



# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

« ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ »

## ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ ΠΙΣΩ ΑΠΟ ΥΨΑΛΟ ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΗ ΜΕ ΠΑΡΟΥΣΙΑ Η ΜΗ ΠΟΣΕΙΔΩΝΙΑΣ

*Ευφροσύνη Ειρήνη Κόγια*

Αθήνα, Μάρτιος 2019

Επιβλέπων: Ομότιμος Καθηγητής Κ. Μέμος

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ &  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ  
ΥΔΑΤΙΚΩΝ  
ΠΟΡΩΝ»



## **«Διερεύνηση συμπεριφοράς του συντελεστή μετάδοσης κυματισμού πίσω από ύφαλο κυματοθραύστη με παρουσία ή μη Ποσειδωνίας»**

---

### **ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Φοιτήτρια:** Ευφροσύνη Ειρήνη Κόγια

**Επιβλέπων:** Κων. Μέμος, Ομότιμος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

#### **Λέξεις – κλειδιά:**

Ποσειδωνία, ύφαλος κυματοθραύστης, διαπερατός, κυματική μετάδοση, συντελεστής  
μετάδοσης, πείραμα, προστασία ακτής, κυματισμοί

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

Αθήνα, Μάρτιος 2019



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί το τελευταίο στάδιο των προπτυχιακών σπουδών μου στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Ολοκληρώνοντας αυτή την εργασία, θα ήθελα πραγματικά να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν μέσα από τα βάθη της καρδιάς μου, άμεσα και έμμεσα και πρώτα απ' όλα τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Κωνσταντίνο Μέμο (Ομότιμος Καθηγητής του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π.) για την υπόδειξη του συγκεκριμένου θέματος, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και για το άριστο κλίμα συνεργασίας που είχαμε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης του θέματος παρόλες τις δυσκολίες .

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Ελπιδοφόρο Ρεπούση για την πολύτιμη βοήθεια και συμβολή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της μεταπτυχιακής μου εργασίας και τον Αθανάσιο Ζήρο για την παραχώρηση των πειραματικών δεδομένων και αποτελεσμάτων.

Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ στους φίλους και την οικογένειά μου για την συμπαράσταση και την υποστήριξη όλα αυτά τα χρόνια και κυρίως καθόλη διάρκεια όλων των σπουδών μου.

Ευφροσύνη Ειρήνη Κόγια

Αθήνα, Μάρτιος 2019



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	9
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ .....	11
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	13
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	15
ABSTRACT .....	17
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	23
1.1 Αντικείμενο και σκοπός της εργασίας.....	23
1.2 Διάρθρωση της εργασίας .....	24
2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΑΚΤΩΝ - ΥΦΑΛΟΙ ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΕΣ .....	25
2.1 Προστασία ακτών και ύφαλοι κυματοθραύστες (Υ.Κ.) .....	25
2.2 Τύποι κατασκευών χαμηλής στέψης.....	32
2.3 Φαινόμενα γύρω από Ύφαλο Κυματοθραύστη .....	34
3 ΠΟΣΕΙΔΩΝΙΑ – POSIDONIA OCEANICA .....	37
3.1 Γενικά.....	37
3.2 Προστασία των ακτών από τα Λιβάδια Ποσειδωνίας.....	42
4 ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗ - ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ Kt.....	45
4.1 Το φαινόμενο της κυματικής μετάδοσης - Καθορισμός των φυσικών μεταβλητών του προβλήματος.....	45
4.2 Βασικές παράμετροι επιρροής της κυματικής μετάδοσης πίσω από ύφαλο κυματοθραύστη .....	49
4.3 Εμπειρικοί τύποι υπολογισμού του συντελεστή κυματικής μετάδοσης Kt.....	51
5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ – ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ .....	57
5.1 Περιγραφή των πειραματικών διατάξεων που δημιουργήθηκαν στο Εργαστήριο Λιμενικών Έργων 2018	57
5.2 Κλίμακες ομοιότητας φυσικών ομοιομάτων .....	61
5.3 Πειραματικά αποτελέσματα .....	64
6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΜΠΕΙΡΙΚΩΝ ΤΥΠΩΝ .....	73
6.1 Αξιολόγηση υπαρχόντων εμπειρικών τύπων υπολογισμού του Kt.....	73
6.2 Αποτελέσματα εμπειρικών τύπων .....	81
6.3 Διερεύνηση πιθανότητας τροποποίησης του τύπου Friebel and Harris .....	90
7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΣΧΟΛΙΑ – ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ.....	95
7.1 Συμπεράσματα ως προς τα πειραματικά αποτελέσματα .....	95
7.2 Συμπεράσματα από την αξιολόγηση των εμπειρικών τύπων υπολογισμού του Kt.....	96
8 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ .....	97
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	99





## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 5-1 Λόγοι ομοιότητας διάφορων σημαντικών παραμέτρων (Ρούπας, 2018) .....	63
Πίνακας 5-2 Δεδομένα Διατομής 1 .....	64
Πίνακας 5-3 Δεδομένα Διατομής 2 .....	65
Πίνακας 5-4 Εύρη τιμών $H_i$ και $T$ για τις Διατομές 1 & 7 .....	66
Πίνακας 5-5 Τελικά δεδομένα Διατομής 1 .....	66
Πίνακας 5-6 Τελικά δεδομένα Διατομής 2 .....	68
Πίνακας 6-1 $K_t$ συντελεστές που προκύπτουν από τους ημι - εμπειρικούς τύπους για τα κυματικά χαρακτηριστικά και τις διαστάσεις της Διατομής 1 .....	74
Πίνακας 6-2 Περιορισμοί των ημι - εμπειρικών τύπων που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6-1 .....	75
Πίνακας 6-3 $K_t$ συντελεστές που προκύπτουν από τους εμπειρικού τύπους $e$ & $f$ για τα κυματικά χαρακτηριστικά και τις διαστάσεις της Διατομής 1 και οι περιορισμοί τους .....	76
Πίνακας 6-4 $K_t$ συντελεστές που προκύπτουν από τους εμπειρικού τύπους για τα κυματικά χαρακτηριστικά και τις διαστάσεις της Διατομής 1 .....	77
Πίνακας 6-5 Περιορισμοί των ημι - εμπειρικών τύπων που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6-4 για τη Διατομή 2 ( $h=0.6m$ ) .....	77
Πίνακας 6-6 $K_t$ συντελεστές που προκύπτουν από τους εμπειρικού τύπους $e$ & $f$ για τα κυματικά χαρακτηριστικά και τις διαστάσεις της Διατομής 2 ( $h=0.6m$ ) και οι περιορισμοί τους .....	78
Πίνακας 6-7 $K_t$ συντελεστές που προκύπτουν από τους εμπειρικού τύπους για τα κυματικά χαρακτηριστικά και τις διαστάσεις της Διατομής 2 ( $h=0.5m$ ) .....	79
Πίνακας 6-8 Περιορισμοί των ημι - εμπειρικών τύπων που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6-7 για τη Διατομή 2 ( $h=0.5m$ ) .....	79
Πίνακας 6-9 $K_t$ συντελεστές που προκύπτουν από τους εμπειρικού τύπους $e$ & $f$ για τα κυματικά χαρακτηριστικά και τις διαστάσεις της Διατομής 2 ( $h=0.5m$ ) και οι περιορισμοί τους .....	80
Πίνακας 6-10 Συντελεστές κυματικής μετάδοσης της Διατομής 1 για το Μοντέλο 1α που προέκυψαν από το πείραμα και τους ημι – εμπειρικούς τύπους .....	81
Πίνακας 6-11 Συντελεστές κυματικής μετάδοσης της Διατομής 2 για το Μοντέλο 2α σε βάθος νερού $h=0.6m$ που προέκυψαν από το πείραμα και τους ημι – εμπειρικούς τύπους .....	84
Πίνακας 6-12 Συντελεστές κυματικής μετάδοσης της Διατομής 2 για το Μοντέλο 2β σε βάθος νερού $h=0.5m$ που προέκυψαν από το πείραμα και τους ημι – εμπειρικούς τύπους .....	86
Πίνακας 6-13 Τιμές $K_t$ για $F=0.2m$ , $F=0.1m$ που προέκυψαν από τον τύπο Friebel & Harris για την Διατομή 2 / Μοντέλο 2α για τις ίδιες περιόδους .....	88
Πίνακας 6-14 Τιμές $K_t$ για $F=0.2m$ , $F=0.1m$ που προέκυψαν από τον τύπο Seabrook & Hall για την Διατομή 2 / Μοντέλο 2α για τις ίδιες περιόδους .....	89



## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 0-1 Διάγραμμα διασποράς των $Kt,1\alpha - Kt,1\beta$ για την Διατομή 1.....	21
Διάγραμμα 5-1 Διάγραμμα διασποράς των $Kt,1\alpha - Kt,1\beta$ για την Διατομή 1.....	67
Διάγραμμα 5-2 Διάγραμμα $Kt - T$ για το σύνολο των πειραματικών δεδομένων της Διατομής 1.....	67
Διάγραμμα 5-3 Διάγραμμα διασποράς των $Kt,2\alpha - Kt,2\beta$ για την Διατομή 2 με βάθος νερού $h=0,6m$ .....	69
Διάγραμμα 5-4 Διάγραμμα $Kt - T$ για το σύνολο των πειραματικών δεδομένων της Διατομής 2 με βάθος νερού $h=0.6m$ .....	69
Διάγραμμα 5-5 Διάγραμμα διασποράς των $Kt,2\alpha - Kt,2\beta$ για την Διατομή 2 με βάθος νερού $h=0,5m$ .....	70
Διάγραμμα 5-6 Διάγραμμα $Kt - T$ για το σύνολο των πειραματικών δεδομένων της Διατομής 2 με βάθος νερού $h=0.5m$ .....	70
Διάγραμμα 5-7 Διάγραμμα $Kt - T$ για το σύνολο των πειραματικών δεδομένων της Διατομής 2 και με τα 2 βάθη νερού.....	71
Διάγραμμα 6-1 Διάγραμμα διασποράς $Kt,c - Kt,m$ της διατομής 1 (Μοντέλο 1α) για τους Friebel & Harris.	82
Διάγραμμα 6-2 Διάγραμμα διασποράς $Kt,c - Kt,m$ της διατομής 1 (Μοντέλο 1α) για τους Seabrook & Hall.	83
Διάγραμμα 6-3 Διάγραμμα διασποράς $Kt,c - Kt,m$ της διατομής 2 (Μοντέλο 2α) με $F=0.2m$ για τους Friebel & Harris.....	85
Διάγραμμα 6-4 Διάγραμμα διασποράς $Kt,c - Kt,m$ της διατομής 2 (Μοντέλο 2α) με $F=0.2m$ για τους Seabrook &Hall.....	85
Διάγραμμα 6-5 Διάγραμμα διασποράς $Kt,c - Kt,m$ της διατομής 2 (Μοντέλο 2α) με $F=0.1m$ για τους Friebel & Harris.....	87
Διάγραμμα 6-6 Διάγραμμα διασποράς $Kt,c - Kt,m$ της διατομής 2 (Μοντέλο 2α) με $F=0.1m$ για τους Seabrook &Hall.....	87
Διάγραμμα 6-7 Διάγραμμα των τιμών $Kt$ για $F=0.2m$ , $F=0.1m$ που προέκυψαν από τον τύπο Friebel & Harris για την Διατομή 2 / Μοντέλο 2α για τις ίδιες περιόδους.....	88
Διάγραμμα 6-8 Διάγραμμα των τιμών $Kt$ για $F=0.2m$ , $F=0.1m$ που προέκυψαν από τον τύπο Seabrook & Hall για την Διατομή 2 / Μοντέλο 2α για τις ίδιες περιόδους.....	89
Διάγραμμα 6-9.....	91
Διάγραμμα 6-10.....	92
Διάγραμμα 6-11.....	92



## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1 Ενδεικτική διατομή επένδυσης / θωράκισης ακτής ( Καραμπάς Θ., Αλληλεπίδραση ακτών/παράκτιων έργων - έργα και μέθοδοι προστασίας ακτών) .....	27
Εικόνα 2.2 Αρχικές διατομές τεχνητής αναπλήρωσης: (α) στο παραλιακό μέτωπο και (β) στο υποβρύχιο τμήμα της ακτής ( Καραμπάς Θ., Αλληλεπίδραση ακτών/παράκτιων έργων - έργα και μέθοδοι προστασίας ακτών).....	28
Εικόνα 2.3 Μορφολογία ακτογραμμής στην σκιά κυματοθραυστών (Karampas T. et al. “Coastal Engineering – Coastal Protection Structures”, 2015).....	29
Εικόνα 2.4. Τυπική διατομή ύφαλου κυματοθραύστη και μηχανισμοί απώλειας της κυματικής ενέργειας( Καραμπάς Θ., Αλληλεπίδραση ακτών/παράκτιων έργων - έργα και μέθοδοι προστασίας ακτών).....	30
Εικόνα 2.5 Ύφαλος Κυματοθραύστης.....	33
Εικόνα 2.6 Σχηματική αναπαράσταση των μηχανισμών απόσβεσης της ενέργειας πάνω στον κυματοθραύστη (Φωτιά, 2017).....	35
Εικόνα 2.7 Ανύψωση την στάθμης στην υπήνεμη πλευρά ενός βυθισμένου κυματοθραύστη Carlo Lorenzoni (2012).....	36
Εικόνα 3.1 Ποσειδωνία Η Ωκεάνια (Posidonia Oceanica).....	38
Εικόνα 3.2 Τα χαρακτηριστικά μέρη του φύλλου της Ωκεάνιας Ποσειδωνίας (Ciraolo, Ferreri, La Loggia, 2006).....	38
Εικόνα 3.3 Κάποια φυτοφάγα ζώα του λιβαδιού της Ποσειδωνίας: α) βόσκηση (Sarpa salpa), β) τρύπα αριστερά από το ισόποδο Synischia hectica, γ) δείγματα του σκαντζόχοιρου Paracentrothus lividus.( α) Ramón Esteban, (β) Ángel Luque, (γ) έργο MedVeg ) .....	39
Εικόνα 3.4 Το αστέρι του μικρού καπετανίου ((Asterina pancerii). ( Programa de Gestión Sostenible del Medio Marino).....	39
Εικόνα 3.5 Ενδεικτικό απόσπασμα χάρτη απεικόνισης Ποσειδωνίας στο νότιο τμήμα του Ν. Αττικής. (Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων) .....	40
Εικόνα 3.6 Ενδεικτικό υπόμνημα του χάρτη διανομής Ποσειδωνίας. (Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων) .....	41
Εικόνα 3.7 Λιβάδι Ποσειδωνίας πάνω σε ύφαλο - Προστασία της ακτής από διάβρωση και εξασθένιση της υδροδυναμικής ενέργειας. (Jordi Corbera, Praderas y bosques marinos de Andalucía) .....	42
Εικόνα 4.1 Σχηματικός ορισμός των μεταβλητών του προβλήματος (Makris - Memos, 2007) .....	45
Εικόνα 5.1 Κάτοψη της Πειραματικής διάταξης όπου κατασκευάστηκαν τα φυσικά μοντέλα των ύφαλων κυματοθραυστών που εξετάζονται στην παρούσα εργασία (Ιωάννης Ρούπας, 2018) .....	58
Εικόνα 5.2 Ύφαλος Διαπερατός Κυματοθραύστης από λιθορριπή – Διατομή 1 / Μοντέλο 1α .....	59
Εικόνα 5.3 Ύφαλος Διαπερατός Κυματοθραύστης από λιθορριπή με λειμώνα Ποσειδωνίας στην στέψη του – Διατομή 1 / Μοντέλο 1β.....	59
Εικόνα 5.4 Ύφαλος Διαπερατός Κυματοθραύστης από λιθορριπή – Διατομή 2 / Μοντέλο 2α για βάθος νερού ίσο με 0,6m .....	60
Εικόνα 5.5 Ύφαλος Διαπερατός Κυματοθραύστης από λιθορριπή με λειμώνα Ποσειδωνίας στην στέψη του – Διατομή 2 / Μοντέλο 2β.....	61



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

---

Με την πάροδο των χρόνων η κλιματική αλλαγή επιτάσσει ολοένα και περισσότερο την κατασκευή ήπιων έργων προστασίας των παράκτιων περιοχών με τη λιγότερο δυνατή αρνητική επίδραση στο περιβάλλον. Για το λόγο αυτό τελευταία, η σημασία των ύφαλων διαπερατών κατασκευών ως έργα προστασίας ήπιας μορφής αυξάνεται σταθερά λόγω των περιβαλλοντικών πλεονεκτημάτων τους έναντι των έξαλλων κατασκευών. Μειώνοντας ικανοποιητικά την κυματική ενέργεια στην υπήνεμη πλευρά και μη προκαλώντας οπτική όχληση στο φυσικό τοπίο, πρωταγωνιστούν ως κατασκευαστικές λύσεις στην παράκτια ζώνη ενώ παράλληλα η συμπεριφορά τους διερευνάται συνεχώς πειραματικά ώστε να βελτιωθούν ακόμα περισσότερο.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εξετάζεται το φαινόμενο της κυματικής μετάδοσης πίσω από διατομές ύφαλων διαπερατών κυματοθραυστών στατικά ευσταθών (Υ.Δ.Κ.), με ή χωρίς Ποσειδωνία στη στέψη τους.

Η κυματική μετάδοση ποσοτικοποιείται μέσω του συντελεστή κυματικής μετάδοσης  $K_t$ , που ορίζεται ως ο λόγος του μεταδιδόμενου ύψους κύματος  $H_t$  προς το εισερχόμενο ύψος κύματος  $H_i$ . Έχει αποδειχθεί πως ο συντελεστής μετάδοσης  $K_t$  εξαρτάται από μία σειρά μεταβλητών που σχετίζονται είτε με τον κυματισμό είτε με την κατασκευή, όπως το  $H_i$ , το εισερχόμενο μήκος κύματος  $L_i$ , το πλάτος στέψης  $B$ , το ελεύθερο βάθος θάλασσας  $F$  πάνω από τον Υ.Κ. και το πορώδες  $n$  του Υ.Κ. Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετοί διαθέσιμοι ημι-εμπειρικοί τύποι υπολογισμού του  $K_t$  για Υ.Δ.Κ., που λαμβάνουν υπόψη στις εξισώσεις τους μια σειρά αδιάστατων σημαντικών παραμέτρων, με πιο συχνή το σχετικό ελεύθερο βάθος  $F/H_i$ . Παρόλα αυτά για την πλειοψηφία των προτεινόμενων αριθμητικών μοντέλων, περιορισμοί στο πεδίο εφαρμογής τους καθώς και η ημι-εμπειρική φύση τους εγείρουν ζητήματα χρήσης τους και αξιοπιστίας στο σχεδιασμό Υ.Κ.

Για τις ανάγκες της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, και συγκεκριμένα για τη διερεύνηση του συντελεστή κυματικής μετάδοσης πίσω από λιθόρριπτους ύφαλους διαπερατούς κυματοθραύστες με παρουσία λειμώνα Ποσειδωνίας στη στέψη τους, αξιοποιήθηκαν οι πειραματικές μετρήσεις που συλλέχθηκαν από τη διεξαγωγή των πειραμάτων των Ziros & Memos (2019), Repousis & Memos (2019), και ειδικότερα αυτές που αντιστοιχούν σε περιπτώσεις μονοχρωματικών κυματισμών.

Σε γενικές γραμμές από τα πειράματα παρατηρήθηκε μεγαλύτερη μείωση του  $K_t$  στην υπήνεμη πλευρά των Υ.Δ.Κ. που στη στέψη τους είχαν Ποσειδωνία σε σχέση με τις διατομές που δεν είχαν, το οποίο ήταν και αναμενόμενο.

Από τα αριθμητικά μοντέλα που εξετάστηκαν, διερευνήθηκαν λεπτομερώς δύο ημι – εμπειρικοί τύποι περαιτέρω, ώστε να αξιολογηθούν ως προς την αξιοπιστία τους σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα. Οι δύο αυτοί τύποι είναι των Friebel and Harris (2003) και των Seabrook and Hall (1998).

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των αριθμητικών μοντέλων και των μετρήσεων χαρακτηρίζεται απέδειξε μια αξιοπιστία ικανοποιητικού βαθμού των παραπάνω ημι – εμπειρικών σχέσεων.

Τέλος πραγματοποιήθηκε μια διερεύνηση πιθανότητας τροποποίησής τους ώστε να λαμβάνουν υπόψιν περιπτώσεις με Ποσειδωνία.



## ABSTRACT

---

### Introduction

Nowadays, the need for protecting the shore from wave action is one of the most frequent yet complex issues scientists, engineers, and managers have to deal with. Considering past experience, conventional installations as emerged shore-parallel breakwaters have been widely applied in defying beach erosion. Despite the overall acceptability of introducing such structures in the coastal zone, it has been observed that they are usually followed by a significant environmental impact, including low level of water renewal, degradation of the aesthetic value of the landscape, occupation of relatively large seabed areas etc.

As environmental awareness gradually increases, submerged breakwaters have become a shore protection alternative aiming in confining such side effects most effectively in micro-tidal environments (Mediterranean Sea, Baltic Sea and Caribbean) of up to average exposure. Beyond the basic goal in protecting the coast, it has been deduced that especially permeable rubble mound submerged breakwaters (SPBs) may function similarly to natural reefs as they tend to attract marine life. Lately, as the acceptance of permeable submerged structures due to their environmental merit over emerged breakwaters is steadily increasing, new methods are investigated for further improvement of their technical and ecological efficiency by proposing submerged structures with presence of *Posidonia Oceanica* over their crest.

This study focus on the technical efficiency of rubble-mound submerged permeable breakwaters with presence of *Posidonia Oceanica* over their crest, and quantitative investigation is performed in terms of wave transmission coefficient. According to the literature, two main mechanisms in reducing notably wave energy are generated over submerged permeable bars: wave breaking and friction. Especially for porous structures the fluid flow through the voids induce significant friction due to turbulent flow within their core (Metallinos *et al.* 2016). There are indications that positioning *Posidonia Oceanica* over SPBs increases the reduction of wave energy propagating over them further probably by intensifying the effect of these phenomena.

Based on the above assumptions this study was performed considering both experimental data and semi-empirical models found in the literature that are proposed for SPBs. Main goals were primarily to determine the contribution of *Posidonia Oceanica* on the technical efficiency of SPBs, through a comparative study from experiments covering both cases for similar wave climate and sea conditions, and secondly to examine the possibility of modifying the existing semi-empirical models in order to include the addition of *Posidonia Oceanica* in their results.

## Description of the experimental model set-ups

Experimental data needed for conducting this study, were gathered by a previous laboratory investigation on rubble mound trapezoidal submerged permeable breakwaters (SPBs) with presence of a *Posidonia Oceanica* meadow over their crest. The relevant set-ups that were used for this thesis are summarized below.

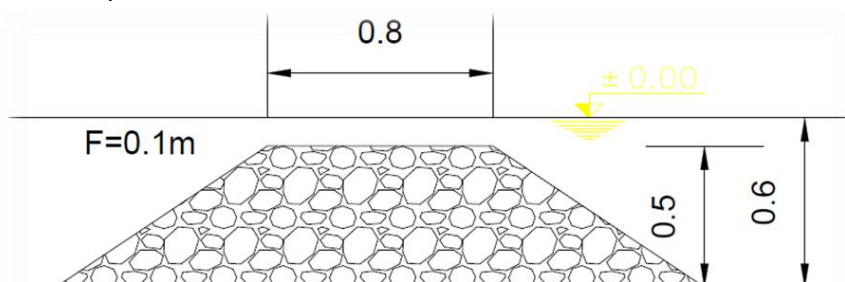
- Laboratory measurements of wave transmission coefficient ( $K_t$  for various cases of sea state), induced by regular waves' action over a series of SPB 2D models, of a scale roughly to 1:10, with steep seaward and leeward slope, with or without *Posidonia Oceanica* covering their crest, in a canal constructed inside a wave basin (Ziros & Memos 2019, Repousis & Memos 2019). In their studies they calculated wave transmission coefficients that were acquired for investigation within this work, through measurements of free surface elevation obtained by using two twin-wired wave gauges positioned at around 1.0 meter from the windward and leeward of the models respectively.

Specifically, the experiments were conducted in the 3-dimensional basin in the Laboratory of Harbor Works at National Technical University of Athens, Greece. The models were constructed subsequently between two metal sheets 4.00 m long, placed at a distance of 0.80 m from each other and vertically to a wider canal of 7.00 m width and 22.00 m length so that each SPB section had a width of 0.80 m. Further details for the canal configuration inside the basin can be found in the study by Memos *et al.* 2018 as the SBP models addressed herein were constructed in the same experimental canal facility. Additional information for SPB cases' constructional details for similar experiments with or without sea-grass can be found in the study by Ioannis Roupas (2018), who also used the same canal for measuring wave transmission coefficients.

Details of the physical models' set-ups (4 models in total) are mentioned below.

**Model 1a:** Submerged permeable rubble mound breakwater.

The height of the model was 0.50 m and the crest width 0.80 m. The structure's material was natural stones with  $d_{50} \approx 0.12$  m and sloping 1:1.5 at both sides. The mean water level was at 0.60 m. Wave conditions were ranging in terms of characteristic wave height between 0.028-0.113 m, and for wave periods between 1,024-1,706 sec.



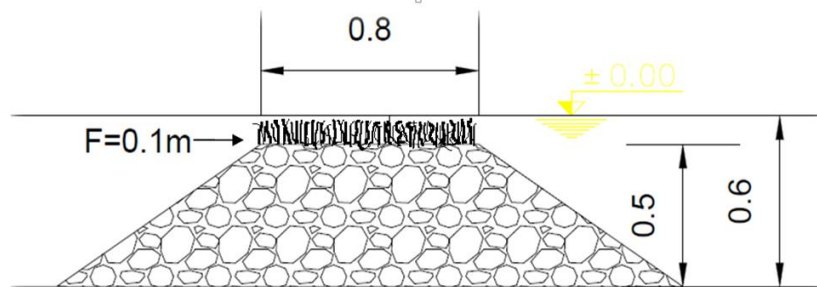
- Permeable Submerged Rubble Mound Breakwater / Model 1a

**Model 1b:** Submerged permeable rubble mound breakwater with placement of a *Posidonia Oceanica* meadow over its crest.

The overall geometry of the structure, sea state and experimental set-up followed Model 1a. Experimental modelling of *Posidonia Oceanica* was applied by pegging individual rhizomes of a mean 2 cm diameter with leaf clusters reduced to a 0.15 m average length (vertical foliar shoots

collected from a natural marine sea-grass bed), on a plastic 2 cm netting mesh (mean sea-grass density of 150 stems per  $m^2$ ) of a total area equal to the crest area of the model which was held with a few stones on top of it.

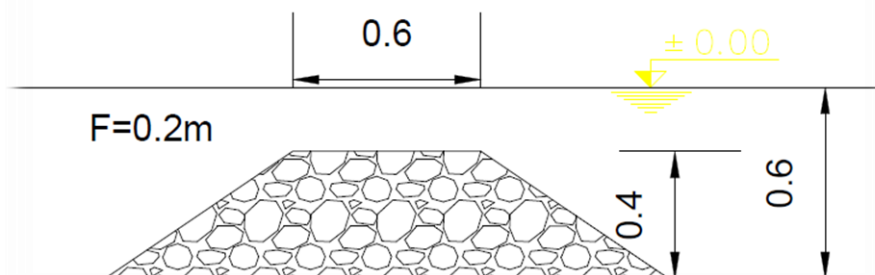
In the under-scaled design of the submerged breakwater-Posidonia set-up following Froude scaling similarity, Ziros & Memos (2019) used real plant parts as one of their main targets was to represent experimentally the plant's wave interaction and friction induced phenomena by keeping its natural properties such as roughness, rigidity, elasticity, movement pattern to wave-flow, etc. In order for the Posidonia Oceanica bed to cope in terms of length scale with that of the rubbles and sea state reasonably (roughly to a scale of 1:10), the experimental meadow was modelled by managing the grid distance of the rhizomes, their mean diameter and density as described above, but also the mean length and number of the leaves on each stem, aiming in resulting simultaneously to a similar agreeable scale for the overall plant-water contact surface.



- Permeable Submerged Rubble Mound Breakwater / Model 1b

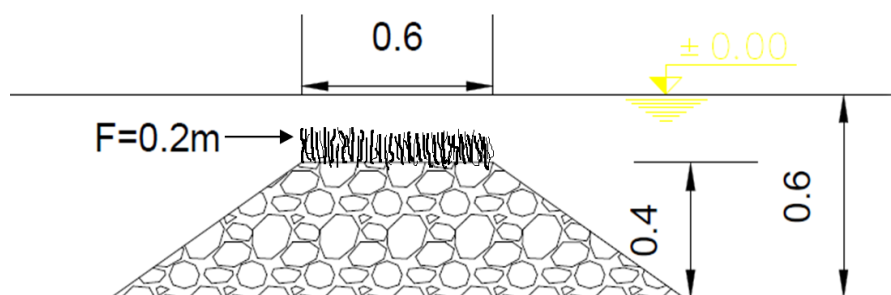
#### **Model 2a:** Submerged permeable rubble mound breakwater

The height of the physical model was 0.40 m and the crest width 0.60 m. The structure's material was natural stones with  $d_{50} \approx 0.12$  m and sloping 1:1.5 at both sides. Two mean water levels were examined at 0.50 and 0.60 m. Wave conditions were ranging in terms of characteristic wave height between 0.033-0.15 m, and for wave periods between 1,024-2,048 sec.



- Permeable Submerged Rubble Mound Breakwater / Model 2a

**Model 2b:** Submerged permeable breakwater with introduction of a Posidonia Oceanica meadow over its crest. The overall geometry of the structure, sea state and experimental set-up followed Model 2a. Experimental modeling of Posidonia Oceanica was applied likewise model 1b.

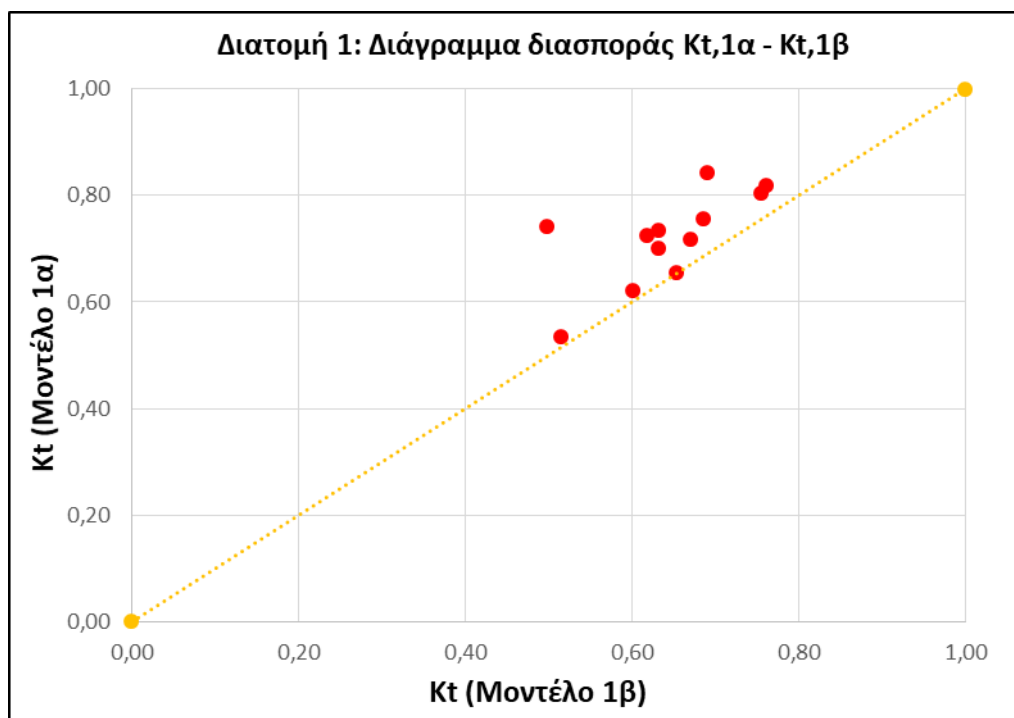


- Permeable Submerged Rubble Mound Breakwater / Model 2b

### Analysis of the experimental data and comparison with semi-empirical numerical models

The experimental data that were sorted out from Ziros & Memos (2019) and Repousis & Memos (2019) works, were considered satisfactory for a preliminary examination, on both a verification study of semi-empirical models found in the literature for estimating wave transmission coefficient behind SPBs, as well as the contribution of the marine plant meadow on top of the SPBs to their technical efficiency. Last, the information comparing  $K_t$  for similar sea states between the two types of SPBs (with or without the sea-grass), was used to examine the possibility of modifying existing semi-empirical models of certain reliability for the SPBs addressed herein; i.e. if they could incorporate adequately the contribution of an added *Posidonia Oceanica* bed over a SPB crest in their numerical calculations and results of  $K_t$ .

At this point it should be noted that semi-empirical models for the case of SPBs with *Posidonia Oceanica* have not been presented yet. Due to lack of adequate experimental data that can be found in the literature, the proposal of a relevant new reliable numerical model covering a series for SPBs with seagrass over their crest, was not possible within this work. For this reason the possibility for proposing such a module was approached by investigating the behavior of the existing semi-empirical models for SPBs in order to use them as a base, by making the assumption of a similar behavior for SPBs of the same layout with or without a bed of *Posidonia Oceanica* covering their crest. Specifically for the proposed model that was found to be the most reliable according to the experimental data for SPBs within this work, targeted calibrations were attempted to its structure in order to examine the possibility of producing a reliable modification that could capture the presence of *Posidonia Oceanica*.



Διάγραμμα 0-1 Διάγραμμα διασποράς των  $K_{t,1\alpha} - K_{t,1\beta}$  για την Διατομή 1

## Conclusions

Considering the experimental data the conclusions can be summoned below:

- The wave transmission coefficients ( $K_t$ ) that were derived from the experimental data for the models 1b and 2b (sections with presence of *Posidonia Oceanica*) were smaller than those for the relevant SPBs models 1a and 2a for the same wave conditions and sea state.
- Specifically for **Section 1** ( $b=0.8\text{m}$ ,  $h=0.6\text{m}$ ,  $h'=0.5\text{m}$ ) the reduction of  $K_t$  for the layout with the *Posidonia Oceanica* reached up to 30%.
- For **Section 2** ( $b=0.6\text{m}$ ,  $h=0.6\text{m}$  &  $h=0.5\text{m}$ ,  $h'=0.4\text{m}$ ) it was observed that for increased freeboard ( $h=0.6\text{m}$ ), the wave transmission coefficients ( $K_t$ ) did not present the same percentage of reduction as for the smaller one freeboard ( $h=0.5\text{m}$ ).
- Between the model 1b and 2b with water depth of 0.5 m, better technical efficiency had the model 1b. The main reason is because of its largest crest width and overall volume.
- Last for all physical models was observed a tendency for significant wave energy reduction for certain wave period and of certain wave height.

Considering the comparison of the experimental data and with semi-empirical numerical models the main conclusions are mentioned below:

- The majority of the semi empirical models that were investigated in this work could not reproduce sufficiently the experimental wave transmission coefficients ( $K_t$ ).

- Those that presented the best behavior and degree of a certain reliability were the Friebel and Harris, and Seabrook and Hall numerical models. However they could not cover adequately all the wave scenarios.
- Specifically for the Friebel and Harris numerical model, the cases that could not be reproduced with accuracy were those for waves of significant wave height for some wave periods without a clear tendency of their influence on these certain miscalculation. The same was observed also for Seabrook and Hall numerical model.
- In general, the Friebel and Harris numerical model was the most reliable.
- Last, the investigation of the possibility of modifying reasonably Friebel and Harris model and proposing a new equation integrating Posidonia Oceanica effect on  $K_t$  led to the conclusion that this could not be achieved due to the structure of the initial equation. This is probably because of the underestimation of the phenomena that are connected to the porosity and the roughness of the structure with wave energy reduction that led Friebel and Harris to neglect extreme values of  $K_t$  by proposing best fit curves.

