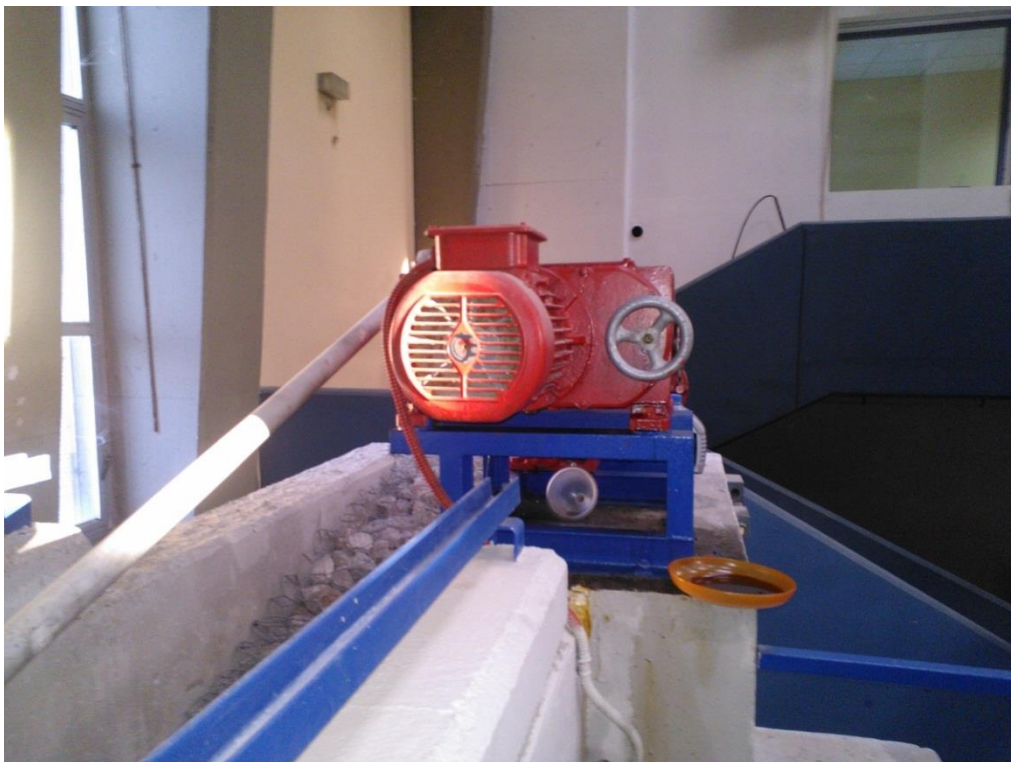
Φωτ. 7 – Η διάταξη των διάτρητων μεταλλικών πλακών που έχει σκοπό την ομαλοποίηση των κυματισμών.



Φωτ. 8 – Το εσωτερικό της πειραματικής διώρυγας. Στο βάθος φαίνεται ο ύφαλος κυματοθραύστης και λίγο μετά ο αποσβεστήρας κυματικής ενέργειας στο άκρο της διώρυγας.



Φωτ. 9 – Απεικονίζονται τα ίδια στοιχεία με την προηγούμενη φωτογραφία, αλλά από πιο κοντά και επομένως είναι πιο ευδιάκριτα.



Φωτ. 10 – Μια ακόμα άποψη της κυματογεννήτριας. Είναι ευδιάκριτος ο σιδερένιος σωλήνας μεταφοράς της κίνησης προς το πτερύγιο και η στρόφιγγα για την αλλαγή ταχυτήτων στην κυματογεννήτρια.



Φωτ. 11 – Πανοραμική άποψη της πειραματικής διώρυγας. Εδώ φαίνονται και άλλες πειραματικές διατάξεις του Εργαστηρίου, ενώ η συγκεκριμένη διώρυγα βρίσκεται στο βάθος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΞΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ahrens, J.P., 1987. “Characteristics of Reef Breakwaters”. CERC Technical Report 87-17. Vicksburg, MS U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station

Avgeris I, Karambas T.V. Prinos P., 2004. “Boussinesq modeling of wave interaction with porous submerged breakwaters”. Coastal Engineering. ICCE 2004, Lisbon, Portugal

Bleck, M. dan Oumeraci, H. “Hydraulic Performance of Artificial Reefs : Global and Local Description”, Proceeding of the 28th International Conference Coastal Engineering 2002, eds. Smith J.M., Cardif Wales, 2002, pp 1778-1790.