## 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

### 1.1 Αντικείμενο και σκοπός της εργασίας

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, μελετώνται βυθισμένοι κυματοθραύστες, και συγκεκριμένα εξετάζεται η συμπεριφορά του συντελεστή κυματικής μετάδοσης  $K_t$  πίσω από τα έργα αυτά με ή χωρίς την παρουσία βλάστησης Ποσειδωνίας στην στέψη τους.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι αρχικά η αξιολόγηση ημι-εμπειρικών τύπων, από την υπάρχουσα βιβλιογραφία που υπολογίζουν το συντελεστή κυματικής μετάδοσης πίσω από ύφαλους διαπερατούς κυματοθραύστες συγκρίνοντάς τους με αποτελέσματα από κατάλληλες εργαστηριακές προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Λιμενικών Έργων του Ε.Μ.Π. Για το βήμα αυτό τα πειράματα που αξιοποιήθηκαν αφορούσαν βυθισμένες διαπερατές τραπεζοειδής λιθόρριπτες κατασκευές χωρίς την παρουσία ποσειδωνίας στη στέψη τους.

Στη συνέχεια, έγινε σύγκριση των συντελεστών κυματικής μετάδοσης που προέκυψαν από τα πειράματα αυτά, με τους συντελεστές κυματικής μετάδοσης που εξήχθησαν από τα αντίστοιχα πειράματα των Υ.Κ. με ποσειδωνία στην στέψη τους, δηλαδή πραγματοποιήθηκε η σύγκριση των συντελεστών  $K_t$  που εξήχθησαν από τα πειράματα με και χωρίς Ποσειδωνία.

Στο σημείο αυτό τονίζεται πως γενικά οι συντελεστές κυματικής μετάδοσης  $K_t$  που εξάγονται από πειράματα με την παρουσία Ποσειδωνίας δεν μπορούν να συγκριθούν με αυτούς των εμπειρικών τύπων καθώς κανένα μοντέλο δεν ενσωματώνει την Ποσειδωνία ως παράμετρο υπολογισμού.

Εν κατακλείδι και με βάση τα όσα αναφέρθηκαν ανωτέρω, μετά από την αξιολόγηση της συμπεριφοράς των ημι-εμπειρικών τύπων και την επιλογή του καταλληλότερου με βάση τα αποτελέσματά του, καθώς και από την σύγκριση των πειραματικών συντελεστών κυματικής μετάδοσης με και χωρίς παρουσία ποσειδωνίας στη στέψη τους έγινε μια διερεύνηση πιθανής τροποποίησής του ώστε να καλύπτει και περιπτώσεις ύφαλων κατασκευών με παρουσία ποσειδωνίας στη στέψη τους.

## 1.2 Διάρθρωση της εργασίας

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία αποτελείται από οκτώ (8) κεφάλαια συνολικά συμπεριλαμβανομένου και αυτό της παρούσας εισαγωγής.

Στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο αναφέρονται κάποιες μέθοδοι προστασίας ακτών και περιγράφεται η σημασία και ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά των βυθισμένων κυματοθραυστών.

Στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο πραγματοποιείται βιβλιογραφική αναφορά στην Ποσειδωνία την Ωκεάνια (Poseidonia Oceanica) και τονίζεται η περιβαλλοντική της σημασία, η συμβολή της στην προστασία των ακτών και η συμμετοχή της στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία.

Στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο περιγράφεται αρχικά το φαινόμενο της κυματικής μετάδοσης πίσω από ύφαλο κυματοθραύστη και οι βασικές παράμετροι που την επηρεάζουν ενώ στη συνέχεια παρατίθενται ορισμένοι ημι-εμπειρικοί τύποι για τον υπολογισμό του συντελεστή της  $K_t$ .

Στο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο αρχικά γίνεται η περιγραφή των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Λιμενικών Έργων του Ε.Μ.Π. για πειράματα ύφαλων διαπερατών κυματοθραυστών με ή χωρίς Ποσειδωνία στη στέψη τους και χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, και στη συνέχεια ακολουθεί η διαδικασία ανάλυσης των πρωτογενών αυτών δεδομένων για την αξιοποίησή τους στο πλαίσιο της εργασίας αυτής.

Στο 6<sup>ο</sup> Κεφάλαιο παρουσιάζεται η συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των αριθμητικών μοντέλων που εξετάστηκαν σε σχέση με τις πειραματικές μετρήσεις των διατομών χωρίς ποσειδωνία. Για το αριθμητικό μοντέλο που παρουσίασε την καλύτερη αξιοπιστία συγκρινόμενο με τις πειραματικές μετρήσεις για τους ύφαλους διαπερατούς κυματοθραύστες, εξετάστηκε η δυνατότητα τροποποίησής του ώστε να λαμβάνει υπόψη στους υπολογισμούς του και την επίδραση της ποσειδωνίας στην στέψη των κατασκευών.

Στο 7<sup>ο</sup> Κεφάλαιο πραγματοποιείται σύγκριση των πειραματικών μετρήσεων για ύφαλους διαπερατούς κυματοθραύστες με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των ημι-εμπειρικών τύπων από τη διεθνή βιβλιογραφία. Στη συνέχεια με κριτήριο την αξιολόγηση του βαθμού αξιοπιστίας τους για τα εν λόγω πειράματα διατυπώνονται συμπεράσματα, σχόλια και παρατηρήσεις

Στο 8<sup>ο</sup> Κεφάλαιο αναφέρονται κάποιες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα της διαφορετικής συμπεριφοράς διαπερατών και αδιαπερατών Υ.Κ. με ή χωρίς παρουσία Ποσειδωνίας, ως προς το φαινόμενο της κυματικής μετάδοσης.

Τέλος αναφέρονται όλες οι βιβλιογραφικές πηγές και οι ιστοσελίδες από τις οποίες αντλήθηκαν πληροφορίες για την εκπόνηση της εργασίας.



## 2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΑΚΤΩΝ - ΥΦΑΛΟΙ ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΕΣ

---

### 2.1 Προστασία ακτών και ύφαλοι κυματοθραύστες (Υ.Κ.)

Με την πάροδο των χρόνων έχει καταστεί επιτακτική η ανάγκη της αντιμετώπισης των επιπτώσεων που φέρει, στην καθημερινότητά και στη διαβίωση όλων, η κλιματική αλλαγή και η υποβάθμιση του περιβάλλοντος. Αύξηση θερμοκρασιών, εμφάνιση έντονων καιρικών φαινομένων συχνότερα από ότι στο παρελθόν, άνοδος της στάθμης της θάλασσας είναι μόνο κάποιες από τις συνέπειες της μεταβολής αυτής του κλίματος. Άμεσα αποτελέσματα αυτών πλέον είναι οι πλημμύρες και η παράκτια διάβρωση που κάνει αισθητή την παρουσία της στις ακτές.

Εξαιτίας των αυξανόμενων πιέσεων επί των ακτών, η ανάγκη για ορθό σχεδιασμό των ακτομηχανικών έργων προστασίας, που θα λαμβάνει υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε περιοχής και θα ελαχιστοποιεί τις πιθανότητες αστοχίας, αυξάνεται ολοένα τα τελευταία χρόνια. Σε περίπτωση αστοχίας, η παρέμβαση και διόρθωση ενός λανθασμένου σχεδιασμού συνοδεύεται από υψηλό κόστος, ενώ απρόβλεπτες συνέπειες στην υπό προστασία ακτή και πέριξ αυτής μπορεί να επιφέρουν δύσκολα διαχειρίσιμες καταστάσεις. Βασικό μέλημα λοιπόν και ταυτόχρονα πρόβλημα είναι η εξαγωγή εμπειρικών ή ημιεμπειρικών καθοριστικών μοντέλων τόσο για την αποτύπωση της δυναμικής ενός συστήματος κάθε αυτού όσο και για την πρόβλεψη της επιτυχούς ή μη λειτουργίας των κατασκευών αυτών. Ενώ στη φάση αρχικής διερεύνησης και προσομοίωσης των υποψηφίων έργων, η εφαρμογή αναλυτικών μεθόδων (μαθηματικά μοντέλα, εμπειρικές σχέσεις) είναι το κατάλληλο εργαλείο, στη φάση τελικής επιλογής του σχήματος παράκτιας προστασίας που πρόκειται να κατασκευαστεί η μελέτη σε φυσικό ομοίωμα στο εργαστήριο είναι περισσότερο από επιβεβλημένη.

Συνεπώς, η κατασκευή καταλλήλων έργων ακτομηχανικής προστασίας είναι εξαιρετικά σημαντική για την ελαχιστοποίηση των προαναφερθέντων προβλημάτων που ενδέχεται να προκύψουν και που μειώνουν τη λειτουργικότητα της ακτής.

Τα τεχνικά έργα προστασίας των ακτών μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με το μέγεθος της επίδρασής τους και στο φυσικό περιβάλλον: σε σκληρές και σε ήπιες μορφές προστασίας των ακτών.

Παρακάτω περιγράφονται επιγραμματικά οι σκληρές και οι ήπιες μέθοδοι προστασίας ακτών:

## **Σκληρές Μέθοδοι Προστασίας Ακτών**

- **Κατασκευή Παράκτιων Τοίχων**

Οι Παράκτιοι Κατακόρυφοι Τοίχοι εμποδίζουν ως ένα βαθμό την διάβρωση της ακτής και έχουν σκοπό την προστασία της παράκτιας ζώνης αλλά και άλλων τεχνικών έργων, όπως έργα οδοποιίας, επιχειρήσεις, κατοικίες κ.λ.π. Επιπλέον αποτελούν την προστασία της παράκτιας ζώνης από πλημμύρες λόγω μετεωρολογικής παλίρροιας.

- **Κατασκευή Συστήματος Παράλληλων Κυματοθραυστών**

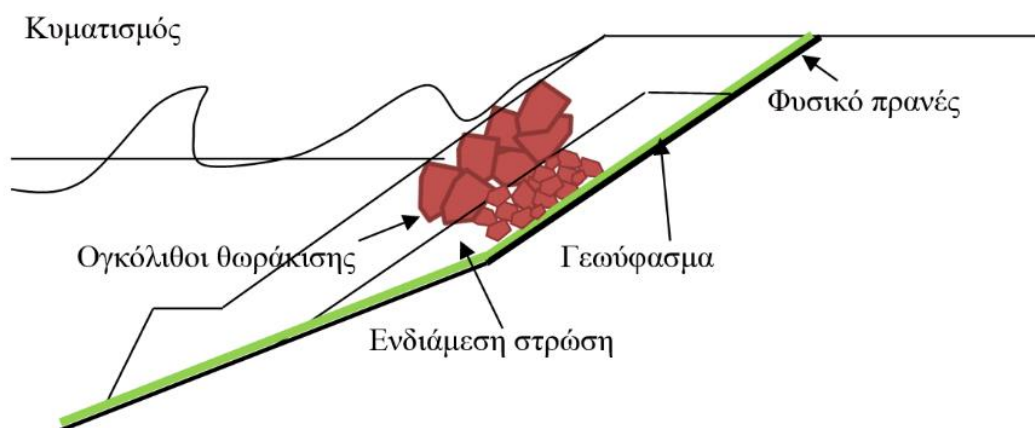
Κατασκευάζονται σε βάθη 2 έως 5 m (σε απόσταση από την ακτή μεγαλύτερη του μήκους τους) με κενά ανάμεσά τους που κυμαίνονται από ½ έως 5 φορές το μήκος τους. Μπορεί να κατασκευαστούν και με κλίση ως προς την ακτογραμμή με προσανατολισμό κάθετα στην κύρια διεύθυνση των κυματισμών.

- **Κατασκευή Βραχιόνων**

Είναι έργα κάθετα στην ακτή με μικρή κλίση προς τα κατάντη (σε σχέση με την κατεύθυνση της παράκτιας στερεομεταφοράς) που σκοπό έχουν την κατακράτηση άμμου και την ενίσχυση αμμωδών ακτών. Οι βραχίονες μπορούν να κατασκευαστούν από πρόχειρα υλικά και να έχουν μήκος που θα εκτείνεται σε όλο το πλάτος της ζώνης θραύσεως, προκαλώντας έτσι μερική ή ολική διακοπή της παράκτιας στερεοπαροχής.

- **Επενδύσεις Ακτών**

Οι θωρακίσεις (επενδύσεις) των ακτών, όπως και οι παράκτιοι τοίχοι αντιστήριξης πρανών, κατασκευάζονται πάνω στην ακτή με σκοπό να αποφευχθεί η διάβρωση της ακτής αλλά και να προστατευτούν οι υποδομές και οι παράκτιοι οικισμοί από τις πλημμύρες, κάτω από συνθήκες ακραίων ή έντονων καιρικών φαινομένων συνδυασμένης αναρρίχησης κυματισμών και ανόδου της στάθμης της θάλασσας. Οι θωρακίσεις ακτών κατασκευάζονται συνήθως από λιθορριπές από φυσικούς ή τεχνητούς ογκόλιθους. Οι τραχείς επιφάνειες εμποδίζουν την αναρρίχηση των κυματισμών. Ταυτόχρονα, η διατομή διαμορφώνεται με κατάλληλη διαβάθμιση (ενδιάμεση στρώση-φίλτρο) και γεώφασμα, ώστε να αποφευχθεί η διάβρωση του φυσικού πρανούς της ακτής, εξασφαλίζοντας έτσι τη σταθερότητά της (Εικόνα 2.1).



Εικόνα 2.1 Ενδεικτική διατομή επένδυσης / θωράκισης ακτής (Καραμπάς Θ., Αλληλεπίδραση ακτών/παράκτιων έργων - έργα και μέθοδοι προστασίας ακτών)

### Ήπιες Μέθοδοι Προστασίας Ακτών

- Βυθισμένοι ή Ύφαλοι Κυματοθραύστες

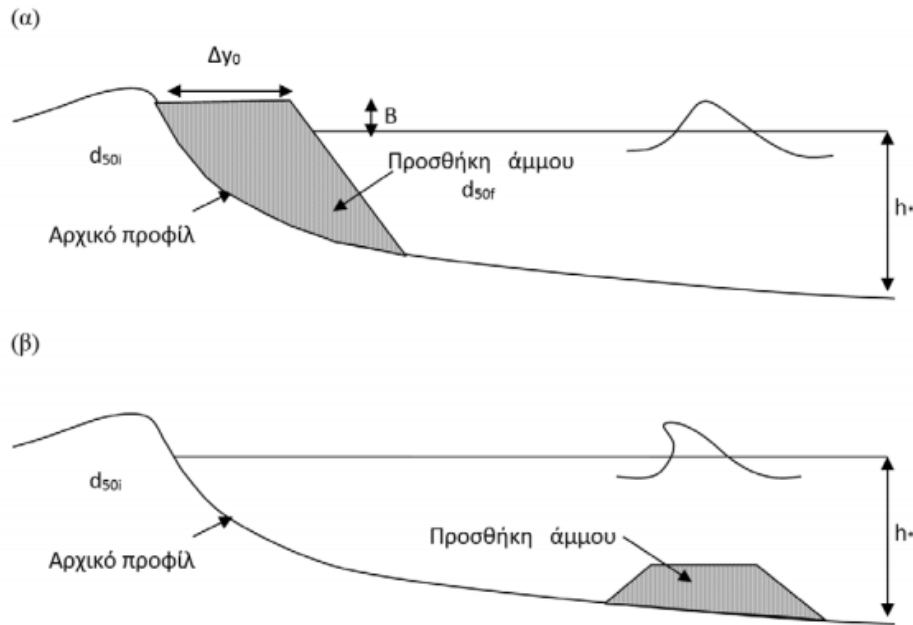
Οι κυματοθραύστες χαμηλής στέψης κατασκευάζονται συνήθως από λιθορριπή και ογκόλιθους, αλλά και από σκυρόδεμα. Κατασκευάζονται επίσης από σωλήνες γεωυφάσματος που είναι πληρωμένοι με άμμο, για να μειωθεί ο κίνδυνος για τους λουόμενους και τα σκάφη. Η στέψη τους βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας ή και πλησίον της ίσαλης γραμμής επιτρέποντας τον κυματισμό να τους υπερπηδά και να διαδίδεται κατάντη.

- Πλωτοί Κυματοθραύστες

Οι πλωτοί κυματοθραύστες αποτελούν βιομηχανικά παραγόμενες κατασκευές από πλαστικό ή σπλισμένο σκυρόδεμα υπό μορφή λεπτότοιχου κιβωτίου, οι οποίες συνήθως χρησιμοποιούνται για την κυματική προστασία ημιπροστατευμένων παράκτιων ζωνών.

- Τεχνητή Αναπλήρωση Ακτής

Σε αυτήν την περίπτωση γίνεται απόθεση άμμου που έχει αντληθεί σε μεγάλο βάθος από τη θάλασσα είτε από τη στεριά είτε ακόμα και από δανειοθαλάμους στην ξηρά και θεωρείται μια περιβαλλοντικά φιλική και «ήπια» μέθοδος αντιμετώπισης της διάβρωσης των ακτών αφού αντικαθιστάται το υλικό που διαβρώνεται. Η τεχνητή αναπλήρωση μπορεί να εφαρμοστεί και στο υποβρύχιο τμήμα της ακτής, διαμορφώνοντας έναν επιμήκη παράλληλο στην ακτή τεχνητό ύφαλο ( ). Ο ύφαλος αυτός αφενός προστατεύει την ακτή, αφετέρου ταυτόχρονα εκτιμάται ότι, κάτω από ήπιες κυματικές συνθήκες εναπόθεσης, θα μεταφερθεί άμμος προς την ακτή διαμορφώνοντας ένα θερινό προφίλ.



Εικόνα 2.2 Αρχικές διατομές τεχνητής αναπλήρωσης: (α) στο παραλιακό μέτωπο και (β) στο υποβρύχιο τμήμα της ακτής (Καραμπάς Θ., Αλληλεπίδραση ακτών/παράκτιων έργων - έργα και μέθοδοι προστασίας ακτών)

Από τα παραπάνω, η βασική κατηγορία παράκτιων έργων ήπιας μορφής που ερευνάται εκτενώς έχοντας ως βασικό στόχο την αντιμετώπιση των διαβρωτικών φαινομένων και με γνώμονα πάντα την ανάγκη για σεβασμό προς το περιβάλλον, λαμβάνοντας υπόψη την αισθητική αξία του παράκτιου τοπίου και την ελαχιστοποίηση της οπτικής όχλησης, είναι οι κατασκευές χαμηλής στέψης ή low crested structures (LCS) και ειδικότερα οι **Ύφαλοι Κυματοθραύστες (Υ/Κ)**.

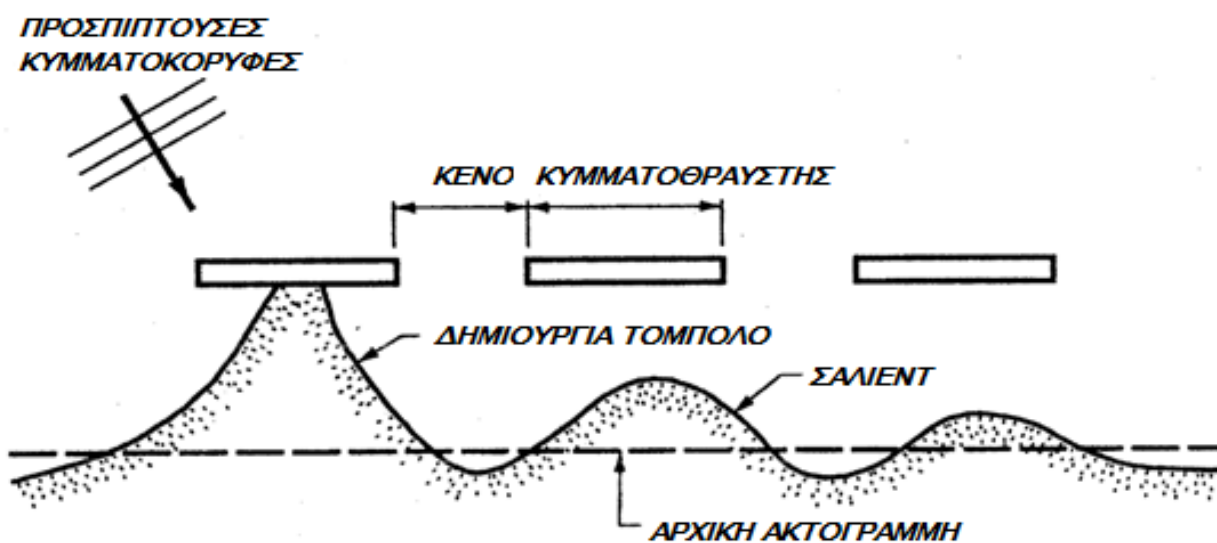
Οι LCS απομακρυσμένοι σε κατάλληλο μήκος από την ακτή και προσανατολισμένοι παράλληλα προς αυτή, είναι στην ουσία «φράγματα» των οποίων η στέψη είναι κάτω από το νερό, σε επαφή με αυτό ή ελαφρώς αναδυόμενη, έτσι ώστε να μπορεί να ξεπεραστεί εύκολα από τα εισερχόμενα κύματα. Κατασκευάζονται συνήθως από λιθορριπή και ογκόλιθους αλλά και από σκυρόδεμα.

Η παρουσία των χαμηλών κυματοθραυστών, δημιουργεί μια ζώνη μειωμένης κυματικής ενέργειας στην υπήνεμη πλευρά τους και στοχεύει στην ελάττωση της διάβρωσης. Η απόσβεση της κυματικής ενέργειας πραγματοποιείται μέσω της θραύσης πάνω στην κατασκευή ή/και μέσω των τυρβωδών ροών στην επιφάνεια (τριβή) και της ροής στο πορώδες. Ο συντελεστής

ανάκλασης είναι της τάξης του 20%, ενώ ο συντελεστής μετάδοσης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες που σχετίζονται με την απώλεια ενέργειας.

Η παρουσία τους παράλληλα στην ακτή δημιουργεί μια προστατευόμενη περιοχή όπου μειώνεται η διαβρωτική εγκάρσια δράση των κυματισμών. Κατασκευάζονται μεμονωμένοι ή ως σύστημα κυματοθραυστών με κενά ανάμεσά τους, σε βάθη μεγαλύτερα των 3-4 m, συνήθως σε περιοχές με μικρό εύρος παλίρροιας (Μεσόγειος Θάλασσα).

Τα ιζήματα της παράκτιας ζώνης, καθώς μετακινούνται κατά μήκος της ακτής προσεγγίζουν την προστατευμένη από τους κυματοθραύστες περιοχή και απουσία δυνάμεων ικανών να συντηρήσουν την κίνηση τους, τελικώς αποτίθενται στην περιοχή αυτή. Έτσι, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των κυμάτων και των ρευμάτων που τελικώς φθάνουν κατόπιν των εμποδίων, δημιουργούνται στην ακτή απλές προεξοχές (salients) ή tombolos (Εικόνα 2.3) από τα συσσωρευμένα ιζήματα. Οι απλές προεξοχές είναι τριγωνικής περίπου μορφής εδαφικές επεκτάσεις της αρχικής ακτογραμμής, ενώ στην περίπτωση των tombolos, οι επεκτάσεις αυτές φθάνουν μέχρι το έργο.



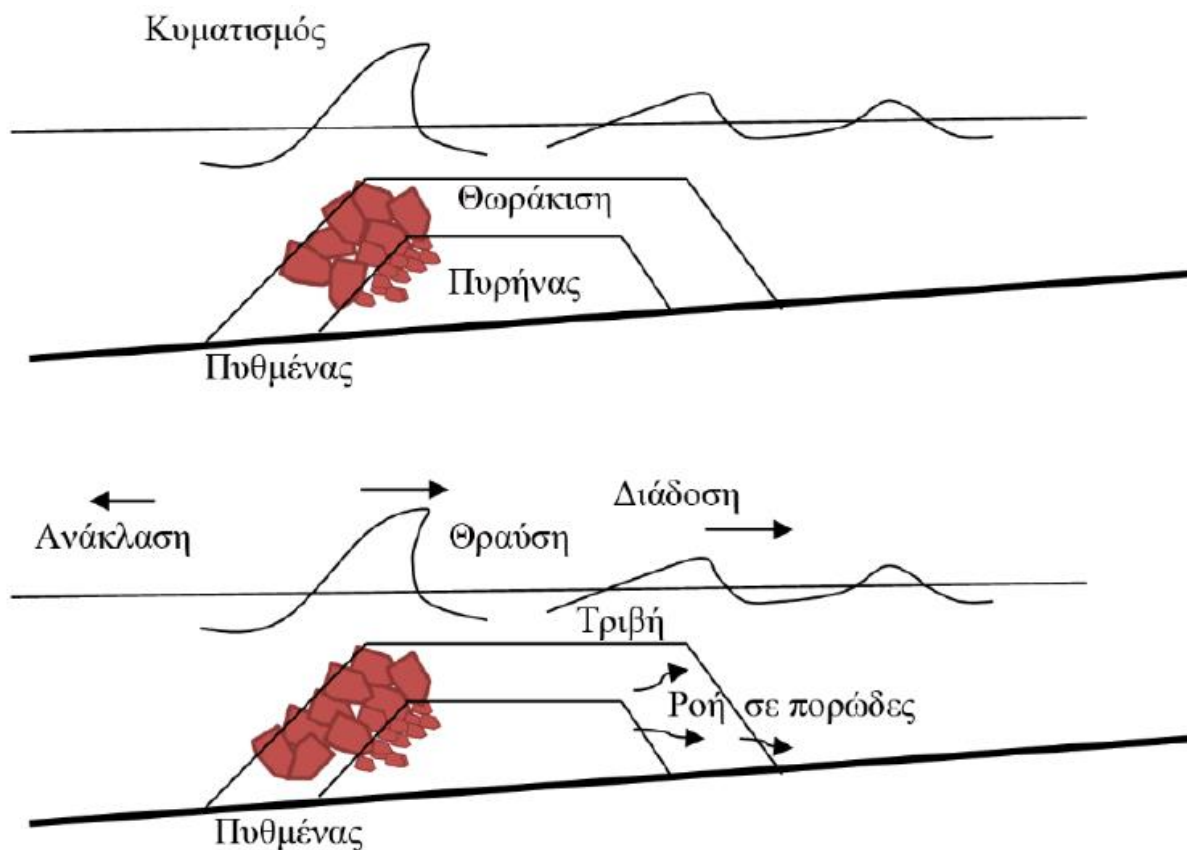
Εικόνα 2.3 Μορφολογία ακτογραμμής στην σκιά κυματοθραυστών (Karampas T. et al. “Coastal Engineering – Coastal Protection Structures”, 2015)

Παρά τη συχνή υπερπήδηση που υφίστανται, οι LCS μπορούν να μειώσουν το υδραυλικό φορτίο που καταλήγει στην παράκτια ζώνη στο απαιτούμενο επίπεδο για τη διατήρηση της δυναμικής ισορροπίας της ακτής.

Επιπλέον, η προσπίπτουσα κυματική ενέργεια πέρα από τη μείωση που υφίσταται μέσω της θραύσης αλλά και λόγω τριβών στη διεπιφάνεια νερού - στέψης της κατασκευής, ενδέχεται εν μέρει να υποστεί ανάκλαση προς τα ανοιχτά, αλλά και η ποσότητά της που καταφέρνει να

διέλθει μέσα από τους πόρους της κατασκευής θα μειωθεί σε κάποιο βαθμό λόγω των εκεί συνθηκών ροής (Εικόνα 2.4).

Βέβαια, παρά τους διάφορους τρόπους καταστροφής της εισερχόμενης ενέργειας, δε συμβαίνει ποτέ πλήρης μείωσή της και έτσι μέρος της μεταδίδεται στα κατάντη της κατασκευής είτε λόγω υπερπήδησης είτε λόγω διέλευσης μέσα από τα κενά του κυματοθραύστη.



Εικόνα 2.4. Τυπική διατομή ύφαλου κυματοθραύστη και μηχανισμοί απώλειας της κυματικής ενέργειας( Καραμπάς Θ., Αλληλεπίδραση ακτών/παράκτιων έργων - έργα και μέθοδοι προστασίας ακτών)

Πέραν από τη μεταδιδόμενη κυματική ενέργεια, ο ρυθμός στερεομεταφοράς, που αποτελεί την πιο σημαντική διεργασία διαμόρφωσης ενός παράκτιου ιζηματογενούς συστήματος, καθορίζεται και από τη μορφή και τη διαθέσιμη ποσότητα ιζήματος. Έτσι, οι κοκκώδεις-αμμώδεις ακτές είναι οι πλέον ευάλωτες στη διαβρωτική επίδραση της θάλασσας και χρήζουν μεγαλύτερης προστασίας. Οι ύφαλοι κυματοθραύστες δεν μπορούν να αποδώσουν τα αναμενόμενα, εάν η κοκκομετρία και η ποσότητα των ιζημάτων- τα βασικότερα ίσως φυσικά παράκτια αμυντικά στοιχεία- δεν ανταποκρίνονται στην κλίμακα της υπό συγκράτηση ή υπό διαμόρφωση ακτής. Σε αυτήν την περίπτωση η επιτυχία του εγχειρήματος απαιτεί μια σειρά πρόσθετων και δαπανηρών αμυντικών έργων κατά μήκος της ακτής όπως η ταυτόχρονη επανατροφοδότηση της προβληματικής ακτής με ιζημα (Σαμλίδης, 2014).

Οι LCS, όπως οι βυθισμένοι κυματοθραύστες και οι τεχνητοί ύφαλοι, παρουσιάζουν **πλεονεκτήματα** σε σχέση με άλλους τύπους έργων παράκτιας προστασίας τα οποία είναι τα εξής:

- Αρχικά, λόγω της τοποθέτησης της στέψης σε επίπεδο κοντά στη Μ.Σ.Η. ή χαμηλότερα, επιφέρουν την ελάχιστη οπτική επιβάρυνση μπροστά από την ακτή και άρα διατηρούν την αισθητική αξία του θαλάσσιου περιβάλλοντος, αποτελώντας προτιμότερη λύση για τουριστικές περιοχές και τοπία ιδιαίτερου φυσικού κάλλους.
- Εξασφαλίζεται η ανεμπόδιση ανανέωση των υδάτων στην υπήνεμη περιοχή του κυματοθραύστη προωθώντας ένα φυσικό σύστημα αυτοκαθαρισμού και αποτρέπεται η διαμόρφωση ζωνών λιμναζόντων νερών
- Επιπλέον μειώνεται το κόστος κατασκευής συγκριτικά με τις έξαλες κατασκευές, όσον αφορά τα χρησιμοποιούμενα υλικά, αφού απαιτούν μικρότερη ποσότητα για να φθάσουν στο τελικό επίπεδο στέψης τους και για την εξασφάλιση της ευστάθειάς τους μέσω των στρώσεων θωράκισης.
- Μειώνεται η ανάκλαση των κυματισμών, η οποία γίνεται ιδιαίτερα σημαντική στη περίπτωση που η κατασκευή τοποθετείται εντός της λιμενολεκάνης ή κατάντη άλλων θαλάσσιων κατασκευών
- Μπορούν να λειτουργήσουν και ως μέσο αναβάθμισης των ενδιαιτημάτων της περιοχής και επομένως να προωθήσουν την οικολογική και τουριστική ανάπτυξη. Ειδικά οι βυθισμένοι κυματοθραύστες που ομοιάζουν με τους φυσικούς ύφαλους (Reef Balls) φιλοξενούν μεγάλο αριθμό θαλάσσιων ειδών.

Η χρήση χαμηλής στέψης κυματοθραυστών συνδέεται όμως και με μια σειρά από **μειονεκτήματα**, τα βασικότερα από τα οποία είναι τα ακόλουθα:

- Οι πολύ χαμηλές στέψεις μπορεί να μη μειώνουν ικανοποιητικά την κυματική ενέργεια και άρα να μην αποτελούν επαρκές μέτρο για προστασία έναντι της διάβρωσης, ειδικά σε περιοχές με υψηλό υδροδυναμικό καθεστώς και με μεγάλο εύρος παλίρροιας.
- Οι Υ.Κ. μπορεί να επιφέρουν αντίθετα αποτελέσματα σε σχέση με το σκοπό κατασκευής τους, καθώς ενδέχεται 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 τελικώς να εντείνουν αντί να αποτρέπουν την παράκτια διάβρωση. Οι αποσπασμένοι Υ.Κ. μπορεί να δημιουργήσουν πεδία υψηλών ταχυτήτων ειδικά στα ακρομώλια ή ανάμεσα σε δύο τέτοιες κατασκευές σε σειρά και έτσι να προκαλέσουν υποσκαφή των έργων ή περαιτέρω διάβρωση.
- Το γεγονός ότι δεν είναι ορατές τις καθιστά επικίνδυνες για τη ναυσιπλοΐα.

- Η τοποθέτηση φωτεινών σημάτων που προβλέπεται από την νομοθεσία (κανονισμός IALA-European Commission, 2002) μπορεί να θεωρηθεί ως αισθητική όχληση αλλά και να διαταράξει τα τοπικά ενδιαφέροντα.
- Η επιθεώρηση του έργου κατά την κατασκευή αλλά και ο έλεγχος της αρτιότητας του έργου μετά την κατασκευή θεωρείται δύσκολη καθώς το έργο βρίσκεται βυθισμένο στο νερό (κυρίως στη περίπτωση των ύφαλων ή ίσαλων κυματοθραυστών).
- Η κατασκευή μπορεί να γίνει οικονομικά επαχθής λόγω της αναγκαίας χρήσης φορτηγίδων και πλεούμενων μηχανημάτων κατασκευής.
- Στη περίπτωση που έχουμε αποσπασμένους παράλληλους κυματοθραύστες, η δημιουργία έντονων βελοειδών ρευμάτων (rip-current) καθίσταται εξαιρετικά επικίνδυνη για τους κολυμβητές ενώ μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλη διάβρωση ειδικά στα ακρομόλια.

## 2.2 Τύποι κατασκευών χαμηλής στέψης

Όπως προαναφέρθηκε, κατασκευές χαμηλής στέψης (Low-Crested Structures, LCS) ονομάζονται αυτές οι οποίες έχουν τη στέψη τους κοντά (λίγο πάνω, λίγο κάτω ή ακριβώς) στη Μ.Σ.Η.. Βασικός στόχος των κατασκευών χαμηλής στέψης, άρα και των Υ.Κ. είναι να προσφέρουν ηρεμία στο κυματικό πεδίο καθορισμένων περιοχών για την προστασία παράκτιων περιοχών και ακτογραμμών είτε προστασία λιμενικών εγκαταστάσεων. Παρόλα αυτά δεν καθίσταται απαραίτητη τόσο η πλήρη απόσβεση της κυματικής ενέργειας, όσο η απομείωσή της.

Πέρα από τους βυθισμένους κυματοθραύστες, στους τύπους κατασκευών με χαμηλή στέψη ανήκουν και οι **έξαλοι κυματοθραύστες χαμηλής στέψης (sub-aerial LCS)**. Κατασκευάζονται συνήθως σε ένα ύψος κοντά στη στάθμη ανώτατης πλήμμης και έτσι τείνουν να γίνονται ξεκάθαρα εμφανείς κατά τη διάρκεια της αμπώτιδας, πολύ δε μάλλον κατά τη φάση της κατώτατης ρηχίας. Διαφέρουν δηλαδή με τους βυθισμένους κυματοθραύστες (submerged breakwaters), ακριβώς στο ότι οι δεύτεροι είναι μονίμως βυθισμένοι άσχετα από τις παλιρροιακές συνθήκες.

Παρακάτω περιγράφονται οι τρεις κατηγορίες όπου ανήκουν οι κυματοθραύστες χαμηλής στέψης, για να διαχωριστεί έτσι και η έννοια τους από τις συναφείς κατασκευές που προαναφέρθηκαν:

- Δυναμικά ευσταθείς ύφαλοι κυματοθραύστες (dynamically stable reef breakwaters):

Ο δυναμικά ευσταθής ύφαλος κυματοθραύστης είναι ένας ομογενής σωρός από ογκολίθους, χωρίς διαχωρισμό σε πυρήνα και ζώνη θωράκισης ή φίλτρου και ως εκ τούτου είναι πιθανή η αλλαγή του σχήματος της διατομής του κάτω από τη δράση των κυμάτων για αυτό και αρχικά η



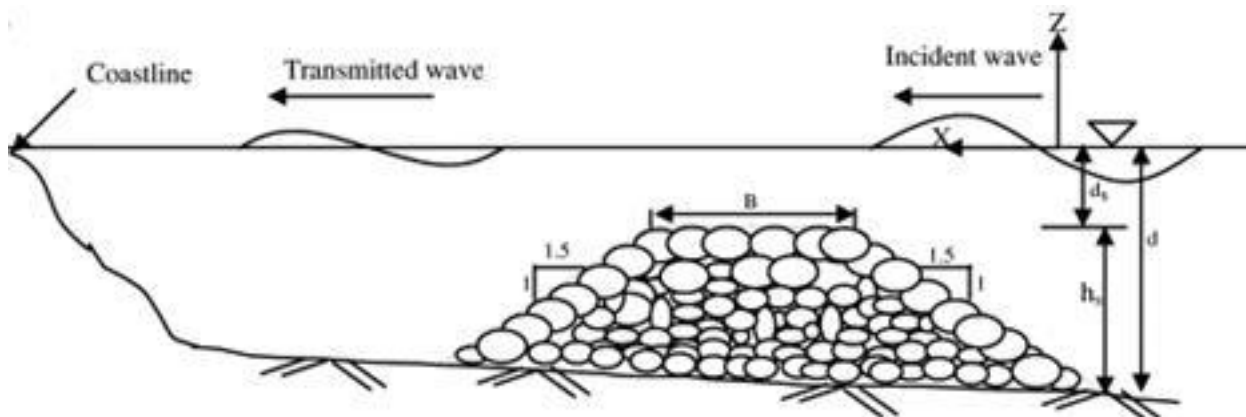
στέψη του κατασκευάζεται ακριβώς πάνω από τη Μ.Σ.Η. Κάτω από έντονες κυματικές συνθήκες, το ύψος στέψης μειώνεται μέχρι ένα συγκεκριμένο ύψος ισορροπίας του υφάλου. Αυτό το σημείο ισορροπίας και το ποσό της κυματικής μετάδοσης στα κατάντη της κατασκευής είναι οι καθοριστικότερες σχεδιαστικές παράμετροι.

- Στατικά ευσταθείς κυματοθραύστες χαμηλής στέψης με ύψος στέψης πάνω από τη Μ.Σ.Η. (statically stable low-crested breakwaters):

Οι στατικά ευσταθείς κυματοθραύστες χαμηλής στέψης, με ύψος στέψης πάνω από τη Μ.Σ.Η., συμπεριφέρονται παρόμοια, με τους κυματοθραύστες που υφίστανται σπανίως ή καθόλου υπερπήδηση από τα προσπίπτοντα κύματα. Οι πρώτοι όμως είναι περισσότερο ευσταθείς, εξ αιτίας του γεγονότος ότι ένα μεγαλύτερο ποσό κυματικής ενέργειας μπορεί να διέλθει πάνω από τη στέψη τους, χωρίς να υποστεί τόσο μεγάλη απόσβεση στις εξωτερικές στρώσεις των κατασκευών. Αυτό συνεπάγεται ότι οι δρώσες δυνάμεις, λόγω των κυμάτων, κατά τις φάσεις αναρρίχησης (run-up) και καταβίβασης (run-down) είναι μικρότερες για τους χαμηλής στέψης κυματοθραύστες. Επίσης οι κυματοθραύστες αυτής της κατηγορίας είναι πιο ευσταθείς από αυτούς της προηγούμενης λόγω της διάταξης στρώσεων θωράκισης και πυρήνα και γενικώς απομειώνουν σε μεγαλύτερο βαθμό την κυματική ενέργεια λόγω της υψηλότερης στέψης τους.

- Στατικά ευσταθείς βυθισμένοι κυματοθραύστες (statically stable submerged breakwaters):

Οι στατικά ευσταθείς βυθισμένοι κυματοθραύστες βρίσκονται μονίμως κάτω από τη Μ.Σ.Η., αλλά και την κατώτατη ρηχία (Εικόνα 2.5). Όλα τα κύματα τους υπερπηδούν ή διέρχονται από πάνω τους. Για τον λόγο αυτό και η κυματική μετάδοση στην υπήνεμη πλευρά τους είναι σημαντική. Αποτελούνται και αυτές από πυρήνα και στρώσεις θωράκισης και η ευστάθειά τους αυξάνεται με τη μείωση του ύψους στέψης. Βέβαια, τονίζεται ότι, παρά τη μειωμένη κυματική φόρτιση, οι λίθοι θωράκισης των βυθισμένων κυματοθραυστών στην επικίνδυνη περιοχή βρίσκονται υπό άνωση, άρα είναι πιο ευάλωτοι σε σύγκριση με τους συμβατικούς έξαλους κυματοθραύστες. Το φαινόμενο αυτό εντείνεται όσο αυξάνεται το ύψος στέψης, οπότε και η θραύση των κυμάτων είναι εμφανής και ολοένα και πιο έντονη.



Εικόνα 2.5 Ύφαλος Κυματοθραύστης (Karampas T. et al. "Coastal Engineering – Coastal Protection Structures", 2015)

Οι παραπάνω 3 τύποι κατασκευών χαμηλής στέψης διαμορφώνονται συνήθως ως πρισματικές λιθορριπές τραπεζοειδούς διατομής (rubble mound structures), με χρήση κυρίως φυσικών ογκολίθων λατομείου αλλά και τεχνητών μονάδων ειδικά διαμορφωμένων. Στην πρώτη περίπτωση, δηλαδή του δυναμικά ευσταθούς υφάλου, το μέγεθος των ογκολίθων θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο ώστε να αντισταθεί στις κυματικές δράσεις και να εξασφαλίσει την τελική ευστάθεια. Το μεγάλο όμως μέγεθος των λίθων συνεπάγεται μεγάλη διαπερατότητα της κατασκευής και ταυτόχρονα υψηλότερο κόστος αυτής.

Όλοι οι τύποι κυματοθραυστών χαμηλής στέψης καλό είναι να θωρακίζονται κατάλληλα και στη στέψη, αλλά και στο υπήνεμο πρανάς, λόγω των δυνάμεων που αναπτύσσονται κατά την υπερπήδηση και την κυματική μετάδοση στα κατάντη. Συνήθως, εφαρμόζεται η ίδια θωράκιση ανάντη, στη στέψη και κατάντη.

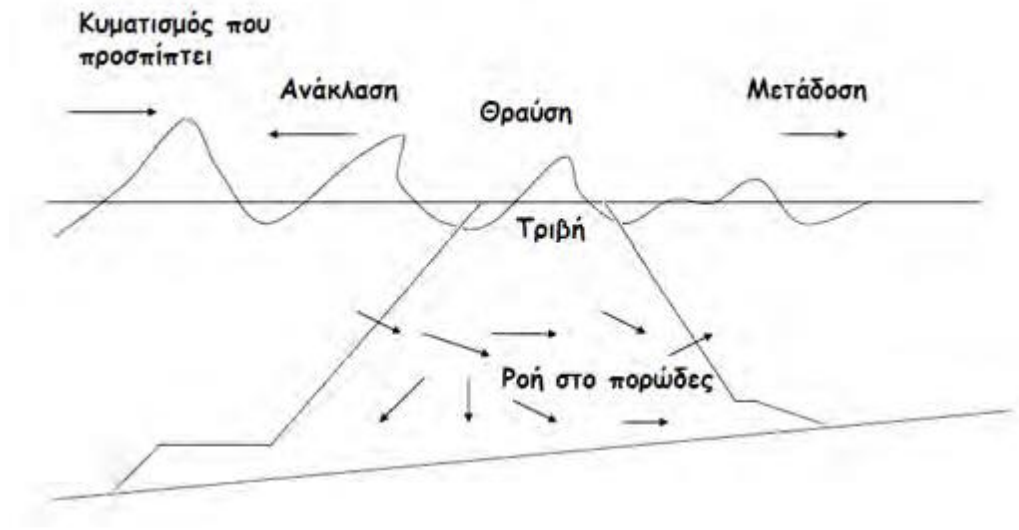
Οι διατομές των Υ.Δ.Κ. που εξετάζονται στην παρούσα διπλωματική εργασία ανήκουν στην τρίτη κατηγορίαν των στατικά ευσταθών βυθισμένων κυματοθραυστών (statically stable submerged breakwaters ).

### **2.3 Φαινόμενα γύρω από Ύφαλο Κυματοθραύστη**

Πέρα του ότι οι Υ.Κ. χρησιμοποιούνται για να μειώσουν την επερχόμενη κυματική ενέργεια σε μια παράκτια ζώνη και ταυτόχρονα αποσκοπούν στη μείωση της μεταφοράς ιζήματος και της δυνητικής παράκτιας διάβρωσης στα κατάντη (στην υπήνεμη πλευρά) του κυματοθραύστη εξασφαλίζουν παράλληλα τη διατήρηση της αισθητικής και της περαιτέρω τουριστικής αξίας της παράκτιας ζώνης.

Η επίτευξη των παραπάνω στόχων συνδέεται με την εμφάνιση διαφόρων σύνθετων φαινομένων στην περιοχή του Υ.Κ. Κάποια από τα βασικότερα φαινόμενα που σχετίζονται με την αλληλεπίδραση κυμάτων Υ.Κ. περιγράφονται παρακάτω.

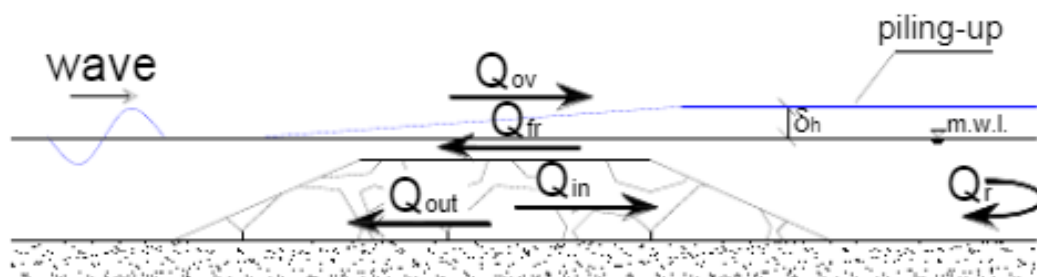
Οι μάζες νερού που περνούν πάνω από τη στέψη και μέσα από τους πόρους της κατασκευής παράγουν νέα κύματα στην προστατευόμενη περιοχή, που γενικώς είναι μικρότερα από τα προσπίπτοντα στον Υ.Κ. Η μείωση της κυματικής ενέργειας (wave energy dissipation) λόγω της παρουσίας του Υ.Κ. καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την κυματική μετάδοση στα κατάντη του και άρα και το συντελεστή κυματικής μετάδοσης  $K_t$  (transmission coefficient), που ορίζεται ως ο λόγος του μεταδιδόμενου ύψους κύματος προς το αντίστοιχο προσπίπτον. Η ενεργειακή απόσβεση των κυματισμών είναι αποτέλεσμα διάφορων μηχανισμών, όπως η θραύση των κυματισμών, η τριβή στον πυθμένα και η ροή σε πορώδες μέσο (Εικόνα 2.6). Από αυτούς η θραύση φαίνεται να παίζει το σημαντικότερο ρόλο και η τελική καταστροφή ενέργειας εξαρτάται από την παρουσία ή όχι αυτού του φαινομένου πάνω από τον ύφαλο.



Εικόνα 2.6 Σχηματική αναπαράσταση των μηχανισμών απόσβεσης της ενέργειας πάνω στον κυματοθραύστη (Φωτιά, 2017)

Ένα μέρος της αρχικής ενέργειας του κυματισμού, υφίσταται ανάκλαση (reflection) στην προσήνεμη πλευρά του Υ.Κ. (Εικόνα 2.6) και έτσι μικρότερα κύματα διαδίδονται προς τα ανοιχτά οδηγώντας στη δημιουργία μερικώς στάσιμων κυμάτων στα ανάντη. Σε αντιστοιχία με τον  $K_t$  ορίζεται και ο συντελεστής ανάκλασης  $K_r$  (reflection coefficient) ως ο λόγος του ανακλώμενου προς το προσπίπτον ύψος κύματος. Η ανάκλαση αυξάνεται όσο μεγαλώνει η κλίση της προσήνεμης πλευράς της κατασκευής, αν και όσο πιο βαθιά τοποθετείται η στέψη, τόσο μειώνεται η επίδραση της κλίσης αυτής και γενικά μειώνεται το ποσό του ανακλώμενου κυματισμού. Επίσης, όσο αυξάνεται η διαπερατότητα της κατασκευής και μειώνεται το μήκος του προσπίπτοντος κύματος, μειώνεται πάλι η ανάκλαση. Το πλάτος στέψης φαίνεται να μην έχει καμία επίδραση στο μέγεθος της ανάκλασης, αφού αυτή συντελείται μόνο στην ανάντη κεκλιμένη επιφάνεια του υφάλου.

Ένα ακόμη φαινόμενο που συναντάται στους βυθισμένους κυματοθραύστες κατά τη διάρκεια καταιγίδων είναι το riling-up δηλαδή η ανύψωση της μέσης στάθμης στην υπήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.7. Το φαινόμενο σχετίζεται με το ισοζύγιο μάζας στην περιοχή ενώ μετά την παρέλευση μιας καταιγίδας έχουμε ροή μάζας ρευστού από τα ανοίγματα προς τα ανοιχτά, δηλαδή βελοειδές ρεύμα (rip – current). Για τους LCS το βελοειδές ρεύμα γίνεται σημαντικό όταν δεν έχουμε ακραία καιρικά φαινόμενα.



Εικόνα 2.7 Ανύψωση την στάθμης στην υπήνεμη πλευρά ενός βυθισμένου κυματοθραύστη Carlo Lorenzoni (2012)

Η κίνηση θαλάσσιου ρεύματος στο οποίο παρεμβάλλεται ύφαλη διαπερατή κατασκευή προκαλεί την εμφάνιση ιδιαίτερα υψηλών ταχυτήτων ροής πάνω από τη στέψη της κατασκευής. Τα φαινόμενο ερμηνεύεται 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. Η διαπίστωση αυτή αν και ήταν αναμενόμενη, είναι ύψιστης σημασίας διότι ενισχύει την άποψη πως οι ύφαλες κατασκευές δεν είναι ικανές να περιορίσουν την εξέλιξη ακραίων μεν καταστροφικών δε φαινομένων όπως είναι τα μακρά κύματα, στην κατηγορία των οποίων ανήκουν και τα τσουνάμι. Κατάντη της κατασκευής του ύφαλου κυματοθραύστη παρατηρείται η δημιουργία περιοχής στροβιλισμού της ροής. Η εμφάνιση της ζώνης αυτής εντοπίζεται στο κατάντη πρηνές 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 πρηνούς του κυματοθραύστη (Memos 2008).

### 3 ΠΟΣΕΙΔΩΝΙΑ – POSIDONIA OCEANICA

---

#### 3.1 Γενικά

Η Ποσειδωνία (*Posidonia Oceanica*=P.O.) (Εικόνα 3.1), ανήκει στην κατηγορία εκείνη των φυτών τα οποία εξαπλώνονται στην ξηρά και δεν είναι φύκος (*algae*). Η P.O. αποτελεί το κυρίαρχο ενδημικό είδος της θαλάσσιας βλάστησης της Μεσογείου – *απαντάται αποκλειστικά και μόνο σε αυτή* - του οποίου ο ρυθμός αύξησής τους θεωρείται εξαιρετικά αργός, της τάξης των 2 εκατοστών ετησίως, ενώ παράλληλα ο ρυθμός καταστροφής τους είναι τεράστιος καθώς είναι πολύ ευαίσθητα στην ρύπανση του νερού. Το μοναδικό αυτό θαλάσσιο οικοσύστημα, τα λιβάδια της Ποσειδωνίας, λόγω της βιοποικιλότητας που απαντάται σε αυτά, θεωρούνται ως ένας από τους πλέον σημαντικούς αναπαραγωγικούς βιοτόπους πολλών οργανισμών. Επίσης μέσω της συνεχούς ανανέωσης των φύλλων προσφέρουν τεράστιες ποσότητες οργανικής ύλης στο οικοσύστημα, άφθονο οξυγόνο, μέσω της φωτοσύνθεσης και δεσμεύουν τεράστιες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα. Για την μεγάλη σημαντικότητα των λιβαδιών αυτών προστατεύονται από την Ευρωπαϊκή Οδηγία για τους Οικοτόπους (Τύπος Οικοτόπου Προτεραιότητας (τύπος 1120) σύμφωνα με το Παράρτημα I της Ευρωπαϊκής Οδηγίας των Οικοτόπων 92/43/ΕΟΚ).

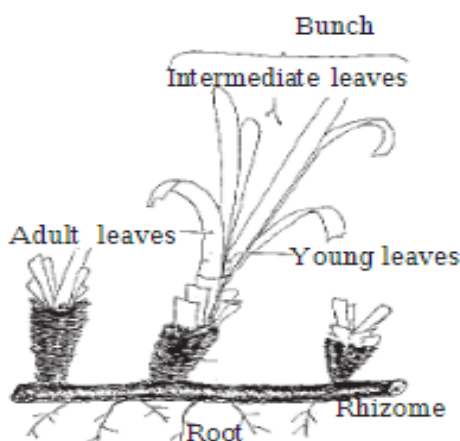
Η Ταξινομική Κατάταξη της P.O. είναι η εξής:

ΚΛΑΣΗ:	Angiospermae Monocotyledoneae
ΤΑΞΗ:	Alismatales
ΟΙΚΟΓΕΝΕΙΑ:	Potamogetonaceae
ΓΕΝΟΣ:	Posidonia
ΕΙΔΟΣ:	Posidonia Oceanica



Εικόνα 3.1 Ποσειδωνία Η Ωκεάνια (Posidonia Oceanica)

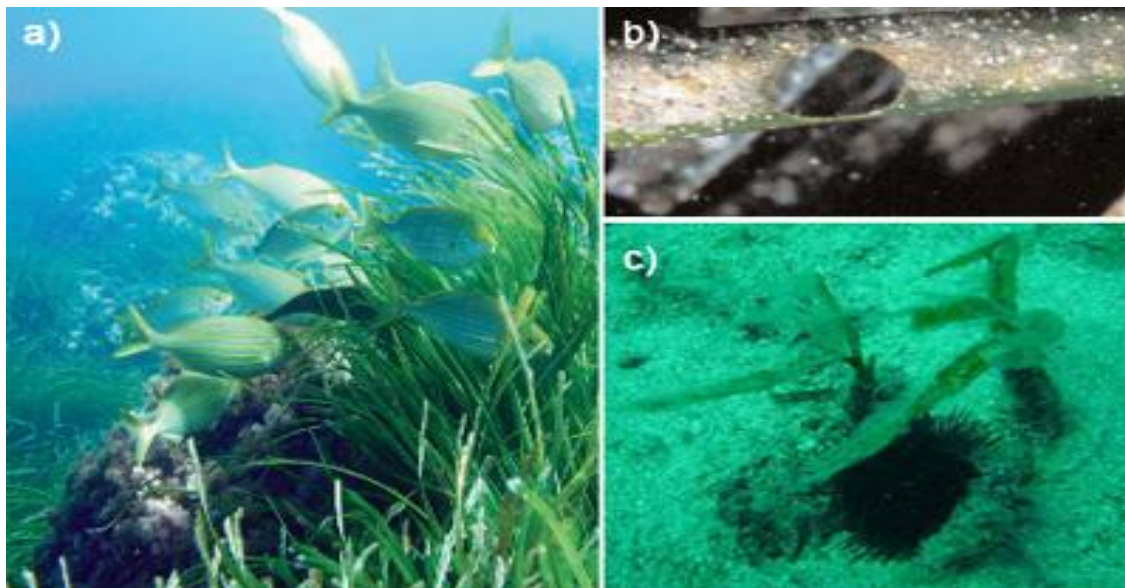
Η Ρ.Ο. κατατάσσεται στα πιο πολύτιμα θαλάσσια οικοσυστήματα στη γη και αποτελεί το επικρατέστερο φυτό στην Μεσόγειο καλύπτοντας περίπου 50.000km<sup>2</sup> (Boudouresque, C.F., et al.,1990) από την παράκτια ζώνη μέχρι την ζώνη που απέχει αρκετά από τον αιγιαλό. Οι περιοχές αυτές δύναται να είναι αμμώδεις έως βραχώδεις και η Ρ.Ο. απαντάται σε βάθη από την επιφάνεια έως 40m ενώ η πυκνότητα της βλάστησης είναι 500 – 1000 στελέχη φύλλων ανά τετραγωνικό μέτρο (stems/m<sup>2</sup>). Τα φύλλα της Ποσειδωνίας έχουν μακρόστενο σχήμα (**Error! Reference source not found.**), 1cm πάχος και ύψος που μπορεί να φτάνει το 1m. ( Bethoux, J. et al.,1986 ; Peres, J.M et al., 1964; Phillips, R.C. et al., 1988 ; Short, F.T., et al., 2007 ; Duarte 1991; Pasqualini et al.1998).



Εικόνα 3.2 Τα χαρακτηριστικά μέρη του φύλλου της Ωκεάνιας Ποσειδωνίας (Ciraolo, Ferreri, La Loggia, 2006)

Η Ρ.Ο. αποτελεί σημαντικό βιολογικό δείκτη αφού είναι ευαίσθητη στη ρύπανση, και οποιαδήποτε διαταραχή στο θαλάσσιο περιβάλλον έχει επιπτώσεις στο οικοσύστημά της. Συγκεκριμένα η Ποσειδωνία θεωρείται δείκτης καλής οικολογικής ποιότητας, καλής ανανέωσης υδάτων και σταθερών συνθηκών αλατότητας (37 – 39‰).

Το τροφικό δίκτυο των λιβαδιών της Ποσειδωνίας είναι εξαιρετικά περίπλοκο και δεν είναι ακόμα πλήρως γνωστό. Το 70% των ζώων των λιβαδιών είναι φυτοφάγα ζώα (Εικόνα 3.3). Επιπλέον τα λιβάδια της Ποσειδωνίας είναι ο αποκλειστικός ή προτιμώμενος βιότοπος πολλών προστατευόμενων ειδών όπως τα νάκρες ή το αστέρι του μικρού καπετάνιου (Εικόνα 3.4) ενώ πολλά αλιευτικά είδη όπως είναι οι σουπιές βάζουν τα αυγά στα λιβάδια της Ποσειδωνίας ή περνούν εκεί την πρώτη φάση της ζωής τους.



Εικόνα 3.3 Κάποια φυτοφάγα ζώα του λιβαδιού της Ποσειδωνίας: α) βόσκηση (*Sarpa salpa*), β) τρύπα αριστερά από το ισόποδο *Synischia hectica*, γ) δείγματα του σκαντζόχοιρου *Paracentrothous lividus*. (α) *Ramón Esteban*, (β) *Ángel Luque*, (γ) έργο *MedVeg* )

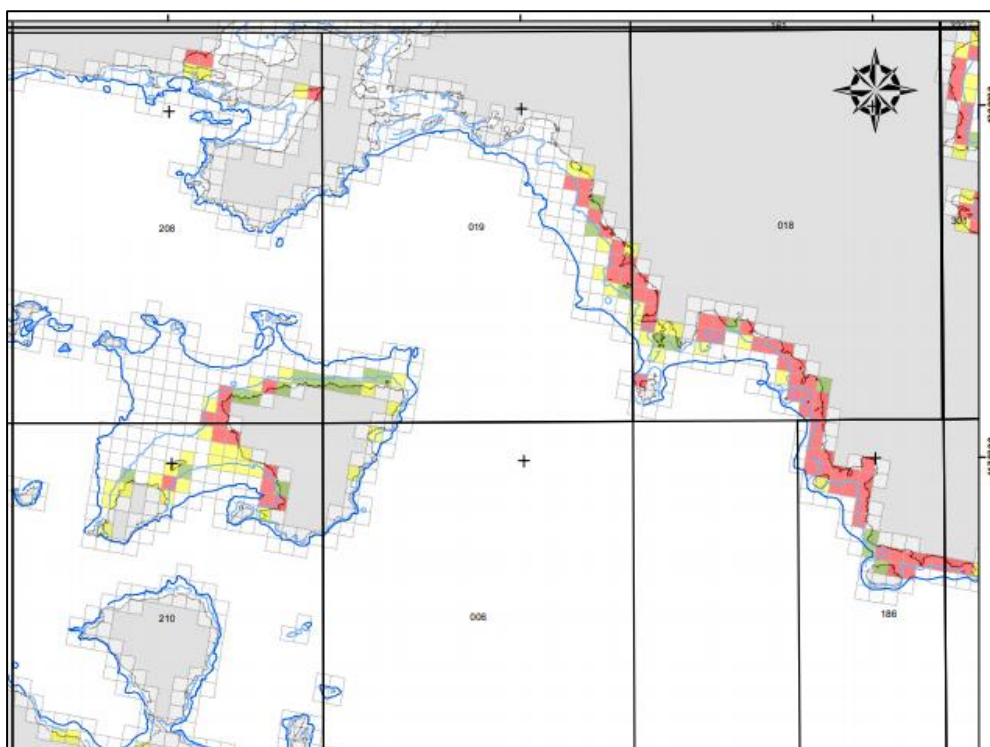


Εικόνα 3.4 Το αστέρι του μικρού καπετάνιου (*Asterina pancerii*). ( Programa de Gestión Sostenible del Medio Marino)

Λάμβάνοντας υπόψιν τα όσα προαναφέρθηκαν για τον ιδιαίτερο ρόλο που κατέχει η ποσειδωνία στο θαλάσσιο περιβάλλον και το ποσοστό κάλυψης των ελληνικών βυθών από

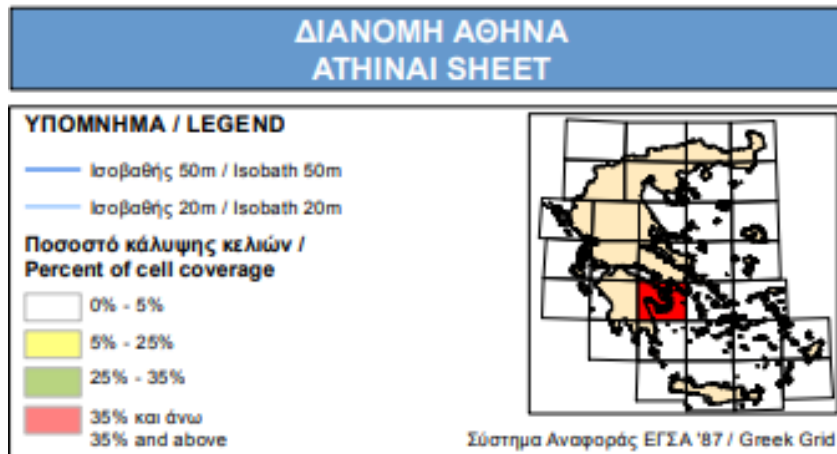
αυτήν, το Νοέμβριο του 2015 ολοκληρώθηκε και παραδόθηκε στην Γενική Διεύθυνση Βιώσιμης Αλιείας, του Υπουργείου Αγροτικής Ανάπτυξης & Τροφίμων, η χαρτογράφηση των θαλάσσιων λιβαδιών ποσειδωνίας της Ελλάδας. Το έργο αυτό αποτελεί ένα σημαντικό βήμα για την προστασία της θαλάσσιας χλωρίδας της χώρας μας και είναι μοναδικό για τη Μεσόγειο.

Οι σχετικοί αυτοί ενδεικτικοί χάρτες (Εικόνα 3.5, Εικόνα 3.6), υποδεικνύουν τις περιοχές με θαλάσσια βλάστηση *Posidonia oceanica* που βρίσκονται εντός του Δικτύου Natura 2000 στις οποίες απαγορεύεται η αλιεία με συγκεκριμένα εργαλεία.



Εικόνα 3.5 Ενδεικτικό απόσπασμα χάρτη απεικόνισης Ποσειδωνίας στο νότιο τμήμα του Ν. Αττικής. (Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων)





Εικόνα 3.6 Ενδεικτικό υπόμνημα του χάρτη διανομής Ποσειδωνίας. (Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων)

### 3.2 Προστασία των ακτών από τα Λιβάδια Ποσειδωνίας

Η *Posidonia Oceanica* (P.O.), το πιο άφθονο είδος θαλάσσιας χλωρίδας στη Μεσόγειο, αντιπροσωπεύει έναν βιοδιασπασμένο βιότοπο και παράλληλα η παρουσία της είναι ζωτικής σημασίας για την προστασία των ακτών από την διάβρωση. Η παράκτια βλάστηση μπορεί συχνά να μετριάσει το ύψος καθώς και την ενέργεια των κυμάτων λειτουργώντας ως φυσικός ύφαλος – κυματοθραύστης μέσα στο θαλάσσιο περιβάλλον συμβάλλοντας στην μερική απόσβεση του κύματος, στην σταθεροποίηση του εδάφους και στην ενίσχυση του βιοτόπου (Εικόνα 3.7). Τα πλεονεκτήματα αυτά περιορίζονται μόνο σε περιοχές χαμηλής κυματικής ενέργειας και για μικρή κλίση εδάφους.

Αποτελώντας ένα αρκετά ενδιαφέρον θέμα προς περαιτέρω διερευνήσεις, τις τελευταίες δύο δεκαετίες έχει διερευνηθεί πειραματικά η κυματική μετάδοση πάνω από λιβάδια Ποσειδωνίας και έχει επικυρωθεί η εξασθένηση του ύψους κύματος.

Εικόνα 3.7 Λιβάδι Ποσειδωνίας πάνω σε ύφαλο - Προστασία της ακτής από διάβρωση και εξασθένηση της υδροδυναμικής ενέργειας. (Jordi Corbera, Praderas y bosques marinos de Andalucía)

Η θετική δράση της Ποσειδωνίας όμως δεν σταματάει στον βυθό. Παράλληλα προστατεύει τις ακτές από τη δράση των κυματισμών με τις συμπαγείς μάζες (banks) που σχηματίζονται από τα νεκρά φύλλα, τα οποία συσσωρεύονται στις παραλίες και αναμειγνύονται με άμμο. Η παρουσία των φύλλων αυτών είναι ένδειξη ψηλής οικολογικής κατάστασης των υδάτων και γενικά μιας υγιούς θάλασσας. Συστήνεται να αφαιρούνται μόνο από τις τουριστικές παραλίες και πριν την έναρξη της τουριστικής περιόδου (τέλη Μαΐου). Η πρακτική αυτή συντελεί στην προστασία της παραλίας κατά τη διάρκεια των έντονων καιρικών συνθηκών (φθινόπωρο, χειμώνα και άνοιξη). Η απομάκρυνση των νεκρών φύλλων της Ποσειδωνίας από τις παραλίες έχει ως αποτέλεσμα, παράλληλα με την αποδυνάμωση του μηχανισμού αυτοπροστασίας της ακτής, την αφαίρεση σημαντικής ποσότητας άμμου.

Θα πρέπει να αποφεύγεται η κατασκευή παράκτιων και υπεράκτιων έργων προστασίας των ακτών σε περιοχές που υπάρχουν λιβάδια Ποσειδωνίας. Στις περισσότερες περιπτώσεις που αυτό συμβαίνει, η έκταση που καταλαμβάνει το έργο σε σχέση με το ποσοστό κατάληψης του βυθού από λιβάδια Ποσειδωνίας είναι πολύ μικρότερη και έτσι από περιβαλλοντικής άποψης το έργο εγκρίνεται, προχωράει και εκτελείται κανονικά.

Παρόλα αυτά, εξετάζονται διάφορα ενδεχόμενα αναπλήρωσης της Ποσειδωνίας που καταστρέφεται λόγω έργων. Μία τέτοια λύση είναι η ανάπτυξη ποσειδωνίας επί της κατασκευής. Στις περιπτώσεις των Υ.Κ. θα μπορούσε η Ποσειδωνία να αναπτυχθεί στη στέψη

του έργου ή ακόμη και στα πρηνή τους. Παράλληλα όμως θα μπορούσε να συμβάλει και αυτή με τη σειρά της στο ρόλο που παίζει ένας Υ.Κ.: Να μειώσει, κατά ένα μικρό ποσοστό, την κυματική ενέργεια στα κατάντη της κατασκευής.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εισάγεται και εξετάζεται αυτή η ιδιαίτερη και περιβαλλοντικά απολύτως σύμφωνη ιδέα, με την προσθήκη λειμώνα Ποσειδωνίας στην στέψη των διατάξεων που έχουν δημιουργηθεί για την επίτευξη πειραμάτων. Σε επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται και αναλύεται η συμβολή του λειμώνα Ποσειδωνίας στην απομείωση της κυματικής ενέργειας



## 4 ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗ - ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΚΤ

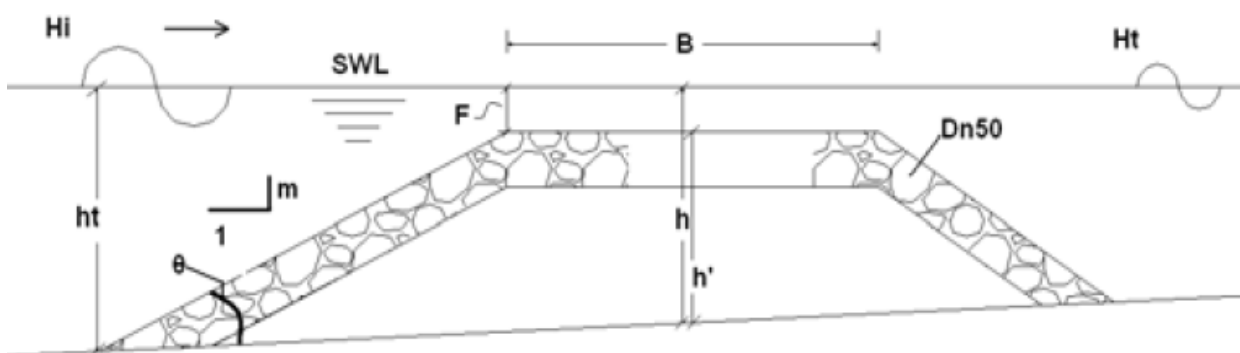
### 4.1 Το φαινόμενο της κυματικής μετάδοσης - Καθορισμός των φυσικών μεταβλητών του προβλήματος

Η κατασκευή ενός Ύφαλου Κυματοθραύστη (Υ.Κ.) αποσκοπεί στην μείωση της κυματικής ενέργειας στην υπήμενη πλευρά του, δηλαδή στην μείωση της κυματικής μετάδοσης.

Η κυματική μετάδοση πίσω από Υ.Κ. αποτελεί ένα σύνθετο φαινόμενο, το οποίο επιτυγχάνεται κατά την αλληλεπίδραση της κατασκευής με τα κύματα και πιο συγκεκριμένα κατά την ανάκλασή τους, της θραύσης τους και της τριβής τους.

Ο ποσοτικός καθορισμός της είναι απαραίτητος για την κατάλληλη διαστασιολόγηση και τελική επιλογή της διάταξης των έργων, ούτως ώστε αυτά να συνιστούν αποτελεσματικά μέσα μείωσης της κυματικής ενέργειας, συνεπώς και της διάβρωσης των παράκτιων περιοχών. Αποτελώντας ένα πολύπλοκο, λοιπόν, από την φύση του πρόβλημα, υπάρχει μια πληθώρα φυσικών μεταβλητών, τόσο κυματικών χαρακτηριστικών, όσο και χαρακτηριστικών των κατασκευών, που καθορίζουν τόσο αυτό, όσο και τα σχετικά με αυτό φαινόμενα.

Παρακάτω, ορίζονται οι μεταβλητές αυτές σχηματικά ( Εικόνα 4.1) και με τη χρήση καταλλήλων συμβόλων, προτού αναλυθεί ποιοτικά και ποσοτικά το φαινόμενο.