Burcharth H.F. Andersen O.H., 1995. “On the one-dimensional steady and unsteady porous flow equations”, Coastal Engineering 24, pp. 233–257

Daemrich, K.-F.; Mai, S. and N. Ohle, 2002. “Wave Transmission at Rubble Mound Structures”; Proceedings of the 1st German-Chinese Joint Symposium on Coastal Engineering; Rostock, Germany 2002

D’Angremond, K.; Van der Meer, J.W., and De Jong, R.J., 1996. “Wave transmission at low-crested structures”. Proceedings of the 22th International Conference on Coastal Engineering (Orlando, FL, USA), pp. 2418-2426

Kennedy, A.B., Q. Chen, J.T. Kirby & R.A. Dalrymple. 2000. “Boussinesq Modeling of Wave Transformation, Breaking, and Runup. I: 1D”, J. of WPCOE, Vol. 126, No. 1, 39-47.

Madsen, O. S., 1974. "Wave transmission through porous structures." *J. Waterway, Harb. and Coast. Engrg. Div., ASCE*, 100(3), 169–188.

Madsen, P.A., Sørensen, O.R., 1992. "A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics. Part 2. A slowly-varying bathymetry". *Coastal Engineering* 18: 183-204

Memos, C.D., T.V. Karambas, and I. Avgeris, 2005. "Irregular wave transformation in the nearshore zone: experimental investigations and comparison with a higher order Boussinesq model". *Ocean Engineering*, 2005. 32(11–12): p. 1465-1485.

Seabrook, S.R. and Hall, K.R., 1998. "Wave transmission at submerged rubble mound breakwaters". *Proceedings of the 26th International Conference on Coastal Engineering (Copenhagen, Denmark)*, pp. 2000-2013.

Sollitt, C.K. and Cross, R.H., 1972. "Wave transmission through permeable breakwater," *Proceeding of 13th International Conference on Coastal Engineering, ASCE*, pp. 1827-1846, 1972.

Van der Meer, J.W. and Pilarczyk, K.W., 1990. "Stability of low-crested and reef breakwaters. ASCE". *Proc. 22th Coastal Conference (ICCE), Delft, The Netherlands*

Van Gent, M.R.A., P. Tönjes, H.A.H. Petit and P. van den Bosch. 1994. "Wave action on and in permeable structures", *Proc. ICCE 1994, ASCE, Vol.2*, pp.1739-1753

Van Gent, M.R.A. 1995. "Porous flow through rubble mound material", *J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, Vol.121, no.3, pp.176-181, ASCE, New York, by M.R.A. van Gent.

Vidal, C., Losada, M. A., Medina, R., and Rubio, J., 1988. "Solitary wave transmission through porous breakwaters". *Proc., 21st Int. Conf.Coast. Engrg., ASCE, New York*, 1073–1083.

Wei, G. and Kirby, J. T., 1995, "A time-dependent numerical code for extended Boussinesq equations" Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 120, 251-261.

Wei, G., Kirby, J. T., Grilli, S. T. and Subramanya, R., 1995, "A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves. I. Highly nonlinear, unsteady waves", Journal of Fluid Mechanics, 294, 71-92.

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Αργυρόπουλος Ε., 2010 "Υδροδυναμική διερεύνηση σώματος ύφαλου κυματοθραύστη με πορώδες", Διπλωματική Εργασία, Εργαστήριο Λιμενικών Έργων Ε.Μ.Π., Αθήνα

Βερναρδάκης Σ., 1990 "Βαθμονόμηση διώρυγας κυματισμών βαρύτητας Εργαστηρίου Λιμενικών Έργων Ε.Μ.Π.", Διπλωματική Εργασία, Εργαστήριο Λιμενικών Έργων Ε.Μ.Π., Αθήνα

Μακρής Χ., 2007 "Μετάδοση κυματισμού κατάντι ύφαλου κυματοθραύστη", Διπλωματική Εργασία, Εργαστήριο Λιμενικών Έργων Ε.Μ.Π., Αθήνα

Μέμος Κ., 2005 "Μαθήματα λιμενικών έργων", Αθήνα

Νουτσόπουλος Γ. – Χριστοδούλου, 1996 "Μαθήματα μηχανικής των ρευστών", Αθήνα

Παπάκου Α., 2008 "Πειραματική διερεύνηση κυματικής μετάδοσης κατάντι ύφαλου κυματοθραύστη", Διπλωματική Εργασία, Εργαστήριο Λιμενικών Έργων Ε.Μ.Π., Αθήνα