Εικόνα 4.1 Σχηματικός ορισμός των μεταβλητών του προβλήματος (Makris - Memos, 2007)

Οι μεταβλητές που σχετίζονται με τον Υ.Κ. είναι οι εξής:

**B:** πλάτος στέψης του κυματοθραύστη (crest width)

**F:** ελεύθερο βάθος θάλασσας (freeboard) [ $F = h - h'$ ]

**h:** βάθος θάλασσας στον άξονα της κατασκευής (water depth at the axis of the structure)

**h':** ύψος κυματοθραύστη στον άξονά του (height of th structure at its axis)

**h<sub>t</sub>:** βάθος θάλασσας στον προσήνεμο (ανάντη) πόδα της κατασκευής (water depth at the seaward toe of the structure)

**m:** κλίση ανάντη πρηνούς της κατασκευής ( $m = \tan\theta$ , front slope of the breakwater face)

**D<sub>n50a</sub>:** μέση ονομαστική διάμετρος ογκολίθων θωράκισης (nominal rock diameter of armour layer)

Όσον αφορά το πορώδες η του κυματοθραύστη, που ορίζεται ως ο λόγος του όγκου κενών προς τον συνολικό όγκο του κυματοθραύστη, σε περίπτωση διαβαθμισμένης κατασκευής, διαφοροποιείται η τιμή του πορώδους της στρώσης θωράκισης από αυτήν του πυρήνα, αλλά για τη μελέτη της κυματικής μετάδοσης, μπορεί να χρησιμοποιείται μια ενιαία τιμή του πορώδους για όλη την κατασκευή.

Οι μεταβλητές που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά του κυματισμού είναι οι εξής:

**H<sub>i</sub>:** εισερχόμενο ή προσπίπτον ύψος κύματος στον ανάντη πόδα της κατασκευής (*incident wave height*)

**H<sub>t</sub>:** μεταδιδόμενο ύψος κύματος προς την προστατευόμενη περιοχή στα κατάντη του κυματοθραύστη (*transmitted wave height*)

**H<sub>r</sub>:** ανακλώμενο ύψος κύματος από την ανάντη πλευρά της κατασκευής (*reflected wave height*)

**H<sub>o</sub>:** ύψος κύματος στα βαθιά νερά

**L<sub>i</sub>:** τοπικό μήκος κύματος εισερχόμενου κύματος (*incident wave length*)

**L<sub>o</sub>:** μήκος κύματος στα βαθιά νερά

**L<sub>op</sub>:** μήκος κύματος στα βαθιά νερά που αντιστοιχεί στην συχνότητα μέγιστης ενέργειας του φάσματος του κύματος

**T:** περίοδος εισερχόμενου κύματος

$T_p$ : περίοδος κορυφής κύματος, στην οποία αντιστοιχεί η μέγιστη ενέργεια του φάσματος του κύματος (*peak wave period*)

$s$ : καμπυλότητα ή κλίση εισερχόμενου κύματος ( $s = \frac{H_i}{L_i}$ )

$s_{op}$ : καμπυλότητα ή κλίση κύματος για το μήκος κύματος στα βαθιά νερά που αντιστοιχεί στην συχνότητα μέγιστης ενέργειας του φάσματος του κύματος

( $s_{op} = \frac{H_i}{L_{op}}$ )

$\xi$ : αριθμός Iribarren εισερχόμενου κύματος ( $\xi = \frac{m}{s^{1/2}}$ )

$\xi_{op}$ : αριθμός Iribarren για το μήκος κύματος στα βαθιά νερά που αντιστοιχεί στην συχνότητα μέγιστης ενέργειας του φάσματος του κύματος ( $\xi_{op} = \frac{m}{s_o^{1/2}}$ )

$k$ : αριθμός κύματος ( $k = \frac{2\pi}{L}$ )

$\sigma$ : σταθερά περιοδικότητας ως προς τον χρόνο ( $\sigma = \frac{2\pi}{T}$ )

$\eta$ : στιγμιαία στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας πάνω από τη Μ.Σ.Η. λόγω του κύματος, διαφορετική σε κάθε σημείο της ροής ( $\eta > 0$  για υπερύψωση)

$g$ : η επιτάχυνση της βαρύτητας ( $=9.81 \text{ m/s}^2$ )

Το σημαντικότερο μέγεθος για την ποσοτική εκτίμηση του φαινομένου της κυματικής μετάδοσης κατάντη του Υ.Κ. και συνεπώς και της απόδοσης του έργου στο οποίο εστιάζει και η παρούσα διπλωματική εργασία, είναι ο **αδιάστατος συντελεστής κυματικής μετάδοσης (transmission coefficient)  $K_t$** , ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος του μεταδιδόμενου  $H_t$  προς το εισερχόμενο ύψος κύματος  $H_i$ :

$$K_t = \frac{H_t}{H_i} \quad (4.1)$$

Το εισερχόμενο ύψος κύματος ( $H_i$ ), το μεταδιδόμενο ( $H_t$ ) και το ανακλώμενο ( $H_r$ ) αναφέρονται στο χαρακτηριστικό ή σημαντικό ύψος κύματος  $H_s$  (significant wave height) των καταγραφών, το οποίο θεωρείται το αντιπροσωπευτικό ύψος του συνόλου της καταγραφείσας διαταραχής. Ορίζεται ως το μέσο ύψος των υψηλότερων 33% των κυμάτων και συμβολίζεται και ως  $H_{1/3}$ . Ανάλογα με την χρησιμοποιούμενη μέθοδο ανάλυσης των καταγραφών των κυματισμών, που προέκυψαν από τους μετρητές κατά την διάρκεια των πειραμάτων, το ύψος  $H_s$  προσεγγίζεται με ένα από τα ακόλουθα δύο ύψη κύματος:

$H_{\sigma}$ : όπως εκτιμάται από την τυπική απόκλιση  $\sigma$  της καταγραφής της ελεύθερης επιφάνειας  $\eta(t)$  σε συνάρτηση με το χρόνο (ανάλυση στην περιοχή του χρόνου), οπότε:

$$H_{\sigma} = 4\sigma \quad (4.2)$$

$H_{m0}$ : όπως εκτιμάται από την ροπή μηδενικής τάξης  $m_0$  της πυκνότητας ενέργειας του φάσματος του καταγεγραμμένου κυματισμού (ανάλυση στην περιοχή των συχνοτήτων ή φασματική ανάλυση για στενό εύρος φάσματος), οπότε:

$$H_{m0} = 4\sqrt{m_0} \quad (4.3)$$

Άλλα συχνά χρησιμοποιούμενα στατιστικά ύψη κύματος αποτελούν το μέγιστο (ελάχιστο) ύψος κύματος της καταγραφής  $H_{max}$  ( $H_{min}$ ), το μέσο στατιστικό ύψος της καταγραφής  $H_m$  και γενικά το ύψος  $H1/n$ , που ορίζεται ως το μέσο ύψος των υψηλότερων  $(100/n)$  % των κυμάτων στην καταγραφή. Αντίστοιχα για τις περιόδους ορίζονται επίσης η μέση στατιστική περίοδος  $T_m$  και η χαρακτηριστική περίοδος  $T_s$ , ως η μέση περίοδος των υψηλότερων 33% του συνόλου των κυμάτων. Έχει βρεθεί ότι η περίοδος κορυφής του φάσματος  $T_p$  συνδέεται με την  $T_s$  με την σχέση:  $T_s = 0.95T_p$ .

Τα εισερχόμενα ύψος και μήκος κύματος, αποτελούν τοπικές τιμές ύψους  $H$  και μήκους  $L$ , στο σημείο που το κύμα προσεγγίζει τον ανάντη πόδα της κατασκευής και εξαρτώνται από το βάθος  $h_t$ , που καθορίζει την περιοχή νερών, σε σχέση και με τα χαρακτηριστικά του κύματος. Έτσι, ανάλογα με το αν βρίσκεται σε βαθιά, ενδιάμεσα ή ρηχά νερά, τα τοπικά ύψος και μήκος κύματος μπορεί να διαφέρουν από τα αντίστοιχα  $H_0$  και  $L_0$  στα ανοιχτά (βαθιά νερά), λόγω του φαινομένου της ρήχωσης, των απωλειών ενέργειας λόγω τριβών στον πυθμένα ή ακόμα και της θραύσης προτού το κύμα φθάσει στην κατασκευή. Αντίθετα, η περίοδος παραμένει αμετάβλητη καθ' όλη την διάρκεια της διάδοσης του κύματος, πριν την θραύση. Ως γνωστόν, τα μήκη κύματος  $L_0$  και  $L$ , στην περιοχή μεταξύ ανοικτής θάλασσας και θραύσεως, σχετίζονται με την περίοδο του κύματος  $T$  και με το βάθος νερού  $h$  με τις ακόλουθες σχέσεις, κάνοντας την παραδοχή ότι η ανάκλαση του κυματισμού από τον πυθμένα και οι λοιπές απώλειες ενέργειας είναι αμελητέες:

#### Εξίσωση βαθιών νερών

$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} \quad \text{για} \quad \frac{h}{L} \geq 0.5 \quad (4.4)$$

#### Εξίσωση ενδιάμεσων νερών



$$L_o = L_o \tanh\left(2\pi \frac{h}{L}\right) \text{ για } \frac{h}{L} < 0.5 \quad (4.5)$$

Το μήκος κύματος  $L$  από την παραπάνω σχέση υπολογίζεται με διαδοχικές προσεγγίσεις.  
Η σχέση αυτή παράγωγη σχέση της γνωστής ως «εξίσωσης διασποράς» σχέσης:

$$\sigma^2 = gk \tanh(kh) \quad (4.6)$$

## 4.2 Βασικές παράμετροι επιρροής της κυματικής μετάδοσης πίσω από ύφαλο κυματοθραύστη

Από τα συμπεράσματα που εξάγονται μελετώντας την υπάρχουσα έως σήμερα βιβλιογραφία, διαπιστώνεται πως αρκετές από τις μεταβλητές που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο είναι καθοριστικές για το φαινόμενο της κυματικής μετάδοσης στα κατάντη ενός βυθισμένου κυματοθραύστη. Είτε από πειραματικά είτε από αριθμητικά μοντέλα, οι περισσότεροι ερευνητές έχουν εστιάσει στις παρακάτω μεταβλητές:

### ✚ Εισερχόμενο ύψος κύματος ( $H_i$ )

Το εισερχόμενο ύψος κύματος  $H_i$  αποτελεί μία από τις βασικότερες παραμέτρους που συμβάλλουν στο φαινόμενο της κυματικής μετάδοσης. Στην περίπτωση σύνθετων κυματισμών εκφράζεται ως το σημαντικό ύψος κύματος  $H_s$  (significant wave height). Τα κύματα με μικρά ύψη κύματος είναι αυτά που περνούν πιο εύκολα στα κατάντη της κατασκευής σε αντίθεση με τα κύματα μεγάλου ύψους κύματος τα οποία χάνουν μεγάλα ποσά ενέργειας και θραύονται πιο εύκολα.

### ✚ Πλάτος στέψης ( $B$ )

Αρκετά σημαντική παράμετρος στην κυματική μετάδοση είναι και το πλάτος στέψης  $B$ . Γενικά ένα σχετικά μεγάλο πλάτος στέψης μειώνει την κυματική μετάδοση (Briganti, 2004), συνεπώς και τον συντελεστή κυματικής μετάδοσης  $K_t$ , αφού όσο αυξάνει το σχετικό πλάτος  $B/H_i$  σε έναν Υ.Κ. οι κυματισμοί θραύονται πιο εύκολα και μεγάλα ποσά ενέργειας που μεταφέρουν καταστρέφονται πάνω στη στέψη (Van Der Meer & Daemen, 1994).

### ✚ Περίοδος και Μήκος εισερχομένου κύματος ( $T$ & $L$ )

Άλλη μια βασική παράμετρος που επηρεάζει την κυματική μετάδοση είναι η περίοδος του εισερχόμενου ύψους κύματος  $T_p$ , άρα και το μήκος του εισερχόμενου κύματος  $L_i$  το οποίο σχετίζεται άμεσα με αυτή. Μεγαλύτερη περίοδος δίνει κύματα μεγαλύτερου μήκους άρα μικρότερης καμπυλότητας. Αυτά τα κύματα θραύονται σε μικρότερο βαθμό πάνω από τον Υ.Κ. και εάν αυτός έχει ενός βαθμού διαπερατότητα, περνάνε ευκολότερα μέσα από τους πόρους

της κατασκευής χωρίς να επέλθουν σημαντικές απώλειες λόγω τριβών σε αυτούς. Όμως, αυτό που έχει παρατηρηθεί είναι πως σε διαπερατές κατασκευές, για μεγάλες τιμές του ελεύθερου βάρους  $F$ , μείωση της καμπυλότητας του κύματος δεν οδηγεί σε μεγαλύτερες τιμές  $K_t$  (Van der Meer & Daemen, 1994).

#### **Ελεύθερο βάθος θάλασσας ( $F$ )**

Η κρίσιμότερη παράμετρος που επηρεάζει το συντελεστή μετάδοσης άρα και την απόδοση της κατασκευής είναι το ελεύθερο βάθος θάλασσας κατά συνέπεια και 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.

#### **Κλίση πρανών της κατασκευής ( $m$ )**

Τόσο το προσήνεμο όσο και το υπήνεμο πρανές μιας ύφαλής κατασκευής επηρεάζουν και συνεισφέρουν στην απομείωση της κυματικής μετάδοσης όταν είναι κατασκευασμένα με ήπιες κλίσεις. Στο προσήνεμο πρανές, σε ηπιότερες κλίσεις, παρατηρείται μεγαλύτερη κυματική ενέργεια λόγω θραύσης σε σχέση με πιο απότομες κλίσεις. Αντίστοιχα και στο υπήνεμο σε πιο ήπιες κλίσεις παρατηρείται απώλεια ενέργειας λόγω επιφανειακής τριβής με την κατασκευή.

#### **Διάμετρος ογκολίθων θωράκισης ( $D_{n50a}$ )**

Τέλος αξιοσημείωτη είναι και η σημασία της ονομαστικής διαμέτρου  $D_{n50a}$  των ογκολίθων θωράκισης μιας ύφαλής κατασκευής. Μεγάλη διάμετρος ογκολίθων σημαίνει μεγάλη τραχύτητα και διαπερατότητα της κατασκευής και συνεπώς μεγαλύτερη απώλεια ενέργειας.

### 4.3 Εμπειρικοί τύποι υπολογισμού του συντελεστή κυματικής μετάδοσης $K_t$

Υπάρχει μια σειρά αριθμητικών μοντέλων για τον υπολογισμό του  $K_t$  για ύφαλους διαπερατούς κυματοθραύστες (Permeable Submerged Breakwaters, P.S.B.) αλλά έχουν σημαντικούς περιορισμούς ως προς το πεδίο εφαρμογής τους. Οι περιορισμοί στο σύνολό τους έχουν να κάνουν είτε με την γεωμετρία και τις διαστάσεις της κατασκευής είτε με τη βυθομετρία και το κυματικό κλίμα. Γενικότερα οι τύποι που υπάρχουν στη μέχρι και σήμερα βιβλιογραφία δεν επαρκούν για την εξαγωγή απολύτως αξιόπιστων αποτελεσμάτων.

Στην παράγραφο αυτή παρατίθενται κάποιοι από τους ημι-εμπειρικούς τύπους υπολογισμού του συντελεστή κυματικής μετάδοσης  $K_t$ , που έχουν διατυπωθεί τις τελευταίες τρεις δεκαετίες από επιστήμονες και ερευνητές και που χρησιμοποιήθηκαν / εξετάστηκαν για την εξαγωγή αποτελεσμάτων στην παρούσα διπλωματική εργασία. Αυτοί από τους οποίους εξήχθησαν και τα πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα, διερευνήθηκαν περαιτέρω.

#### i. D' Angremond, Van der Meer και De Jong (1996)

Οι D' Angremond et al. (1996) επανεξέτασαν τα δεδομένα που χρησιμοποίησαν οι Van der Meer και Daemen (1994) οι οποίοι πρότειναν εισαγωγή της διαμέτρου των ογκολίθων θωράκισης  $D_{n50a}$  ως παράμετρο, που λαμβάνει έμμεσα υπόψη την διαπερατότητα της κατασκευής και συμπεριέλαβαν και νέα δεδομένα από πειραματικές διερευνήσεις στο Delft Hydraulics (1993, 1994), όπου εξετάστηκαν και λείες, αδιαπέρατες κατασκευές και κάποιες κατασκευές με στρώση θωράκισης από τεχνητές μονάδες Tetrapods και Acropods. Στόχος τους ήταν να βρεθεί μια διορθωμένη έκφραση που θα λαμβάνει υπόψη την τραχύτητα και την διαπερατότητα των κατασκευών. Η ανάλυση της ευρείας αυτής βάσης δεδομένων έγινε αρχικά με παρόμοιο τρόπο, με αυτόν που πρώτα προτάθηκε από τον Van der Meer (1990), οδηγώντας σε σχέση της μορφής:

$$K_t = a \frac{F}{H_i} + b \quad (4.7)$$

όπου ο συντελεστής  $a$  θεωρήθηκε ανεξάρτητος των υπολοίπων παραμέτρων του προβλήματος και ίσος με  $a = 0.4$ . και ο συντελεστής  $b$  προσδιορίζει την τιμή του  $K_t$ , όταν  $F=0$ . Ο συντελεστής  $b$  υπολογίζεται συναρτήσει του πλάτους στέψης και του αριθμού Iribarren ξορ, που θεωρείται από τους συγγραφείς ως δείκτης θραύσης, οπότε:

$$b = A_{str} \left( \frac{B}{H_i} \right)^{-0.31} (1 - e^{-0.5\xi_{op}}) \quad (4.8)$$

Ο  $A_{str}$  λαμβάνει υπόψη τον τύπο και την διαπερατότητα της κατασκευής, παίρνοντας διαφορετικές τιμές κάθε φορά:

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

$A_{str} = 0.80$ , για λείες, αδιαπέρατες κατασκευές (για παράδειγμα θωράκιση γεμισμένη με ασφαλτικά)

$A_{str} = 0.75$ , για στρώματα από μπλόκια από σκυρόδεμα (block mattresses)

$A_{str} = 0.70$ , για γεωφάσματα ή αμμόσακους (gabion mattresses)

Οι περιορισμοί για την εφαρμογή της σχέσης, που προέκυψαν ούτως ώστε να αποφεύγεται θραύση των κυμάτων πριν προσεγγίσουν την κατασκευή στο εργαστήριο, είναι:

$$\text{Για } -2.5 < \frac{F}{H_i} < 2.5 \quad (4.9)$$

$$s_{op} \leq 0.06$$

$$H_i / h_t \leq 0.54$$

Ο τύπος που προέκυψε και διερευνήθηκε στην παρούσα διπλωματική προκύπτει ως:

$$K_t = 0.4 \frac{F}{H_i} + 0.64 \left( \frac{B}{H_i} \right)^{-0.31} (1 - e^{-0.5\xi}), \quad 0.075 \leq K_t \leq 2.5 \quad (4.10)$$

Από επόμενες έρευνες βρέθηκε ότι ο παραπάνω προτεινόμενος εμπειρικός τύπος περιορίζεται στις περιπτώσεις για τις οποίες ισχύει για

$$\frac{B}{H_i} < 10$$

δηλαδή όχι για πολύ ευρύ πλάτος στέψης, καθώς το σφάλμα στην πρόβλεψη του  $K_t$  αυξάνεται με αύξηση του παραπάνω λόγου (Briganti et al., 2004).

## ii. Seabrook & Hall (1998)

Οι Seabrook και Hall (1998) διεξήγαγαν πειράματα σε δύο και τρεις διαστάσεις, αποκλειστικά σε βυθισμένους κυματοθραύστες από λιθορριπή, με διαβάθμιση στρώσεων θωράκισης και πυρήνα, με τα αποτελέσματά τους να δείχνουν ότι οι βασικές παράμετροι που επηρεάζουν τον  $K_t$  είναι η σχετική βύθιση της κατασκευής, το εισερχόμενο ύψος κύματος και το πλάτος στέψης. Το πρόγραμμα των δοκιμών περιλάμβανε 13 διαφορετικές γεωμετρικές κατασκευών, για 5 διαφορετικά βάθη νερού, με μεταβαλλόμενα χαρακτηριστικά των εισερχομένων φασματικών κυματισμών, δίνοντας τελικώς ένα σύνολο 800 δοκιμών. Οι αναλύσεις του  $K_t$  έγιναν πραγματοποιώντας γραφική ανάλυση των τάσεων μεταβολής του  $K_t$ , ακολουθούμενη από στατιστική ανάλυση εναλλακτικών εξισώσεων υπολογισμού του  $K_t$  σε σχέση με καθοριστικές αδιάστατες παραμέτρους.

Προτάθηκαν νέες αδιάστατες μεταβλητές, που είναι σχετικότερες, κατά τους συγγραφείς, με τις φυσικές διεργασίες που επηρεάζουν την κυματική μετάδοση. Το φαινόμενο της θραύσης θεωρούν ότι καθορίζεται από την σχετική βύθιση  $F/H_i$ , που επηρεάζει πολύ τον  $K_t$ , ειδικά για τις μικρές τιμές της, ενώ η υπερπήδηση, καθοριστική για μικρή βύθιση του Υ.Κ., εκφράζεται με τον λόγο  $H_i/B$ . Η εισαγωγή της παραμέτρου  $FH_i/(BD_{n50a})$  εκφράζει την απώλεια ενέργειας του κύματος λόγω τριβών στην επιφάνεια της κατασκευής, ενώ η επίδραση του πορώδους λαμβάνεται έμμεσα υπόψη με την διάμετρο των ογκολίθων θωράκισης, μέσω της παραμέτρου  $BF/(LiD_{n50a})$ , που εκφράζει την επίδραση του μήκους κύματος στην ταχύτητα ροής στα κενά της κατασκευής, την επίδραση του ελεύθερου βάθους νερού στην ποσότητα της ροής που αντιστοιχεί μέσα στην στρώση θωράκισης και την επίδραση του πλάτους στέψης στις απώλειες ενέργειας λόγω ροής στο πορώδες μέσο. Κατέληξαν ότι η επίδραση του πλάτους στέψης είναι σημαντική όσον αφορά την μεταφορά ενέργειας στις υψηλότερες αρμονικές του φάσματος κατά την αλληλεπίδραση κύματος- Υ.Κ. Η τελική προτεινόμενη εξίσωση είναι:

$$K_t = 1 - \left[ \exp\left(-0.65 \frac{F}{H_i} - 1.09 \frac{H_i}{B}\right) + 0.047 \frac{BF}{LiD_{n50a}} - 0.067 \frac{FH_i}{BD_{n50a}} \right] \quad (4.11)$$

Με όρια εφαρμογής τα εξής:

$$0 \leq \frac{BF}{LiD_{n50a}} \leq 7.08$$

$$0 \leq \frac{FH_i}{BD_{n50a}} \leq 2.14$$

### iii. Briganti, Van der Meer, Buccino και Calabrese (2004)

Οι Briganti et al. (2004) στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος DELOS (Environmental Design of Low Crested Coastal Defence Structures) επέκτειναν και τροποποίησαν τον προηγούμενο τύπο των D' Angremond et al. (1996) για πιο ευρείας στέψης κατασκευές. Για τον σκοπό αυτό συγκέντρωσαν μία πολύ ευρεία βάση δεδομένων με πάνω από 2000 πειραματικές δοκιμές μετάδοσης κυματισμού πίσω από χαμηλής στέψης κατασκευές σε δύο διαστάσεις, που περιελάμβανε τα δεδομένα των Van der Meer και Daemen (1994), των D' Angremond et al. (1996), των Seabrook και Hall (1998), των Hirose et al. (2000) που εξέτασαν τον νέο, τεχνητό τύπο μονάδων θωράκισης Aquareefs και των Melito και Melby (2002), που εξέτασαν κατασκευές θωρακισμένες με τα τεχνητά στοιχεία Core Loc. Επίσης, χρησιμοποίησαν νέα δεδομένα που προέκυψαν στα πλαίσια του DELOS, για διαπερατές κατασκευές από λιθορριπή υπό την δράση φασματικών κυματισμών στο UCA (University of Cantabria, 2001), στο UPC (Polytechnic University of Catalonia, 2002) και στο Coastal Research Center (FZK, Αννόβερο, 2002). Ο τύπος στον οποίο καταλήγουν για χαμηλής στέψης διαπερατές κατασκευές, και όχι για λείες και αδιαπέρατες είναι:

Για  $\frac{B}{H_i} > 10$

$$K_t = 0.35 \frac{F}{H_i} = 0.51 \left(\frac{B}{H_i}\right)^{-0.65} (1 - e^{-0.41\xi_{op}}) \quad (4.12)$$

$$0.05 \leq K_t \leq 0.93 - 0.006 \frac{B}{H_i}$$

#### iv. Siladharma & Hall (2003)

Επεκτείνοντας την προσπάθεια του Seabrook (1997) και για να συμπεριληφθεί η επίδραση του φαινομένου της περίθλασης στον τύπο υπολογισμού του  $K_t$ , οι Siladharma και Hall (2003) ανέπτυξαν μία νέα έκφραση, εφαρμόζοντας μεθοδολογία μη γραμμικής απόκλισης εξαρτημένης στατιστικής μεταβλητής. Χρησιμοποίησαν πειραματικά αποτελέσματα κυματικής μετάδοσης σε τρισδιάστατο μοντέλο βυθισμένου κυματοθραύστη και οι αδιάστατες παράμετροι που συμμετείχαν στην ανάλυση είναι αντίστοιχες με αυτές των Seabrook και Hall (1998). Ο τύπος για τρισδιάστατη θεώρηση του προβλήματος και ενσωμάτωση όρου για την περίθλαση είναι:

$$K_t = -0.869 \exp\left(-\frac{F}{H_i}\right) + 1.049 \exp\left(-0.003 \frac{B}{H_i}\right) - 0.026 \frac{FH_i}{BD_{n50a}} - 0.005 \frac{B^2}{L_i D_{n50a}} + 0.003 \frac{h' r}{h_t L_p} \cos(\varphi - \varphi_0) \quad (4.13)$$

όπου:

$r$ : η ακτινική απόσταση του εξεταζόμενου σημείου της προστατευόμενης περιοχής από το ακρομώλιο

$\varphi_0$ : η γωνία πρόσπτωσης των ορθογωνικών του κύματος, σε σχέση με τον άξονα της κατασκευής στο ακρομώλιο

$\varphi$ : η τελική γωνία που σχηματίζουν οι ορθογωνικές του κύματος με τον άξονα της κατασκευής στο εξεταζόμενο σημείο της προστατευόμενης περιοχής, η οποία είναι διαφορετική από την φολόγω του φαινομένου της περίθλασης

Υπολογίσθηκαν οι στατιστικές παράμετροι αξιολόγησης  $R^2 = 0.854$  και  $\sigma = 0.07$ . Ο τύπος για τις τρεις διαστάσεις φαίνεται να αποδίδει καλύτερα στην εξής περιοχή τιμών του  $K_t$ :

$$0.4 \leq K_t \leq 0.8$$

#### v. Friebel και Harris (2003)

Οι Friebel and Harris to 2003 εξέλιξαν τη θεώρηση του προβλήματος της κυματικής μετάδοσης σε δύο διαστάσεις επανεξετάζοντας και βελτιώνοντας κάποια υπάρχοντα μοντέλα. Συγκεκριμένα συνδιάστηκαν και αναλύθηκαν πέντε βάσεις δεδομένων: Daemen (1991),

Daemrich και Kahle (1985), Seabrook και Hall (1997), Seeling (1980) και Van der Meer (1988). Το μοντέλο των Friebel and Harris περιελάμβανε όλες τις απαραίτητες παραμέτρους για την απομείωση του κύματος παρουσία Υ.Κ. και έδινε καλύτερα αποτελέσματα σε σχέδια με άλλα μοντέλα. Τα αποτελέσματα τους επιβεβαίωναν πως η κυματική μετάδοση επηρεάζεται πολύ από τον λόγο του ελεύθερου βάθους νερού προς το εισερχόμενο ύψος κύματος ( $F/H_i$ ). Επιπλέον ανέφεραν πως εξίσου σημαντική επίδραση είχε ο λόγος του πλάτους στέψης προς το βάθος νερού ( $B/h$ ), το ύψος της κατασκευής προς το βάθος νερού ( $h'/h$ ), το πλάτος στέψης προς το εισερχόμενο ύψος κύματος ( $B/L_i$ ) και το ελεύθερο βάθος νερού προς το πλάτος στέψης ( $F/B$ ).

Η σχέση που προτείνεται με τις μεταβλητές που προαναφέρθηκαν είναι:

$$K_t = -0.4969 \exp\left(-\frac{F}{H_i}\right) - 0.0292\left(\frac{B}{h}\right) - 0.4257\left(\frac{h'}{h}\right) - 0.06961 \ln\left(\frac{B}{L_i}\right) + 0.1359\left(\frac{F}{B}\right) + 1.0905 \quad (4.14)$$

Οι περιορισμοί για τους οποίους ισχύει ο παραπάνω τύπος είναι:

$$0 \leq \frac{F}{H_i} \leq 8.696$$

$$0.286 \leq \frac{B}{h} \leq 8.750$$

$$0.440 \leq \frac{h'}{h} \leq 1$$

$$0.024 \leq \frac{B}{L_i} \leq 1.890$$

$$0 \leq \frac{F}{B} \leq 1.050$$

#### vi. **Buccino και Calabrese (2007)**

Οι Buccino και Calabrese (2007) στην δημοσίευσή τους περιγράφουν ένα ημι-εμπειρικό μοντέλο πρόβλεψης του  $K_t$ , που ανέπτυξαν οι ίδιοι, όπου οι εξισώσεις προέκυψαν ξεκινώντας από μια σχηματοποίηση των φυσικών διεργασιών που καθορίζουν το φαινόμενο: την θραύση πάνω από την στέψη, την υπερπήδηση και την μετάδοση μέσα από τα κενά της κατασκευής. Έτσι, γίνεται αρχικά θεωρητική προσέγγιση με χονδροειδείς απλοποιήσεις για να προκύψουν απλούστερες σχέσεις που στην συνέχεια ελέγχονται με μια ευρεία βάση παλαιότερων πειραματικών δεδομένων. Γίνεται διαχωρισμός σε ύφαλες και έξαλες κατασκευές, οπότε εδώ παρουσιάζεται η πρώτη μόνο περίπτωση:

Για  $0.833 \leq \frac{F}{H_i} \leq 2$ :

$$K_t = 1 / [1.18(H_i/F)^{0.12} + 0.33(H_i/F)^{1.5} B / (H_i L)^{1/2}] \quad (4.15)$$

$$0 < \frac{F}{H_i} \leq 2$$

$$0.3 \leq \frac{B}{(H_i L)^{1/2}} \leq 10.5$$

$$1 \leq \xi_{op} \leq 8$$

$$s_{op} \geq 0.01$$

Για  $0.002 \leq s_{op} < 0.01$ , ο σταθερός συντελεστής 0.33 στην πρώτη έκφραση του  $K_t$  αντικαθίσταται με τον εξής όρο:

$$\frac{1}{2G''} = 0.33 + 47(0.01 - s_{op}) \quad (4.16)$$



## 5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ – ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

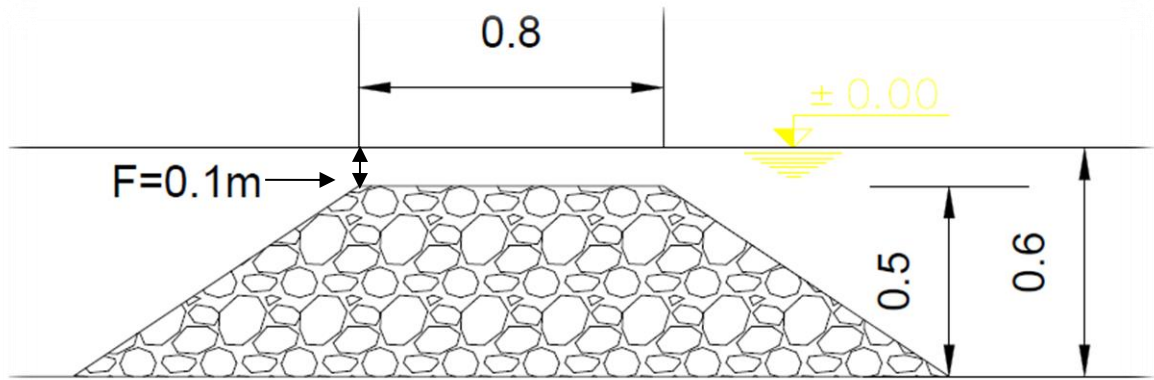
### 5.1 Περιγραφή των πειραματικών διατάξεων που δημιουργήθηκαν στο Εργαστήριο Λιμενικών Έργων 2018

Για τις ανάγκες της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, και συγκεκριμένα για τη διερεύνηση του συντελεστή κυματικής μετάδοσης πάνω από λιθορριπτούς ύφαλους διαπερατούς κυματοθραύστες με παρουσία λειμώνα Ποσειδωνίας στη στέψη τους, αξιοποιήθηκαν οι πειραματικές μετρήσεις που συλλέχθηκαν από τη διεξαγωγή των πειραμάτων των Ziros & Memos (2019), Repousis & Memos (2019), και ειδικότερα αυτές που αντιστοιχούν σε περιπτώσεις μονοχρωματικών κυματισμών.

Τα πειράματα αυτά πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Λιμενικών Έργων του ΕΜΠ (Ε.Λ.Ε.) στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου εντός της Δεξαμενής Δ1 υπό την εποπτεία του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών. Η δεξαμενή είχε χωριστεί στη μέση περίπου και εντός αυτής της περιοχής διαστάσεων 7.00 m πλάτους και 22.00 m μήκους, διαμορφώθηκαν τέσσερις συνολικά διώρυγες, τα διαχωριστικά των οποίων κατασκευάστηκαν από φύλλα λαμαρίνας κατάλληλα στερεωμένων. Περιμετρικά η δεξαμενή έχει απορροφητικό πρανές από λιθορριπή κλίσης 1/1.5 και κατάλληλης διαμέτρου, ώστε να εξασφαλίζεται ο μικρότερος δυνατός συντελεστής ανάκλασης. Για την παραγωγή των κυμάτων χρησιμοποιήθηκε η κυματογεννήτρια του Ε.Λ.Ε. κατασκευασμένη από την εταιρία *HR Wallingford*, και αποτελείται από ένα ενιαίο μέτωπο μεγάλης επιφάνειας (6.0x1.20 m), το οποίο κινείται μέσω υδραυλικού συστήματος και διατηρείται πάντα σε κατακόρυφη θέση. Η συγκεκριμένη κυματογεννήτρια ελέγχεται μέσω του λογισμικού WAVEDATA, επίσης της εταιρίας *HR Wallingford*. Ζητήθηκε και έγινε η ανάκτηση των πρωτογενών δεδομένων που είχαν συλλεχθεί με τη χρήση του λογισμικού αυτού, τα οποία αποτελούνται από ένα σημαντικό όγκο συντελεστών κυματικής μετάδοσης για διαδιδόμενους μονοχρωματικούς και σύνθετους κυματισμούς πίσω από φυσικά μοντέλα ύφαλων διαπερατών κυματοθραυστών από λιθορριπή και απότομες κλίσεις πρανών με και χωρίς Ποσειδωνία να καλύπτει τη στέψη τους.

Συγκεκριμένα τα μοντέλα κατασκευάστηκαν διαδοχικά εντός της διώρυγας '3' (Εικόνα 5.1), η οποία έχει πλάτος 0.80 m και μήκος 4,0 m. Για τις μετρήσεις και τον υπολογισμό του συντελεστή κυματικής μετάδοσης τοποθετήθηκαν δύο μετρητές ανύψωσης τύπου αντίστασης, ο πρώτος 1.0 m ανάντη των μοντέλων για τη μέτρηση του εισερχόμενου κύματος και ένας 1.0 m από τον υπήνεμο πόδα για τη μέτρηση του εξερχόμενου-διαδιδόμενου κύματος. Επιπρόσθετες λεπτομέρειες για την πειραματική διάταξη αναφέρονται στους Memos et al. 2018, για την εργασία των οποίων χρησιμοποιήθηκε η ίδια διαμορφωμένη πειραματική εγκατάσταση εντός της Δεξαμενής Δ1, ενώ για επιπρόσθετες πληροφορίες για τον τρόπο κατασκευής των ύφαλων κυματοθραυστών εντός αυτής για τη μέτρηση συντελεστών κυματικής μετάδοσης ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει επιπλέον στην εργασία του Ioannis Rouras (2018).

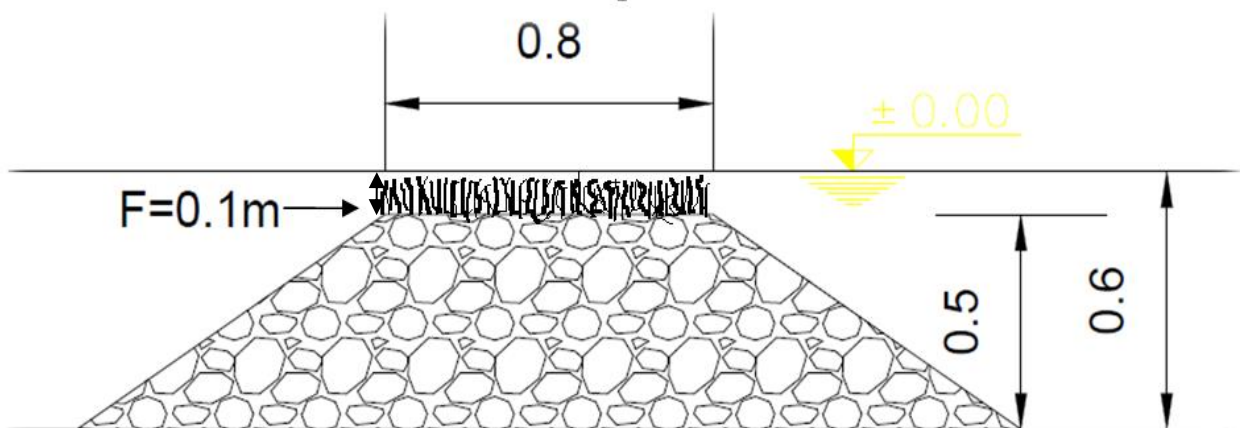




Εικόνα 5.2 Ύφαλος Διαπερατός Κυματοθραύστης από λιθορριπή – Διατομή 1 / Μοντέλο 1α

**Διατομή 1 / Μοντέλο 1β:** Ύφαλος διαπερατός κυματοθραύστης από λιθορριπή με λειμώνα Ποσειδωνίας (Εικόνα 5.3).

Η γεωμετρία της κατασκευής, το κυματικό κλίμα και η βυθομετρία είναι η ίδια με τη διάταξη του μοντέλου 1α. Η πειραματική προσομοίωση της *Posidonia Oceanica* εφαρμόστηκε με την τοποθέτηση μεμονωμένων μίσχων-ριζωμάτων ποσειδωνίας μέσης διαμέτρου 2 cm με συστάδες φύλλων μέσου μήκους μειωμένου σε 0.15 m, σε πλαστικό πλέγμα οπής 2 cm (μέση πυκνότητα ριζωμάτων να ανέρχεται περί τα 150 ανά m<sup>2</sup>). Με το πλέγμα αυτό καλύφθηκε επιφάνεια ίση με αυτήν της στέψης και στερεώθηκε επαρκώς τοποθετώντας μερικές από τις πέτρες της εξωτερικής στρώσης αυτής ώστε να μην παρασύρεται από τους εισερχόμενους κυματισμούς.



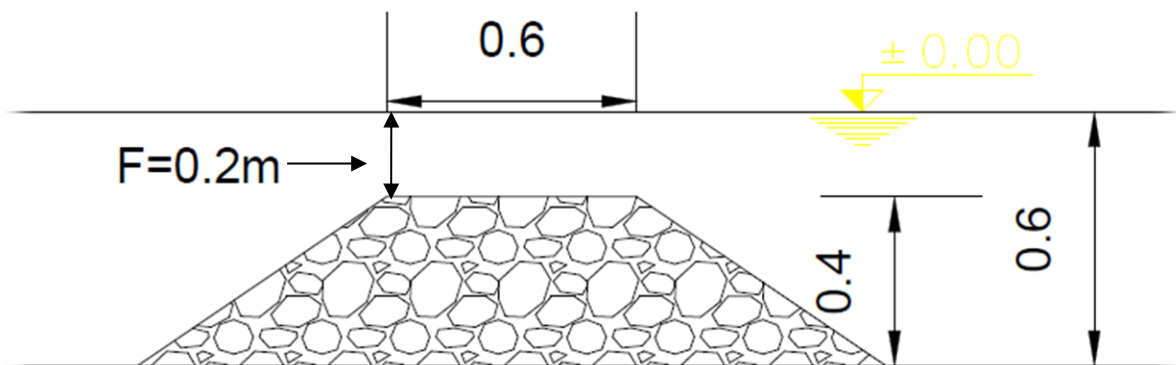
Εικόνα 5.3 Ύφαλος Διαπερατός Κυματοθραύστης από λιθορριπή με λειμώνα Ποσειδωνίας στην στέψη του – Διατομή 1 / Μοντέλο 1β

Ακολουθώντας την κλίμακα ομοιότητας του Froude, οι Ζήρος & Μέμος (2019) χρησιμοποίησαν αληθινά τμήματα φυτών καθώς ένας από τους βασικούς τους στόχους ήταν να αντιπροσωπευτεί πειραματικά η αλληλεπίδραση της φύτευσης με το κύμα και τα φαινόμενα τριβής κρατώντας σταθερές τις φυσικές ιδιότητες όπως είναι η τραχύτητα, η ελαστικότητα και η κίνηση στη ροή τους κύματος. Για να μπορέσει η Ποσειδωνία να ανταπεξέλθει στην κλίμακα της κατασκευής, το πειραματικό λιβάδι Ποσειδωνίας μοντελοποιήθηκε με τη διαχείριση της

απόστασης από το πλέγμα των ριζωμάτων, τη διάμετρο και την πυκνότητα, αλλά και το μέσο μήκος και τον αριθμό των φύλλων σε κάθε στέλεχος, με στόχο να προκύψει ταυτόχρονα μια παρόμοια κλίμακα για τη συνολική επιφάνεια επαφής φυτού-νερού

**Διατομή 2 / Μοντέλο 2α :** Ύφαλος διαπερατός κυματοθραύστης από λιθορριπή (Εικόνα 5.4).

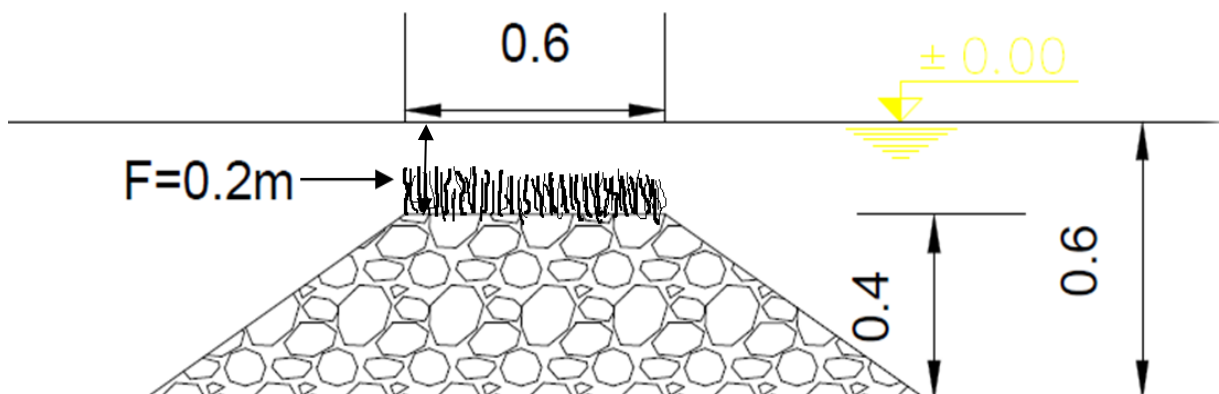
Το ύψος του κυματοθραύστη ήταν 0.40 m και το πλάτος στέψης του 0.60 m. Το υλικό κατασκευής ήταν γωνιώδεις φυσικοί λίθοι μέσης διαμέτρου  $d_{50} \approx 0.12$  m, και η κλίση των πρανών 1:1.5, με το πλάτος στον πυθμένα να διαμορφώνεται στα 1.80 m. Εξετάστηκαν δύο βάθη νερού, 0.50 m και 0.60 m (στην Εικόνα 5.4 απεικονίζεται το Μοντέλο 2α σε βάθος νερού  $h=0.60$ m), και τα κυματικά σενάρια που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία αφορούν μονοχρωματικούς κυματισμούς με εύρος χαρακτηριστικού ύψους κύματος μεταξύ 0.033-0.150 m, και για περιόδους από 1.024 έως 2.048 sec.



Εικόνα 5.4 Ύφαλος Διαπερατός Κυματοθραύστης από λιθορριπή – Διατομή 2 / Μοντέλο 2α για βάθος νερού ίσο με 0,6m

**Διατομή 2 / Μοντέλο 2β :** Ύφαλος διαπερατός κυματοθραύστης από λιθορριπή με λειμώνια Ποσειδωνίας (Εικόνα 5.5).

Η γεωμετρία της κατασκευής, το κυματικό κλίμα και η βυθομετρία είναι η ίδια με τη διάταξη της Διατομής 2α. Η πειραματική προσομοίωση της *Posidonia Oceanica* εφαρμόστηκε σε αντιστοιχία με τη Διατομή 1β.



Εικόνα 5.5 Ύφαλος Διαπερατός Κυματοθραύστης από λιθορριπή με λειμώνα Ποσειδωνίας στην στέψη του – Διατομή 2 / Μοντέλο 2β

## 5.2 Κλίμακες ομοιότητας φυσικών ομοιομάτων

Η κατασκευή με το πραγματικό μέγεθος ονομάζεται πρωτότυπο, ενώ το πανομοιότυπο με το μικρό μέγεθος ονομάζεται ομοίωμα (model).

Οι διατάξεις της παρούσας εργασίας δεν επρόκειτο να αντιστοιχηθούν με κάποιο φυσικό ομοίωμα, όμως θεωρείται σκόπιμο να γίνει μια αναφορά στην αντιστοίχιση των διάφορων φυσικών και γεωμετρικών παραμέτρων μέσω ενός συντελεστή κλίμακας ανάμεσα στα φυσικά μοντέλα και κάποιων υποθετικών πρωτοτύπων.

Η αξιοπιστία της ανάλυσης ομοιωμάτων εξαρτάται από την ομοιότητα ανάμεσα στο πρωτότυπο και στο ομοίωμα του. Όταν η ομοιότητα ανάμεσα στο πρωτότυπο και στο ομοίωμα του είναι πλήρης απ' όλες τις απόψεις τότε αυτή η ομοιότητα ονομάζεται Υδραυλική ομοιότητα.

Γενικά υπάρχουν οι παρακάτω τρεις τύποι ομοιότητας:

- (α) Γεωμετρική ομοιότητα
- (β) Κινηματική ομοιότητα
- (γ) Δυναμική ομοιότητα.

Γεωμετρική ομοιότητα σημαίνει ότι ο λόγος οποιουδήποτε μήκους της πραγματικής κατασκευής προς το αντίστοιχο μήκος του μοντέλου παραμένει σταθερός, δηλαδή πως όλα τα μήκη του μοντέλου είναι λ φορές μικρότερα από τα αντίστοιχα του πρωτότυπου.

$$\lambda = \frac{L_s}{L_m} \quad (5.1)$$

Η σχέση ομοιότητας των μηκών, εμβαδών και όγκων σε σχέση με το πρωτότυπο είναι για  $\lambda$ ,  $\lambda^2$  και  $\lambda^3$  αντίστοιχα.

Κινηματική ομοιότητα σημαίνει ότι οι λόγοι των χρόνων στο πραγματικό φαινόμενο προς τους αντίστοιχους χρόνους στο πείραμα παραμένουν σταθεροί.

$$\tau = \frac{t_s}{t_m} \quad (5.2)$$

Η ταυτόχρονη γεωμετρική και κινηματική ομοιότητα οδηγούν στις ακόλουθες σχέσεις για τις ταχύτητες και τις επιταχύνσεις αντίστοιχα μεταξύ πειράματος και πραγματικού φαινομένου:

$$V_s = \frac{\lambda}{\tau} * V_m \quad \alpha_s = \frac{\lambda}{\tau^2} * \alpha_m \quad (5.3)$$

Τέλος η Δυναμική ομοιότητα απαιτεί εκτός από γεωμετρική και κινηματική ομοιότητα, οι λόγοι των δυνάμεων στο πραγματικό φαινόμενο προς τις αντίστοιχες δυνάμεις στο πείραμα να παραμένουν σταθεροί.

$$\kappa = \frac{F_s}{F_m} \quad (5.4)$$

Η Δυναμική ομοιότητα απαιτεί σταθερούς λόγους σε όλες τις δυνάμεις: Αδρανειακές δυνάμεις, δυνάμεις βαρύτητας, δυνάμεις τριβής.

Όταν υπάρχουν μόνο αδρανειακές δυνάμεις και δυνάμεις βαρύτητας, η ισότητα των αριθμών Froude σε πρωτότυπο και ομοίωμα εξασφαλίζει τη δυναμική ομοιότητα.

Υπενθυμίζεται πως ο αριθμός Froude δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$F = \frac{V}{\sqrt{g * L}} \quad (5.5)$$

Η ισότητα των αριθμών Froude επιτυγχάνεται εύκολα μέσω της επιλογής κατάλληλης (μικρότερης) ταχύτητας για το μοντέλο.

Στον παρακάτω Πίνακας 5-1 δίνονται οι λόγοι ομοιότητας κατά Froude των σημαντικότερων φυσικών παραμέτρων.

Πίνακας 5-1 Λόγοι ομοιότητας διάφορων σημαντικών παραμέτρων (Ρούπας, 2018)

Παράμετρος	Διαστάσεις	Πολλαπλασιαστικός Συντελεστής
<i>Μήκος</i>	$m$	$\lambda$
<i>Επιφάνεια</i>	$m^2$	$\lambda^2$
<i>Όγκος</i>	$m^3$	$\lambda^3$
<i>Μάζα</i>	$kg$	$\lambda^3 * \rho_P / \rho_M$
<i>Ταχύτητα</i>	$m/s$	$\sqrt{\lambda}$
<i>Επιτάχυνση</i>	$m/s^2$	$a_P = a_M$
<i>Χρόνος</i>	$s$	$\sqrt{\lambda}$
<i>Δύναμη</i>	$N$	$\lambda^3 * \rho_P / \rho_M$
<i>Πίεση</i>	$Pa = N/m^2$	$\lambda * \rho_P / \rho_M$

Αξίζει να σημειωθεί πως στα πειράματα της παρούσας εργασίας ο λειμώνας της Ποσειδωνίας δεν είναι υπό κλίμακα παρόμοια με την ύφαλη κατασκευή καθώς πραγματοποιήθηκε φύτευση που να αντιπροσωπεύει την πραγματικότητα (1:1) με διαχείριση τέτοια στην τοποθέτησή της ώστε να ταιριάζει με τις διαστάσεις του έργου.

### 5.3 Πειραματικά αποτελέσματα

Αρχικά, για την **Διατομή 1 (μοντέλο 1α, μοντέλο 1β)** συγκεντρώθηκαν όλα τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα σε δύο ομάδες από τα πειράματα με (ΜΠ) ή χωρίς Ποσειδωνία (ΧΠ) στην στέψη των διατάξεων. Στη συνέχεια ταξινομήθηκαν με βάση την περίοδο, από τη μικρότερη στη μεγαλύτερη (Πίνακας 5-2) ώστε να πραγματοποιηθεί η αντιστοίχισή των κυματικών σεναρίων με παραπλήσιες κυματικές συνθήκες (T, Hi) για την περίπτωση με ή χωρίς ποσειδωνία. Η αντιστοίχιση αυτή έγινε με γνώμονα τη συγκριτική μελέτη της επίδρασης στην τεχνική απόδοση με ή χωρίς την παρουσία ποσειδωνίας.

Παρόλα αυτά όπως φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα σε αντίθεση με τις τιμές των περιόδων τα ύψη κύματος είναι παραπλήσια και εκ πρώτης όψεως δε δύναται η αντιστοίχισή τους. Αυτό συμβαίνει διότι η θέση των μετρήσεων για τους εισερχόμενους κυματισμούς είναι αρκετά μακριά από τη θέση της κυματογεννήτριας και πλησίον των Υ.Δ.Κ. με αποτέλεσμα η ανύψωση της ελεύθερης στάθμης να επηρεάζεται από μετασχηματισμούς των διαδιδόμενων κυματισμών που αλληλεπιδρούν με τις κατασκευές (ρήγωση, ανάκλαση, θραύση, παραγωγή αρμονικών κυμάτων). Επειδή η παρουσία της ποσειδωνίας αλλάζει την γεωμετρία και τα χαρακτηριστικά της κατασκευής τα οποία επηρεάζουν τα παραπάνω φαινόμενα, για ίδιους παραγόμενους κυματισμούς στη θέση της κυματογεννήτριας ( κατά αναλογία εισερχόμενοι κυματισμοί στα βαθειά) με ή χωρίς ποσειδωνία και για ίδιο βάθος νερού, οι μετρήσεις του ύψους κύματος φαίνεται να αποκλίνουν.

Πίνακας 5-2 Δεδομένα Διατομής 1

ΔΙΑΤΟΜΗ 1						
T	Μοντέλο 1β		T	Μοντέλο 1α		Σενάριο
	Hi	Kt		Hi	Kt	
1,024	5,13	0,75	1,024	9,23	0,84	1.1
1,024	6,69	0,65	1,137	2,82	0,74	1.2
1,024	6,84	0,69	1,137	3,76	0,68	1.3
1,137	3,25	0,50	1,137	5,30	0,73	1.4
1,137	5,17	0,63	1,137	5,49	0,76	1.5
1,137	7,86	0,65	1,280	4,32	0,72	1.6
1,137	7,95	0,65	1,280	4,59	0,73	1.7
1,137	10,24	0,54	1,280	5,40	0,72	1.8
1,280	4,25	0,62	1,280	8,66	0,76	1.9
1,280	6,02	0,67	1,462	3,85	0,70	1.10
1,280	8,55	0,69	1,462	3,95	0,76	1.11
1,462	3,81	0,63	1,462	6,29	0,67	1.12
1,462	7,66	0,52	1,462	6,95	0,53	1.13
1,462	11,34	0,45	1,707	4,14	0,79	1.14
1,706	5,01	0,75	1,707	4,30	0,80	1.15
1,706	5,24	0,76	1,707	4,35	0,82	1.16
1,706	6,94	0,83	1,707	8,58	0,62	1.17
1,706	8,09	0,60	1,707	10,40	0,66	1.18
1,706	10,80	0,65	1,707	10,40	0,64	1.19



Επιλέχθηκαν για τις ίδιες τιμές περιόδου (πορτοκαλί επισήμανση) και για παραπλήσια ύψη κύματος (πράσινη επισήμανση) τα τελικά σενάρια (βλ. Αντίστοιχα Kt) που χρησιμοποιήθηκαν για τη εξαγωγή των τελικών διαγραμμάτων.

Ομοίως με τα παραπάνω και για τη Διατομή 2 έχουμε τον ακόλουθο Πίνακα 5-3.

Πίνακας 5-3 Δεδομένα Διατομής 2

ΔΙΑΤΟΜΗ 2						
T	Μοντέλο 2β		T	Μοντέλο 2α		Σενάριο
	Hi	Kt		Hi	Kt	
<b>F=0.2m</b>						
1,024	4,38	0,98	1,138	7,98	0,98	2.1
1,024	7,29	0,95	1,138	11,81	0,90	2.2
1,024	10,54	0,98	1,280	5,44	0,92	2.3
1,024	15,00	0,82	1,280	7,14	0,94	2.4
1,138	3,33	0,95	1,463	9,91	0,56	2.5
1,138	5,81	0,88	1,463	13,97	0,51	2.6
1,138	8,87	0,88	1,463	7,34	0,65	2.7
1,138	12,16	0,88	1,463	5,74	0,48	2.8
1,138	3,55	0,74	1,463	7,68	0,78	2.9
1,280	5,32	0,91	1,707	6,17	0,84	2.10
1,280	6,99	0,92	1,707	8,21	0,83	2.11
1,280	9,89	0,90	1,707	9,85	0,87	2.12
1,463	9,22	0,57	2,048	7,79	0,77	2.13
1,463	12,49	0,53	2,048	12,77	0,77	2.14
1,463	6,91	0,66	2,048	10,36	0,89	2.15
1,463	5,63	0,76				2.16
1,463	7,71	0,76				2.17
1,707	6,09	0,83				2.18
1,707	8,16	0,81				2.19
1,707	9,79	0,83				2.20
2,048	10,03	0,74				2.21
2,048	7,42	0,76				2.22
2,048	12,51	0,75				2.23
2,048	7,28	0,86				2.24
2,048	10,29	0,85				2.25
<b>F=0.1m</b>						
1,024	4,62	0,66	1,024	4,56	0,79	2.26
1,024	7,53	0,68	1,024	7,54	0,73	2.27
1,138	6,24	0,68	1,024	10,63	0,77	2.28
1,138	7,76	0,74	1,138	9,36	0,89	2.29
1,138	10,10	0,60	1,138	5,29	0,74	2.30
1,280	6,59	0,72	1,138	7,58	0,84	2.31
1,280	11,98	0,53	1,280	3,58	0,71	2.32
1,463	8,30	0,75	1,280	5,35	0,73	2.33
1,463	11,60	0,46	1,280	8,41	0,66	2.34
1,707	11,29	0,64	1,280	11,55	0,61	2.35
1,707	8,21	0,63	1,463	8,67	0,66	2.36
1,707	14,44	0,75	1,463	8,65	0,71	2.37
1,707	9,55	0,92	1,463	11,58	0,64	2.38
2,048	9,21	0,93	1,463	4,28	0,90	2.39
			1,707	10,96	0,61	2.40
			1,707	8,58	0,74	2.41
			1,707	13,74	0,79	2.42

Τα εύρη των τιμών του ύψους κύματος και της περιόδου των πειραματικών αποτελεσμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των τελικών διαγραμμάτων και συμπερασμάτων φαίνονται στον παρακάτω Πίνακας 5-4.

Πίνακας 5-4 Εύρη τιμών  $H_i$  και  $T$  για τις Διατομές 1 & 7

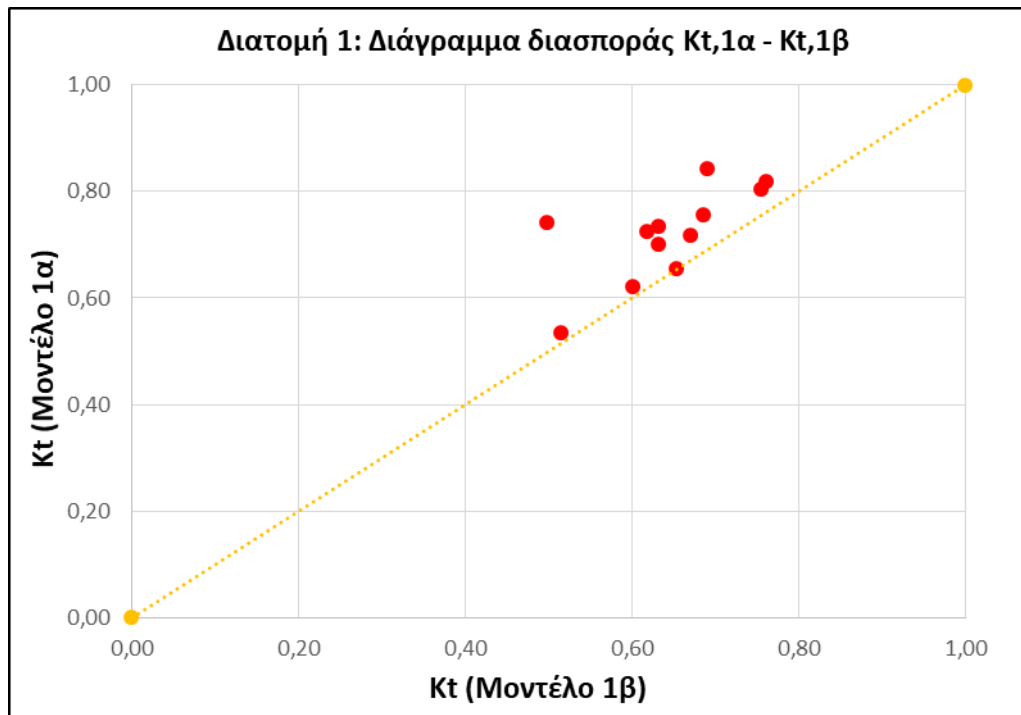
		Range $H_i$ (m)	Range $T$ (s)	Βάθος Νερού $h$ (m)
ΔΙΑΤΟΜΗ 1	1β	0,0325-0,108	1,024 - 1,707	0,6
	1α	0,0282 - 0,104	1,024 - 1,707	0,6
ΔΙΑΤΟΜΗ 2	2β	0,0563 - 0,1251	1,138 - 2,048	0,6
	2α	0,0617 - 0,1277	1,138 - 2,048	0,6
	2β	0,0492 - 0,1444	1,024 - 1,707	0,5
	2α	0,0456 - 0,1374	1,024 - 1,707	0,5

Για την **Διατομή 1** ( $b=0.8m$ ,  $h=0.6m$ ,  $h'=0.5m$ ) οι τιμές περιόδου  $T$  που επιλέχθηκαν και οι τελικοί συντελεστές μετάδοσης  $K_t$  που προέκυψαν από τις διατάξεις με ή χωρίς Ποσειδωνία συγκεντρώνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5-5). Συγκεντρώθηκαν συνολικά δώδεκα (12) σενάρια.

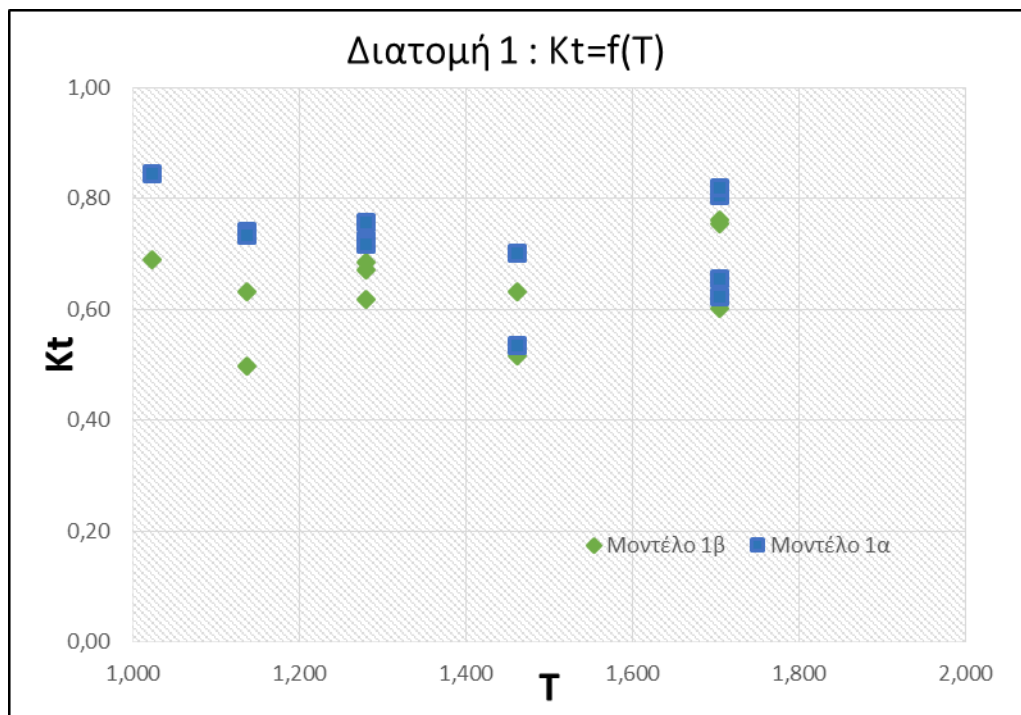
Πίνακας 5-5 Τελικά δεδομένα Διατομής 1

ΔΙΑΤΟΜΗ 1			
T	Μοντέλο 1β	Μοντέλο 1α	Σενάριο
	$K_t$ (ΜΠ)	$K_t$ (ΧΠ)	
1,024	0,69	0,84	1.1
1,137	0,50	0,74	1.2
1,137	0,63	0,73	1.4
1,280	0,62	0,72	1.6
1,280	0,67	0,72	1.8
1,280	0,69	0,76	1.9
1,462	0,63	0,70	1.10
1,462	0,52	0,53	1.13
1,706	0,75	0,80	1.15
1,706	0,76	0,82	1.16
1,706	0,60	0,62	1.17
1,706	0,65	0,66	1.18

Είναι εμφανές πως για τις ίδιες τιμές περιόδου οι συντελεστές κυματικής μετάδοσης  $K_t$  των διατάξεων με Ποσειδωνία στη στέψη στις μικρές τιμές περιόδου  $T$  (1,024 & 1,137) παρουσιάζουν μια μείωση που κυμαίνεται από 14% έως 32% σε σχέση με τους αντίστοιχους  $K_t$  των διατάξεων χωρίς Ποσειδωνία. Όσο η περίοδος αυξάνεται η διαφορά μεταξύ των  $K_t$  (ΜΠ) και  $K_t$ (ΧΠ) μειώνεται και αγγίζει και το 2%. Η γενική εικόνα δείχνει ότι με την παρουσία Ποσειδωνίας επιτυγχάνεται μεγαλύτερη απομείωση της κυματικής ενέργειας όπως φαίνεται και στο ακόλουθο διάγραμμα.



Διάγραμμα 5-1 Διάγραμμα διασποράς των  $K_{t,1\alpha}$  -  $K_{t,1\beta}$  για την Διατομή 1



Διάγραμμα 5-2 Διάγραμμα  $K_t$  -  $T$  για το σύνολο των πειραματικών δεδομένων της Διατομής 1

Στο Διάγραμμα 5-2 είναι εμφανής η διαφοροποίηση του  $K_t$  των δύο μοντέλων 1α και 1β (χωρίς και με παρουσία Ποσειδωνίας αντίστοιχα) για τις ίδιες τιμές της περιόδου  $T$  και τα ίδια κυματικά χαρακτηριστικά. Επίσης παρατηρείται και μια μείωση των τιμών  $K_t$  για ενδιάμεσες τιμές της περιόδου.

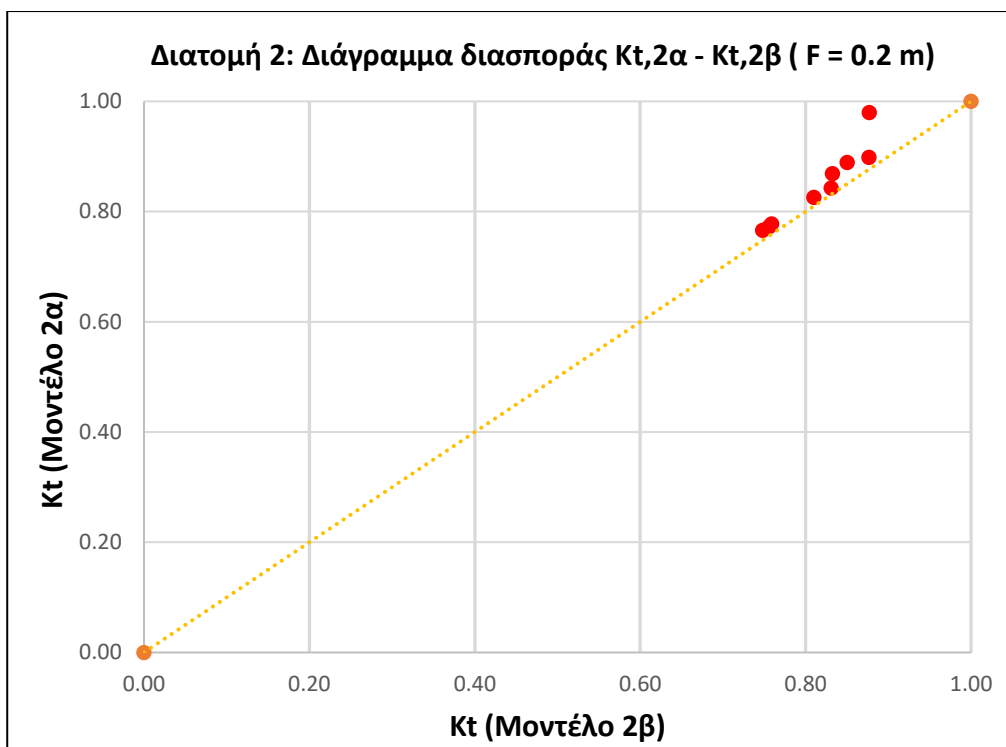
Για την **Διατομή 2** ( $b=0.6m$ ,  $h=0.6m$  &  $h'=0.5m$ ,  $h''=0.4m$ ) οι τιμές περιόδου  $T$  που επιλέχθηκαν και οι τελικοί συντελεστές μετάδοσης  $K_t$  που προέκυψαν από τις διατάξεις με ή χωρίς Ποσειδωνία συγκεντρώνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5-6) και για τα δύο ελεύθερα βάθη ( $F=0.2m$  &  $F=0.1m$ ). Συγκεντρώθηκαν συνολικά δεκαεννέα (19) σενάρια – εννέα (9) για  $F=0.2m$  και δέκα (10) για  $F=0.1m$ .

Πίνακας 5-6 Τελικά δεδομένα Διατομής 2

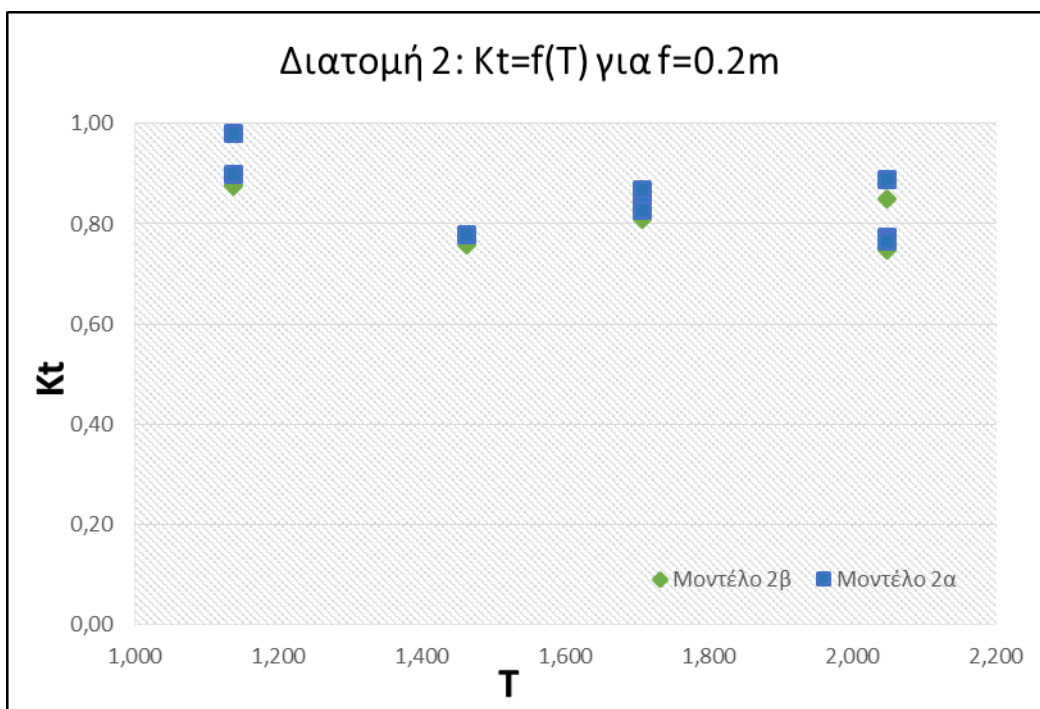
<b>ΔΙΑΤΟΜΗ 2</b>			
<b>T</b>	<b>Μοντέλο 2β</b>	<b>Μοντέλο 2α</b>	<b>Σενάριο</b>
	<b>K<sub>t</sub> (ΜΠ)</b>	<b>K<sub>t</sub> (ΧΠ)</b>	
<b>F=0.2m</b>			
<b>1,138</b>	<b>0,88</b>	<b>0,98</b>	<b>2.1</b>
<b>1,138</b>	<b>0,88</b>	<b>0,90</b>	<b>2.2</b>
<b>1,463</b>	<b>0,76</b>	<b>0,78</b>	<b>2.9</b>
<b>1,707</b>	<b>0,83</b>	<b>0,84</b>	<b>2.10</b>
<b>1,707</b>	<b>0,81</b>	<b>0,83</b>	<b>2.11</b>
<b>1,707</b>	<b>0,83</b>	<b>0,87</b>	<b>2.12</b>
<b>2,048</b>	<b>0,76</b>	<b>0,77</b>	<b>2.13</b>
<b>2,048</b>	<b>0,85</b>	<b>0,89</b>	<b>2.15</b>
<b>2,048</b>	<b>0,75</b>	<b>0,77</b>	<b>2.14</b>
<b>F=0.1m</b>			
<b>1,024</b>	<b>0,66</b>	<b>0,79</b>	<b>2.26</b>
<b>1,024</b>	<b>0,68</b>	<b>0,73</b>	<b>2.27</b>
<b>1,138</b>	<b>0,74</b>	<b>0,84</b>	<b>2.31</b>
<b>1,138</b>	<b>0,68</b>	<b>0,74</b>	<b>2.30</b>
<b>1,280</b>	<b>0,72</b>	<b>0,73</b>	<b>2.33</b>
<b>1,280</b>	<b>0,53</b>	<b>0,61</b>	<b>2.35</b>
<b>1,463</b>	<b>0,75</b>	<b>0,71</b>	<b>2.37</b>
<b>1,463</b>	<b>0,46</b>	<b>0,64</b>	<b>2.38</b>
<b>1,707</b>	<b>0,63</b>	<b>0,74</b>	<b>2.41</b>
<b>1,707</b>	<b>0,75</b>	<b>0,79</b>	<b>2.42</b>

Και σε αυτή την περίπτωση, όπως παρουσιάζεται και στα ακόλουθα διαγράμματα ( Διάγραμμα 5-3, Διάγραμμα 5-4, Διάγραμμα 5-5, Διάγραμμα 5-6), οι συντελεστές κυματικής μετάδοσης  $K_t$  της διατομής 2 με λειμώνια Ποσειδωνία στη στέψη (Μοντέλο 2β) είναι μικρότεροι των συντελεστών  $K_t$  της διατομής 2 χωρίς Ποσειδωνία στη στέψη της (Μοντέλο 2α).

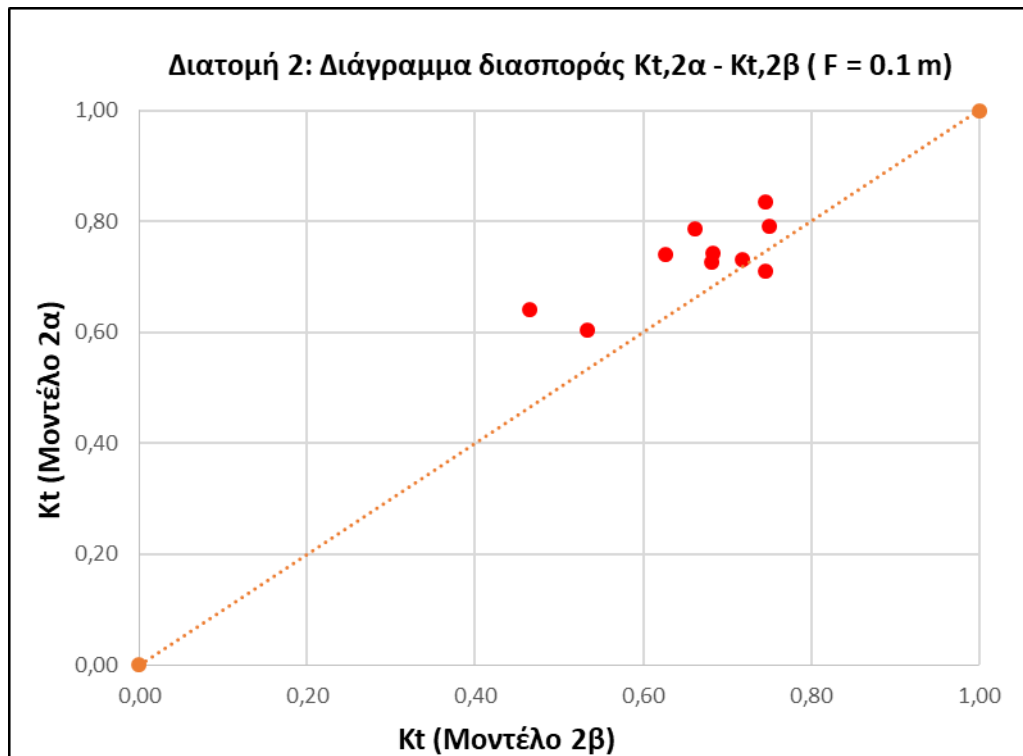
Σχετικά με τις δύο υποπεριπτώσεις όπου τα ελεύθερα βάθη  $F$  είναι διαφορετικά, παρατηρείται καλύτερη απόδοση του Μοντέλου 2β με Ποσειδωνία στο μικρότερο βάθος νερού ( $h=0.5m$ ), δηλαδή για  $F=0.1m$



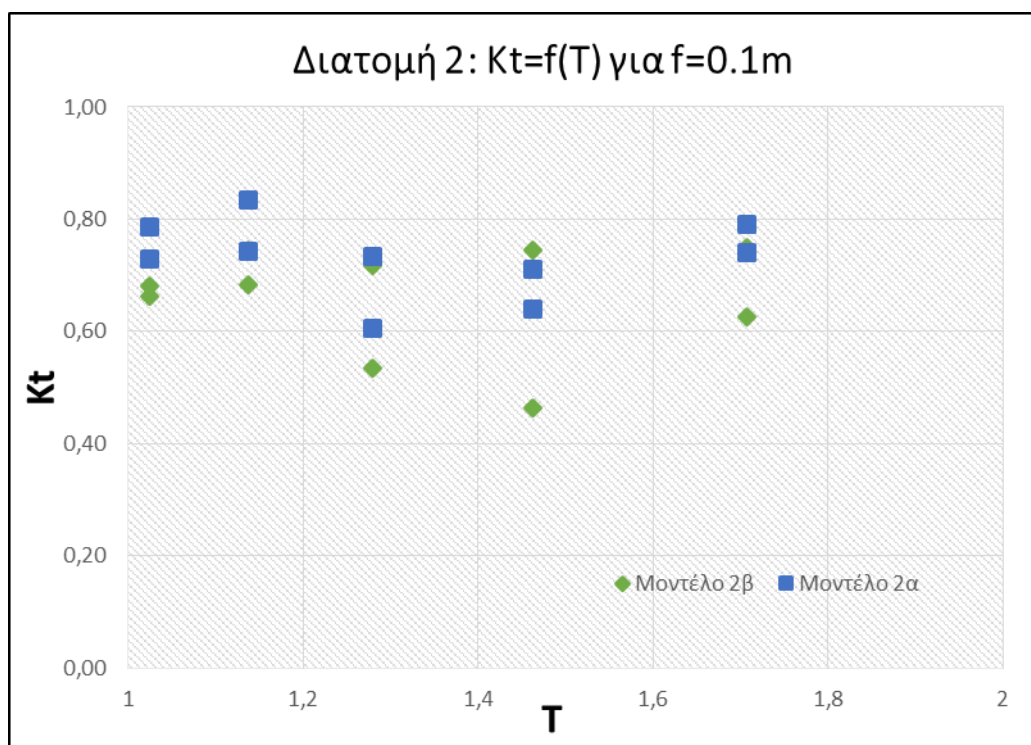
Διάγραμμα 5-3 Διάγραμμα διασποράς των  $K_{t,2\alpha} - K_{t,2\beta}$  για την Διατομή 2 με βάθος νερού  $h=0,6m$



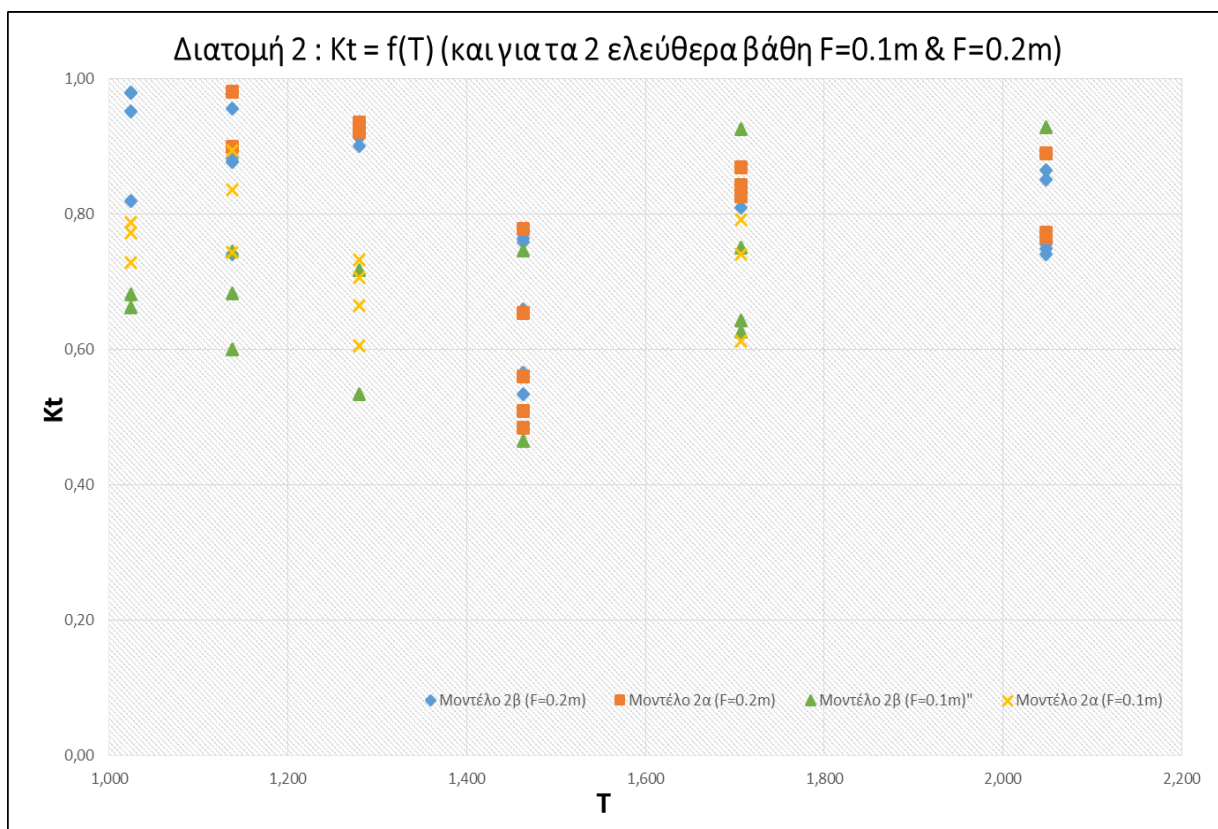
Διάγραμμα 5-4 Διάγραμμα  $K_t - T$  για το σύνολο των πειραματικών δεδομένων της Διατομής 2 με βάθος νερού  $h=0.6m$



Διάγραμμα 5-5 Διάγραμμα διασποράς των  $K_t,2\alpha$  -  $K_t,2\beta$  για την Διατομή 2 με βάθος νερού  $h=0,5m$



Διάγραμμα 5-6 Διάγραμμα  $K_t$  -  $T$  για το σύνολο των πειραματικών δεδομένων της Διατομής 2 με βάθος νερού  $h=0.5m$



Διάγραμμα 5-7 Διάγραμμα  $K_t - T$  για το σύνολο των πειραματικών δεδομένων της Διατομής 2 και με τα 2 βάθη νερού

Στο παραπάνω Διάγραμμα 5-7 του συντελεστή  $K_t$  με την περίοδο παρουσιάζονται συγκεντρωμένα όλα τα πειραματικά αποτελέσματα της Διατομής 2 και για τα 2 μοντέλα αλλά και για τα 2 βάθη νερού. Όπως φαίνεται σε εδώ, καλύτερη απόδοση παρουσιάζει το Μοντέλο 2β για βάθος νερού  $h=0.5m$ .





## 6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΜΠΕΙΡΙΚΩΝ ΤΥΠΩΝ

### 6.1 Αξιολόγηση υπαρχόντων εμπειρικών τύπων υπολογισμού του $K_t$

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η αξιολόγηση των ημι - εμπειρικών τύπων υπολογισμού του  $K_t$ , που αναφέρονται στην παράγραφο 4.3, με βάση κατάλληλες στατιστικές παραμέτρους, για το σύνολο των πειραμάτων που περιγράφονται στο Κεφάλαιο 5 και αφορούν τις διατάξεις χωρίς την παρουσία Ποσειδωνίας. Προκύπτουν συμπεράσματα ως προς τους καλύτερους τύπους και ως προς τα σενάρια που εξετάστηκαν και δίνουν τις μέγιστες αποκλίσεις από τα εμπειρικά μοντέλα.

Αναφέρονται επιγραμματικά οι έξι τύποι που εξετάστηκαν οι οποίοι περιγράφονται αναλυτικά στην παράγραφο 4.3:

- a) **D' Angremond, Van der Meer και De Jong (1996)**
- b) **Briganti, Van der Meer, Buccino και Calabrese (2004)**
- c) **Friebel και Harris (2003)**
- d) **Buccino και Calabrese (2007)**
- e) **Seabrook & Hall (1998)**
- f) **Siladharmā & Hall (2003)**

Όλοι οι παραπάνω ημι – εμπειρικοί τύποι υπολογισμού του συντελεστή κυματικής μετάδοσης  $K_t$  διατυπώθηκαν σε φύλλα excel για κάθε μία περίπτωση ξεχωριστά ώστε να βρεθούν αυτός ή αυτοί που αποδίδουν καλύτερα και που τα αποτελέσματά τους είναι αρκετά παραπλήσια και με τα πειραματικά.

Αριστερά στους πίνακες των διατομών βρίσκονται οι  $K_t$  measured δηλαδή οι συντελεστές που εξήχθησαν από την πειραματική διαδικασία των διατομών χωρίς την παρουσία λειμώννα Ποσειδωνίας στην στέψη τους. Για τα ίδια κυματικά χαρακτηριστικά και κάτω από κάθε τύπο είναι οι εμπειρικοί συντελεστές που προκύπτουν από το excel. Με πράσινο χρώμα επισημαίνονται οι συντελεστές  $K_t$  οι οποίοι δεν επηρεάζονται από κανέναν περιορισμό.

Στην συνέχεια στον Πίνακα 6-2, για κάθε τύπο έχουν ταξινομηθεί και οι περιορισμοί οι οποίοι αντιστοιχίζονται με κάθε τύπο με τα γράμματα a, b, c, d, e και f όπως έχουν διατυπωθεί ανωτέρω.

Στους ακόλουθους πίνακες οι τιμές  $K_t$  με πράσινο χρώμα κρίθηκαν αποδεκτές ενώ αυτές με κόκκινο χρώμα μη αποδεκτές.

• **Διατομή 1 (Μοντέλο 1α)**

Πίνακας 6-1 Kt συντελεστές που προκύπτουν από τους ημι - εμπειρικούς τύπους για τα κυματικά χαρακτηριστικά και τις διαστάσεις της Διατομής 1

ΔΙΑΤΟΜΗ 1							
			D'Angemond, Van de Meer, DeJong (a)	Briganti, Van de Meer, Buccino, Calabrese (b)	Friebel and Harris (c)	Buccino, Calabrese (d)	Buccino, Calabrese (d)
Kt measured	Hi	T	Kt (B/Hi<10)	Kt (B/Hi>10)	Kt	Kt (0≤F/His≤0.833)	Kt (0.833≤F/His≤2)
0,84	9,23	1,000	0,677854337		0,56	0,043732748	0,560101645
0,58	1,87	1,135	2,332493182	1,913438002	0,74	0,0361	0,930210807
0,68	3,76	1,143	1,290579668	0,991409238	0,71	0,0361	0,787961052
0,76	5,49	1,133	0,970301309	0,709770441	0,66	0,0361	0,703326025
0,86	7,75	1,132	0,769452386	0,535564307	0,61	0,053865017	0,62426917
0,88	9,09	1,139	0,698552629	0,474956724	0,58	0,075020823	0,588311957
0,61	2,79	1,272	1,650341337	1,30777917	0,75	0,0361	0,862848226
0,73	4,59	1,233	1,111318302	0,83095017	0,70	0,0361	0,755601239
0,86	6,26	1,218	0,891241319	0,637993964	0,65	0,046125401	0,685451467
0,87	7,79	1,248	0,776082108	0,537143227	0,62	0,078670399	0,640120767
<b>0,76</b>	8,66	1,269	<b>0,72983885</b>	<b>0,496806262</b>	<b>0,60</b>	<b>0,09696216</b>	<b>0,618907195</b>
<b>0,70</b>	3,85	1,421	<b>1,27659337</b>	<b>0,97408396</b>	<b>0,74</b>	<b>0,0361</b>	<b>0,810823352</b>
<b>0,80</b>	4,30	1,567	<b>1,177704852</b>	<b>0,884443333</b>	<b>0,74</b>	<b>0,06121361</b>	<b>0,800200459</b>
<b>0,76</b>	3,95	1,462	<b>1,252759267</b>	<b>0,95239373</b>	<b>0,74</b>	<b>0,0361</b>	<b>0,809028285</b>
<b>0,79</b>	4,14	1,571	<b>1,211490073</b>	<b>0,914491695</b>	<b>0,74</b>	<b>0,057247121</b>	<b>0,80803232</b>
<b>0,77</b>	2,83	1,569	<b>1,63588965</b>	<b>1,292452047</b>	<b>0,77</b>	<b>0,0361</b>	<b>0,881331876</b>
0,95	2,60	1,791	1,757535443	1,399907037	0,80	0,0361	0,908376305
0,82	4,35	1,734	1,17091652	0,876944745	0,75	0,088458705	0,809430577
0,72	4,32	1,26	1,164147053	0,87703093	<b>0,71</b>	0,0361	0,771597533
0,86	4,54	1,735	1,135178259	0,845032775	0,75	0,094267289	0,801186626
0,74	2,82	0,991	1,625897864	1,291382505	<b>0,71</b>	0,0361	0,830682905
0,73	5,30	0,958	0,981858767	0,726651535	<b>0,65</b>	0,0361	0,683493118
0,72	5,40	1,027	0,974202954	0,717034644	<b>0,65</b>	0,0361	0,69098976
<b>0,66</b>	10,40	1,568	<b>0,679759236</b>	<b>0,446212946</b>	<b>0,60</b>	<b>0,179322014</b>	<b>0,613981887</b>
0,62	8,58	1,572	0,75227096	0,50830296	0,63	0,15397181	0,656522574
<b>0,64</b>	10,40	1,572	<b>0,679990467</b>	<b>0,446321714</b>	<b>0,60</b>	<b>0,180004808</b>	<b>0,614407256</b>
0,53	6,95	1,52	0,848436711	0,593250706	<b>0,67</b>	0,11598244	0,69682487
0,64	3,47	1,135	1,375562947	1,066705847	<b>0,72</b>	0,0361	0,804170007
0,67	6,29	1,342	0,895545058	0,638387989	<b>0,67</b>	0,069927199	0,699644511
0,94	10,60	1,724	0,681700354	0,44481118	0,608738527	0,206875468	0,625360579
0,95	8,70	1,706	0,752563397	0,506147582	0,643295134	0,178010052	0,666148899
0,91	14,00	1,724	0,603843341	0,380215208	0,558930148	<b>0,241933359</b>	0,564594604
<b>0,75</b>	8,07	1,466	<b>0,773336029</b>	<b>0,528823247</b>	0,635701512	0,1264946	0,658842705

Όπως διατυπώθηκε και παραπάνω, στον Πίνακα 5-1 από αριστερά στην πρώτη στήλη παρατίθενται όλοι οι συντελεστές Kt που εξήχθησαν από το πείραμα για τη Διατομή 1 χωρίς την παρουσία λειμώννα ποσειδωνίας στην στέψη της και ακριβώς στις δύο επόμενες στήλες τα κυματικά χαρακτηριστικά της κάθε περίπτωσης.

Στις επόμενες στήλες για την αντίστοιχη κυματική συνθήκη και δίνονται οι συντελεστές κυματικής μετάδοσης Kt που προκύπτουν από την εφαρμογή του κάθε τύπου. Με πράσινο επισημαίνονται αυτοί που είναι εντός των περιοσμών του Πίνακα 6-2 αλλά και αυτοί που είναι κάτω της μονάδας καθώς η μεταδιδόμενη κυματική ενέργεια είναι μικρότερη από την προσπίπτουσα ( $Kt < 1$ ).

Πίνακας 6-2 Περιορισμοί των ημι - εμπειρικών τύπων που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6-1

Περιορισμοί ανά μέθοδο											
a,b	a	a	b	c						d	
B/Hi	-2.5F/His≤2.5	0.075≤Kt≤0.8	0.05≤Kt≤0.93-0.006B/Hi	0.5F/His≤8.696	0.286≤B/h≤8.75	0.44≤hs/h≤1	0.24≤B/L≤1.89	0.5F/B≤1.05	1ξ5ξ8	F/His	
8,667389	1,083423619			0,8779957	1,083423619	1,333333333	0,833333333	0,512390239	0,125	2,741905356	1,083423619
42,78075	5,347593583			0,6733155	5,347593583			0,397749026		6,913983977	5,347593583
21,2766	2,659574468			0,8023404	2,659574468			0,392200721		4,910272772	2,659574468
14,57195	1,821493625			0,8425683	1,821493625			0,399154499		4,028070361	1,821493625
10,32258	1,290322581			0,8680645	1,290322581			0,39986003		3,387262749	1,290322581
8,80088	1,100110011			0,8771947	1,100110011			0,39496026		3,146988044	1,100110011
28,67384	3,584229391			0,757957	3,584229391			0,316684367		6,34363695	3,584229391
17,42919	2,178649237			0,8254248	2,178649237			0,337034761		4,794132626	2,178649237
12,77955	1,597444089			0,8533227	1,597444089			0,345387226		4,055210775	1,597444089
10,26958	1,283697047			0,8683825	1,283697047			0,328981652		3,72476748	1,283697047
9,237875	1,154734411			0,8745727	1,154734411			0,318183463		3,592162597	1,154734411
20,77922	2,597402597			0,8053247	2,597402597			0,25375388		6,032773549	2,597402597
18,60465	2,325581395			0,8183721	2,325581395			0,208671364		6,294889039	2,325581395
20,25316	2,53164557			0,808481	2,53164557			0,239721012		6,127765473	2,53164557
19,32367	2,415458937			0,814058	2,415458937			0,2076101		6,431752514	2,415458937
28,26855	3,533568905			0,7603887	3,533568905			0,208139718		7,769320481	3,533568905
30,76923	3,846153846			0,7453846	3,846153846			0,159738527		9,252566653	3,846153846
18,3908	2,298850575			0,8196552	2,298850575			0,170412976		6,92560591	2,298850575
18,51852	2,314814815			0,8188889	2,314814815			0,322745175		5,049890745	2,314814815
17,62115	2,202643172			0,8242731	2,202643172			0,170216591		6,783047575	2,202643172
28,36879	3,546099291			0,7597872	3,546099291			0,521739285		4,91589288	3,546099291
15,09434	1,886792453			0,839434	1,886792453			0,558302831		3,466417629	1,886792453
14,81481	1,851851852			0,8411111	1,851851852			0,485802741		3,681517542	1,851851852
7,692308	0,961538462			0,8838462	0,961538462			0,208405287		4,050258099	0,961538462
9,324009	1,165501166			0,8740559	1,165501166			0,207346049		4,470562885	1,165501166
7,692308	0,961538462			0,8838462	0,961538462			0,207346049		4,06059039	0,961538462
11,51079	1,438848921			0,8609353	1,438848921			0,221775554		4,802910525	1,438848921
23,05476	2,88184438			0,7916715	2,88184438			0,397749026		5,075565475	2,88184438
12,7186	1,589825119			0,8536884	1,589825119			0,284508874		4,457388657	1,589825119
7,54717	0,943396226			0,884717	0,943396226			0,172395659		4,411005906	0,943396226
9,195402	1,149425287			0,8748276	1,149425287			0,176052742		4,818065624	1,149425287
5,714286	0,714285714			0,8957143	0,714285714			0,172395659		3,838190747	0,714285714
9,913259	1,239157373			0,8705204	1,239157373			0,238414633		4,298832399	1,239157373

Πίνακας 6-3 Kt συντελεστές που προκύπτουν από τους εμπειρικούς τύπους e & f για τα κυματικά χαρακτηριστικά και τις διαστάσεις της Διατομής 1 και οι περιορισμοί τους

	ΔΙΑΤΟΜΗ 1			Περιορισμοί ανά μέθοδο		
	Seabrook & Hall (e)	Siladharmha & Hall (f)		Seabrook & Hall (e)		Siladharmha & Hall (f)
Kt measured	Kt	Kt	Hi (cm)	$0 \leq B^*F/Li^*Dn50a \leq 7.08$	$0 \leq F^*Hi/B^*Dn50a \leq 7.08$	
0,84	0,550316934	0,708395928	9,23	0,426991866	0,0013845	
0,58	0,955571904	0,904749524	1,87	0,331457522	0,0002805	
0,68	0,818616967	0,909232176	3,76	0,326833934	0,000564	
<b>0,76</b>	0,704195474	0,848747731	5,49	0,332628749	0,0008235	
0,86	0,600797261	0,762451898	7,75	0,333216692	0,0011625	
0,88	0,558698955	0,716805694	9,09	0,32913355	0,0013635	
0,61	0,895853626	0,927102133	2,79	0,263903639	0,0004185	
<b>0,73</b>	0,762060154	0,884716149	4,59	0,2808623	0,0006885	
0,86	0,665744122	0,820438525	6,26	0,287822688	0,000939	
0,87	0,602135418	0,763375763	7,79	0,274151377	0,0011685	
0,76	0,574030638	0,733518295	8,66	0,265152886	0,001299	
0,70	0,817362622	0,911391516	3,85	0,211461567	0,0005775	
<b>0,80</b>	0,786827707	0,899010385	4,30	0,173892803	0,000645	
0,76	0,810572405	0,908990606	3,95	0,19976751	0,0005925	
<b>0,79</b>	0,798132761	0,904251316	4,14	0,173008417	0,000621	
0,77	0,897049122	0,930626964	2,83	0,173449765	0,0004245	
0,95	0,916330117	0,931911812	2,60	0,133115439	0,00039	
0,82	0,784859598	0,898608058	4,35	0,142010814	0,0006525	
0,72	0,780970095	0,894539601	4,32	0,268954312	0,000648	
0,86	0,771933465	0,892049258	4,54	0,14184716	0,000681	
0,74	0,885531412	0,92020256	2,82	0,434782738	0,000423	
0,73	0,708926023	0,850808895	5,30	0,465252359	0,000795	
0,72	0,705946523	0,849356426	5,40	0,404835617	0,00081	
0,66	0,534552258	0,683083568	10,40	0,173671072	0,00156	
0,62	0,5807875	0,739903664	8,58	0,172788374	0,001287	
0,64	0,534593744	0,683118876	10,40	0,172788374	0,00156	
0,53	0,639137911	0,797991695	6,95	0,184812961	0,0010425	
0,64	0,840306308	0,916009562	3,47	0,331457522	0,0005205	
0,67	0,666668996	0,821299023	6,29	0,237090728	0,0009435	
0,94	0,531870837	0,678593886	10,60	0,143663049	0,00159	
0,95	0,578404382	0,736917359	8,70	0,146710619	0,001305	
0,91	0,483595159	0,596220514	14,00	0,143663049	0,0021	
0,75	0,595940249	0,756442652	8,07	0,198678861	0,0012105	

• **Διατομή 2 / Μοντέλο 2α (h=0.6m)**

Πίνακας 6-4 Kt συντελεστές που προκύπτουν από τους εμπειρικούς τύπους για τα κυματικά χαρακτηριστικά και τις διαστάσεις της Διατομής 1

ΔΙΑΤΟΜΗ 2								
			D'Angemond, Van de Meer, DeJong (a)	Briganti, Van de Meer, Buccino, Calabrese (b)	Friebel and Harris (c)	Buccino, Calabrese (d)	Buccino, Calabrese (d)	
Kt measured	Hi	T	Kt (B/Hi<10)	Kt (B/Hi>10)	Kt	Kt (0.5F/His<0.833)	Kt (0.833<F/His<2)	
1,11	11,13	0,961	0,984043474	0,735750092	0,710836207	0,119050664	0,76625598	
1,08	6,79	0,988	1,436774377	1,120769911	0,770956828	0,074917895	0,863343423	
0,97	5,94	1,06	1,60822165	1,266200889	0,789733555	0,075804861	0,893408867	
0,98	7,98	1,003	1,266897572	0,973748587	0,758645722	0,100054425	0,834885847	
0,90	11,81	1,094	0,9613846	0,710249631	0,71989862	0,170155764	0,769841377	
0,92	5,44	1,215	1,739939318	1,375813253	0,813292784	0,100099695	0,918572173	
0,94	7,14	1,213	1,401333297	1,081111794	0,795458386	0,136625718	0,871774448	
1,02	9,64	1,237	1,123889235	0,841676913	0,765959932	0,182701831	0,820264164	
0,56	9,91	1,417	1,117308454	0,830555614	0,781241389	0,221731454	0,827440311	
0,51	13,97	1,4	0,894412763	0,643813335	0,726881115	0,260697776	0,765079424	
0,65	7,34	1,428	1,386445359	1,062326359	0,815778914	0,184649043	0,87925314	
0,48	5,74	1,412	1,676356472	1,315624889	0,831544806	0,14833345	0,919230981	
1,09	7,21	1,551	1,411470687	1,081637786	0,828842107	0,204079296	0,887798981	
1,05	11,66	1,531	1,01174392	0,73815988	0,768650036	0,260480992	0,805837398	
1,09	7,09	1,652	1,433544818	1,099275044	0,839046259	0,218176544	0,894487593	
1,12	11,12	1,597	1,047316887	0,766783465	0,781669993	0,264794214	0,817592794	
0,84	6,17	1,792	1,597115389	1,240894997	0,860530332	0,221190761	0,921073815	
0,83	8,21	1,783	1,294013116	0,975893485	0,835779523	0,255049098	0,875655946	
0,77	7,79	1,84	1,345021866	1,019642439	0,84551164	0,25628442	0,885921039	
0,77	12,77	1,767	0,972112802	0,70024655	0,774231966	0,302374328	0,802446766	
0,78	7,68	1,19	1,323472779	1,014578585	0,786223234	0,141364822	0,857409435	
0,89	10,36	1,495	1,089845459	0,805185329	0,782650038	0,240615571	0,824259571	
0,87	9,85	1,424	1,122476896	0,834782842	0,782734203	0,222210627	0,828911988	

Πίνακας 6-5 Περιορισμοί των ημ - εμπειρικών τύπων που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6-4 για τη Διατομή 2 (h=0.6m)

Περιορισμοί ανά μέθοδο											
a,b	a	a	b	c			d				
B/Hi	-2.55F/His<2.5	0.075<Kt<0.8	0.05<Kt<0.93-0.006B/Hi	0.5F/His<8.696	0.286<B/h<8.75	0.44<Sh<h<1	0.24<B/L<1.89	0.5F/B<1.05	1<ξ<8	F/His	
5,39083558	1,796945193			0,897654987	1,796945193	1	0,666666667	0,416116882	0,33333333	2,399546	1,796945
8,8365243	2,9455081			0,876980854	2,9455081			0,393684415		3,15846	2,945508
10,1010101	3,367003367			0,869393939	3,367003367			0,342019117		3,62298	3,367003
7,518796992	2,506265664			0,884887218	2,506265664			0,381997258		2,957691	2,506266
5,080440305	1,693480102			0,899517358	1,693480102			0,321090508		2,65183	1,69348
11,02941176	3,676470588			0,863823529	3,676470588			0,260321211		4,339405	3,676471
8,403361345	2,801120448			0,879579832	2,801120448			0,261180356		3,781508	2,80112
6,22406639	2,074688797			0,892655602	2,074688797			0,251143945		3,318826	2,074689
6,054490414	2,018163471			0,893673058	2,018163471			0,191391396		3,749612	2,018163
4,294917681	1,431639227			0,904230494	1,431639227			0,196067694		3,120205	1,431639
8,174386921	2,72479564			0,880953678	2,72479564			0,188454146		4,390697	2,724796
10,45296167	3,484320557			0,86728223	3,484320557			0,192749259		4,909441	3,484321
8,321775312	2,773925104			0,880069348	2,773925104			0,159749135		4,811688	2,773925
5,145797599	1,715265866			0,899125214	1,715265866			0,163950117		3,734902	1,715266
8,462623413	2,820874471			0,87922426	2,820874471			0,140812765		5,168211	2,820874
5,395683453	1,798561151			0,897625899	1,798561151			0,150678844		3,989384	1,798561
9,724473258	3,241491086			0,87165316	3,241491086			0,119670223		6,009644	3,241491
7,30816078	2,436053593			0,886151035	2,436053593			0,120881384		5,183619	2,436054
7,702182285	2,567394095			0,883786906	2,567394095			0,113507998		5,491644	2,567394
4,698512138	1,566170713			0,901808927	1,566170713			0,123080432		4,119025	1,566171
7,8125	2,604166667			0,883125	2,604166667			0,27137397		3,577006	2,604167
5,791505792	1,930501931			0,895250965	1,930501931			0,17194111		3,869142	1,930502
6,091370558	2,030456853			0,893451777	2,030456853			0,189514364		3,779594	2,030457

Πίνακας 6-6 Kt συντελεστές που προκύπτουν από τους εμπειρικούς τύπους e & f για τα κυματικά χαρακτηριστικά  
και τις διαστάσεις της Διατομής 2 (h=0.6m) και οι περιορισμοί τους

	ΔΙΑΤΟΜΗ 2			Περιορισμοί ανά μέθοδο		
	Seabrook & Hall (e)	Siladharm & Hall (f)		Seabrook & Hall (e)		Siladharm & Hall (f)
Kt measured	Kt	Kt	Hi (cm)	$0 \leq B \cdot F / Li \cdot Dn50a \leq 7.08$	$0 \leq F \cdot Hi / B \cdot Dn50a \leq 7.08$	
1,11						
1,08				0,693528137	0,004452	
0,97	0,883649334	0,974874167	5,94	0,656140691	0,002716	
0,98	0,815282771	0,939403627	7,98	0,570031861	0,002376	
0,90	0,728436631	0,85678596	11,81	0,636662096	0,003192	
0,92	0,906700894	0,982425217	5,44	0,535150847	0,004724	
0,94	0,850617478	0,958414239	7,14	0,433868685	0,002176	
1,02				0,435300593	0,002856	
0,56	0,778492467	0,902687003	9,91	0,418573242	0,003856	
0,51	0,704697279	0,81296062	13,97	0,318985661	0,003964	
0,65	0,84999536	0,956604312	7,34	0,326779489	0,005588	
0,48	0,902017788	0,980994454	5,74	0,314090243	0,002936	
1,09				0,321248766	0,002296	
1,05				0,266248559	0,002884	
1,09				0,273250194	0,004664	
1,12				0,234687941	0,002836	
0,84	0,893397371	0,977408586	6,17	0,251131406	0,004448	
0,83	0,828983635	0,941257742	8,21	0,199450372	0,002468	
0,77	0,842005555	0,949892382	7,79	0,201468974	0,003284	
0,77	0,72762009	0,840532823	12,77	0,189179997	0,003116	
0,78	0,832979195	0,948093559	7,68	0,205134054	0,005108	
0,89	0,769602127	0,893080311	10,36	0,45228995	0,003072	
0,87	0,79492014	0,908812215	9,85	0,286568517	0,004144	
				3,15857E-07	0,00394	

• **Διατομή 2 / Μοντέλο 2α (h=0.5m)**

Πίνακας 6-7 Kt συντελεστές που προκύπτουν από τους εμπειρικούς τύπους για τα κυματικά χαρακτηριστικά και τις διαστάσεις της Διατομής 2 (h=0.5m)

ΔΙΑΤΟΜΗ 2								
			D'Angemond, Van de Meer, DeJong (a)	Briganti, Van de Meer, Buccino, Calabrese (b)	Friebel and Harris (c)	Buccino, Calabrese (d)	Buccino, Calabrese (d)	
Kt measured	Hi	T	Kt (B/Hi<10)	Kt (B/Hi>10)	Kt	Kt (0≤F/His≤0.833)	Kt (0.833≤F/His≤2)	
0,79	4,56	1,015	1,125326876	0,844225233	0,705438692	0,0361	0,769818319	
0,73	7,54	1,004	0,79359215	0,55864947	0,627456523	0,092757415	0,659192293	
0,77	10,63	0,92	0,634863531	0,431610173	0,553093315	0,099964809	0,565516117	
0,89	9,36	1,129	0,709777685	0,483147348	0,60498353	0,154018554	0,63047483	
0,74	5,29	1,143	1,019555264	0,74755567	0,702376362	0,080293681	0,754655319	
0,84	7,58	1,139	0,804559598	0,562297684	0,644091359	0,127581492	0,678017197	
0,71	3,58	1,276	1,368309726	1,051117155	0,76231949	0,058938842	0,84477837	
0,73	5,35	1,268	1,019335825	0,743884832	0,715215294	0,109357004	0,765639591	
0,66	8,41	1,199	0,761476427	0,52372352	0,632765517	0,155830185	0,66347735	
0,61	11,55	1,24	0,646324037	0,427529557	0,579702496	0,207150902	0,599761875	
<b>0,90</b>	<b>4,28</b>	<b>1,428</b>	<b>1,200946027</b>	<b>0,900746222</b>	<b>0,760369985</b>	<b>0,11324612</b>	<b>0,822410267</b>	
<b>1,00</b>	<b>5,86</b>	<b>1,416</b>	0,966544918	0,694455509	0,717042087	0,151932419	0,760992242	
<b>0,66</b>	8,67	1,386	0,763246753	0,519669969	0,64744757	0,198779168	0,678693402	
<b>0,71</b>	8,65	1,408	0,765722064	0,521213782	0,650057349	0,202597362	0,681436389	
<b>0,64</b>	11,58	1,386	0,659289154	0,433746996	0,594727487	0,235686696	0,617428723	
<b>0,61</b>	10,96	1,539	0,688291141	0,453726882	0,619292631	0,254404306	0,645199853	
0,74	8,58	1,555	0,77803879	0,528481242	0,665348701	0,226999033	0,696863803	
0,79	13,74	1,567	0,626706855	0,404196778	0,581348021	0,284437393	0,60051521	
<b>1,02</b>	<b>9,06</b>	<b>1,711</b>	0,764300314	0,514143736	0,66878919	0,256952884	0,698596293	
<b>1,06</b>	<b>8,69</b>	<b>1,912</b>	0,788304882	0,532166133	0,691815303	0,277744864	0,72044494	
0,76	5,49	1,042	0,985702004	0,721694608	0,684148544	0,061657056	0,73416877	
0,65	10,94	1,282	0,668093626	0,443736416	0,594191739	0,208751573	0,617130697	
0,79	10,17	1,558	0,714229818	0,474709444	0,63465309	0,248390455	0,662477799	
<b>0,71</b>	6,44	1,178	<b>0,895180787</b>	0,638536194	<b>0,676443846</b>	0,114536614	<b>0,717747161</b>	
0,75	5,79	0,937	0,939626496	0,686544974	0,661406922	0,043082608	0,706840398	

Πίνακας 6-8 Περιορισμοί των ημ - εμπειρικών τύπων που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6-7 για τη Διατομή 2 (h=0.5m)

Περιορισμοί ανά μέθοδο											
a,b	a	a	b	c			d				
B/Hi	2.5F/His≤2.5	0.075≤Kt≤0.8	0.05≤Kt≤0.93-0.006B/Hi	0≤F/His≤8.696	0.286≤B/h≤8.75	0.44≤hs/h≤1	0.24≤B/L≤1.89	0≤F/B≤1.05	1≤ξ≤8	F/His	
13,15789474	2,192982456			0,851052632	2,192982456	1,2	0,8	0,373018204	0,166666667	3,959469	2,192982456
7,957559682	1,326259947			0,882254642	1,326259947			0,381236686		3,0458	1,326259947
5,644402634	0,940733772			0,896133584	0,940733772			0,455020631		2,348022	0,940733772
6,41025641	1,068376068			0,891538462	1,068376068			0,301490913		3,074039	1,068376068
11,34215501	1,890359168			0,86194707	1,890359168			0,29415054		4,139727	1,890359168
7,915567282	1,319261214			0,882506596	1,319261214			0,296220195		3,446216	1,319261214
16,75977654	<b>2,793296089</b>			0,829441341	2,793296089			0,236026498		5,617751	2,793296089
11,21495327	1,869158879			0,86271028	1,869158879			0,239014145		4,566628	1,869158879
7,134363853	1,189060642			0,887193817	1,189060642			0,267315256		3,44409	1,189060642
5,194805195	0,865800866			0,898831169	0,865800866			0,249930202		3,039373	0,865800866
14,01869159	2,336448598			0,84588785	2,336448598			0,188454146		5,749891	2,336448598
10,23890785	1,706484642			0,868566553	1,706484642			0,191661819		4,872678	1,706484642
6,920415225	1,153402537			0,888477509	1,153402537			0,200048662		3,921092	1,153402537
6,936416185	1,156069364			0,888381503	1,156069364			0,193845981		3,987934	1,156069364
5,18134715	0,863557858			0,898911917	0,863557858			0,200048662		3,392831	0,863557858
5,474452555	0,912408759			0,897153285	0,912408759			0,162250062		3,872457	0,912408759
6,993006993	1,165501166			0,888041958	1,165501166			0,158928332		4,422217	1,165501166
4,366812227	0,727802038			0,903799127	0,727802038			0,156503523		3,52151	0,727802038
6,622516556	1,103752759			0,890264901	1,103752759			0,131268974		4,73521	1,103752759
6,904487917	1,150747986			0,888573072	1,150747986			0,105120238		5,402954	1,150747986
10,92896175	1,821493625			0,86442623	1,821493625			0,353937577		3,704545	1,821493625
5,484460695	0,914076782			0,897093236	0,914076782			0,233822372		3,228737	0,914076782
5,899705015	0,983284169			0,89460177	0,983284169			0,158316874		4,06968	0,983284169
9,316770186	1,552795031			0,874099379	1,552795031			0,276930972		3,866835	1,552795031
10,3626943	1,727115717			0,867823834	1,727115717			0,437706433		3,243797	1,727115717

Πίνακας 6-9 Kt συντελεστές που προκύπτουν από τους εμπειρικούς τύπους e & f για τα κυματικά χαρακτηριστικά  
και τις διαστάσεις της Διατομής 2 (h=0.5m) και οι περιορισμοί τους

ΔΙΑΤΟΜΗ 2				Περιορισμοί ανά μέθοδο		
	Seabrook & Hall (e)	Siladharmma & Hall (f)		Seabrook & Hall (e)		Siladharmma & Hall (f)
Kt measured	Kt	Kt	Hi (cm)	$0 \leq B^*F/Li^*Dn50a \leq 7.08$	$0 \leq F^*Hi/B^*Dn50a \leq 7.08$	
0,79	0,768342873	0,90046057	4,56	0,310848503	0,000912	
0,73	0,623853918	0,781308487	7,54	0,317697238	0,001508	
0,77	0,544798276	0,676965887	10,63	0,379183859	0,002126	
0,89	0,575632922	0,719543537	9,36	0,251242428	0,001872	
0,74	0,727554956	0,873408375	5,29	0,24512545	0,001058	
0,84	0,625810693	0,781928281	7,58	0,246850162	0,001516	
0,71	0,841600505	0,937168143	3,58	0,196688748	0,000716	
0,73	0,726375155	0,872340199	5,35	0,199178455	0,00107	
0,66	0,601090722	0,752450164	8,41	0,222762713	0,001682	
0,61	0,539146137	0,656758703	11,55	0,208275169	0,00231	
0,90	0,793986104	0,91553456	4,28	0,157045122	0,000856	
1,00			5,86	0,159718182	0,001172	
0,66	0,596586527	0,745091211	8,67	0,166707218	0,001734	
0,71	0,597363512	0,745934512	8,65	0,161538318	0,00173	
0,64	0,54070594	0,657215641	11,58	0,166707218	0,002316	
0,61	0,550984144	0,674946573	10,96	0,135208385	0,002192	
0,74	0,600619864	0,749225721	8,58	0,132440276	0,001716	
0,79	0,521207249	0,606772626	13,74	0,130419603	0,002748	
1,02			9,06	0,109390812	0,001812	
1,06			8,69	0,087600198	0,001738	
0,76	0,714237354	0,863743101	5,49	0,294947981	0,001098	
0,65	0,548488625	0,67371508	10,94	0,194851976	0,002188	
0,79	0,564541175	0,69789056	10,17	0,131930728	0,002034	
0,71	0,670918897	0,826908569	6,44	0,23077581	0,001288	
0,75	0,695311078	0,849351661	5,79	0,364755361	0,001158	



## 6.2 Αποτελέσματα εμπειρικών τύπων

Από την εκτενή αξιολόγηση των ημι – εμπειρικών τύπων που πραγματοποιήθηκε καθ'όλη την διάρκεια της παρούσας εργασίας και όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 6.1, προέκυψε πώς καλύτερη απόδοση έχουν εξής τύποι:

- ✓ **Friebel & Harris**
- ✓ **Seabrook & Hall**

Σε νέους πίνακες κατηγοριοποιήθηκαν οι πειραματικοί συντελεστές κυματικής μετάδοσης  $K_t$  της κάθε διατομής (Μοντέλα 1α, Μοντέλο 1β) ανάλογα με την περίοδο (από την μικρότερη στην μεγαλύτερη) και ακριβώς δίπλα οι αντίστοιχοι συντελεστές που προέκυψαν από τους δύο ανωτέρω ημι – εμπειρικούς τύπους.

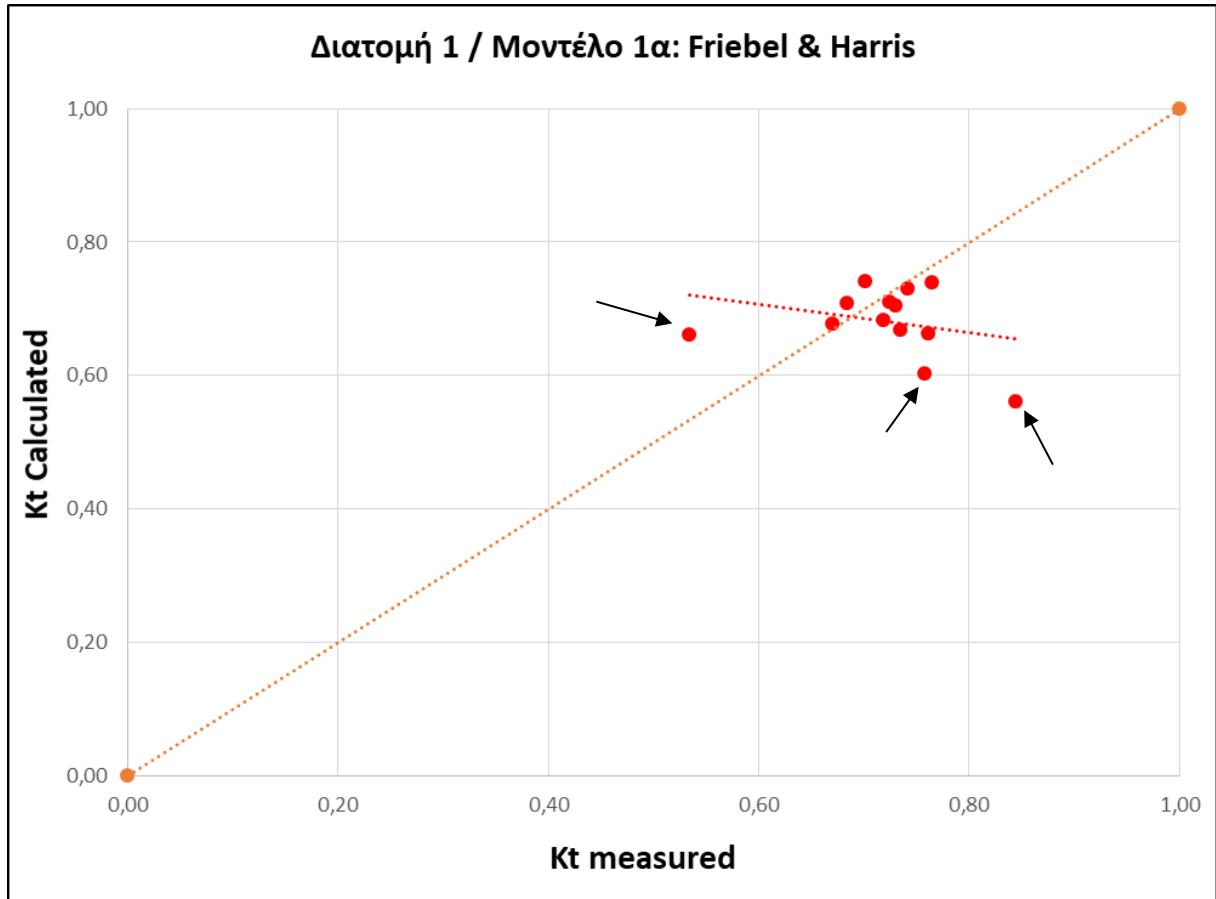
Για κάθε τύπο δίνονται τα διαγράμματα διασποράς με άξονα  $x$  τον μετρημένο  $K_{t,m}$  (measured) από τις πειραματικές μετρήσεις και άξονα  $y$  τον αντίστοιχο προβλεπόμενο  $K_{t,c}$  (calculated) από τον εκάστοτε εμπειρικό τύπο. Όσο πιο κοντά στην ευθεία πλήρους ταύτισης  $K_{t,m} = K_{t,c}$  είναι τα σημεία στο διάγραμμα, τόσο καλύτερη είναι η επίδοση κάθε τύπου.

- **Διατομή 1**

Πίνακας 6-10 Συντελεστές κυματικής μετάδοσης της Διατομής 1 για το Μοντέλο 1α που προέκυψαν από το πείραμα και τους ημι – εμπειρικούς τύπους

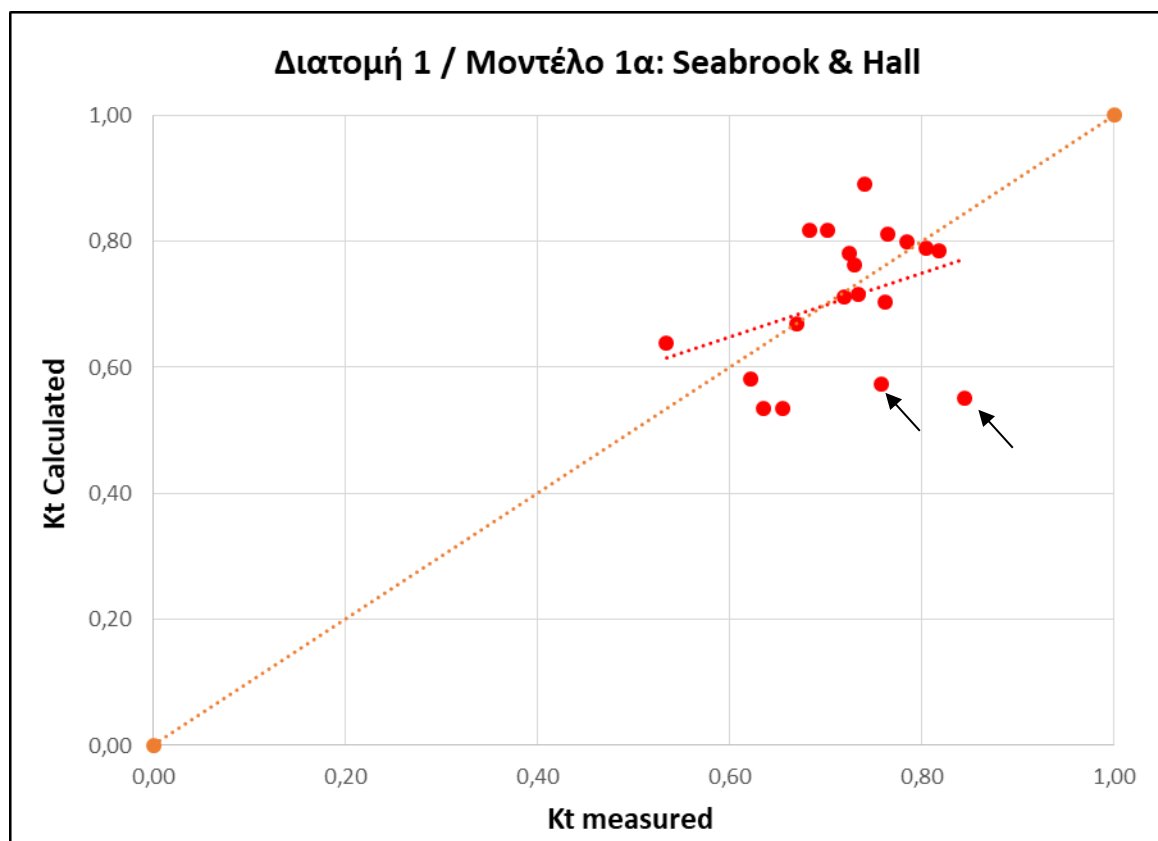
<b>ΔΙΑΤΟΜΗ 1 / Μοντέλο 1α</b>			
		<b>Friebel and Harris ( c )</b>	<b>Seabrook &amp; Hall ( e )</b>
<b>Σενάριο</b>	<b><math>K_{t,m}</math></b>	<b><math>K_{t,c}</math></b>	<b><math>K_{t,c}</math></b>
1.1	0,84	0,56	0,55
1.2	0,74	0,73	0,89
1.3	0,68	0,71	0,82
1.4	0,73	0,67	0,72
1.5	0,76	0,66	0,70
1.6	0,72	0,71	0,78
1.7	0,73	0,70	0,76
1.8	0,72	0,68	0,71
1.9	0,76	0,60	0,57
1.10	0,70	0,74	0,82
1.11	0,76	0,74	0,81
1.12	0,67	0,68	0,67
1.13	0,53	0,66	0,64
1.14	0,79	0,76	0,80
1.15	0,80	0,75	0,79
1.16	0,82	0,75	0,78
1.17	0,62	0,65	0,58
1.18	0,66	0,61	0,54
1.19	0,64	0,61	0,54

Οι κόκκινες τιμές  $K_t$  του πίνακα για τον τύπο Friebel and Harris είναι αυτές που για τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα ήταν εκτός των περιορισμών και συνεπώς δεν συμπεριλήφθηκαν στο διάγραμμα διασποράς του συγκεκριμένου τύπου που ακολουθεί.



Διάγραμμα 6-1 Διάγραμμα διασποράς  $K_{t,c} - K_{t,m}$  της διατομής 1 (Μοντέλο 1α) για τους Friebel & Harris

Στο παραπάνω διάγραμμα υπάρχουν τρεις τιμές που αποκλίνουν περισσότερο από τη διαγώνιο σε σχέση με τις άλλες. Παρατηρήθηκε πως οι συγκεκριμένες 3 τιμές είχαν το μικρότερο λόγο  $F/H_i$ , δηλαδή τα μεγαλύτερα ύψη κύματος.



Διάγραμμα 6-2 Διάγραμμα διασποράς  $K_{t,c} - K_{t,m}$  της διατομής 1 (Μοντέλο 1α) για τους Seabrook & Hall

Παρατηρώντας το Διάγραμμα 6-2, υπάρχουν και σε αυτό 2 τουλάχιστον τιμές που εμφανίζουν σχετικά μεγάλη απόκλιση από την διαγώνιο οι οποίες επίσης αντιστοιχούν στα δύο μεγαλύτερα ύψη κύματος.

Εκτός όμως από τις αποκλίσεις που προαναφέρθηκαν, η τάση των υπόλοιπων σημείων είναι αρκετά καλή και για τους δύο ημι – εμπερικού τύπους με λίγο πιο αξιόπιστο αυτόν των Friebel & Harris.

- **Διατομή 2 (h=0.60m)**

Ομοίως και σε αυτή την περίπτωση, οι κόκκινες τιμές του πίνακα για τον τύπο Friebel and Harris είναι αυτές που για τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα ήταν εκτός των περιορισμών και συνεπώς δεν συμπεριλήφθηκαν στο διάγραμμα διασποράς του συγκεκριμένου τύπου.

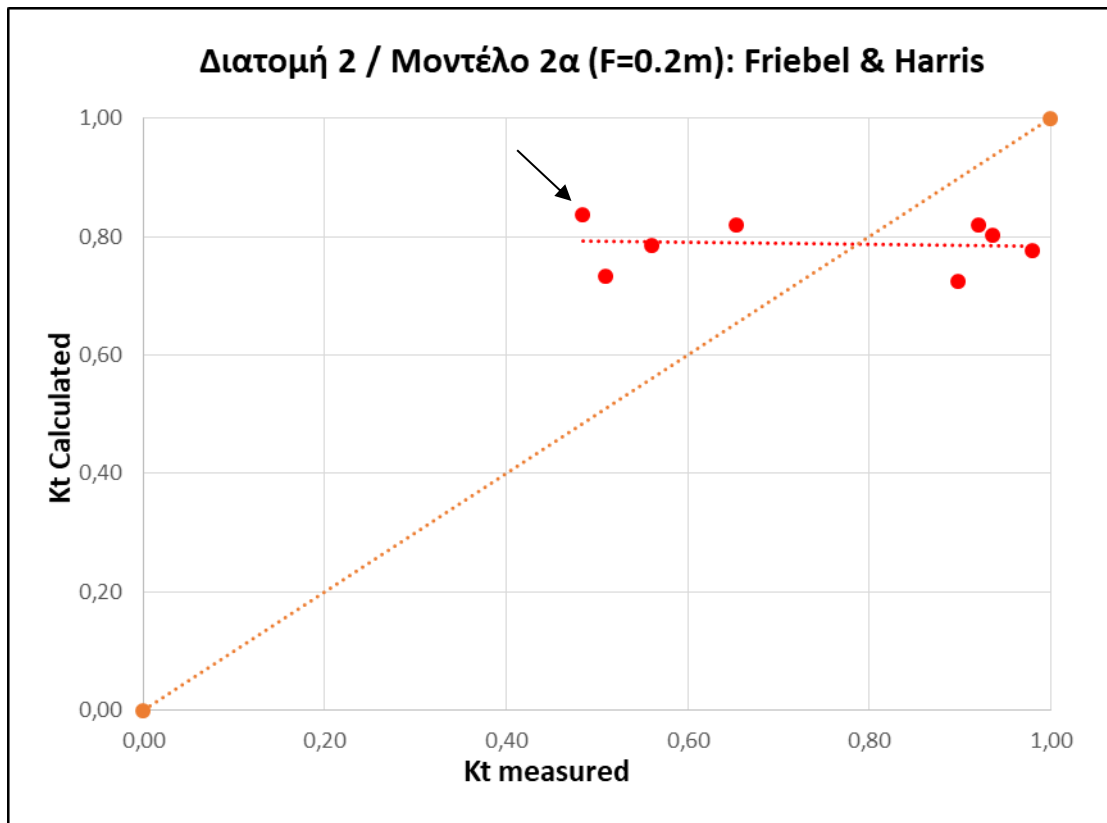
Πίνακας 6-11 Συντελεστές κυματικής μετάδοσης της Διατομής 2 για το Μοντέλο 2α σε βάθος νερού h=0.6m που προέκυψαν από το πείραμα και τους ημι – εμπειρικούς τύπους

<b>ΔΙΑΤΟΜΗ 2 / Μοντέλο 2α (h=0.6m)</b>			
		<b>Friebel and Harris ( c )</b>	<b>Seabrook &amp; Hall ( e )</b>
<b>Σενάριο</b>	<b>Kt,m</b>	<b>Kt,c</b>	<b>Kt,c</b>
2.1	0,98	0,78	0,82
2.2	0,90	0,73	0,73
2.3	0,92	0,82	0,91
2.4	0,94	0,80	0,85
2.5	0,56	0,79	0,78
2.6	0,51	0,73	0,71
2.7	0,65	0,82	0,85
2.8	0,48	0,84	0,90
2.9	0,78	0,81	0,84
2.10	0,84	0,85	0,89
2.11	0,83	0,83	0,83
2.12	0,87	0,81	0,78
2.13	0,77	0,86	0,84
2.14	0,77	0,79	0,73
2.15	0,89	0,83	0,78

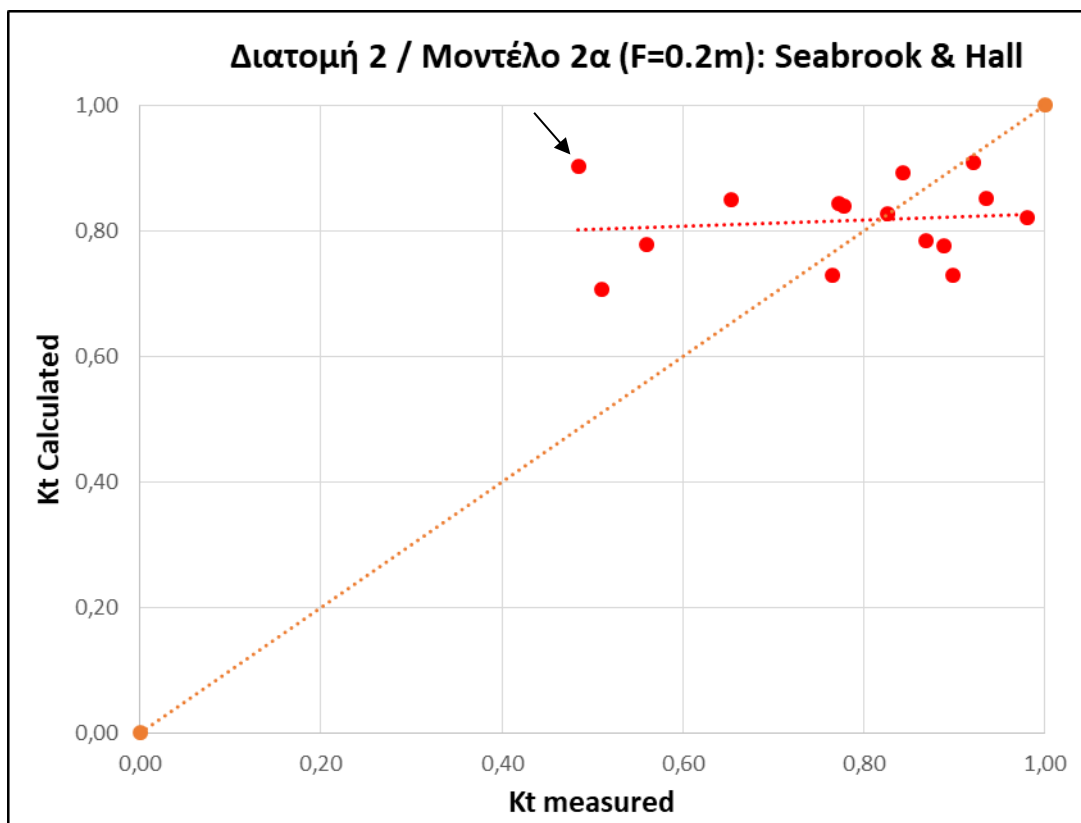
Στον Πίνακα 6-11 υπάρχουν κάποιοι συντελεστές κυματικής μετάδοσης που έχουν προκύψει από το πείραμα και που η τιμή τους είναι αρκετά μικρότερη από τις υπόλοιπες τιμές (Σενάρια 2.5 -2.8).

Έχουν παρατηρηθεί τύποι θραύσης υδραυλικού άλματος του οποίου ακολουθεί θραύση τύπου κατάρρευσης του εισερχόμενου κύματος πάνω από την στέψη του Υ.Δ.Κ. με αποτέλεσμα τη δημιουργία σημαντικής τυρβώδους ροής στο εσωτερικό της κατασκευής (Repousis & Memos 2019). Για αυτές τις περιπτώσεις παρατηρείται μεγάλη απομείωση κυματικής ενέργειας ενδεχομένως λόγω της μεγάλης αλληλεπίδρασης της μάζας ύδατος με το πορώδες της κατασκευής. Επιπλέον επειδή υπήρξαν πιο έντονες ανακλάσεις στα όρια της κατασκευής κατά την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας για το συγκεκριμένο μοντέλο (Μοντέλο 2α) για τις περιπτώσεις αυτές, η παραπάνω υπόθεση είναι υπό διερεύνηση.

Οι τιμές αυτές απεικονίζονται χαρακτηριστικά και στα ακόλουθα διαγράμματα διασποράς (Διάγραμμα 6-3, Διάγραμμα 6-4) με αρκετά εμφανείς αποκλίσεις από την διαγώνιο.



Διάγραμμα 6-3 Διάγραμμα διασποράς  $K_{t,c} - K_{t,m}$  της διατομής 2 (Μοντέλο 2α) με  $F=0.2m$  για τους Friebel & Harris



Διάγραμμα 6-4 Διάγραμμα διασποράς  $K_{t,c} - K_{t,m}$  της διατομής 2 (Μοντέλο 2α) με  $F=0.2m$  για τους Seabrook & Hall

- **Διατομή 2 (h=0.50m)**

Όπως και στις προηγούμενες δύο περιπτώσεις, οι κόκκινες τιμές του πίνακα για τον τύπο Friebel and Harris είναι αυτές που για τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα ήταν εκτός των περιορισμών και συνεπώς δεν συμπεριλήφθηκαν στο διάγραμμα διασποράς του συγκεκριμένου τύπου.

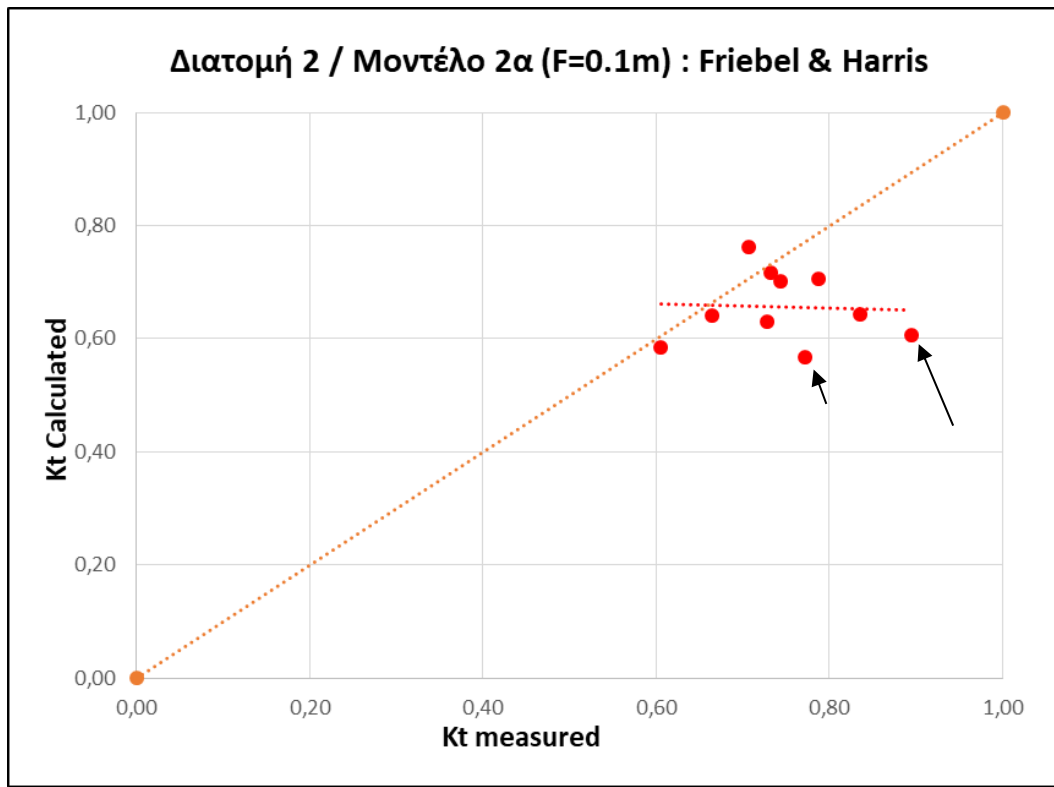
Πίνακας 6-12 Συντελεστές κυματικής μετάδοσης της Διατομής 2 για το Μοντέλο 2β σε βάθος νερού h=0.5m που προέκυψαν από το πείραμα και τους ημι – εμπειρικούς τύπους

<b>ΔΙΑΤΟΜΗ 2 / Μοντέλο 2α (h=0.5m)</b>			
		<b>Friebel and Harris ( c )</b>	<b>Seabrook &amp; Hall ( e )</b>
<b>Σενάριο</b>	<b>Kt,m</b>	<b>Kt,c</b>	<b>Kt,c</b>
2.26	0,79	0,71	0,77
2.27	0,73	0,63	0,62
2.28	0,77	0,57	0,55
2.29	0,89	0,61	0,58
2.30	0,74	0,70	0,73
2.31	0,84	0,64	0,63
2.32	0,71	0,76	0,84
2.33	0,73	0,72	0,73
2.34	0,66	0,64	0,60
2.35	0,61	0,58	0,54
2.36	0,66	0,65	0,60
2.37	0,71	0,65	0,60
2.38	0,64	0,59	0,55
2.39	0,90	0,76	0,80
2.40	0,61	0,62	0,55
2.41	0,74	0,67	0,60
2.42	0,79	0,58	0,52

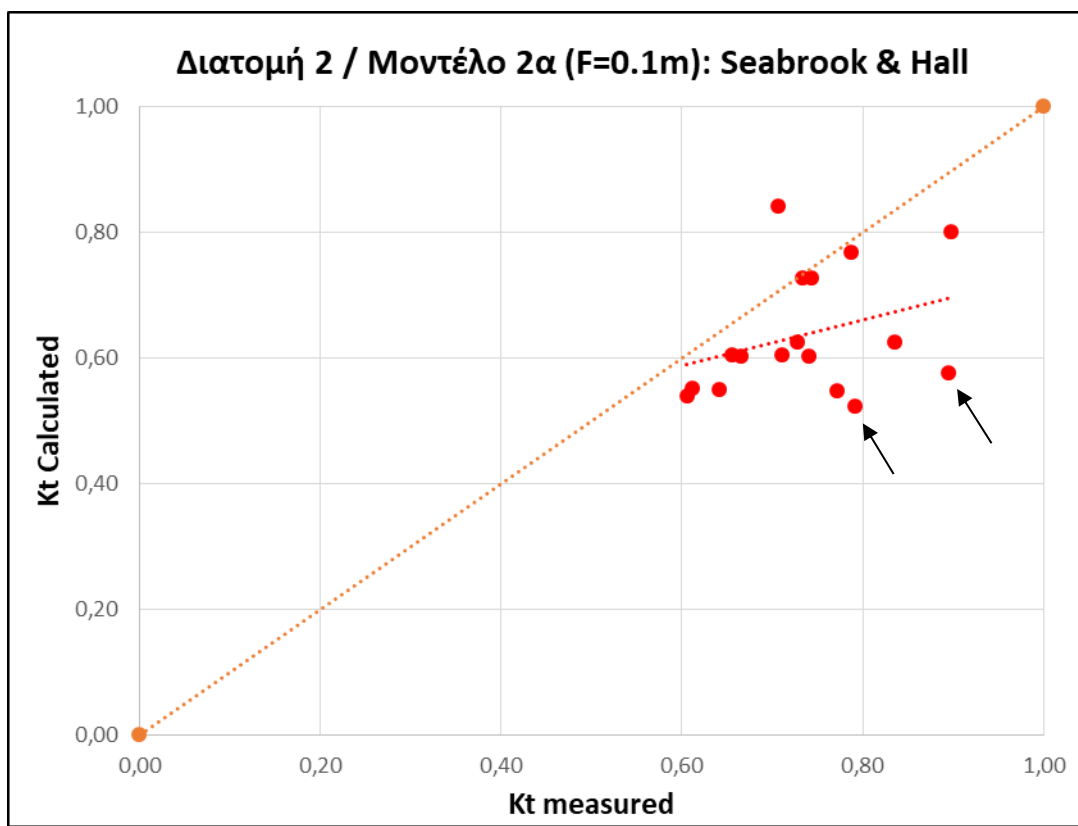
Αξίζει να σημειωθεί πως στην συγκεκριμένη περίπτωση οι τύποι έχουν δώσει αρκετά χαμηλότερες τιμές Kt σε σχέση με τις πειραματικές τιμές.

Στη συνέχεια παρατίθενται τα Διαγράμματα διασποράς Kt,m – Kt,c (Διάγραμμα 6-5, Διάγραμμα 6-6) των δύο ημι – εμπειρικών τύπων για το μοντέλο 2β της Διατομής 2 σε βάθος νερού h=0.5m.

Όπως είναι εμφανές τα περισσότερα σημεία και στα δύο διαγράμματα είναι κάτω από την διαγώνιο αλλά και αρκετά κοντά σε αυτή. Και σε αυτή την περίπτωση στις τιμές με τη μεγαλύτερη απόκλιση παρατηρήθηκε πως αντιστοιχούν τα μεγαλύτερα ύψη κύματος.



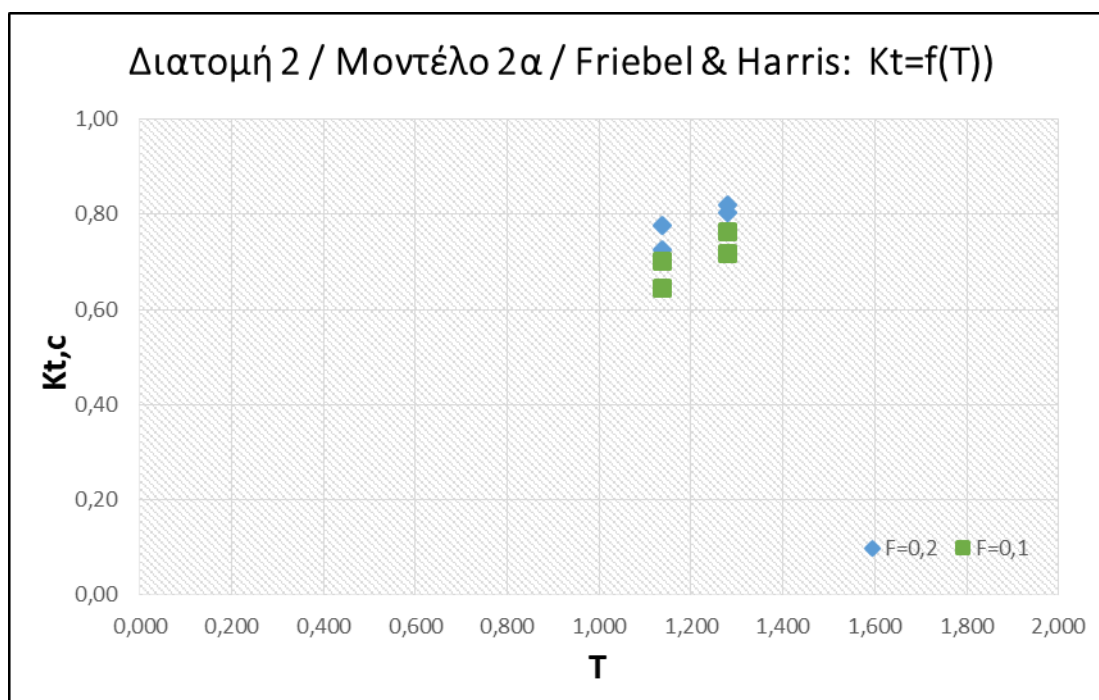
Διάγραμμα 6-5 Διάγραμμα διασποράς  $K_{t,c} - K_{t,m}$  της διατομής 2 (Μοντέλο 2α) με  $F=0.1m$  για τους Friebel & Harris



Διάγραμμα 6-6 Διάγραμμα διασποράς  $K_{t,c} - K_{t,m}$  της διατομής 2 (Μοντέλο 2α) με  $F=0.1m$  για τους Seabrook & Hall

Πίνακας 6-13 Τιμές  $K_t$  για  $F=0.2m$  ,  $F=0.1m$  που προέκυψαν από τον τύπο Friebel & Harris για την Διατομή 2 / Μοντέλο 2a για τις ίδιες περιόδους

Friebel & Harris				
T	$H_i (F=0.2m)$	$H_i (F=0.1m)$	$K_{t,c}$ F=0.2m	$K_{t,c}$ F=0.1m
1,138	0,0798	0,0529	0,78	0,70
1,138	0,1181	0,0758	0,73	0,64
1,280	0,0544	0,0358	0,82	0,76
1,280	0,0714	0,0535	0,80	0,72



Διάγραμμα 6-7 Διάγραμμα των τιμών  $K_t$  για  $F=0.2m$  ,  $F=0.1m$  που προέκυψαν από τον τύπο Friebel & Harris για την Διατομή 2 / Μοντέλο 2a για τις ίδιες περιόδους

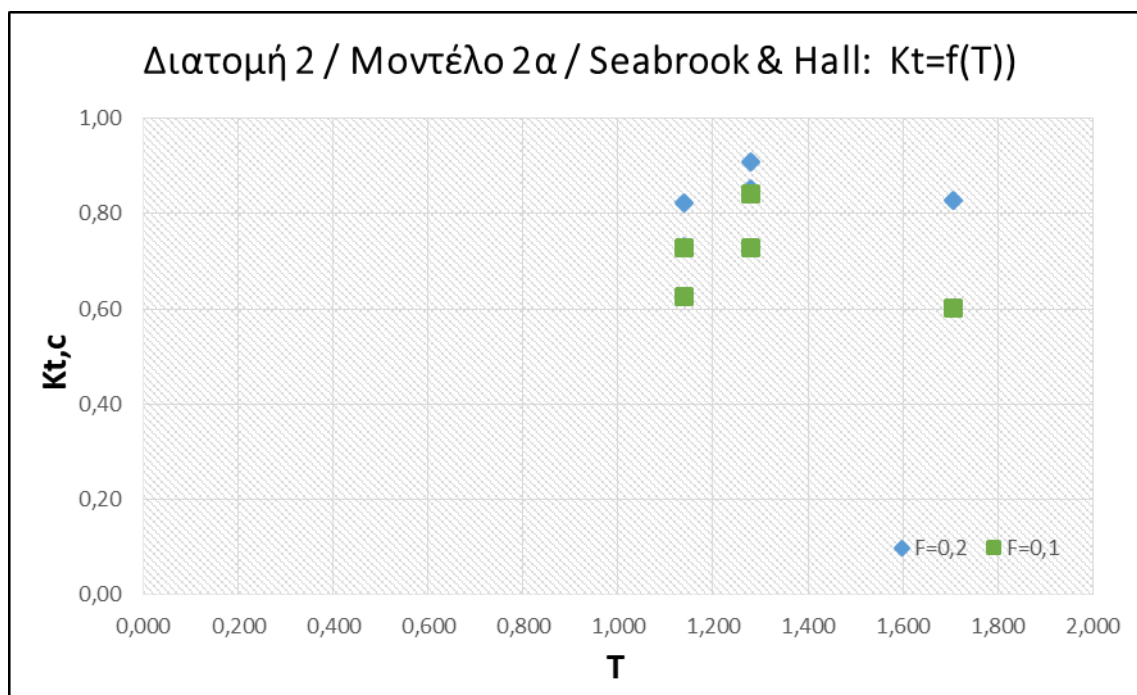
Όπως διαπιστώνεται και από το Διάγραμμα 6-7 η επίδραση του ελεύθερου βάθους  $F$  στον τύπο Friebel and Harris είναι σημαντική. Είναι εμφανές πως οι συντελεστές κυματικής μετάδοσης  $K_t$  που εξάγονται από τον τύπο για κάθε κυματισμό είναι μεγαλύτεροι στην περίπτωση που ελεύθερο βάθος είναι 20cm σε σχέση με το ελεύθερο βάθος 10cm.



Ομοίως πραγματοποιήθηκε η σύγκριση για τα ελεύθερα βάθη και με τον τύπο του Seabrook & Hall.

Πίνακας 6-14 Τιμές  $K_t$  για  $F=0.2m$  ,  $F=0.1m$  που προέκυψαν από τον τύπο Seabrook & Hall για την Διατομή 2 / Μοντέλο 2a για τις ίδιες περιόδους

Seabrook & Hall				
T	$H_i$ (F=0.2m)	$H_i$ (F=0.1m)	$K_{t,c}$ F=0.2m	$K_{t,c}$ F=0.1m
1,138	0,080	0,053	0,82	0,73
1,138	0,118	0,076	0,73	0,63
1,280	0,054	0,036	0,91	0,84
1,280	0,071	0,054	0,85	0,73
1,707	0,082	0,086	0,83	0,60



Διάγραμμα 6-8 Διάγραμμα των τιμών  $K_t$  για  $F=0.2m$  ,  $F=0.1m$  που προέκυψαν από τον τύπο Seabrook & Hall για την Διατομή 2 / Μοντέλο 2a για τις ίδιες περιόδους

Όπως διαπιστώνεται και από το Διάγραμμα 6-8 η επίδραση του ελεύθερου βάθους  $F$  είναι σημαντική και στον τύπο του Seabrook & Hall. Είναι εμφανές πως οι συντελεστές κυματικής μετάδοσης  $K_t$  που εξάγονται από τον τύπο για κάθε κυματισμό είναι μεγαλύτεροι στην περίπτωση που ελεύθερο βάθος είναι 20cm σε σχέση με το ελεύθερο βάθος 10cm.

Με βάση τις παραπάνω συγκρίσεις που πραγματοποιήθηκαν, το συμπέρασμα είναι πως και οι δύο τύποι που διερευνήθηκαν έδωσαν ικανοποιητικά αποτελέσματα, με αυτόν των Friebel and Harris να κρίνεται ως ο πιο αξιόπιστος εκ των δύο.

### 6.3 Διερεύνηση πιθανότητας τροποποίησης του τύπου Friebel and Harris

Στην προηγούμενη παράγραφο μετά από την συγκριτική αξιολόγηση των τύπων Friebel and Harris και Seabrook and Hall, ο πρώτος κρίθηκε πως έδωσε τα πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Έτσι, αξιολογώντας τον ημι – εμπειρικό τύπο των Friebel and Harris ως τον πιο αξιόπιστο έγινε μια προσπάθεια διερεύνησης πιθανής τροποποίησής του.

Υπενθυμίζεται πως ο τύπος είναι ο εξής:

#### Friebel and Harris

$$Kt = -0.4969 \exp\left(-\frac{F}{Hi}\right) - 0.0292\left(\frac{B}{h}\right) - 0.4257\left(\frac{h'}{h}\right) - 0.06961 \ln\left(\frac{B}{Li}\right) + 0.1359\left(\frac{F}{B}\right) + 1.0905$$

Είναι ένα μοντέλο που γενικά δουλεύει αρκετά καλά, καθώς έχει προκύψει από βελτίωση υπάρχοντων τύπων και έχει εξετάσει πολλά δεδομένα.

Πειράζοντας λοιπόν τον πρωτότυπο τύπο μπορεί να ελεγχθεί η ευαισθησία των συντελεστών του και κατα πόσο είναι εφικτό τροποποιώντας κάποιον ή κάποιους από αυτούς μπορεί ο συγκεκριμένος τύπος να προσαρμοστεί και για περιπτώσεις με παρουσία Ποσειδωνίας.

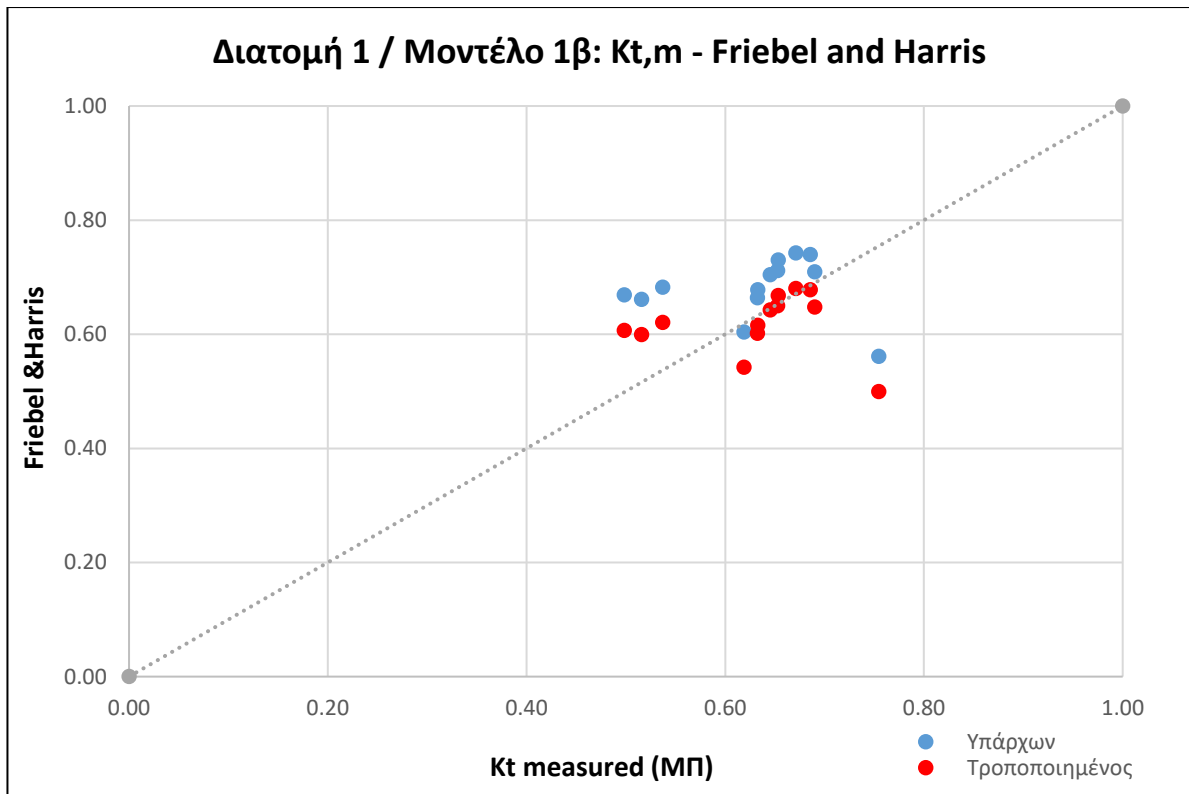
Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες προσπάθειες τροποποίησης του τύπου οι οποίες πραγματοποιήθηκαν με τα δεδομένα της Διατομής 1.

#### • 1<sup>η</sup> Τροποποίηση Friebel and Harris

Πραγματοποιήθηκε μία αύξηση της τάξης του 60% στον πρώτο και στον τελευταίο συντελεστή όπως φαίνεται και παρακάτω:

$$Kt = -0.8 \exp\left(-\frac{F}{Hi}\right) - 0.0292\left(\frac{B}{h}\right) - 0.4257\left(\frac{h'}{h}\right) - 0.06961 \ln\left(\frac{B}{Li}\right) + 0.30\left(\frac{F}{B}\right) + 1.0905$$

Αυτό οδήγησε κάποια από τα σημεία που είχαν εξαχθεί από τον πρωταρχικό τύπο να βρεθούν λίγο πιο κοντά στη διαγώνιο (Διάγραμμα 6-9). Όσο πιο κοντά ή πάνω στην διαγώνιο καταλήξουν τα σημεία, τόσο καλύτερη είναι η ταύτιση των  $Kt$  από τον τροποποιημένο τύπο με τους  $Kt$  από το Μοντέλο 1β.



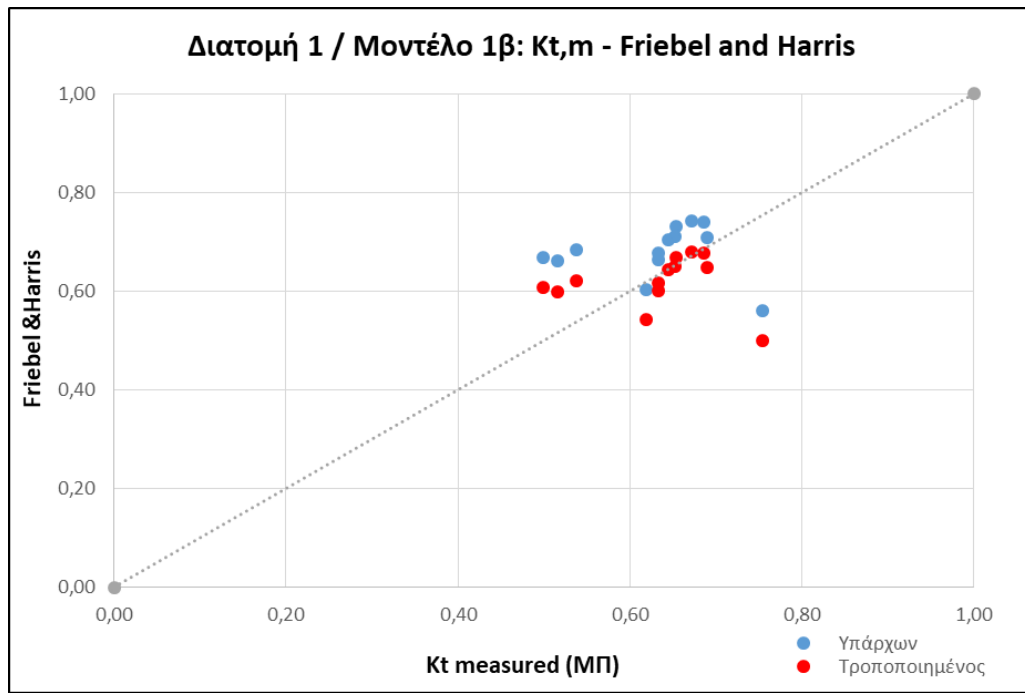
Διάγραμμα 6-9

• **2<sup>η</sup> Τροποποίηση Friebel and Harris**

Πραγματοποιήθηκε μία αύξηση της τάξης του 15% στον μεσαίο συντελεστή όπως φαίνεται και παρακάτω:

$$Kt = -0.4969 \exp\left(-\frac{F}{Hi}\right) - 0.0292\left(\frac{B}{h}\right) - 0.50\left(\frac{h'}{h}\right) - 0.06961 \ln\left(\frac{B}{Li}\right) + 0.1359\left(\frac{F}{B}\right) + 1.0905$$

Τα σημεία είχαν ακριβώς την ίδια μετακίνηση με αυτή που είχαν μετά την 1<sup>η</sup> Τροποποίηση όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 6-10.



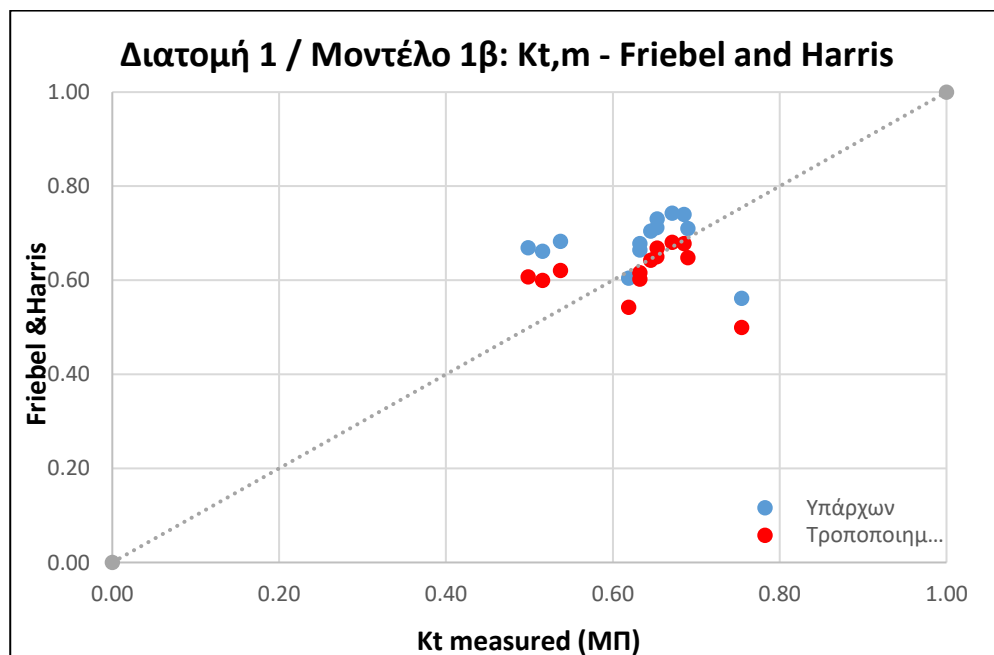
Διάγραμμα 6-10

### 3<sup>η</sup> Τροποποίηση Friebel and Harris

Πραγματοποιήθηκε μία μείωση τελευταίου συντελεστή κατά 0.04 όπως φαίνεται και παρακάτω:

$$Kt = -0.4969 \exp\left(-\frac{F}{Hi}\right) - 0.0292\left(\frac{B}{h}\right) - 0.4257\left(\frac{h'}{h}\right) - 0.06961 \ln\left(\frac{B}{Li}\right) + 0.1359\left(\frac{F}{B}\right) + 1.0505$$

Τα σημεία είχαν ακριβώς την ίδια μετακίνηση με τις δύο προηγούμενες τροποποιήσεις.



Διάγραμμα 6-11

Από την παραπάνω ανάλυση δεν διαπιστώθηκε η δυνατότητα τροποποίησης της σχέσης των Friebel & Harris ώστε να μπορεί να ενσωματώσει ικανοποιητικά και με λογικό τρόπο την επίδραση της Ποσειδωνίας στο συντελεστή κυματικής μετάδοσης. Αυτό συμβαίνει λόγω της φύσης του ημι – εμπειρικού αυτού τύπου ο οποίος έχει προκύψει από βέλτιστη προσαρμογή σε μια ναι μεν σχετικά μεγάλη βάση δεδομένων η οποία όμως αμελεί την πραγματική απομείωση της κυματικής ενέργειας όταν αυτή είναι έντονη και ενδεχομένως σχετίζεται με το πορώδες. Για το λόγο αυτό κρίνεται αναγκαίο να εξαχθεί ημι – εμπειρική σχέση στην οποία θα δίνεται περισσότερη έμφαση στην τραχύτητα και το πορώδες μιας ύφαλής κατασκευής.



## 7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΣΧΟΛΙΑ – ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

### 7.1 Συμπεράσματα ως προς τα πειραματικά αποτελέσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τα πειραματικά αποτελέσματα. Υπενθυμίζεται στον αναγνώστη πως τα πειράματα περιελάμβαναν δύο διατομές (Διατομή 1, Διατομή 2) οι οποίες εξετάστηκαν με ή χωρίς παρουσία Ποσειδωνίας στην στέψη τους (Μοντέλα 1α, 1β, 2α, 2β).

- Οι συντελεστές κυματικής μετάδοσης που προέκυψαν από τα μοντέλα 1β και 2β, δηλαδή των διατομών με λιβάδι Ποσειδωνίας στην στέψη τους ήταν μικρότεροι από αυτούς των μοντέλων 1α και 2α που δεν είχαν Ποσειδωνία. Επιβεβαιώνεται δηλαδή πως το λιβάδι Ποσειδωνίας πάνω σε μία ύφαλη διαπερατή κατασκευή μπορεί να μειώσει σε μικρό ποσοστό την κυματική ενέργεια στην υπήνεμη πλευρά.
- Συγκριμένα για τη **Διατομή 1** ( $b=0.8\text{m}$ ,  $h=0.6\text{m}$ ,  $h'=0.5\text{m}$ ) η μείωση του  $K_t$  στις περιπτώσεις που στη στέψη του Υ.Δ.Κ. υπήρχε Ποσειδωνία έφτασε και το 30% από τον αντίστοιχο  $K_t$  (ίδιες κυματικές συνθήκες) χωρίς Ποσειδωνία.
- Όσον αφορά τη **Διατομή 2** ( $b=0.6\text{m}$ ,  $h=0.6\text{m}$  &  $h=0.5\text{m}$ ,  $h'=0.4\text{m}$ ) παρατηρήθηκε πώς στο μεγαλύτερο βάθος νερού ( $h=0.6\text{m}$ ), δηλαδή στο μεγαλύτερο ελεύθερο βάθος της κατασκευής από την επιφάνεια, οι συντελεστές κυματικής μετάδοσης  $K_t$  δεν παρουσίαζαν μείωση της ίδιας τάξης με αυτήν για μικρότερο βάθος νερού ( $h=0.5\text{m}$ ). Το ελεύθερο βάθος των 20 cm κρίνεται οριακό και σίγουρα επηρεάζει την κυματική μετάδοση καθώς ο κυματισμός περνάει πολύ πιο εύκολα πάνω από την κατασκευή όταν υπάρχει μεγαλύτερη στήλη νερού.
- Ανάμεσα στο μοντέλο 1β της Διατομής 1 και στο μοντέλο 2β με βάθος νερού 0.5 m, καλύτερη απόδοση είχε το μοντέλο 1β. Ο λόγος είναι και το μεγαλύτερο πλάτος στέψης της Διατομής 1 που ενίσχυε την απόσβεση ενέργειας πάνω σε αυτή και κατα μήκος του λειμώνα της Ποσειδωνίας.
- Τέλος σε όλα τα μοντέλα της πειραματικής διαδικασίας παρατηρήθηκε μια τάση μείωσης των συντελεστών κυματικής μετάδοσης για ενδιάμεσες τιμές περιόδου.

## 7.2 Συμπεράσματα από την αξιολόγηση των εμπειρικών τύπων υπολογισμού του $K_t$

Υπάρχουν αρκετά αριθμητικά μοντέλα για τον υπολογισμό του συντελεστή μετάδοσης  $K_t$  για Υ.Δ.Κ. αλλά σχεδόν όλα έχουν σημαντικούς περιορισμούς ως προς το πεδίο εφαρμογής τους. Κάποιοι εξετάστηκαν στο Κεφάλαιο 6 μέσω της σύγκρισής τους με τις πειραματικές μετρήσεις.

- Από την διερεύνηση των αριθμητικών μοντέλων η πλειοψηφία αυτών δεν παρουσίασε ικανοποιητικό βαθμό αξιοπιστίας για τα πειράματα που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία.
- Από αυτά, διερευνήθηκαν περαιτέρω τα μοντέλα των Friebel and Harris και των Seabrook and Hall τα οποία φάνηκε να αποδίδουν καλύτερα. Από την σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων για τους συντελεστές  $K_t$  με τα αποτελέσματα αυτών των δύο αριθμητικών μοντέλων προέκυψαν σε γενικές γραμμές ικανοποιητικά αποτελέσματα. Ωστόσο δεν μπορούσαν να καλύψουν όλες τις περιπτώσεις.
- Ειδικότερα για τον τύπο των Friebel and Harris, εντοπίστηκε ότι οι περιπτώσεις για τις οποίες αποκλίνει σημαντικά το μοντέλο από το πείραμα είναι αυτές για τις οποίες τα ύψη κύματος ήταν μεγάλα για μια σειρά διαφορετικών περιόδων χωρίς να φαίνεται μια ξεκάθαρη τάση, εάν δηλαδή υπερεκτιμάται ή όχι το μοντέλο σε σχέση με την περίοδο για μεγάλα ύψη κύματος. Τα ίδια προβλήματα προέκυψαν και για το μοντέλο των Seabrook and Hall.
- Συνολικά ο τύπος των Friebel and Harris κρίθηκε ως ο πιο αξιόπιστος. Τα προβλήματα ωστόσο που είχε είναι πιθανότατα λόγω της φύσης του ημι – εμπειρικού αυτού τύπου ο οποίος έχει προκύψει από βέλτιστη προσαρμογή σε μια ναι μεν σχετικά μεγάλη βάση δεδομένων η οποία όμως αμελεί την πραγματική απομείωση της κυματικής ενέργειας όταν αυτή είναι έντονη και ενδεχομένως σχετίζεται με το πορώδες.
- Τέλος δεν διαπιστώθηκε η δυνατότητα τροποποίησης της σχέσης των Friebel & Harris ώστε να μπορεί να ενσωματώσει ικανοποιητικά και με λογικό τρόπο την επίδραση της Ποσειδωνίας στο συντελεστή κυματικής μετάδοσης.



## 8 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

---

Το υπό μελέτη φαινόμενο της κυματικής μετάδοσης πίσω από ύφαλές διαπερατές κατασκευές μπορεί να εξεταστεί επίσης ως προς πληθώρα άλλων παραμέτρων συνδυάζοντας ταυτόχρονα και την Ποσειδωνία. Σίγουρα στο μέλλον Με το πέρας της παρούσας διπλωματικής εργασίας προτείνονται τα εξής :

- Πραγματοποίηση περισσότερων εργαστηριακών πειραμάτων όπου θα εξετάζεται η επίδραση του πλάτους στέψης της κατασκευής.
- Αναγκαίο κρίνεται να εξεταστούν περισσότερες τιμές πορώδους των Υ.Κ. καθώς όπως διαπιστώθηκε και από την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας δεν ενσωματώνεται ως μεταβλητή στα υπάρχοντα αριθμητικά μοντέλα.
- Περαιτέρω διερεύνηση της επίδρασης της περιόδου στον συντελεστή κυματικής μετάδοσης με ή χωρίς Ποσειδωνία. Ειδικότερα να διερευνηθεί η επίδραση της περιόδου για τα μεγάλα ύψη κύματος δηλαδή για κύματα που έχουν σχετικά μεγάλη ενέργεια.
- Τροποποίηση της υφιστάμενης έρευνας με διαφορετικές πυκνότητες φύτευσης της Ποσειδωνίας ή ακόμα και άλλου είδους βλάστησης.
- Διερεύνηση τρόπων εφαρμογής Ποσειδωνίας πάνω σε πραγματική ύφαλη κατασκευή και προσδιορισμός του χρόνου ωφέλιμης ζωής της.
- Σε ότι αφορά την εξαγωγή ημι – εμπειρικής σχέσης που να προβλέπει τον συντελεστή κυματικής μετάδοσης για Υ.Δ.Κ. παρουσία Ποσειδωνίας στη στέψη τους, κρίνεται σκόπιμο να εξαχθεί ημι – εμπειρική σχέση στην οποία θα δίνεται περισσότερη έμφαση στην τραχύτητα και το πορώδες μιας ύφαλης κατασκευής. Αυτό απαιτεί περισσότερα πειραματικά δεδομένα αφού από τον όγκο αυτών που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία, δεν ήταν δυνατόν να πραγματοποιηθεί μια αξιόπιστη παραμετροποίηση του προβλήματος αλλά μόνο να εξαχθεί μια σειρά ποιοτικών συμπερασμάτων.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Θεοδουλίδης Α. *Ομοιότητα και διαστατική ανάλυση*, Σημειώσεις μαθήματος Θεωρία Πλοίου II
- Ρούπας Ι. (2018). *Διερεύνηση Τυρβώδων Πιέσεων και Συντελεστή Κυματικής Μετάδοσης σε Ύφαλο Διαπερατό Κυματοθραύστη*, Μεταπτυχιακή Εργασία, Εργαστήριο Λιμενικών Έργων Ε.Μ.Π., Αθήνα
- Σαμλίδης Ν. (2016). *Κυματική Μετάδοση πίσω από Ύφαλους Κυματοθραύστες*. Διπλωματική Εργασία, Εργαστήριο Λιμενικών Έργων Ε.Μ.Π., Αθήνα
- Φωτιά Μ. *Μελέτη της επίδρασης ίσαλων κυματοθραυστών στην παράκτια ζώνη μέσω αριθμητικής προσομοίωσης*, Διατριβή Διπλώματος Ειδίκευσης, Πάτρα 2017
- Briganti, R., Van der Meer, J. W., Buccino, M., & Calabrese, M. (2004). *Wave transmission behind low crested structures*. *Proc. Coastal Structures, Portland*, ASCE pp. 580–592
- Ciruolo G., Ferreri G.B., La Loggia G. (2006). *Flow Resistance of Posidonia Oceanica in Shallow Water*, *Journal of Hydraulic Research* Vol.44, No.2 (2006), pp. 189-202
- D'Angremond, K., Van der Meer, J. W., & De Jong, R. J. (1996). *Wave transmission at low crested structures*. *Proc. 25th Int. Conf. on Coastal Engineering*, ASCE, pp. 3305–3318.
- Karampas T. et al. (2015) “*Coastal Engineering – Coastal Protection Structures*”
- Makris, C. V., & Memos, C. D. (2007). *Wave Transmission over Submerged Breakwaters: Performance of Formulae and Models*.
- Memos C.D. (2016). *Interventions to Prevent Erosion*. Σημειώσεις μαθήματος Ολοκληρωμένης Διαχείριση Παράκτιας Ζώνης. Ε.Μ.Π., Αθήνα
- Memos C.D. (2016). *Mild Interventions for Beach Protection*. Σημειώσεις μαθήματος Ολοκληρωμένης Διαχείριση Παράκτιας Ζώνης. Ε.Μ.Π., Αθήνα
- Memos C.D., Kapsalis A. (2008). *Το Υδροδυναμικό Πεδίο σε Πορώδη Ύφαλο Κυματοθραύστη*, Εργαστήριο Λιμενικών Έργων Ε.Μ.Π., Αθήνα
- Memos C.D., D. Malliouri, Eleni Kazakidou, V. Tsoukala, (2018). “Impact of wavelength on the stability of rubble mound breakwaters”, *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on the Application of Physical Modelling in Coastal and Port Engineering and Science*, Santander, Spain
- Metallinos, A.S., Repousis, E.G., Memos, C.D. (2016b). *Wave propagation over a submerged porous breakwater with steep slopes*. *Ocean Engineering*. 111, 424-438.
- Stratigaki V., Manca E., Prinos P., Losada I., Lara. J., Sclavo M., Caceres I., Sanchez-Arcilla A. (2009) *Large Scale Experiments on Wave Propagation over Posidonia Oceanica*.
- Repousis E. & Memos C.D., (2019). *Wave transmission over a narrow crested submerged breakwater with steep slopes*. 1st International Scientific Conference on the Design and Management of Harbor Coastal and Offshore Works, Athens, Greece (abstract accepted)
- Van der Meer, J. W., & Daemen, I. F. (1994). *Stability and wave transmission at low crested rubble mound structures*. *Journal of Waterway, Port Coastal and Ocean Engineering*, 1, pp. 1–19.

- Ziros A. & Memos C. D., (2019). «Διάδοση κυματισμού πάνω από ύφαλο αναβαθμό με λειμώνες ποσειδωνίας», (“Wave transmission over a submerged bar with Posidonia meadow”). 1st International Scientific Conference on the Design and Management of Harbor Coastal and Offshore Works, Athens, Greece (in greek, abstract accepted)

#### **Διαδικτυακές πηγές**

- [http://www.moa.gov.cy/moa/dfmr/dfmr.nsf/All/08BE4EE8E22C09DA42257D70003B6424/\\$file/POSEIDONIA%20final.pdf?OpenElement](http://www.moa.gov.cy/moa/dfmr/dfmr.nsf/All/08BE4EE8E22C09DA42257D70003B6424/$file/POSEIDONIA%20final.pdf?OpenElement)
- <http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/8706/1/eleni%20stamatopoyloy.pdf>
- <http://www.alieia.minagric.gr>
- <http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente>