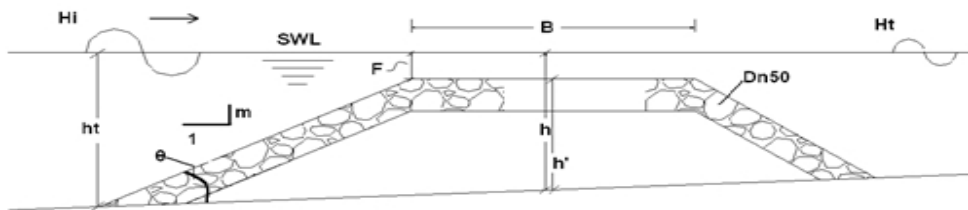


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



**ΣΥΝΘΕΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ
ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΥΦΑΛΟ
ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΗ**

ΦΙΛΟΚΛΗΣ Α. ΚΟΤΣΙΦΗΣ

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Δ. Μέμος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

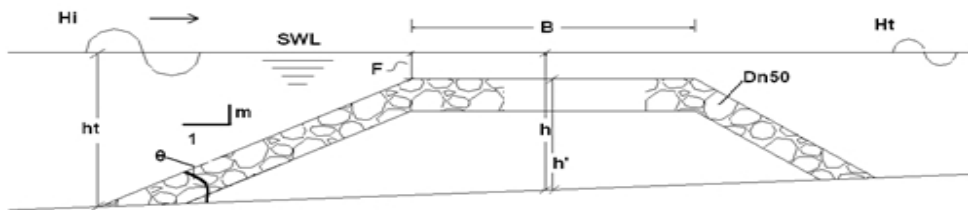
Αθήνα, Ιούλιος 2013



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



**ΣΥΝΘΕΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ
ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΥΦΑΛΟ
ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΗ**

ΦΙΛΟΚΛΗΣ Α. ΚΟΤΣΙΦΗΣ

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Δ. Μέμος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2013

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όσους με βοήθησαν για την εκπόνησή της.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της προπτυχιακής εργασίας, Καθηγητή ΕΜΠ, Κωνσταντίνο Μέμο, κάτω από τη σταθερή καθοδήγηση και συντονισμό του οποίου, ολοκληρώθηκε αυτή η προσπάθεια. Το συνεχές ενδιαφέρον που επέδειξε, με ενθάρρυνε να συνεχίσω με σταθερούς ρυθμούς, ενώ οι επισημάνσεις και οι διορθώσεις του ήταν καθοριστικές για την διαμόρφωση της παρούσας έρευνας.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της παρούσας εργασίας, κ. Δερματά Δ., Επικ. Καθηγητή ΕΜΠ και κ. Αζοράκο Σ., Λέκτορα ΕΜΠ, για τις πολύτιμες διορθώσεις και σχόλια-παρατηρήσεις.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Υποψήφιο Διδάκτορα και φίλο Μιχάλη Χονδρό για το συνεχές ενδιαφέρον του για την εξέλιξη της εργασίας αυτής, για τη συστηματική καθοδήγηση του, καθώς επίσης και για τη συρροή πληροφοριών που μου παρείχε, με στόχο την ολοκληρωμένη προσέγγιση του θέματος.

Ευχαριστώ, τέλος, τους συναδέλφους και φίλους μου Επαμεινώνδα Αργυρόπουλο, Θεοχάρη Τσιούρη, Στέφανο Ποτουρίδη, Σπύρο Αποστόλου, Αλέξανδρο Σιανούδη, Πολάκη Καμπανή, Ιωάννη Βλαχάκη, Μιχάλη Χατζηγιακουμή, Κωνσταντίνο Ζαρακίότη, Κωνσταντίνα Μαυρίκα για την βοήθειά τους στην διαδικασία των πειραματικών μετρήσεων και για την ψυχολογική στήριξη καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Αθήνα 2013 Κοτσίφης Φιλοκλής

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	vii
---------------	-----

ABSTRACT.....	ix
---------------	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΣΤΟΧΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	1
1.1 Αντικείμενο της εργασίας.....	1
1.2 Πρωτότυπα σημεία.....	2
1.3 Διάρθρωση της εργασίας.....	2

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΥΦΑΛΟΙ ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΕΣ.....	5
2.1 Γενικά περί Ύφαλων Κυματοθραυστών.....	5
2.2 Φαινόμενο κυματικής μετάδοσης και εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού.....	6
2.3 Παράμετροι επιρροής κυματικής μετάδοσης σε Ύφαλους Κυματοθραύστες.....	10
2.3.1 Εισερχόμενο Ύψος Κύματος.....	11
2.3.2 Περίοδος Εισερχόμενου Κύματος.....	12
2.3.3 Ελεύθερο Ύψος Θάλασσας.....	12
2.3.4 Πλάτος στέψης.....	12
2.3.5 Κλίση πρανών.....	13
2.3.6 Τραχύτητα και Διαπερατότητα της κατασκευής.....	13
2.4 Εμπειρικές Σχέσεις Υπολογισμού του Συντελεστή Μετάδοσης K_t	14
2.4.1 Πρώτες απόπειρες.....	14
2.4.2 Ahrens (1987).....	15
2.4.3 Van der Meer (1990).....	16
2.4.4 Van der Meer & D'Angremond (1991) – CEM (2004).....	16
2.4.5 Van der Meer & Daemen (1994).....	18
2.4.6 D'Angremond, Van der Meer & De Jong (1996).....	19
2.4.7 Briganti, Van der Meer, Buccino & Calabrese (2003).....	20

2.4.8	Van der Meer, Briganti, Zannutigh & Wang (2005).....	20
2.4.9	Seabrook & Hall (1998).....	21
2.4.10	Bleck & Oumeraci (2002).....	22
2.4.11.	Friebel & Harris (2003).....	22
2.4.12.	Siladharma & Hall (2003).....	23
2.4.13.	Calabrese, Vicinanza & Buccino (2003).....	24
2.4.14.	Daemrich, Mai & Ohle (2002).....	25

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΟΜΟΙΩΜΑΤΑ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ ΤΥΠΟΥ

BOUSSINESQ.....	27	
3.1	Εισαγωγή στα ομοιώματα τύπου Boussinesq.....	27
3.2	Εισαγωγή της θραύσης στα μοντέλα Boussinesq.....	28
3.3	Κατάστρωση μαθηματικού ομοιώματος Boussinesq (Karambas & Memos 2009).....	33
3.4	Κατάστρωση εξισώσεων Boussinesq (Karambas&Memos2009).....	34
3.4.1	1DH-περίπτωση.....	34
3.5	Αριθμητικό σχήμα επίλυσης.....	40
3.6	Θραύση κυματισμών (Kennedy et al. 1999).....	42
3.7	Οριακές συνθήκες.....	45
3.7.1	Όρια γένεσης κύματος (Lee&Suh 1998).....	45
3.8	Απορροφητικά ορια.....	48

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΤΕΧΝΗΤΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ 51

4.1	Εισαγωγή.....	51
4.2	Περιγραφή Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων.....	51
4.2.1	Ιδιότητες Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων.....	54
4.2.2	Τύποι Νευρωνικών Δικτύων.....	54
4.2.3	Αρχιτεκτονική Νευρωνικών Δικτύων.....	55
4.2.4	Αλγόριθμοι Εκπαίδευσης.....	56
4.3	Παράμετροι βελτιστοποίησης ΤΝΔ.....	57
4.3.1	Αρχικοποίηση βαρών.....	57
4.3.2	Τερματισμός Εκπαίδευσης.....	58

4.3.3	Επιλογή Συνόλου Εκπαίδευσης, Επαλήθευσης και Γενίκευσης.....	58
4.3.4	Σχεδίαση Νευρωνικού Δικτύου.....	59
4.3.5	Προεπεξεργασία Δεδομένων.....	60
4.4	Εφαρμογές Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων.....	61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5		
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ.....		63
5.1	Πειραματική Διώρυγα.....	63
5.1.1	Διαστάσεις – Περιγραφή.....	63
5.1.2	Κυματογεννήτρια.....	66
5.1.3	Παραγόμενοι κυματισμοί.....	68
5.2	Διαδικασία μετρήσεων.....	69
5.3	Πορώδες.....	75
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6		
ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....		77
6.1	Σύνθετη Προσομοίωση.....	77
6.1.1	Εισαγωγή.....	77
6.2	Επιλογή μεταβλητών εισόδου και εξόδου.....	80
6.3	Εφαρμογή μοντέλου Boussinesq.....	81
6.4	Εφαρμογή ΤΝΔ.....	83
6.5	Επαλήθευση Βελτιωμένου Μοντέλου.....	86
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7		
Συμπεράσματα – Προτάσεις.....		89
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		93
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....		99

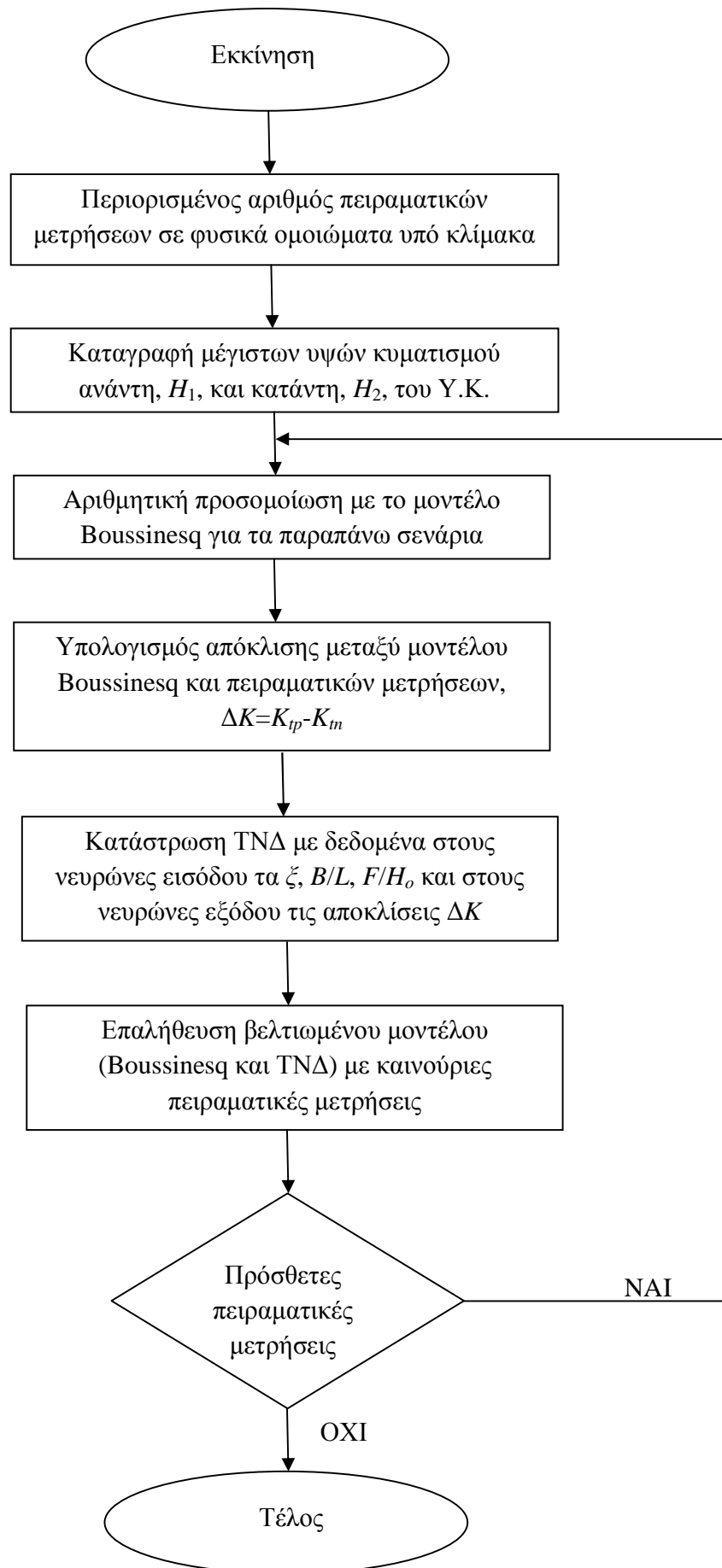
ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα μελέτη ακολουθείται μια προσέγγιση για να υπολογιστεί με ακρίβεια ο συντελεστής κυματικής μετάδοσης K , πάνω από ύφαλα εμπόδια, με βάση ένα σχετικά μικρό αριθμό πειραματικών μετρήσεων, ο οποίος όμως συμπληρώνεται μέσω ενός αλγόριθμου ΤΝΔ. Το βασικό σημείο αυτής της εργασίας είναι η χρησιμοποίηση ενός επιπλέον αριθμητικού μοντέλου Boussinesq για την ελαχιστοποίηση μεγάλου όγκου πειραματικών δεδομένων και το διάστημα επιρροής των νευρωνικών δικτύων.

Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις του ύψους κυματισμού ανάντη και κατόντη ύφαλου κυματοθραύστη διάφορων γεωμετρικών χαρακτηριστικών στο Εργαστήριο Λιμενικών Έργων. Έπειτα προσομοιώθηκαν όλα τα σενάρια με αριθμητικό μοντέλο Boussinesq (Karambas & Memos, 2009), το οποίο εμφάνισε κάποιες αποκλίσεις στον κατόντη σταθμό. Οι αποκλίσεις αυτές μαζί με τα εισερχόμενα κυματικά χαρακτηριστικά και τη γεωμετρία του κυματοθραύστη λειτούργησαν ως δεδομένα εισόδου σε ένα Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο που καταστρώθηκε. Στόχος είναι η βελτιστοποίηση ενός σύνθετου μοντέλου ώστε να καθίσταται πιο ακριβής η πρόγνωση του συντελεστή μετάδοσης σε ένα καινούριο σενάριο.

Το σύνθετο μοντέλο έπειτα επαληθεύεται στην πρόγνωση του συντελεστή μετάδοσης σε καινούριες πειραματικές μετρήσεις και συγκρίνεται με την πρόβλεψη του μοντέλου Boussinesq και με αυτή που προβλέπουν ημι-εμπειρικές σχέσεις δείχνοντας καλύτερη απόδοση από τα προηγούμενα.

Στο επόμενο διάγραμμα ροής συνοψίζεται η πορεία που ακολουθήθηκε στην παρούσα έρευνα για την κατάστροψη του βελτιωμένου μοντέλου που συνδυάζει ταυτόχρονα τη γνώση από υπάρχουσες πειραματικές μετρήσεις, τις αριθμητικές προσομοιώσεις με το μοντέλο Boussinesq και την ευελιξία ενός ΤΝΔ, με στόχο την βέλτιστη πρόβλεψη του συντελεστή κυματικής K , μετάδοσης πάνω από Υ.Κ.



ABSTRACT

1. Introduction

Designing of harbour and coastal projects requires good knowledge of the hydrodynamic field in the study area in order to accurately calculate the forces that load the works as well as to predict a sequel of phenomena such as overtopping, sediment transport and others. For better understanding of the natural processes involved, physical models are constructed in laboratories under a suitable scale. A second approach is the numerical modelling based on analytical equations. In broad terms the first one is time consuming and costly while the second lacks in accuracy. Thus during the recent past years a method was introduced that combines the previous two, carrying out a small number of experiments and extended numerical simulations with an error correction algorithm and an optimization procedure. This composite simulation is based on information feeding from one to the other model for the accomplishment of a still better solution.

Several researchers have adopted this composite approach. Some of these efforts focused on the derivation of a numerical model that incorporates the knowledge of a large amount of experimental data in order to predict wave overtopping or loads upon the toe of the construction.

In the present study an application of composite modelling is presented, for the wave transmission above submerged breakwaters. Specifically, experimental measurements and numerical results from the Boussinesq model of Karambas and Memos (2009) are used and an Artificial Neural Network (ANN) is structured aiming at precisely forecasting the transmission coefficient by this improved model. The latter is compared with a new set of experiments, with the initial Boussinesq model and with empiric formulas.

2. Experimental data

Measurements were obtained from experiments that took place in a wave flume of the Laboratory of Harbour Works, National Technical University of Athens. All the experimental layouts incorporated a horizontal bottom followed by an impermeable submerged breakwater of

various geometrical characteristics. The simulated wave scenarios included breaking and non-breaking, monochromatic (short and long) waves.

3. Numerical models

For the initial calculation of the wave transmission coefficient a Boussinesq model was used. Further, in order to improve previous results, an ANN was constructed, fed by experimental data.

3.1 Boussinesq model

The fully dispersive and weakly non-linear Boussinesq type model of Karambas and Memos (2009) was used to simulate the propagation of regular waves, over a submerged breakwater. The model was extended by Chondros *et al.* (2009), to simulate energy dissipation due to wave breaking.

Specifically the one horizontal dimension version of the continuity equation is given by:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial((d + \zeta)U)}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

where the dimensionless variables: (d) water depth, (ζ) surface elevation, (ε) nonlinearity coefficient ($=H/d$), H wave height and (U) depth averaged horizontal velocity. The second model equation is the momentum equation:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} = \frac{g}{\pi d} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial}{\partial x} [\zeta(x - \xi, t) - \zeta(x, t)] \ln \tanh\left(\frac{\pi|\xi|}{4d}\right) d\xi \quad (2)$$

3.2 Artificial Neural Network

An ANN can be defined as a mathematical model tending to save empirical knowledge and make it available for applications. Among various types of ANNs, in the present work a forward-

feeding, multi-level network perceptron is used due to its capability to produce higher order statistical terms from the data.

4. Results

The input data in the ANN included consist of the Irribaren parameter, the ratio of breakwater's crest width to wave length and the ratio of breakwater's freeboard to incident wave height. The value of the transmission coefficient based on experimental data, K_t , differs from, K_{tn} , the one predicted by Boussinesq model, by $\Delta K = K_{tp} - K_{tn}$. This difference was chosen to be the desired export datum from the ANN. In the following figure the improvement of the result by composite modelling in contrast to those by the Boussinesq model is obvious for typical individual tests shown in Fig. 1. Furthermore the composite model is compared against various semi-empirical equations with satisfactory behaviour as shown in the next Figure 2.

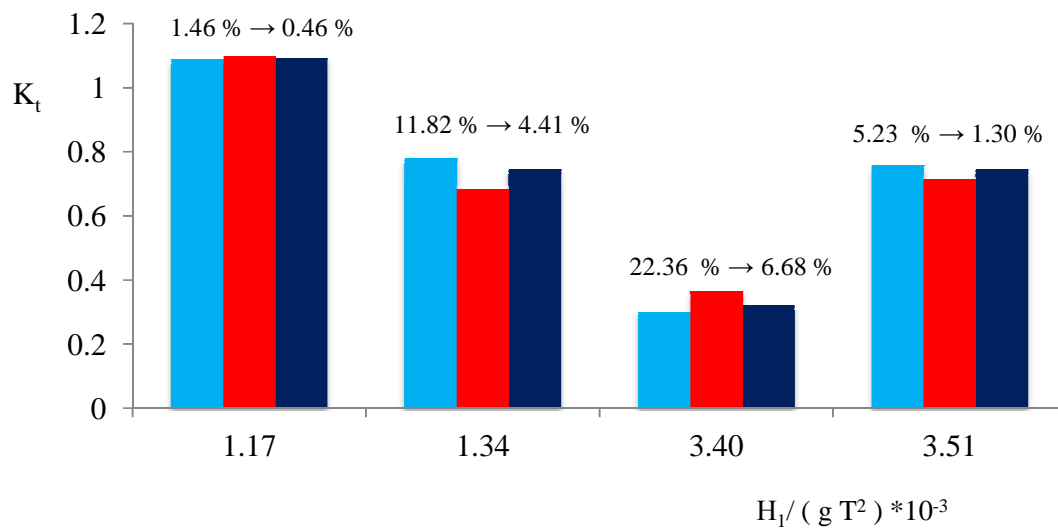


Figure 1. Reduction of divergence rates, in prediction of wave transmission coefficient; (■) Experimental data, (■) Boussinesq model and (■) Composite model.

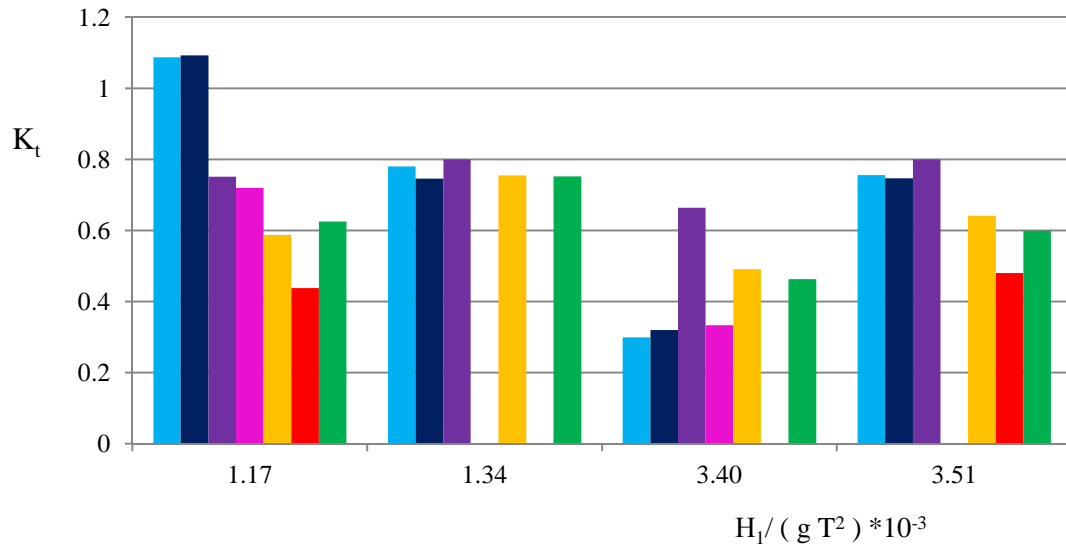


Figure 2. Reduction of divergence rates, in prediction of wave transmission coefficient; (■) Experimental data, (■) Composite model, (■) Van der Meer (1990), (■) Bleck and Oumeraci (2002), (■) Friebel and Harris (2003), (■) D'Angremond et al. (1996), (■) Briganti et al. (2003).

5. Conclusions

The ANN that was derived in the present work shows improved behaviour regarding predictions by a Boussinesq model for the wave transmission. This is achieved by taking advantage of the knowledge obtained from experimental data, despite the relatively limited available number of the latter. Future research should focus on feeding the ANN with more measurements.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΣΤΟΧΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

1.1 Αντικείμενο της εργασίας

Για το σχεδιασμό παράκτιων έργων είναι απαραίτητη η γνώση των κυματικών χαρακτηριστικών και του υδροδυναμικού πεδίου στην περιοχή μελέτης, έτσι ώστε να καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός των δυνάμεων που ασκούνται σε αυτά καθώς και για την εκτίμηση μιας σειράς φαινομένων όπως η υπερπήδηση, η στερεομεταφορά κ.α. Για καλύτερη κατανόηση των διεργασιών που υπεισέρχονται και λήψη σχετικών μετρήσεων κατασκευάζονται φυσικά προσομοιώματα σε κατάλληλα εργαστήρια τα οποία αποτελούν ουσιαστικά μια αναπαράσταση του φυσικού φαινομένου υπό κλίμακα. Μια δεύτερη προσέγγιση είναι η αριθμητική προσομοίωση του φαινομένου η οποία βασίζεται στην επεξεργασία μαθηματικών μοντέλων. Η πρώτη μέθοδος είναι χρονοβόρα και έχει μεγάλο κόστος, ενώ η τελευταία υστερεί σε ακρίβεια. Έτσι λοιπόν, τα τελευταία χρόνια αναπτύσσεται μια μέθοδος που συνδυάζει τις δυο προηγούμενες, πραγματοποιώντας ένα ορισμένο αριθμό πειραμάτων και εκτεταμένες αριθμητικές προσομοιώσεις μαζί με ένα αλγόριθμο διόρθωσης σφάλματος και μια διαδικασία βελτιστοποίησης. Αυτή η σύνθετη προσομοίωση βασίζεται στην τροφοδότηση πληροφοριών από το ένα μοντέλο στο άλλο για την επίτευξη λύσης με μεγάλη ακρίβεια.

Στην παρούσα μελέτη ακολουθείται μια προσέγγιση για να υπολογιστεί με ακρίβεια ο συντελεστής κυματικής μετάδοσης πάνω από ύφαλα εμπόδια, με βάση ένα σχετικά μικρό αριθμό πειραματικών μετρήσεων, ο οποίος όμως συμπληρώνεται μέσω ενός αλγόριθμου ΤΝΔ. Το βασικό σημείο αυτής της εργασίας είναι η χρησιμοποίηση ενός επιπλέον αριθμητικού μοντέλου Boussinesq για την ελαχιστοποίηση μεγάλου όγκου πειραματικών δεδομένων και το διάστημα επιρροής των νευρωνικών δικτύων.

Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις του ύψους κυματισμού κατάντη ύφαλου κυματοθραύστη διάφορων γεωμετρικών χαρακτηριστικών στο Εργαστήριο Λιμενικών Έργων, έπειτα προσομοιώθηκαν όλα τα σενάρια με αριθμητικό μοντέλο Boussinesq (Karambas & Memos, 2009), το οποίο εμφάνισε κάποιες αποκλίσεις στον κατάντη σταθμό. Οι αποκλίσεις αυτές μαζί με τα εισερχόμενα κυματικά χαρακτηριστικά και τη γεωμετρία του κυματοθραύστη λειτούργησαν ως δεδομένα εισόδου σε ένα Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο που καταστρώθηκε. Στόχος είναι η βελτιστοποίηση ενός σύνθετου μοντέλου ώστε να καθίσταται πιο ακριβής η πρόγνωση του συντελεστή μετάδοσης σε ένα καινούριο σενάριο.

1.2 Πρωτότυπα σημεία

Η παρούσα έρευνα μπορεί να χαρακτηριστεί ως πρωτότυπη, καθώς

- συνδυάζει πειραματικές μετρήσεις και αριθμητικά μοντέλα με στόχο την ακριβή πρόβλεψη του συντελεστή μετάδοσης και
- εφαρμόζει επιπλέον απο τις προυπάρχουσες δημοσιευμένες έρευνες ένα αριθμητικό μοντέλο Boussinesq με στόχο τη μείωση του απαραίτητου όγκου πειραματικών μετρήσεων.

1.3 Διάρθρωση της εργασίας

Η εργασία περιλαμβάνει, εκτός από την παρούσα εισαγωγή (Κεφάλαιο 1), έξι Κεφάλαια και δύο Παραρτήματα.

Στο Κεφάλαιο 2 πραγματοποιείται εκτεταμένη βιβλιογραφική επισκόπηση των ύφαλων κυματοθραυστών καθώς και των εμπειρικών σχέσεων που υπολογίζουν το συντελεστή μετάδοσης.

Στο Κεφάλαιο 3 εισάγεται η προσομοίωση κυματικής διάδοσης με τα αριθμητικά μοντέλα Boussinesq και παρουσιάζεται η κατάστρωση του αριθμητικού μοντέλου των Karambas & Memos (2009).

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται οι βασικές αρχές λειτουργίας των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (ΤΝΔ), περιγράφοντας τις βασικές κατηγορίες, τα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες τους.

Στο Κεφάλαιο 5 αναφέρονται οι πειραματικές διατάξεις και παρουσιάζονται οι πίνακες με τις μετρήσεις.

Στο Κεφάλαιο 6 δίνεται η πορεία σύνθεσης του βελτιωμένου μοντέλου και επαληθεύεται εκ νέου με πειραματικές μετρήσεις.

Στο Κεφάλαιο 7 συνοψίζονται τα κύρια συμπεράσματα της εργασίας και διατυπώνονται ορισμένες προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Στο Παράρτημα Α παρατίθεται ο κώδικας του μοντέλου Boussinesq σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN.

Στο Παράρτημα Β παρατίθενται τα αποτελέσματα του αριθμητικού μοντέλου Boussinesq για όλα τα σενάρια.

2 ΥΦΑΛΟΙ ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΕΣ

2.1 Γενικά περί Ύφαλων Κυματοθραυστών

Η παράκτια ζώνη είναι μια ευαίσθητη ζώνη στην οποία αναπτύσσονται έντονα δυναμικά φαινόμενα, με αποτέλεσμα να διαμορφώνονται εύθραυστες και ευμετάβλητες ισορροπίες όσον αφορά στο προφίλ και τη γενικότερη μορφολογία αυτής. Το μεγαλύτερο ποσοστό της κινητικής ενέργειας του κυματισμού διαχέεται μέσα από τη θραύση, την αναρρίχηση στην ακτή, την τριβή στον πυθμένα κ.α. Το σημαντικότερο αποτέλεσμα αυτών των διεργασιών είναι η διάβρωση της παράκτιας ζώνης και η στερεομεταφορά του υλικού (ίζημα).

Οι συμβατικοί έξαλλοι κυματοθραύστες κατασκευάζονται τυπικά, έτσι ώστε να καταστρέφουν ολοκληρωτικά κατά το δυνατόν την κυματική ενέργεια στη υπήνεμη πλευρά τους. Συνήθως αυτά τα έργα είναι ογκώδη και χονδροειδή για να αντέξουν στα ακραία κυματικά φαινόμενα τα οποία υφίστανται, με παράπλευρο αποτέλεσμα όμως να εξαφανίζουν και τα ευεργετικά αποτελέσματα της κυκλοφορίας του νερού στην προστατευόμενη περιοχή καθώς και την αισθητική του τοπίου.

Τα τελευταία χρόνια αναπτύσσονται εναλλακτικοί τρόποι κατασκευής έργων προστασίας, όπως οι ύφαλοι κυματοθραύστες (Υ.Κ.). Αυτές οι κατασκευές έχουν τη στέψη τους κάτω από ένα ορισμένο ύψος, το οποίο ορίζεται π.χ. από τη Σ.Η.Υ. (Στάθμη Ηρεμίας Υδάτων) και ενώ προσφέρουν κάποιο ποσοστό προστασίας από την κυματική προσβολή της ακτής, παράλληλα επιτρέπουν την απρόσκοπτη κυκλοφορία του θαλάσσιου ύδατος κατά μήκος της ακτής.

Οι Υ. Κ. είναι μονίμως βυθισμένοι κυματοθραύστες (submerged breakwaters) που κατασκευάζονται συνήθως από λιθορριπή με τεχνητούς ή φυσικούς ογκόλιθους. Σε διάφορες περιπτώσεις μπορεί να γίνει χρήση ειδικού σχήματος τεχνητών ογκόλιθων ή μονάδων θωράκισης, tripods, tetrapods, dolos, reef-balls, γεωσωλήνων (geotubes), γεώσακκων κ.τ.λ. για την δημιουργία υφάλων εμποδίων, ως έργων προστασίας ακτής.

Σκοπός της χρήσης του Υ. Κ. είναι να μειώσει τις υδραυλικές φορτίσεις κατάντη αυτού λόγω του κυματικού πεδίου σε τέτοιο σημείο ώστε να διατηρείται μια ωφέλιμη δυναμική ισορροπία στην παράκτια ζώνη. Οι Υ.Κ. προσφέρουν ικανοποιητική προστασία απέναντι στην διάβρωση της ακτής και σταθεροποιούν την ακτογραμμή, ενώ ταυτόχρονα επιτρέπουν την απρόσκοπτη κυκλοφορία του νερού αφήνοντας τα παράκτια ρεύματα να περάσουν πάνω από την στέψη τους και μεταξύ υφάλου κυματοθραύστη και ακτογραμμής, εμποδίζοντας τελικά την διαμόρφωση ζωνών λιμναζόντων νερών.

2.2 Φαινόμενο κυματικής μετάδοσης και εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού

Το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης κυματισμού - έργων προστασίας είναι εξαιρετικά σύνθετο και πολύπλοκο. Αυτή η πολυπλοκότητα προκύπτει από δύο αιτίες:

- την έντονη μεταβλητότητα των κλιματικών και κυματικών συνθηκών και
- την ταυτόχρονη επίδραση διαφόρων διεργασιών, όπως η διήθηση σε πορώδεις μέσο, η θραύση κυματισμών και η απελευθέρωση υψίσυχων στα κατάντη του Υ. Κ.

Η αλληλεπίδραση των διεργασιών καθορίζει την κυματική μετάδοση (transmission), την ανάκλαση (reflection) και την καταστροφή της κυματικής ενέργειας (wave energy dissipation).

Παρακάτω αναλύονται οι τρεις σχετικές με τον Υ.Κ., έννοιες της αναρρίχησης (run up), της υπερπήδησης (overtopping) και της μετάδοσης (transmission) κυματισμών, καθώς και οι μεταξύ τους διαφορές (Εικόνα 2.1).



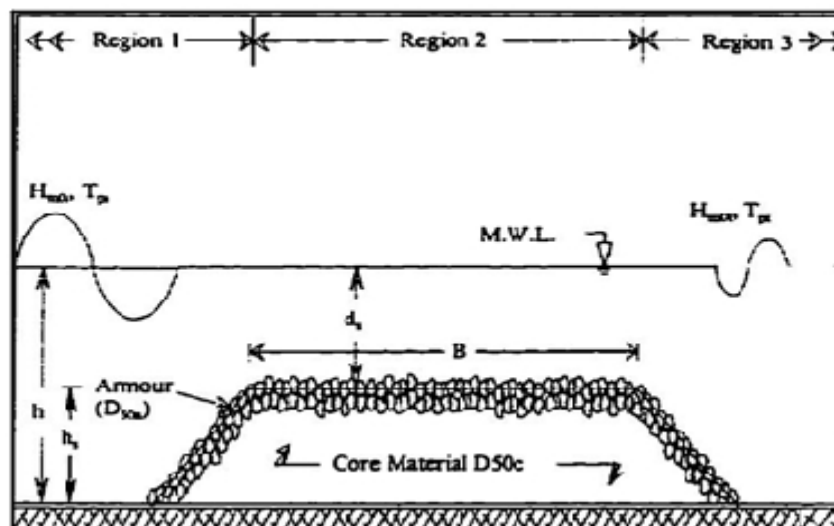
Εικόνα 2.1: Αναρρίχηση, Υπερπήδηση και Μετάδοση Κύματος σε χαμηλής στέψης έργα.

Η αναρρίχηση της ελεύθερης επιφάνειας είναι το φαινόμενο κατά το οποίο ένα εισερχόμενο κύμα συναντά μια κεκλιμένη επιφάνεια και ένα τμήμα του αναρριχάται πάνω σε αυτή. Η ανύψωση αυτή φτάνει ως ένα μέγιστο ύψος πάνω από τη Σ.Η.Υ., το οποίο είναι και το ύψος αναρρίχησης (run up level). Όταν η στέψη της κεκλιμένης επιφάνειας βρεθεί κάτω από το επίπεδο ανύψωσης, το νερό θα μεταδοθεί πάνω από αυτή. Η μέση ποσότητα του νερού το οποίο περνά πάνω από τη στέψη ονομάζεται κυματική μετάδοση και μπορεί να ερμηνευτεί σε κυβικά μέτρα ανά τρέχον μέτρο και ανά δευτερόλεπτο ($\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{sec}$). Συνεπώς και μπορεί να συγκριθεί με την ειδική παροχή ανά μονάδα πλάτους (q) στη ροή με ελεύθερη επιφάνεια σε ανοικτούς αγωγούς.

Στην περίπτωση που κατάντη του εμποδίου υπάρχει ανοιχτό θαλάσσιο πεδίο, οι συνολικές μάζες του νερού που μεταδίδονται μέσω του εμποδίου είτε υπερπηδώντας το είτε διαδιδόμενες από πάνω του, είτε απλά διαπερνώντας το από μέσα του, δημιουργούν ενίοτε ένα νέο κυματικό πεδίο στην προστατευόμενη περιοχή κατάντη του έργου. Τα κύματα αυτά είναι γενικά μικρότερα σε ύψος από τα επερχόμενα στα ανάντη της κατασκευής και ο λόγος των πρώτων υψών προς τα δεύτερα αποτελεί το βασικό κριτήριο εκτίμησης της κυματικής μετάδοσης πίσω από το έργο.

Στην παρούσα εργασία και εφόσον εξετάζονται μόνο Υ.Κ. το μόνο φαινόμενο που θα μας απασχολήσει είναι η συνολική κυματική μετάδοση πάνω και πίσω από τέτοιου τύπου έργα και όχι ξεχωριστά τα παραπάνω φαινόμενα. Οι σχεδιαστικές κυρίαρχες παράμετροι είναι η γεωμετρία της ύφαλης κατασκευής, η διαπερατότητά της, το ελεύθερο ύψος θάλασσας πάνω από το ύψος στέψης του Υ. Κ., το πλάτος της στέψης του έργου, η επιφανειακή τραχύτητα της θωράκισης, το βάθος της θάλασσας στην περιοχή του έργου και τα κυματικά χαρακτηριστικά δηλαδή το ύψος και η περίοδος και η σύνθετη/φασματική (irregular/spectral) ή μονοχρωματική (regular) φύση τους.

Οι βασικές φυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάδοση κυματισμών κατάντη ύφαλων κυματοθραυστών μπορούν γενικά να χωριστούν σε 3 περιοχές επί του Υ.Κ. και είναι οι ακόλουθες (Σχήμα 2.1):



Σχήμα 2.1: Τρεις περιοχές ενδιαφέροντος σε Υ. Κ

Η πρώτη βρίσκεται στο προσήνεμο πρηνές της κατασκευής. Σε αυτή το εισερχόμενο κυματικό πεδίο είναι από τη φύση του σύνθετο, φασματικό και χωρικά και χρονικά μεταβλητό. Τα φαινόμενα της ρήγωσης και της διάθλασης επιδρούν πάνω σε αυτό με αποτέλεσμα την δημιουργία αρμονικών κυμάτων. Μερική από την εισερχόμενη κυματική ενέργεια ανακλάται και η ανάκλαση αυτή εξαρτάται άμεσα από το πόσο βυθισμένη είναι η στέψη σε σχέση με τη Σ.Η.Υ. Κατά κάποιο τρόπο είναι εξαρτώμενη και από την κλίση του ανάντη πρηνούς του Υ. Κ. Επίσης παρατηρείται πιθανώς θραύση των κυμάτων, η οποία επηρεάζεται άμεσα από την κλίση του προσήνεμου πρηνούς και τη μεταβολή του βάθους.

Η δεύτερη περιοχή ενδιαφέροντος εντοπίζεται επί της στέψης του κυματοθραύστη. Σε αυτήν, ενέργεια από τις θεμελιώδεις συχνότητες μεταφέρεται στην περιοχή με υψηλότερες συχνότητες. Στην περίπτωση ενός Υ.Κ., όπου η διάδοση του κύματος γίνεται σε πιο απότομη βαθυμετρία με στόχο να είναι μικρή η μετάδοση τους κατάντη, το φαινόμενο επηρεάζεται από τις διεργασίες ανάκλασης και θραύσης των κυμάτων πάνω στην στέψη. Το φαινόμενο της θραύσης είναι έντονο κατά μήκος της στέψης και όσο αυτή επιμηκύνεται, τόσο και αυτό αυξάνει. Καθώς η στέψη του Υ. Κ. είναι το πιο ρηχό (με μικρότερο βάθος) σημείο στην περιοχή η αντίσταση τριβής στον πυθμένα αρχίζει να επηρεάζει το κύμα, μειώνοντας το ύψος του. Επιπλέον, αν ο Υ. Κ. είναι διαπερατός, τυρβώδεις ροές μέσα στο σώμα της κατασκευής μπορούν να προκαλέσουν απώλεια κυματικής ενέργειας.

Η τρίτη περιοχή εντοπίζεται στο κατάντη πρανές του Υ.Κ., στην οποία παρατηρείται μετάβαση - σχετικά απότομη - από ρηγά σε βαθύτερα νερά με αποτέλεσμα οι υψίσυχνες συνιστώσες των κυματισμών που δημιουργούνται στις προαναφερθείσες περιοχές να αποχωρίζονται από τις πρωταρχικές συνιστώσες και να ταξιδεύουν με τη δική τους φασική ταχύτητα.

Γι' αυτό το λόγο γίνεται κατανοητό ότι υπάρχουν αρκετοί παράγοντες συνδεδεμένοι με τη φύση του εισερχόμενου κυματικού πεδίου, τη γεωμετρία του κυματοθραύστη και την τοπική βαθυμετρία που μπορούν να επηρεάσουν την μεταβολή του κύματος και την τελική διάδοση, τη μετάδοση, την ανάκλαση και την απώλεια κυματικής ενέργειας σε έναν Υ. Κ. Μέτρο εκτίμησης της κυματικής μετάδοσης μπορεί να αποτελέσει ο συντελεστής κυματικής μετάδοσης K_t , ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος του μεταδιδόμενου ύψους κύματος H_t κατάντη του Υ. Κ. προς το εισερχόμενο ύψος κύματος H_i ανάντη της κατασκευής.

Φυσικές και αριθμητικές διερευνήσεις έχουν γίνει στο παρελθόν στην προσπάθεια να εκτιμηθούν τα παραπάνω. Μια γενική ιστορική ανασκόπηση καθώς και διεξοδική παρουσίαση και αξιολόγηση αυτών των προσπαθειών και των αποτελεσμάτων τους έχει παρουσιαστεί στην Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία του Μακρή Χ. (2007) και παρακάτω παρατίθενται τα σημαντικότερα από αυτή την έρευνα.

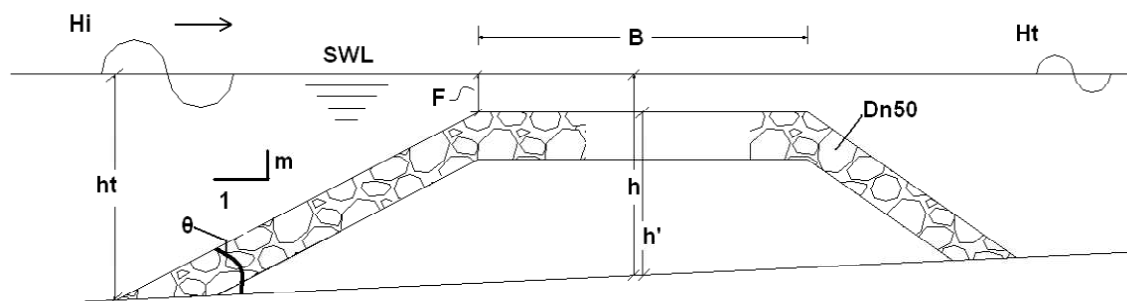
2.3 Παράμετροι επιρροής κυματικής μετάδοσης σε Ύφαλους Κυματοθραύστες

Καθοριστικής σημασίας μέγεθος, όπως έχει προαναφερθεί, για την εκτίμηση του φαινομένου της κυματικής μετάδοσης κατάντη ύφαλου κυματοθραύστη αποτελεί ο συντελεστής κυματικής μετάδοσης K_t , ο οποίος ορίζεται ως:

$$K_t = \frac{H_t}{H_i} \quad (2.1)$$

όπου H_t το μεταδιδόμενο ύψος κύματος κατάντη και H_i το εισερχόμενο ύψος κύματος ανάντη της κατασκευής.

Ένας μεγάλος αριθμός εργαστηριακών πειραμάτων 1-D, 2-D, 3-D σε πρότυπα κανάλια (flumes), δεξαμενές (basins) και σε πραγματικό πεδίο έχουν διεξαχθεί στο παρελθόν με στόχο να ποσοτικοποιήσουν τον συντελεστή μετάδοσης K_t . Αυτή η έρευνα σε συνδυασμό με στατιστικές μεθόδους και διαστατική ανάλυση έχει παράγει μια πλειάδα ημι-εμπειρικών τύπων που χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές σχεδιασμού Υ. Κ. Εντούτοις, υπάρχουν περιορισμοί ξεχωριστά για κάθε έκφραση οι οποίοι συναρτώνται με τις διαφορετικές κάθε φορά εργαστηριακές συνθήκες και το εύρος τιμών των δεδομένων εισαγωγής για τη διεξαγωγή των πειραμάτων. Οι φυσικές παράμετροι που επηρεάζουν το συντελεστή μετάδοσης παρουσιάζονται στο ακόλουθο σκαρίφημα και είναι οι εξής:



Σχήμα 2.2: Καθορισμός Φυσικών Μεταβλητών προβλήματος

B : πλάτος στέψης του κυματοθραύστη

F : ελεύθερο ύψος θάλασσας (freeboard), [$F=h-h'$]

h : βάθος θάλασσας (στον άξονα της κατασκευής)

h' : ύψος κυματοθραύστη (στον άξονά του)

h_i : βάθος θάλασσας στον προσήνεμο (ανάντη) πόδα της κατασκευής m : κλίση ανάντη πρηνούς της κατασκευής ($m=\tan\theta$)

D_{n50} : ονομαστική διάμετρος ογκολίθου θωράκισης [$D_{n50}=(M_{n50}/\rho_a)^3$]

H_i : εισερχόμενο ύψος κύματος (H_{si} or H_{m0i}) (incident wave height) στον πόδα της κατασκευής

H_s : σημαντικό ύψος κύματος (significant wave height) που αντιστοιχεί στο μέσο όρο του 1/3 των μεγαλύτερων κυμάτων [$H_s=H_{1/3}$]

H_{m0} : σημαντικό ύψος κύματος (significant wave height) από φασματική ανάλυση
 $[H_{m0}=\sqrt{(4m_0)}]$

L : τοπικό μήκος κύματος (local wavelength)

T_p , L_p : περίοδος, μήκος κύματος που αντιστοιχούν στην κορυφή του φάσματος ξ_p :
 αριθμός Iribaren (surf-similarity parameter) $[\xi_p=m/\sqrt{S_p}]$

S_p : κλίση κύματος $[S_p =H_i /L_p]$

S_{op} : κλίση κύματος στα βαθιά, όπου $S_{op}=H_i/L_{op}=(2\pi H_i)/(gT_p^2)$.

Πρέπει να τονισθεί, προς αποφυγή παρερμηνειών, ότι στην παρούσα ανάλυση το ελεύθερο ύψος θεωρείται πάντοτε θετικό ($F>0$) για ύφαλους κυματοθραύστες και αρνητικό ($F<0$) για έξαλους, με αντίστοιχη αλλαγή στα πρόσημα των εκφράσεων στις αυθεντικές πηγές από τις οποίες έχουν αντληθεί, όπου μπορεί π.χ. η τιμή του F να έχει ληφθεί αντιστρόφως.

Για την απόκτηση ή την εκτίμηση ενός έγκυρου και εύχρηστου μοντέλου πρόβλεψης της μετάδοσης κύματος σε Υ. Κ. είναι απαραίτητο να καθοριστεί μία σειρά παραμέτρων που επιδρούν πάνω στο φαινόμενο.

2.3.1 Εισερχόμενο Ύψος Κύματος

Το πιο σημαντικό παραμετρικό μέγεθος αποτελεί το εισερχόμενο ύψος κύματος (incident wave height) H_i . Στην περίπτωση σύνθετων κυματισμών εκφράζεται ως το σημαντικό ύψος κύματος H_s ή H_{m0} (significant wave height). Προφανώς, τα μικρά σε ύψος κύματα περνούν πιο εύκολα πάνω από τους Υ. Κ. και δίνουν μεγαλύτερους συντελεστές μετάδοσης από ότι τα υψηλά κύματα. Εκτός όμως του άμεσου καθορισμού του συντελεστή κυματικής μετάδοσης K_t ($K_t=H_{st}/H_{si}$), το μέγεθος του ύψους του εισερχόμενου κύματος H_i καθορίζει αν άλλα συναφή μεγέθη όπως η διάμετρος των ογκολίθων θωράκισης D_{n50} , το ελεύθερο ύψος θάλασσας F πάνω από τη στέψη του Υ. Κ. ή το πλάτος στέψης B έχουν μεγάλες ή μικρές τιμές, σε σύγκριση μαζί τους.

2.3.2 Περίοδος Εισερχόμενου Κύματος

Με τον όρο «περίοδος εισερχόμενου κύματος» (incident wave period) T_i συνήθως εννοούμε στην ανάλυσή μας την περίοδο του κύματος που αντιστοιχεί στην κορυφή του ενεργειακού φάσματος, T_p (peak spectral period), δηλαδή $T_p = T_{pi}$. Είναι γεγονός ότι μεγαλύτερες περιόδους, T_p , δίνουν μικρότερες (ηπιότερες) κλίσεις, S_p , για σταθερό ύψος κύματος.

Φαίνεται ότι η αναλογία ανάμεσα στην περίοδο που αντιστοιχεί στην κορυφή του φάσματος του εισερχόμενου κυματισμού και σε αυτή του μεταδιδόμενου είναι πάντοτε περίπου ίση με μονάδα. Αυτό σημαίνει ότι η συχνότητα κορυφής του φάσματος δεν αλλάζει όταν τα κύματα διαδίδονται πάνω από έναν Υ. Κ.

2.3.3. Ελεύθερο Ύψος Θάλασσας

Το ελεύθερο ύψος θάλασσας πάνω από τη στέψη (crest freeboard), F αποτελεί την κατακόρυφη απόσταση ανάμεσα στην ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας και τη στέψη του κυματοθραύστη. Θεωρείται η πιο σημαντική κρίσιμη παράμετρος για τον υπολογισμό του K_t , όπου ως σχετικό ελεύθερο ύψος (relative freeboard) ορίζεται ο λόγος του ελεύθερου ύψους προς το ύψος του εισερχόμενου κύματος, F/H_i .

2.3.4. Πλάτος στέψης

Προηγούμενες μελέτες αναδεικνύουν το ρόλο που παίζει το πλάτος στέψης (crest width) B στον υπολογισμό του K_t , ως εξής: ένα ευρύτερο (μεγαλύτερο) πλάτος στέψης B μειώνει την κυματική μετάδοση άρα και το K_t . Οι Van der Meer & Daemen (1994) διασαφηνίζουν ότι για τις αμιγώς ύφαλες κατασκευές, όσο αυξάνει το σχετικό πλάτος στέψης B/H_i , τα κύματα αναγκάζονται να θραυσθούν με συνέπεια περισσότερη ενέργεια να καταστρέφεται πάνω στη στέψη οδηγώντας σε χαμηλότερες τιμές του συντελεστή K_t .

2.3.5. Κλίση πρανών

Το προσήνεμο πρανές του κυματοθραύστη επηρεάζει τη μετάδοση του κύματος πάνω από αυτόν, εφόσον καθορίζει τον τύπο θραύσης του κύματος ανάλογα με την

κλίση του. Η κλίση του πρανούς m συμμετέχει στον υπολογισμό του αριθμού Iribaren ξ , ο οποίος με τη σειρά του επηρεάζει τον συντελεστή K_t (D'Angremond et al., 1996). Γενικά σε ηπιότερες κλίσεις πρανών παρατηρείται μεγαλύτερη απώλεια κυματικής ενέργειας λόγω θραύσης από ότι σε πιο απότομες. Το φαινόμενο αυτό γίνεται εντονότερο όσο πιο κοντά στην θαλάσσια επιφάνεια είναι η στέψη του έργου.

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

2.3.6. Τραχύτητα και Διαπερατότητα της κατασκευής

Οι έννοιες της τραχύτητας της επιφάνειας και της διαπερατότητας (surface roughness and permeability) είναι άμεσα συνδεδεμένες με την ονομαστική διάμετρο D_{n50} των ογκολίθων θωράκισης. Όσο μεγαλύτερη είναι η τελευταία, τόσο πιο τραχεία και διαπερατή είναι η κατασκευή με αποτέλεσμα στις περισσότερες περιπτώσει η απώλεια ενέργειας να είναι μεγαλύτερη. Στα έργα χαμηλής στέψης παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο, επιδρώντας ανταγωνιστικά στα φαινόμενα υπερπήδησης και αναρρίχησης. Στα ύφαλα έργα φαίνεται προσφάτως να επηρεάζουν εξίσου λόγω τριβής στον τραχύ πυθμένα και τυρβώδους διήθησης στην πορώδη στρώση θωράκισης.

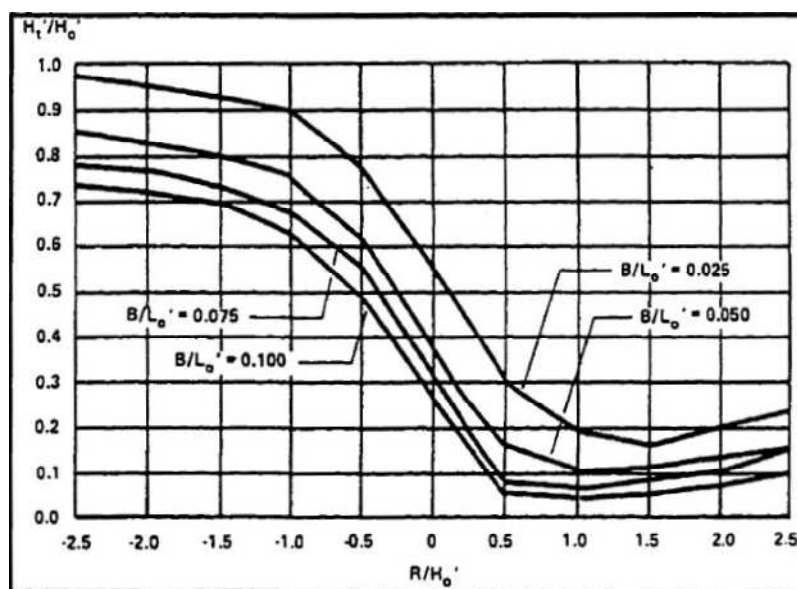
Η διαπερατότητα του πυρήνα της κατασκευής δεν είναι ακόμα απολύτως ξεκάθαρο πώς επηρεάζει τη μετάδοση του κύματος σε Υ.Κ. Ένας αδιαπέρατος πυρήνας παρεμποδίζει την επέλαση των κυμάτων και τα ωθεί σε θραύση λόγω ρήγωσης, μειώνοντας τον συντελεστή μετάδοσης K_t , ενώ ταυτόχρονα ένας διαπερατός πυρήνας επιτρέπει τη διέλευση των κυμάτων μέσω του πορώδους προκαλώντας την καταστροφή ενέργειας όμως λόγω μη στρωτών, τυρβωδών ροών οι οποίες αναπτύσσονται στο εσωτερικό του Υ. Κ. Το ζήτημα χρήζει περαιτέρω έρευνας με εργαστηριακά πειράματα και αριθμητικές προσομοιώσεις.

2.4 Εμπειρικές Σχέσεις Υπολογισμού του Συντελεστή Μετάδοσης K_t

2.4.1. Πρώτες απόπειρες

Όπως έχει προαναφερθεί, το πρόβλημα της μετάδοσης κυματικού πεδίου πίσω από Υ.Κ μπορεί να θεωρηθεί ως ειδική περίπτωση μιας γενικότερης· αυτής των έργων χαμηλής στέψης, των οποίων η στέψη βρίσκεται πάνω από τη στάθμη της θάλασσας, αλλά πολύ κοντά σε αυτή. Αρκετές πειραματικές ερευνητικές προσπάθειες έχουν γίνει στο παρελθόν, οι οποίες οδήγησαν σε αναλυτικές ημι-εμπειρικές σχέσεις για τον συντελεστή κυματικής μετάδοσης K_t , φασματικών κατά κύριο λόγο κυματισμών, κατόντι κατασκευών χαμηλής στέψης.

Ο Tanaka (1976) διεξήγαγε πειράματα με μονοχρωματικούς κυματισμούς που περιελάμβαναν και ύφαλες και έξαλες κατασκευές με μεγάλο εύρος τιμών για το πλάτος στέψης. Ήταν ο πρώτος που θέσπισε καμπύλες σχεδιασμού για τον συντελεστή κυματικής μετάδοσης K_t ως εξαρτώμενο από την σχετική βύθιση F/H_i και το σχετικό πλάτος στέψης B/L . Οι καμπύλες λόγω της σχετικής βύθισης F/H_i είναι τύπου σχήματος ανεστραμμένου S, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3: Καμπύλες Tanaka

Η πρώτη σχετικά σύγχρονη ενδεδειγμένη μελέτη του φαινομένου έγινε από τον Seelig (1980), ο οποίος έκανε μετρήσεις της κυματικής μετάδοσης για ένα μεγάλο αριθμό από κατασκευαστικές διατομές κυματοθραυστών χαμηλής στέψης, κυρίως με

συνήθη περιοδικά κύματα, αλλά και με φασματικά. Ο Seelig πρότεινε την ακόλουθη αναλυτική σχέση για τον εμπειρικό συντελεστή κυματικής μετάδοσης K_t , ο οποίος προτείνεται και από το Shore Protection Manual (SPM, 1984):

$$K_t = \left(0.51 - 0.11 \frac{B}{h} \right) \left(1 + \frac{F}{R} \right) \quad (2.2)$$

όπου το R είναι η κυματική αναρρίχηση στο προσήνεμο πρηνές του κυματοθραύστη στην αντίστοιχη περίπτωση απουσίας όμως κατάντι κυματικής μετάδοσης. Τύπος για τον υπολογισμό του R παρέχεται από το Shore Protection Manual (SPM, 1984).

Άλλες αντίστοιχες προσπάθειες έγιναν από τον Allsop (1983) και τους Powell & Allsop (1985) για κατασκευές χαμηλής στέψης, αποτυπώνοντας τη γενικότερη υδραυλική συμπεριφορά τους, για πολύ μικρά ποσοστά αστοχίας. Στη συνέχεια οι Daemrich & Kahle (1985) έθεσαν υπό έρευνα τρεις τύπους κατασκευών, που συμπεριελάμβαναν μόνο ύφαλους και ίσαλους κυματοθραύστες και ο Ahrens (1987) σε δυναμικά ευσταθείς Υ. Κ. όπως περιγράφεται παρακάτω.

Όλα τα παραπάνω συνοψίστηκαν από τον Van der Meer (1990), ο οποίος τελικά σε συνεργασία με άλλους επιστήμονες έδωσε μία σειρά τύπων την επόμενη δεκαετία, βασισμένος στην προκαταρκτική έρευνα των προαναφερθέντων συγγραφέων και την διεξοδική ανάλυση νέων πειραμάτων, πολλά από τα οποία στα πλαίσια του χρηματοδοτούμενου από την Ευρωπαϊκή Ένωση προγράμματος DELOS (ENVIRONMENTAL DESIGN OF LOW CRESTED COASTAL DEFENCE STRUCTURES) και οι οποίοι παρουσιάζονται εκτενώς στα επόμενα.

2.4.2. Ahrens (1987)

Ο πρώτος που δίνει αξιόπιστο αναλυτικό τύπο για τον συντελεστή κυματικής μετάδοσης K_t σε Υ. Κ. είναι ο Ahrens (1987), ο οποίος εξέτασε την ευστάθεια και την μετάδοση κυματισμού σε τεχνητούς υφάλους με δυναμική ευστάθεια, δηλαδή μεταβαλλόμενη γεωμετρία (σχήμα, μορφή, ύψος στέψης κ.τ.λ.). Συνεπώς το ύψος της κατασκευής, όπως αυτό εισάγεται στην παρακάτω έκφραση πρέπει να ληφθεί ίσο με το τελικό ύψος αυτής μετά την υποτιθέμενη αστοχία. Η όλη ανάλυση των

πειραματικών διατάξεων και του προτεινόμενου τύπου περιλαμβάνεται και στη δημοσίευση της Hearn (1987) και δίνει την εξής έκφραση.

$$K_t = \frac{1.0}{1.0 + \left(\frac{h'}{h}\right)^{1.188} \times \left(\frac{A}{hL}\right)^{0.261} \times \exp\left[0.529\left(\frac{F}{H_i}\right) + 0.00551\left(\frac{A^{3/2}}{D_{n50}^2 L}\right)\right]} \quad (2.3)$$

όπου A είναι η επιφάνεια της διατομής του κυματοθραύστη σε m² και F/H_i < 1.

Η παραπάνω εξίσωση δεν έχει άλλους περιορισμούς στην εφαρμογή της, όμως μπορεί να μην αντιστοιχεί στην πραγματική επίδραση που έχει το σχετικό πλάτος στέψης B/L στον συντελεστή κυματικής μετάδοσης K_t.

2.4.3. Van der Meer (1990)

Ο Van der Meer (1990) μετά από επανεξέταση όλων των παραπάνω προσπαθειών κατέληξε σε μία απλή έκφραση πρόβλεψης του K_t, όπου αυτός εξαρτάται γραμμικά και μόνο από το σχετικό ελεύθερο ύψος F/H_i.

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

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

$$K_t = 0.1, \text{ για } -2.0 < F/H_i < 1.13$$

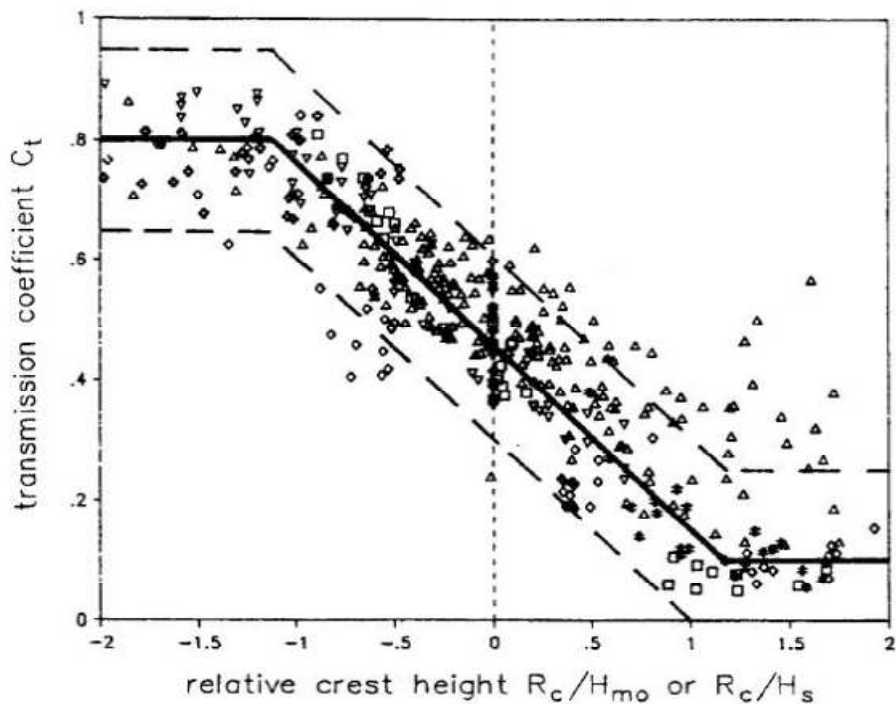
όπου F > 0 για Υ.Κ

Η παραπάνω έκφραση δε λαμβάνει υπόψη την επίδραση του πλάτους στέψης της κατασκευής και άλλων δευτερευουσών παραμέτρων όπως η κλίση του ανάντη πρανούς, το τοπικό μήκος κύματος και η ενεργειακή απώλεια λόγω τριβής στον πυθμένα (επιφάνεια έργου). Η καμπύλη που περιγράφει τις παραπάνω εξισώσεις (2.4) φαίνεται στο Σχήμα 2.4.

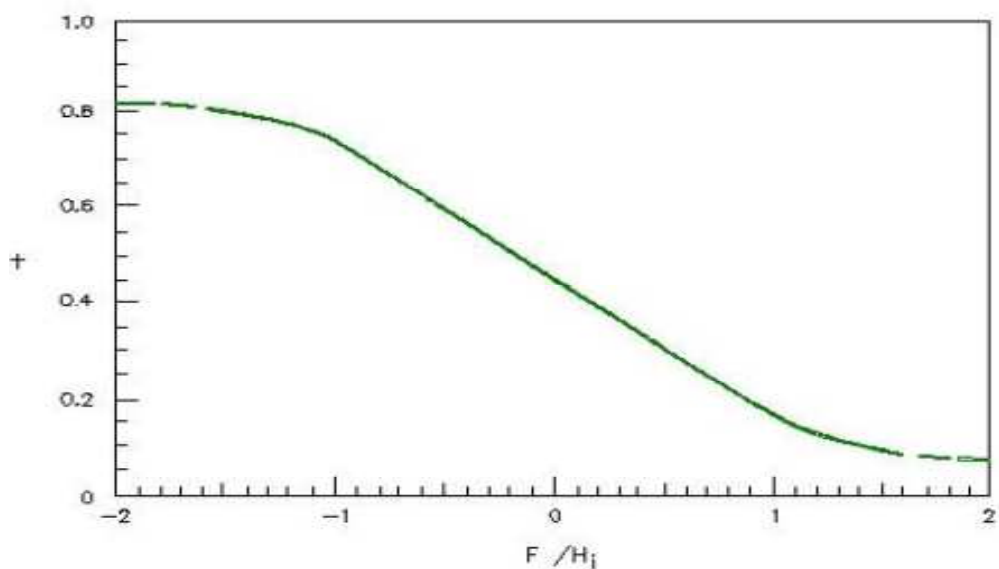
2.4.4. Van der Meer & D'Angremond (1991) – CEM (2004)

Στην πιο πρόσφατη έκδοση του Coastal Engineering Manual (CEM, 2004) της εξέλιξης δηλαδή του κλασσικού Shore Protection Manual (SPM, 1984) υιοθετείται η προηγούμενη έκφραση ελαφρώς διορθωμένη από τους Van der Meer &

D'Angremond (1991) για προκαταρκτικό υπολογισμό του συντελεστή κυματικής μετάδοσης K_t . Τα αποτελέσματα παρέχονται από ειδικό γράφημα όπως αυτό φαίνεται διάδοσης στα σχήματα 2.4-2.5.



Σχήμα 2.4: Καμπύλη Van der Meer



Σχήμα 2.5: Καμπύλη υπολογισμού K_t από F/H_1 για LCS (Πηγή: CEM, 2004)

2.4.5. Van der Meer & Daemen (1994)

Ο Daemen (1991) έκανε παρόμοιες προσπάθειες να συνδέσει την κλίση του κύματος και κάποιους αδιάστατους όρους, όπως το ελεύθερο ύψος, το πλάτος στέψης και το ύψος του επερχόμενου κύματος ανηγμένα ως προς την ονομαστική διάμετρο ογκολίθου θωράκισης D_{n50} με τον συντελεστή K_t . Σκοπός ήταν να λάβει υπόψη του την επίδραση του πορώδους των στρώσεων θωράκισης του έργου στον K_t . Τα όρια για το σχετικό ελεύθερο ύψος αδιαστατοποιημένο ως προς την ονομαστική διάμετρο ογκολίθου θωράκισης D_{n50} είναι $2 > F/D_{n50} > 2$ και η τελική μορφή της εξίσωσης, ώστε τα υψηλότερα κύματα να επηρεάζονται περισσότερο από το έργο, είναι

$$K_t = -a \frac{F}{D_{n50}} + b \quad (2.5)$$

Όπου γενικά, $a = 0.031 \frac{F}{D_{n50}} - 0.024$

$b = -5.4 S_{op} + 0.0323 \frac{H_i}{D_{n50}} - 0.017 \left(\frac{B}{D_{n50}} \right)^{1.84} + 0.51$, για παραδοσιακούς λόγους

$b = -2.6 S_{op} - 0.05 \left(\frac{H_i}{D_{n50}} \right) + 0.85$, για ύφαλους κυματοθραύστες

όπου $F > 0$ για Υ. Κ.

(Σημ. Ο όρος ύφαλος κυματοθραύστης μόνο για εδώ σημαίνει μια ρηγή κατασκευή από μία μοναδική στρώση υλικού θωράκισης)

Ο συντελεστής μπορεί να πάρει τις εξής περιορισμένες τιμές: $0.075 \leq K_t \leq 0.75$ για παραδοσιακούς κυματοθραύστες και $0.15 \leq K_t \leq 0.6$ για $F/D_{n50} > 2$ γραμμικά αυξανόμενο στο $K_t = 0.8$ για $F/D_{n50} = 6$. Η εν λόγω δε εξίσωση έχει ισχύ για το ακόλουθο εύρος παραμετρικών τιμών: $1 < H_i / D_{n50} < 6$ και $0.01 < S_{op} < 0.05$ όπου το S_{op} αναφέρεται στα ανοιχτά (offshore συνθήκες). Τιμές, $H_i / D_{n50} > 6$ θα προκαλούσαν αστάθεια της κατασκευής και $S_{op} > 0.05$ θα είχαν ως αποτέλεσμα τη θραύση των κυματισμών λόγω μεγάλης κλίσης. Η φόρμουλα έχει εφαρμογή και εκτός ορίων με εμφανή όμως μείωση της αξιοπιστίας της και εφόσον άλλες εκφράσεις ανταποκρίνονται στα όρια εφαρμογής, είναι σωστότερο να προτιμώνται.

2.4.6. D'Angremond, Van der Meer & De Jong (1996)

Οι D'Angremond et al.(1996) πρότειναν μετά από ανάλυση ομοίων πειραματικών δεδομένων και παρατηρήσεων, για κατασκευές από λιθορριπή αλλά και από τεχνητή μονάδα θωράκισης 'Tetrapods', μία άλλη έκφραση για τον συντελεστή K_t η οποία παίρνει υπόψη την επιρροή του πλάτους στέψης B και της παραμέτρου ομοιότητας θραύσης ξ (αριθμός Iribaren) και αφορά τόσο ύφαλους όσο και έξαλους κυματοθραύστες με όρια εφαρμογής για το αδιάστατο ελεύθερο ύψος F/H_i , $2.5 > F/H_i > -2.5$. Η εξίσωση έχει τη μορφή:

$$K_t = 0.4 \frac{F}{H_i} + A_{str} \left(\frac{B}{H_i} \right)^{-0.31} (1 - e^{-0.5\xi}) \quad (2.6)$$

για $0.075 \leq K_t \leq 0.8$, όπου

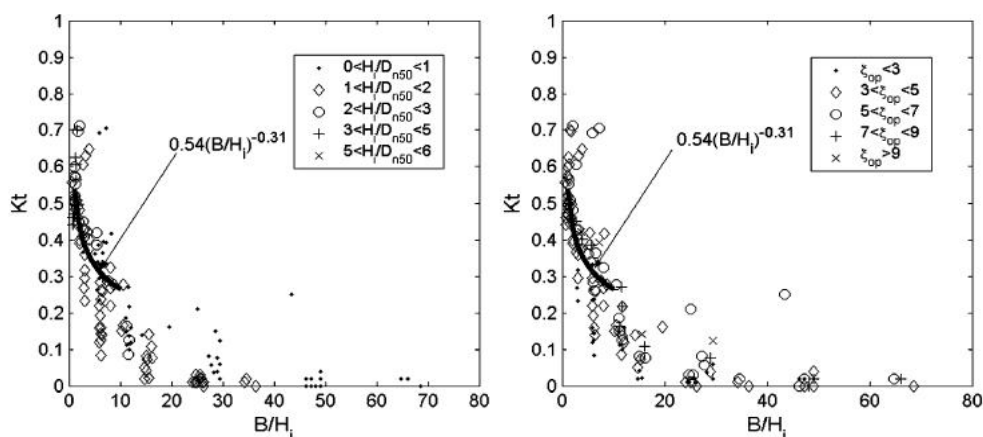
$A_{str} = 0.64$, για διαπερατές κατασκευές από λιθορριπή (φυσικών ή τεχνητών ογκολίθων)

$A_{str} = 0.8$, για λείες αδιαπέρατες κατασκευές (π.χ. θωράκιση γεμισμένη με ασφαλτικά ή μπλόκια από σκυρόδεμα)

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

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

Στην πορεία αποδείχθηκε ότι η άνωθι έκφραση περιορίζεται στις περιπτώσεις για τις οποίες ισχύει $B/H_i < 10$, σχετικά στενό πλάτος στέψης δηλαδή, καθώς πρέπει να σημειωθεί ότι το λάθος στην πρόβλεψη του K_t αυξάνει με το σχετικό πλάτος στέψης B/H_i , όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6: Επιρροή συντελεστή K_t ως προς B/H_i (Πηγή Van der Meer et al., 2005)

2.4.7. Briganti, Van der Meer, Buccino & Calabrese (2003)

Η προηγούμενη έκφραση επεκτάθηκε από τους Briganti et al. (2003), χρησιμοποιώντας την εκτενή βάση δεδομένων του προγράμματος DELOS με δισδιάστατους (2D) σύνθετους κυματισμούς. Χρησιμοποιήθηκε η ίδια σειρά παραμέτρων όπως και στις προηγούμενες εκφράσεις. Η ανάλυση ανέδειξε την ανάγκη μιας συμπληρωματικής έκφρασης που θα επιτρέπει τον υπολογισμό του K_t σε ευρείας στέψης κυματοθραύστες. Η απαίτηση καλύφθηκε από μια νέα αναθεωρημένη εξίσωση για $B/H_i > 10$, η οποία έχει ως εξής:

$$K_t = 0.35 \frac{F}{H_i} + 0.51 \left(\frac{B}{H_i} \right)^{-0.65} (1 - e^{-0.41\xi}) \quad (2.7)$$

με όρια εφαρμογής $K_{t1}=0.05 \leq K_t \leq K_{t2}=0.93-0.006B/H_i$

2.4.8. Van der Meer, Briganti, Zannutigh & Wang (2005)

Το ζήτημα της διάδοσης των κυμάτων τα οποία προσεγγίζουν έναν Υ. Κ. υπό γωνία καθώς και το ζήτημα της αδιαπερατότητας της κατασκευής απασχόλησαν τους Van der Meer et al. (2005) οι οποίοι κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι για διαπερατές κατασκευές από λιθορριπή ο συντελεστής K_t δεν επηρεάζεται από την γωνία πρόσπτωσης του κύματος στο έργο, ενώ για λείες αδιαπέρατες κατασκευές με επικάλυψη της θωράκισης π.χ. από ασφαλτικά ο συντελεστής K_t επηρεάζεται που προκύπτει από πειράματα για λείες κατασκευές μεταλλάσσεται κατά έναν όρο $\cos^{2/3}\beta$, όπου β η γωνία που σχηματίζει η ακτίνα/ορθογωνική του κύματος με τον εγκάρσιο άξονα του έργου.

Επιπρόσθετα πρέπει να σημειωθεί ότι η μετάδοση σε αδιαπέρατες κατασκευές είναι πολύ διαφορετική υπόθεση από ότι για διαπερατές. Κατά πρώτον είναι υψηλότερη για το ίδιο ύψος στέψης, αλλά και μόνο επειδή δεν παρατηρείται ενεργειακή απώλεια λόγω τριβής στην επιφάνεια του κυματοθραύστη και λόγω πορώδους. Επιπρόσθετα το πλάτος στέψης του Υ. Κ. έχει ελάχιστη ως μηδαμινή επιρροή στη μετάδοση του κύματος, πράγμα αντίθετο από ότι ισχύει για τους διαπερατούς Υ. Κ. Μόνο για πολύ φαρδιές (μεγάλο B) κατασκευές μπορεί να εντοπιστεί αξιοσημείωτη επίδραση του πλάτους στέψης στον συντελεστή K_t , όμως αυτή η περίπτωση δε συναντάται συχνά ως σχεδιαστική λύση στην πράξη, καθώς

τέτοια έργα από σκυρόδεμα ή ασφαλτικά κυρίως κατασκευάζονται εν ξηρώ και όχι υποθαλασσίως.

Σύμφωνα με τα παραπάνω και επεκτείνοντας τη δουλειά των D'Angremond et al. (1996) και Briganti et al. (2003) κατέληξαν στις επόμενες εκφράσεις για λείες αδιαπέρατες κατασκευές:

$$K_t = 0.3 \frac{F}{H_i} + 0.75 (1 - e^{-0.5\xi}), \text{ για } \xi_{op} < 3 \quad (2.8)$$

$$K_t = 0.3 \frac{F}{H_i} + 0.75 (1 - e^{-0.5\xi}) \left(\frac{B}{H_i}\right)^{-0.31}, \text{ για } \xi_{op} \geq 3 \quad (2.9)$$

με όρια εφαρμογής $0.075 \leq K_t \leq 0.8$, ενώ για λοξή πρόσπτωση κυματισμού σε λείες αδιαπέρατες Υ. Κ. έδωσαν:

$$K_t = \left[0.3 \frac{F}{H_i} + 0.75 (1 - e^{-0.5\xi}) \right] (\cos\beta)^{\frac{2}{3}} \quad (2.10)$$

με όρια εφαρμογής $0.075 \leq K_t \leq 0.8$ και $1 < \xi_{op} < 3$, $0^\circ \leq \beta \leq 70^\circ$, $1 < B/H_i < 4$.

2.4.9. Seabrook & Hall (1998)

Σε διαφορετική παραμετρική προσέγγιση, μία πολύ σοβαρή προσπάθεια για ενδελεχή έρευνα του φαινομένου της μετάδοσης κυματισμού μόνο σε ύφαλους κυματοθραύστες (στατικά ευσταθείς) έγινε από τον Seabrook (1997), ο οποίος εκτέλεσε μια εκτεταμένη σειρά διεξοδικών πειραμάτων σε φυσικό μοντέλο στο Queen's University of Kingston, στον Καναδά. Οι Seabrook & Hall (1998) χρησιμοποίησαν τα πορίσματα αυτής της προσπάθειας κατά την οποία διάφορες τιμές ελεύθερου ύψους, πλάτους στέψης, βάρους θάλασσας και χαρακτηριστικών επερχόμενων κυμάτων δοκιμάστηκαν και εισάγοντας νέες παραμέτρους, όπως την BF/LD_{n50} και την FH_i/BD_{n50} , πρότειναν την παρακάτω έκφραση

$$K_t = 1 - \exp\left(-0.65 \frac{F}{H_i} - 1.09 \frac{H_i}{B}\right) + 0.047 \frac{BF}{LD_{n50}} - 0.067 \frac{H_i F}{BD_{n50}} \quad (2.11)$$

με όρια ισχύος τα εξής: $0 \leq BF/LD_{n50} \leq 7.08$ και $0 \leq FH_i/BD_{n50} \leq 2.14$.

Σε αυτή τη μελέτη όπως και στις προηγούμενες το πορώδες της κατασκευής (στο κυρίως σώμα και τον πυρήνα) δεν λαμβάνεται ξεκάθαρα υπόψη, παρά

μόνο η επιρροή του όρου της ονομαστικής διαμέτρου D_{n50} των ογκολίθων της στρώσης θωράκισης. Παρόλο που το πορώδες μπορεί να έχει κάποια επίδραση στον υπολογισμό του συντελεστή K_t όταν το ελεύθερο ύψος F είναι μικρό, ο Seelig (1980) παρατηρεί ότι για ύφαλες κατασκευές (ειδικά όταν $h/h' \geq 1.2$) η μετάδοση διαμέσω του σώματος της κατασκευής είναι αμελητέα.

Η επίδραση της τριβής πάνω στο υλικό της κατασκευής εκφράζεται με τον νεοεισαχθέντα όρο τριβής FH_i/BD_{n50} , ενώ τα φαινόμενα διάσχυσης του νερού στις διαπερατές στρώσεις θωράκισης (δηλ. της εσωτερικής ροής σε πορώδες μέσο) εκφράζονται με τον όρο BF/LD_{n50} , παραλλαγή του όρου B^2/LD_{n50} από Seelig (1980). Τέλος αμελητέα θεωρείται και η επιρροή του h/H_i ο οποίος είναι ως ένα βαθμό δείκτης της μη γραμμικότητας του κυματικού πεδίου σε σχετικά ρηγά νερά.

2.4.10. Bleck & Oumeraci (2002)

Πιο πρόσφατα αρκετοί νέοι αναλυτικοί τύποι, όπως αυτός από τους Bleck & Oumeraci (2002), οι οποίοι ερεύνησαν την κυματική μετάδοση πάνω από ύφαλο αναβαθμό με ορθογωνική διατομή. Περιορίζοντας την εξάρτηση του συντελεστή K_t μόνο στην κρισιμότερη παράμετρο του σχετικού ελεύθερου ύψους F/H_i , κατέληξαν στην εξής πρόταση:

$$K_t = 1.0 - 0.83 \exp \left(-0.72 \frac{F}{H_i} \right) \quad (2.12)$$

2.4.11. Friebel & Harris (2003)

Οι Friebel & Harris (2003) ανέπτυξαν έναν βελτιστοποιημένο τύπο, βασισμένοι στην παρεχόμενη σειρά δεδομένων από προηγούμενες αναλύσεις των Seelig (1980), Daemrich & Kahle (1985), Van der Meer (1988), Daemen (1991) και Seabrook (1997). Η έρευνά τους επιβεβαίωσε το γεγονός ότι ο συντελεστής κυματικής μετάδοσης K_t είναι βασικά εξαρτώμενος από το αδιάστατο ελεύθερο ύψος F/H_i . Σε ένα μικρότερο βαθμό ο K_t εξαρτάται επίσης από το σχετικό πλάτος στέψης B/L ή B/h_i , από τη σχετική βύθιση της κατασκευής h'/h_i (ή τη σχετική ανύψωση της στάθμης στέψης από τη θαλάσσια επιφάνεια $1-F/h_i$), καθώς και το λόγο F/B . Η προτεινόμενη εξίσωση με τιμή $RSQ R^2=0.9402$ και τυπική απόκλιση $\sigma=0.0510$, είναι:

$$K_t = -0.4969 \exp\left(\frac{-F}{H_t}\right) - 0.0292 \frac{R}{h_t} - 0.4257 \frac{h'}{h_t} - 0.0696 \ln\left(\frac{B}{L}\right) - 0.1359 \frac{F}{B} + 1.0905 \quad (2.13)$$

Τα όρια εφαρμογής της σχέσης για τις διάφορες παραμέτρους είναι τα εξής:
 $0 \leq F/H_i \leq 8.696$, $0.286 \leq B/h_t \leq 8.75$,

$$0.44 \leq h'/h_t \leq 1, 0.0244 \leq B/L \leq 1.89,$$

$$0 \leq F/B \leq 1.05$$

2.4.12. Siladharma & Hall (2003)

Επεκτείνοντας την προσπάθεια του Seabrook (1997), ώστε να συμπεριληφθεί η επίδραση του φαινομένου της περίθλασης στον τύπο πρόβλεψης του συντελεστή K_t , οι Siladharma & Hall (2003) ανέπτυξαν μία νέα έκφραση κάνοντας χρήση μεθοδολογίας στατιστικής ανάλυσης και συγκεκριμένα μη γραμμικής απόκλισης εξαρτημένης στατιστικής μεταβλητής (non-linear regression analysis). Η μεθοδολογία εφαρμόστηκε σε πειραματικά αποτελέσματα κυματικής μετάδοσης σε τρισδιάστο (3D) φυσικό μοντέλο Υ. Κ. Η προτεινόμενη εξίσωση με τιμή RSQ $R^2=0.854$ και τυπική απόκλιση $\sigma=0.07$, είναι:

$$K_t = -0.869 \exp\left(\frac{-F}{H_i}\right) + 1.049 \exp\left(-0.003 \frac{B}{H_i}\right) - 0.026 \frac{FH_i}{BD_{n50}} - 0.005 \frac{B^2}{LD_{n50}} + 0.003 \frac{h'}{h_t} \frac{r}{L_p} \cos(\varphi - \varphi_o) \quad (2.14)$$

με καλύτερη απόδοση του 3-D τύπου για εύρος τιμών του συντελεστή K_t , $0.4 \leq K_t \leq 0.8$.

Σε περίπτωση που θέλουμε να συγκρίνουμε την απόδοση της σχέσης με άλλες βασισμένες σε δισδιάστατα (2-D) πειράματα η έκφραση παραμένει η ίδια αποκλείοντας απλά τον όρο περίθλασης και συνεπώς παίρνει την απλούστερη μορφή:

$$K_t = -0.869 \exp\left(\frac{-F}{H_i}\right) + 1.049 \exp\left(-0.003 \frac{B}{H_i}\right) - 0.026 \frac{FH_i}{BD_{n50}} - 0.005 \frac{B^2}{LD_{n50}} \quad (2.15)$$

Οι αδιάστατοι όροι που συμμετέχουν στην ανάλυση είναι παρόμοιοι με αυτούς των Seabrook & Hall (1998).

2.4.13. Calabrese, Vicinanza & Buccino (2003)

Οι Calabrese et al. (2003) εξέτασαν την αξιοπιστία κάποιων από τις παραπάνω αναλυτικές σχέσεις και κατέληξαν ότι ο τύπος των D'Angremond et al. (1996) δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα πρόβλεψης του συντελεστή K_t , ακόμα και για θραυόμενους κυματισμούς. Επιπρόσθετα, από τα στοιχεία τα οποία περισυνέλεξαν, συμπεράναν ότι τρεις διαστασεις του προβλήματος πρέπει να επισημανθούν ρητά:

- Ο ρυθμός μείωσης του συντελεστή K_t δε θα έπρεπε να είναι σταθερός όπως προβλέπει η εκφραση των D'Angremond et al. (1996).
- Σημαντικό ρόλο φαίνεται ότι διαδραματίζει η παράμετρος της θραύσης H_i/h ειδικά όταν η κατασκευή βρίσκεται σε σχετικά ρηγά νερά.
- Προέκυψε πιο κατάλληλο και αποτελεσματικό να καταστήσει κανείς το ελεύθερο ύψος F αδιάστατο ως προς το πλάτος στέψης B παρά ως προς το ύψος του επερχόμενου κύματος H_i .

Εντόπισαν δε ότι με τη χρήση της σχέσης των D'Angremond et al. (1996) προέκυπτε ακόμα μία διασπορά ανάμεσα στα πειραματικά στοιχεία και στις προβλεπόμενες τιμές. Πιθανές εξηγήσεις αυτής της ασυνέπειας είναι οι εξής:

- Ο δείκτης θραύσης H_i/h θα έπρεπε να επηρεάζει την κυματική μετάδοση στην παράκτια ζώνη και ειδικά όσο ρηχότερα είναι τοποθετημένος ο ύφαλος κυματοθραύστης, ενώ αυτό συνήθως παραμελείται στις τρέχουσες σχέσεις.
- Το πλάτος της στέψης θα έπρεπε να προκαλεί τη μείωση του συντελεστή K_t .

Αυτές οι παρατηρήσεις ποσοτικοποιήθηκαν και συμπεριλαμβάνονται στη νέα σχέση υπολογισμού του συντελεστή K_t :

$$K_t = \left(\left(0.6597 \frac{H_i}{h_t} - 0.7021 \right) \exp\left(0.2568 \frac{B}{h_t}\right) \right) \left(-\frac{F}{B} \right) + \left((1 - 0.562) \exp(-0.0507\xi) \right) \exp\left(-0.0845 \frac{B}{H_t}\right) \quad (2.16)$$

Τα όρια διαβάθμισης των παραμέτρων που συμμετέχουν στην παρούσα έκφραση είναι:

$$0.3 \leq F/B \leq -0.4$$

$$1.06 \leq B/H_i \leq 8.13$$

$$0.31 \leq H_i/h_t \leq 0.61$$

$$3 \leq \xi \leq 5.2$$

Συγκρίσεις με πειραματικά δεδομένα αποδεικνύουν ότι η παραπάνω σχέση παρουσιάζει μεγαλύτερη αξιοπιστία από τον τύπο των D'Angremond et al. (1996). Επιπρόσθετα πρέπει να καταδειχθεί ότι το ξ αναφέρεται στην ανάντι κλίση του πρανούς, ενώ ο πρώτος όρος $(0.6597H_i/h_t - 0.7021)$ πρέπει να είναι συνάρτηση της κατάντι του έργου κλίσης της παράκτιας ζώνης.

2.4.14. Daemrich, Mai & Ohle (2002)

Τέλος οι Daemrich et al. (2002), προσπαθώντας να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα των περιορισμένων ορίων τιμών για τον συντελεστή K_t , επέκτειναν την έρευνα και σε πιο βαθιά νερά, στα οποία αντιστοιχούν μεγάλες τιμές σχετικού ελεύθερου ύψους F/H_i και συνεπώς μεγάλες τιμές K_t .

Συγκεκριμένα για $K_t \geq 0.8$ καθόρισαν την παρακάτω σχέση:

$$K_t = \tanh\left(\frac{2\pi F}{L_{op}}\right)^{0.262}, \text{ για } K_t \geq 0.8 \quad (2.17)$$

Για $K_t < 0.8$ ισχύουν οι τύποι των D'Angremond et al. (1996) κατά τα γνωστά.

3 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΟΜΟΙΩΜΑΤΑ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ ΤΥΠΟΥ BOUSSINESQ

3.1 Εισαγωγή στα ομοιώματα τύπου Boussinesq

Η προσομοίωση της διάδοσης των κυματισμών και η ακριβής περιγραφή των μετασχηματισμών που υφίστανται στις παράκτιες περιοχές είναι απαραίτητη σε σχέση με τον σχεδιασμό των θαλάσσιων κατασκευών καθώς και με την πρόβλεψη της εξέλιξης του προφίλ της ακτογραμμής και του πυθμένα.

Τα τελευταία χρόνια έχει παρουσιαστεί ένας μεγάλος αριθμός ομοιωμάτων διάδοσης κυματισμών που βασίζονται στην επίλυση των διαφορικών εξισώσεων τύπου Boussinesq. Οι εξισώσεις Boussinesq προκύπτουν από την ολοκλήρωση των εξισώσεων Euler (ορμής) στο βάθος ροής με την παραδοχή σχετικά μακρών κυματισμών. Οι εξαρτημένες μεταβλητές που υπεισέρχονται στις εξισώσεις αυτές είναι η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας και η οριζόντια ταχύτητα του ρευστού, υπό μορφή μερικών παραγώγων διαφόρων τάξεων. Με τη χρήση των παραπάνω ομοιωμάτων είναι δυνατή η προσομοίωση της διάδοσης μη γραμμικών κυματισμών διασποράς στα ρηχά νερά και η περιγραφή των κυματικών φαινομένων της παράκτιας ζώνης όπως της ρήχωσης, της διάθλασης, της ανάκλασης, της περίθλασης, καθώς επίσης της θραύσης και της αναρρίχησης στην ακτή.

Η ανάλυση των κυματισμών διασποράς χαρακτηρίζεται από δύο σημαντικές παραμέτρους κλίμακας. Η πρώτη είναι η παράμετρος ε που εκφράζει τη διασπορά εύρους (amplitude dispersion) και κατ' επέκταση τη μη γραμμικότητα (non-linearity) και ορίζεται σαν ο λόγος του ύψους κύματος προς το βάθος $\varepsilon=H/d$, ενώ η δεύτερη είναι το τετράγωνο του λόγου του βάθους προς ένα χαρακτηριστικό οριζόντιο μήκος (λαμβάνεται συνήθως ίσο με το μήκος κύματος) $\sigma^2=(d/L)^2$ και εκφράζει τη διασπορά συχνοτήτων (frequency dispersion) (Karambas 1999). Λόγω της μαθηματικής τους διατύπωσης οι πρωταρχικές μορφές των εξισώσεων Boussinesq αναφέρονται σε κυματισμούς ελαφρά μη γραμμικούς (weakly nonlinear) και με ελαφρά διασπορά συχνοτήτων (weak dispersion).

Πρέπει να τονιστεί ότι η μορφή των εξισώσεων Boussinesq δεν είναι συγκεκριμένη, αντιθέτως στη σχετική βιβλιογραφία απαντώνται διαφορετικές εκδοχές των εξισώσεων, οι οποίες συνιστούν το αποτέλεσμα μιας μακρόχρονης εξελικτικής διαδικασίας. Οι διαφορές μεταξύ τους σχετίζονται κυρίως με τη διαφορετική επιλογή – θεώρηση της οριζόντιας ταχύτητας και τους διαφορετικούς όρους ανώτερης τάξης που διατηρούνται κατά την κατάστροση των εξισώσεων. Διακρίνουμε τις παρακάτω περιπτώσεις ως προς την επιλογή της οριζόντιας ταχύτητας:

- Μέση στο βάθος ταχύτητα
- Ταχύτητα στη στάθμη ηρεμίας ύδατος
- Ταχύτητα σε τυχαίο βάθος
- Ταχύτητα στον πυθμένα

3.2 Εισαγωγή της θραύσης στα μοντέλα Boussinesq

Η συνέπεια της εφαρμογής των ομοιωμάτων Boussinesq στη ζώνη θραύσης είναι προβληματική. Στην περιοχή αυτή η μη γραμμικότητα γίνεται σημαντική ($\varepsilon \rightarrow O(1)$) ενώ οι όροι διασποράς τείνουν να απαλειφθούν ($\sigma^2 \rightarrow 0$). Συνεπώς σε αυτό το όριο το ομοίωμα Boussinesq προσεγγίζει τις συνήθεις μη γραμμικές εξισώσεις των κυματισμών στα ρηχά νερά. Οι εξισώσεις αυτές περιγράφουν την ανέλιξη και τη θραύση οποιασδήποτε αρχικής μορφής κύματος και για το λόγο αυτό δεν επιτρέπουν τη μοντελοποίηση σε αρκετά σημαντική απόσταση μη θραυόμενων κυματισμών. Με τις εξισώσεις των ρηχών νερών είναι δυνατόν να προσομοιωθεί με επιτυχία η σκέδαση των κυμάτων στη ζώνη θραύσης και η αναρρίχηση τους στην ακτή. Η αριθμητική επίλυση βασίζεται συνήθως στο σχήμα Lax-Wendroff, το οποίο διατηρεί τις συντηρητικές ιδιότητες της μάζας και της ορμής αλλά επιτρέπει τη σκέδαση της ενέργειας. Η αντιμετώπιση αυτή δίνει προβλέψεις που βρίσκονται σε ικανοποιητική συμφωνία με μετρήσεις και αφορούν το ύψος των θραυόμενων κυμάτων, τις ταχύτητες του ρευστού, τη λοξότητα και τα χαρακτηριστικά ασυμμετρίας των κυμάτων.

Η θραύση των κυματισμών συμπεριλήφθηκε αρχικά στις εξισώσεις τύπου Boussinesq από τον Tao (1983) και τους Abbott et al. (1983), οι οποίοι εισήγαγαν έναν όρο τυρβώδους συνεκτικότητας στην ολοκληρωμένη στο βάθος εξίσωση ορμής

(Hamm et al. 1993). Ο όρος αυτός εκφράστηκε σαν γινόμενο των οριζόντιων βαθμίδων της θεωρούμενης ροϊκής μεταβλητής και ενός τοπικού συντελεστή τυρβώδους συνεκτικότητας, σχετιζόμενου με το βάθος του νερού και την τυρβώδη κινητική ενέργεια. Μια εξίσωση μεταφοράς εφαρμόστηκε για την περιγραφή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας. Ο Zelt (1991) χρησιμοποίησε επίσης έναν όρο τυρβώδους συνεκτικότητας για να περιγράψει με ικανοποιητική ακρίβεια τη διάδοση μοναχικών θραυόμενων κυμάτων και την αναρρίχηση τους στην ακτή. Στην εργασία του Zelt ο τοπικός συντελεστής τυρβώδους συνεκτικότητας υπολογιζόταν συναρτήσει ενός μήκους ανάμιξης. Οι Karambas et al. (1990,1991) ακολούθησαν την ίδια τεχνική, όμως ο τοπικός συντελεστής τυρβώδους συνεκτικότητας, προσδιορίστηκε χρησιμοποιώντας ένα απλό αλγεβρικό κλείσιμο που ήταν ανάλογο με το γινόμενο της γραμμικής ταχύτητας φάσης στα ρηχά νερά και το βάθος νερού. Οι Karambas & Koutitas (1992) υιοθέτησαν μία πιο περίπλοκη μεθοδολογία στην οποία η τυρβώδης συνεκτικότητα προσδιορίστηκε υποθέτοντας ότι η τύρβη παράγεται στο μέτωπο του θραυόμενου κύματος και στα απόνερα του προηγούμενου κύματος. Η θέση του σημείου θραύσης και το πλάτος της ζώνης θραύσης προσδιορίστηκαν βάσει εμπειρικών σχέσεων.

Οι Schäffer et al. (1993) σημείωσαν ότι το κύριο μειονέκτημα των παραπάνω μεθόδων είναι η υποτιθέμενη σχέση μεταξύ της σκέδασης της ενέργειας και των οριζοντίων βαθμίδων της οριζόντιας ροϊκής μεταβλητής. Η σκέδαση την ενέργειας εξαρτάται γενικά από τις κατακόρυφες βαθμίδες του οριζόντιου προφίλ της ταχύτητας (Madsen 1981) και γι' αυτό οι μέθοδοι διαφοροποιούνται οριακά μόνο στη χρησιμοποίηση της διεπιφάνειας σκέδασης.

Ο Engelund (1981) περιέγραψε ένα ελαφρύ υδραυλικό άλμα θεωρώντας ένα επιπλέον όρο πίεσης στην ολοκληρωμένη στο βάθος εξίσωση ορμής που προέρχονταν από την παρουσία ενός επιφανειακού υδάτινου κυλίνδρου (surface roller). Χρησιμοποιώντας την αναλογία μιας ξεχωριστής ροής διαχυτήρων η κλίση της διεπιφάνειας ανάμεσα στον κύλινδρο και την επικείμενη οργανωμένη ροή εκτιμήθηκε περίπου ίση με 10° . Ο Deigaard (1989) ακολούθησε τις ιδέες του Engelund και εισήγαγε τη θεώρηση του επιφανειακού κυλίνδρου σε ένα ομοίωμα Boussinesq που βασιζόταν αρχικά στις εξισώσεις των Abbott et al. (1978). Έγινε η υπόθεση ότι ο επιφανειακός κύλινδρος είναι μία μάζα νερού που ταξιδεύει με την ταχύτητα του κύματος. Η θραύση του κύματος ξεκινούσε όταν η τοπική κλίση του μετώπου του

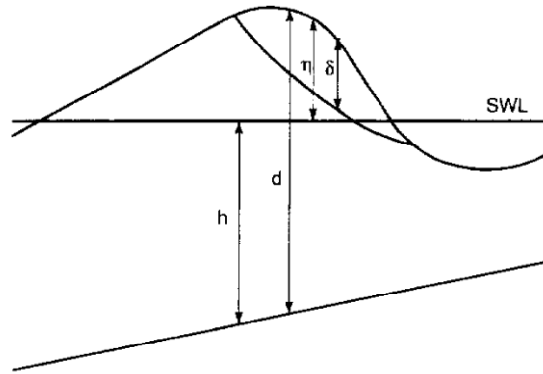
κύματος ξεπερνούσε την οριακή τιμή που προσδιόρισε ο Engelund. Παρόμοια η θραύση σταματούσε όταν η μέγιστη κλίση του μετώπου του κύματος έπαιρνε τιμή μικρότερη της εφαπτομένης των 10°. Προκαταρκτικά παραδείγματα μη γραμμικών κυμάτων θραυόμενων πάνω από έναν πυθμένα με γραμμικές υβώσεις κατέδειξαν τις δυνατότητες του ομοιώματος.

Οι Brocchini et al. (1991,1992) ποσοτικοποίησαν τη διατμητική τάση στη διεπιφάνεια του επιφανειακού κυλίνδρου και της υποκείμενης ροής κάνοντας την υπόθεση ότι πίεση μέσα στον κύλινδρο είναι υδροστατική. Αυτό συμπεριλήφθηκε στις εξισώσεις τύπου Boussinesq και συνδυάστηκε με μία εμπειρική σχέση για τον εντοπισμό και την ανάπτυξη του επιφανειακού κυλίνδρου. Δόθηκαν παραδείγματα που έδειξαν ικανοποιητική συμφωνία με πειραματικά δεδομένα.

Οι Madsen & Svendsen (1983) και οι Svendsen & Madsen (1984), διαδοχικά, ανέπτυξαν ένα θεωρητικό μοντέλο για την περιγραφή του μετώπου ενός τυρβώδους κατακόρυφου μετώπου που κινείται πάνω σε οριζόντιο ή κεκλιμένο πυθμένα. Σε αυτή την προσέγγιση, μια πλήρως τυρβώδης διατμητική ροή θεωρήθηκε στο ανώτερο στρώμα της στήλης του νερού, ενώ μια πρακτικά αστρόβιλη ροή θεωρήθηκε στο κατώτερο στρώμα. Εκτός από μια εξίσωση ορμής ολοκληρωμένη μόνο στην τυρβώδη περιοχή και οι ολοκληρωμένες στο βάθος εξισώσεις συνέχειας, ορμής και ενέργειας επιλύονταν ταυτόχρονα. Χωρίς την τύρβη το σύστημα των εξισώσεων μετασχηματίζεται στις μη γραμμικές εξισώσεις των κυματισμών στα ρηχά νερά. Ένα σημαντικό συμπέρασμα που βγήκε απ' αυτές τις μελέτες είναι το γεγονός ότι το απλοποιημένο φαινόμενο της θραύσης μπορεί να συμπεριληφθεί στις εξισώσεις ορμής με την υπόθεση της αναδιανομής της οριζόντιας ταχύτητας πάνω στην κατακόρυφη ταχύτητα. Αυτό οδηγεί σε πρόσθετους όρους συναγωγής στις ολοκληρωμένες στο βάθος εξισώσεις ορμής.

Οι ιδέες που περιγράφηκαν προηγουμένων ακολουθήθηκαν από τους Schäffer et al.(1993), που συμπεριέλαβαν το φαινόμενο της υπερχειλίζουσας θραύσης κύματος σε ένα σετ εξισώσεων τύπου Boussinesq όμοιες με αυτές του Peregrine. Οι υπολογισμοί έγιναν σε μία οριζόντια διάσταση χρησιμοποιώντας τη θεώρηση του επιφανειακού κυλίνδρου (Σχήμα 3.1). Βασιζόμενοι στην υπόθεση μιας ομοιόμορφης κατακόρυφης κατανομής της οριζόντιας ταχύτητας σε ένα μη θραυόμενο κύμα, ένας πρόσθετος συναγωγικός όρος ορμής που οφείλεται στη θραύση συμπεριλήφθηκε

στην ολοκληρωμένη στο βάθος εξίσωση ορμής θεωρώντας το ανομοιόμορφο προφίλ ταχύτητας που πρότεινε ο Svendsen (1984).



Σχήμα 3.1: Προσομοίωση θραύσης με την τεχνική του επιφανειακού κυλίνδρου (Surface roller, Madsen et al. 1997a).

Σε συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα του Stive (1980) η ταχύτητα του επιφανειακού κυλίνδρου μοντελοποιήθηκε ως 1.3 φορές η ταχύτητα του γραμμικού κύματος στα ρηγά νερά. Η θραύση του κύματος ξεκινούσε όταν η μέγιστη κλίση του μετώπου του κύματος ξεπερνούσε μία αποδιδόμενη αρχική τιμή. Παρόμοια, η θραύση τερματιζόταν, όταν η μέγιστη κλίση έπαιρνε μία μικρότερη τελική τιμή. Η χρονική εξέλιξη του πάχους του επιφανειακού κυλίνδρου προσδιοριζόταν γεωμετρικά περιγράφοντας μία διαφοροποίηση στο χρόνο της κλίσης της διεπιφάνειας ανάμεσα στον κύλινδρο και την υποκείμενη οργανωμένη κίνηση του κύματος. Εκτός από τις παραμέτρους που περιγράφουν την έναρξη και τη λήξη της θραύσης, το ομοίωμα ενσωματώνει μια χρονική κλίμακα για την ανάπτυξη του επιφανειακού κυλίνδρου όπως επίσης και μια παράμετρο σχήματος που αναφέρεται στον πρωτόλειο τρόπο διαχωρισμού του κυλίνδρου από την υποκείμενη ροή. Σε σύγκριση με πειραματικά δεδομένα καταδείχθηκε ότι το ομοίωμα προβλέπει ικανοποιητικά τη διαφοροποίηση της μέσης στάθμης ύδατος και του ύψους κύματος πριν, κατά τη διάρκεια και μετά την έναρξη της θραύσης. Ιδιαίτερα δόθηκε έμφαση στο ότι το ομοίωμα αποδείχθηκε ικανό να εκτιμήσει την αρχή της εσωτερικής περιοχής, δηλαδή του σημείου όπου η μέση στάθμη ύδατος αρχίζει να αυξάνει. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι το ομοίωμα αναπαράγει το φαινόμενο της ραγδαίας μετατροπής της δυναμικής ενέργειας σε κινητική στην εξωτερική μεταβατική περιοχή. Οι Schäffer et al. (1992) επέκτειναν το ομοίωμα της ζώνης θραύσης ώστε να

περιλαμβάνει τη δεύτερη οριζόντια διάσταση και παρουσίασαν ένα προκαταρκτικό παράδειγμα.

Ο Nwogu (1996) χρησιμοποίησε ένα πλήρως μη γραμμικό σετ εξισώσεων Boussinesq (Kirby & Wei 1994) για να προσομοιάσει το μετασχηματισμό των θραυόμενων κυμάτων σε δύο οριζόντιες διαστάσεις. Η θραύση ξεκινούσε όταν η οριζόντια ταχύτητα κορυφής ξεπερνούσε την ταχύτητα μετάδοσης του κύματος. Το φαινόμενο της θραύσης ενσωματώθηκε στις εξισώσεις ορμής χρησιμοποιώντας έναν όρο τυρβώδους συνεκτικότητας ανάλογο της κατακόρυφης βαθμίδας της οριζόντιας ταχύτητας κορυφής. Σε κάθε χρονικό βήμα υπολογισμού, η τυρβώδης συνεκτικότητα προσδιοριζόταν επιλύοντας μία πρόσθετη εξίσωση μεταφοράς για την τυρβώδη κινητική ενέργεια που παρήγαγε η θραύση του κύματος.

Οι Yu και Svendsen (1996) ανέπτυξαν ένα συνεπές μαθηματικό ομοίωμα για τη ζώνη θραύσης στο οποίο η ροή θεωρήθηκε στροβιλή. Ένα σετ εξισώσεων τύπου Boussinesq καταστρώθηκε διαχωρίζοντας τη στήλη ύδατος σε μία στροβιλή περιοχή ροής κοντά στην επιφάνεια και ένα χαμηλότερο πυρήνα αστρόβιλης ροής. Το στροβιλό κομμάτι της ροής που συσχετιζόταν με τον επιφανειακό κύλινδρο, χρησίμευσε ως μία πηγή στροβιλότητας και τύρβης, με τη στροβιλότητα να προσδιορίζεται επιλύοντας μια πρόσθετη εξίσωση μεταφοράς στροβιλότητας.

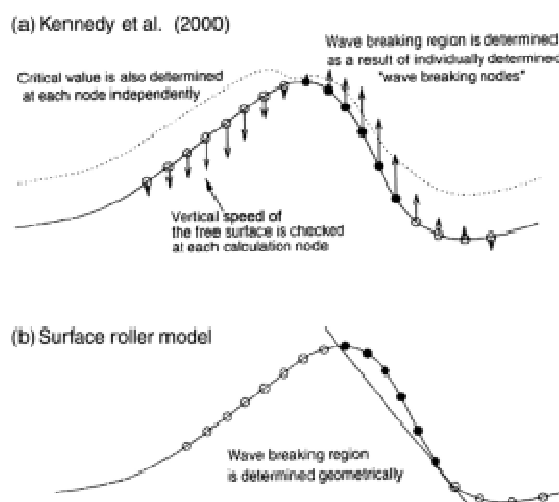
Συνοψίζοντας, για την περιγραφή της θραύσης στα ομοιώματα Boussinesq προστίθενται στην ολοκληρωμένη στο βάθος εξίσωση ορμής ένας πρόσθετος όρος είτε τυρβώδους συνεκτικότητας, είτε επιφανειακού κυλίνδρου (Σχήμα. 3.2).

Ο όρος τυρβώδους συνεκτικότητας είναι ένας όρος διάχυσης που εκφράζει τη σκέδαση της ενέργειας λόγω τύρβης (Abbott et al., 1983, Zelt, 1991, Karambas & Koutitas, 1992, Kennedy et al. 2000).

Από την άλλη πλευρά η τεχνική του επιφανειακού κυλίνδρου οδηγεί σε ένα πρόσθετο όρο συναγωγής στη εξίσωση ορμής που εκφράζει την πίεση που ασκείται στο κύμα από τον επιφανειακό κύλινδρο (Deigaard, 1989, Brocchini et al., 1991) ή την ανομοιόμορφη κατακόρυφη κατανομή της οριζόντιας ταχύτητας (Schäffer et al., 1993). Τα μοντέλα αυτού του τύπου αγνοούν την επίδραση των τυρβωδών διακυμάνσεων στο μέσο πεδίο ροής που εκφράζεται με τις τάσεις Reynolds. Σημειώνεται ότι σε ένα δυσδιάστατο μοντέλο, οι τυρβώδεις τάσεις Reynolds είναι οι μοναδικοί όροι σκέδασης που εισάγονται στις εξισώσεις ορμής.

Τέλος, οι Karambas & Tozer 2001 πρότειναν έναν συνδυασμό των δύο παραπάνω τεχνικών, θεωρώντας κατακόρυφη κατανομή της οριζόντιας ταχύτητας ίδια με αυτή των Madsen και Svendsen (1983) και οι Svendsen και Madsen (1984).

;



Σχήμα 3.2: Σχηματική απεικόνιση εναλλακτικών κριτηρίων θραύσης.

3.3 Κατάστροφη μαθηματικού ομοιώματος Boussinesq (Karambas & Memos 2009)

Όπως περιγράφηκε και αποδείχτηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, πρόσφατες μελέτες κατάφεραν να παράγουν εξισώσεις Boussinesq, οι οποίες περιγράφουν κυματισμούς πλήρους διασποράς και υψηλής μη γραμμικότητας με ικανοποιητική ακρίβεια.

Παρόλα αυτά, πολλά είναι τα πρακτικά προβλήματα όπως αναφέρουν και οι ίδιες έρευνες (π.χ. Madsen et al. 2003), που προκύπτουν σχετικά με την εφαρμογή, τη σταθερότητα και την ακρίβεια των αριθμητικών σχημάτων επίλυσής τους. Στην πλειονότητά τους αυτές οι δυσκολίες είναι συνέπεια της ιδιαίτερης πολυπλοκότητας των συστημάτων των μερικών διαφορικών εξισώσεων (partial differential equations / PDEs), οι οποίες περιέχουν ένα σημαντικό αριθμό όρων με παραγώγους υψηλότερων τάξεων. Συνεπάγεται ότι και τα αριθμητικά σχήματα επίλυσης των PDEs είναι πολύπλοκα και περιλαμβάνουν μεγάλα συστήματα διακριτών γραμμικών εξισώσεων.

Στην παρούσα ενότητα, περιγράφεται η κατάστρωση ενός καινούριου μοντέλου τύπου post-Boussinesq από τους Karambas & Memos (2009). Οι εξισώσεις που προκύπτουν είναι παρόμοιες με εκείνες που κατέστρωσαν οι Chester (1968) και Tsutsui et al. (1998). Το σύστημα των εξισώσεων που προτείνεται, ορίζεται σε δύο οριζόντιες διαστάσεις και προσομοιάζει τη διάδοση κυματισμών πλήρους διασποράς και ελαφρώς μη γραμμικών, σε οποιοδήποτε πεπερασμένο βάθος νερού. Το μοντέλο περιέχει πέντε όρους στην εξίσωση ορμής, περιέχοντας τους όρους της εξίσωσης μακρών κυματισμών και μόνο έναν όρο διασποράς συχνοτήτων. Το αριθμητικό σχήμα επίλυσής του βασίζεται σε ένα απλό σχήμα πεπερασμένων διαφορών, το οποίο σημαίνει ότι το μοντέλο δεν εμπλέκει την επίλυση μεγάλων συστημάτων αλγεβρικών εξισώσεων όπως σε άλλες φόρμουλες Boussinesq.

Επίσης έχει γίνει επέκταση του μοντέλου για θραυόμενους κυματισμούς με την ενσωμάτωση ενός πρόσθετου όρου στο δεξιό μέρος της εξίσωσης ορμής που σκοπό έχει την προσομοίωση απώλειας ενέργειας λόγω της θραύσης (Chondros et al. 2011). Το κριτήριο που χρησιμοποιήθηκε βασίζεται στη σκέδαση της ενέργειας λόγω τύρβης και ο πρόσθετος όρος τυρβώδους συνεκτικότητας υπολογίζεται με τη σχέση των Kennedy et al. (1999).

3.4 Κατάστρωση εξισώσεων Boussinesq (Karambas & Memos 2009)

Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζονται οι εξισώσεις των Karambas & Memos (2009), που είναι κατάλληλες για σύνθετους κυματισμούς, ελαφρώς μη γραμμικούς και πλήρους διασποράς που διαδίδονται σε σταθερού βάθους ή σε ήπιας κλίσης πυθμένα θάλασσας.

3.4.1 1DH-περίπτωση

Υποθέτοντας ιδεατό και ασυμπίεστο ρευστό όπου οι συνήθεις εξισώσεις Navier-Stokes ικανοποιούνται, η εξίσωση συνέχειας γράφεται:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.1)$$

Όπου u και w είναι η οριζόντια και η κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας και x , z η οριζόντια και η κάθετη συνιστώσα με σημείο ορισμού τη $(\Sigma.H.Y.)$.

Ολοκληρώνοντας την (3.1) ως προς το βάθος και χρησιμοποιώντας τις οριακές συνθήκες της ελεύθερης επιφάνειας και του πυθμένα, η γνωστή εκδοχή της εξίσωσης συνέχειας προκύπτει, μετά από χρήση του κανόνα ολοκλήρωσης Leibnitz έχουμε:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial((d + \zeta)U)}{\partial x} = 0 \quad (3.2)$$

Όπου ζ η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας, d το βάθος νερού και U η μέση στο βάθος ταχύτητα. Η εξίσωση (3.2) είναι μια ακριβής σχέση εφαρμόσιμη στα βαθιά, ενδιάμεσα και ρηγά νερά χωρίς κανένα περιορισμό στη μη-γραμμικότητα.

Η εξίσωση ορμής όπως καταστρώθηκε από τον Mei (1983) και χρησιμοποιώντας αδιάστατες παραμέτρους με τη μέθοδο των Veeramony & Svendsen (2000) είναι:

$$\frac{\partial(U(d + \varepsilon \zeta))}{\partial t} + \varepsilon \frac{\partial}{\partial x} \int_{-d}^{\varepsilon \zeta} u^2 dz = p(-d)d_x - \frac{\partial}{\partial x} \int_{-d}^{\varepsilon \zeta} p dz \quad (3.3)$$

$$p(z) = \left(\zeta - \frac{z}{\varepsilon} \right) + \sigma^2 \frac{\partial}{\partial t} \int_z^{\varepsilon \zeta} w dz - \varepsilon \sigma^2 w^2 + \varepsilon \sigma^2 \frac{\partial}{\partial x} \int_z^{\varepsilon \zeta} u w dz \quad (3.4)$$

Όπου p είναι η κανονικοποιημένη ($/\rho g d_0$) πίεση και οι αδιάστατες παράμετροι έχουν ως εξής:

$$x = \frac{x'}{L'}, z = \frac{z'}{d'_0} \text{ και } t = \frac{\sqrt{g d'_0}}{L'} t' \quad (3.5)$$

Με d'_0 και L' να αντιπροσωπεύουν το χαρακτηριστικό βάθος νερού και το χαρακτηριστικό μήκος κύματος αντίστοιχα. Ο τόνος υποδηλώνει παραμέτρους με διαστάσεις. Επίσης:

$$d = \frac{d'}{d'_0}, \quad \zeta = \frac{\zeta'}{H'}, \quad u' = u \varepsilon \sqrt{g d'_0}, \quad w' = w \varepsilon \sigma \sqrt{g d'_0} \quad (3.6)$$

Και H' το χαρακτηριστικό ύψος κύματος, ε είναι η παράμετρος μη γραμμικότητας $\varepsilon = H'/d_0$ όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω και $\sigma^2 = (d'_0/L')^2$ η παράμετρος διασποράς. Εισάγοντας την (3.3) στην (3.4) και κρατώντας όρους της τάξης $O(1, \varepsilon, \sigma^2)$

η ακόλουθη εξίσωση ορμής ολοκληρωμένη στο βάθος και εκφρασμένη σε αδιάστατες παραμέτρους είναι:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \varepsilon U \frac{\partial U}{\partial x} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \sigma^2 \frac{1}{d} \int_{-d}^0 \left(\frac{\partial^2}{\partial x \partial t} \int_z^0 w dz \right) dz + O(\varepsilon \sigma^2, \varepsilon^2, \dots) \quad (3.7)$$

Η οποία αν εκφραστεί σε παραμέτρους με διάσταση προκύπτει η τελική μορφή της εξίσωσης ορμής:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{1}{d} \int_{-d}^0 \left(\frac{\partial^2}{\partial x \partial t} \int_z^0 w dz \right) dz + \text{h.o.t.} \quad (3.8)$$

Εάν υποθεθεί ένα δυναμικό ταχύτητας $F(x, z, t)$ σχετιζόμενο με την ροή του παραπάνω πεδίου, με

$$F(x, z, t) = \Phi(x, t) \cosh k(d + z), \quad k \text{ είναι ο αριθμός κυμάτων.} \quad (3.9)$$

Έπειτα πάρουμε το μετασχηματισμό Fourier (F.T.) του F :

$$\phi(k, z, t) = \text{F.T.}\{F(x, z, t); x \rightarrow k\} \quad (3.10)$$

Όπου ο ορισμός που χρησιμοποιείται για έναν τέτοιο μετασχηματισμό είναι:

$$\text{F.T.}\{f(t)\} = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{it\xi} f(t) dt = \hat{f}_{t \rightarrow \xi}$$

Εισάγοντας

$$\phi(k, z, t) = f(k, t) \cosh k(d + z) \quad (3.11)$$

Μπορεί εύκολα να αποδειχτεί ότι

$$f(k, t) = \text{F.T.}\{\Phi(x, t); x \rightarrow k\} \quad (3.12)$$

Έτσι αφού η ϕ ικανοποιεί την εξίσωση Laplace, οι συνεπαγόμενες ‘ταχύτητες’ και ‘πίεσεις’ ικανοποιούν τις εξισώσεις της κίνησης και της συνέχειας στο F.T.-χώρο. Ως εκ τούτου μπορεί να δουλευτεί σε αυτό το χώρο. Έχοντας γνωστό ότι οι Karambas & Memos (2009) προσπάθησαν να χειριστούν και σύνθετους κυματισμούς, αυτός ο χώρος δείχνει πλεονεκτικός όπου η μεταβλητή του μετασχηματισμού αναπαριστά τον αριθμό κυμάτων. Συνεπώς υπέρθεση των κυματισμών είναι εφικτή μέσα από την ολοκλήρωση ως προς k και ένα κατάλληλο αρχικό σημείο για την ανάλυση παρέχεται από τις (3.9) & (3.10).

Από την (3.9) έχουμε:

$$u = \frac{\partial F}{\partial x}, \quad \hat{u} = \frac{\partial \hat{F}}{\partial x} = -ikF.T.\{F(x, z, t); x \rightarrow kf\} = -ikf(k, t)\cosh k(d+z) \quad (3.13)$$

$$w = \frac{\partial F}{\partial z}, \quad \hat{w} = \frac{\partial \hat{F}}{\partial z} = \hat{\Phi}(x, t)k \sinh(d+z) = kf(k, t)\sinh k(d+z) \quad (3.14)$$

Το ολοκλήρωμα της εξίσωσης (3.8), $D = -\frac{1}{d} \int_{-d}^0 \left(\frac{\partial^2}{\partial x \partial t} \int_z^0 w dz \right) dz$ έχει F.T. :

$$\hat{D}_{x \rightarrow k} = -\frac{1}{d} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{ikx} \left(\int_{-d}^0 \frac{\partial^2}{\partial x \partial t} \left(\int_z^0 w dz \right) dz \right) dx \quad (3.15)$$

Οι εξισώσεις (3.13) & (3.14) καταλήγουν:

$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial x} \cosh k(d+z), \quad w = \Phi(x, t)k \sinh k(d+z) \quad (3.16)$$

Και η εξίσωση (3.15) γίνεται:

$$\hat{D}_{x \rightarrow k} = -\frac{1}{d} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{ikx} \int_{-d}^0 \left(\frac{\partial^2}{\partial x \partial t} \int_z^0 k \sinh k(d+z) \Phi(x, t) dz \right) dz =$$

$$\begin{aligned}
&= -\frac{1}{d} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} dx e^{ikx} \int_{-d}^0 \left(\frac{\partial^2}{\partial x \partial t} \Phi(x, t) [\cosh kd - \cosh k(d+z)] \right) dz = \\
&= -\frac{1}{d} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{ikx} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial t} \left[d \cosh kd - \frac{1}{k} \sinh kd \right] dx = \\
&= -\cosh kd \left(1 - \frac{\tanh kd}{kd} \right) \frac{\partial^2 \widehat{\Phi}}{\partial x \partial t} \tag{3.17}
\end{aligned}$$

Αντικαθιστώντας την έκφραση του δυναμικού για το w στην εξίσωση (3.4) και διατηρώντας τους πρώτους δύο όρους στην τάξη μεγέθους του δεξιού μέρους της εξίσωσης έχουμε:

$$p(x, z, t) = \rho g(\zeta - z) + \rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} \cosh kd \tag{3.18}$$

Εφ' όσον η (3.18) ισχύει για κάθε z , μπορούμε να θέσουμε $z=0$ ώστε να υπολογίσουμε τον τελευταίο όρο της εξίσωσης αυτής:

$$p(x, 0, t) = \rho g(\zeta) + \rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} \cosh kd \tag{3.19}$$

Το αριστερό μέλος της εξίσωσης (3.19) μηδενίζεται στη γραμμική θεωρία

$$\rho g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \rho \cosh kd \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial t} = 0 \tag{3.20}$$

Άρα,

$$\frac{\partial^2 \widehat{\Phi}}{\partial x \partial t} = -g \frac{\widehat{\partial \zeta}}{\partial x} \frac{1}{\cosh kd} \tag{3.21}$$

Η εξίσωση (3.15) γίνεται μέσω της (3.21):

$$\widehat{D}(k) = g \frac{\widehat{\partial \zeta}}{\partial x} \left(1 - \frac{\tanh kd}{kd} \right) \tag{3.22}$$

Η:

$$D(k \rightarrow x) = g \int_{-\infty}^{\infty} e^{-ikx} dk \frac{\widehat{\partial \zeta}}{\partial x} \left(1 - \frac{\tanh kd}{kd} \right) \tag{3.23}$$

Υπολογίζονται τα ολοκληρώματα:

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{-ik\xi} \frac{\tanh kd}{kd} dk = \int_{-\infty}^{\infty} e^{ij\xi} \frac{\tanh jd}{jd} dj = -\frac{2}{d} \ln \tanh \frac{\pi|\xi|}{4d} \quad (3.24)$$

Επίσης μπορεί να αποδειχθεί ότι:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \ln \tanh \left(\frac{\pi|\xi|}{4d} \right) d\xi = -\pi d \quad (3.25)$$

Κάνοντας χρήση της ταυτότητας συνέλιξης:

$$\int_{-\infty}^{\infty} F(\xi) G(\xi) e^{-i\xi t} d\xi = \int_{-\infty}^{\infty} f(u) g(t-u) du \quad (3.26)$$

Όπου $F.T.\{f\} = F\{\xi\}$ και $F.T.\{g\} = G\{\xi\}$.

Και με τον αντίστροφο F.T., η εξίσωση (3.23) μπορεί να γραφτεί έχοντας υπόψη τις (3.24) & (3.25):

$$D = \frac{g}{\pi d} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial}{\partial x} [\zeta(x-\xi, t) - \zeta(x, t)] \ln \tanh \left(\frac{\pi|\xi|}{4d} \right) d\xi \quad (3.27)$$

Τελικώς η εξίσωση (3.8) καταλήγει στην ακόλουθη μορφή:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} = \frac{g}{\pi d} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial}{\partial x} [\zeta(x-\xi, t) - \zeta(x, t)] \ln \tanh \left(\frac{\pi|\xi|}{4d} \right) d\xi \quad (3.28)$$

Η οποία είναι μια εξίσωση ορμής τύπου Boussinesq. Ο όρος στο δεξιό μέρος της (3.28) είναι της τάξεως $O(\sigma^2)$ και υπολογίζει μη υδροστατικά αποτελέσματα πίεσης.

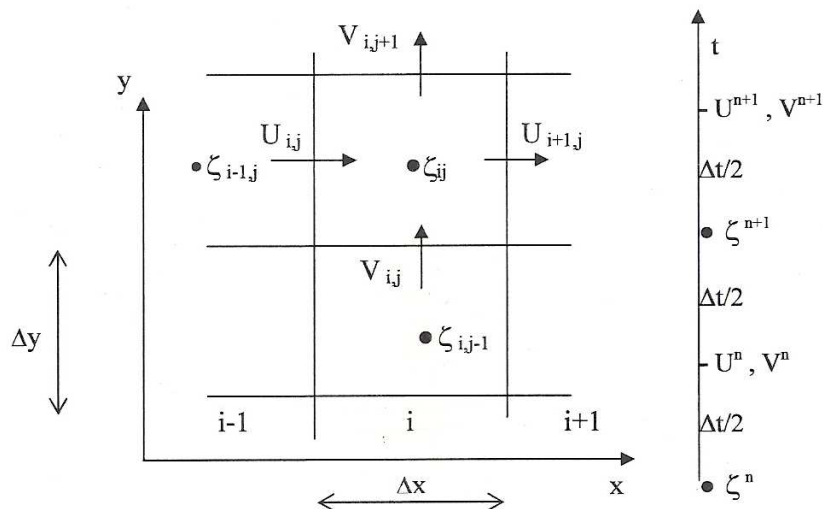
Οι εξισώσεις (3.2) και (3.28) λοιπόν, αποτελούν το σύστημα των εξισώσεων του μοντέλου. Σημειώνεται εδώ ότι το μοντέλο είναι ανεξάρτητο του αριθμού των κυμάτων. Οι μόνες υποθέσεις για να ισχύει η μέθοδος που αναπτύχθηκε πιο πάνω είναι:

- Δυναμικό πεδίο ροής
- Σταθερό βάθος (ή ήπιας κλίσης πυθμένα)
- Ελαφρώς μη γραμμικοί κυματισμοί

Είναι επίσης προφανές ότι το μοντέλο είναι σε συμφωνία με τη γραμμική θεωρία Stokes και ακριβές για κυματισμούς γραμμικούς περιοδικούς που διαδίδονται σε σταθερό βάθος. Συνεπώς για όσο απασχολεί η σχέση της γραμμικής διασποράς, η παραπάνω προσέγγιση είναι ακριβής (το παρών μοντέλο τύπου Boussinesq δεν περιορίζεται σε βάθος νερού).

3.5 Αριθμητικό σχήμα επίλυσης

Για την αριθμητική επίλυση του συστήματος των εξισώσεων (3.2) και (3.28) χρησιμοποιείται το απλό και κλασικό σχήμα πεπερασμένων διαφορών 2^{ης} τάξης. Το σχήμα είναι κεντροθετημένο (centered) στο χώρο και έμπροσθεν (forward) στο χρόνο σε εναλασσόμενο κάναβο που απεικονίζεται στο Σχήμα 3.3. Η διακριτοποιημένη εξίσωση συνέχειας είναι κεντροθετημένη (centered) στα σημεία επιπέδου (level points) και η εξίσωση ορμής στα σημεία ροής (flux points)



Σχήμα 3.3: Κάναβος αριθμητικού σχήματος (Karambas & Memos 2009).

Οι διαφορικές εξισώσεις (3.29),(3.30) & (3.31) προσεγγίζονται από τις ακόλουθες αλγεβρικές εξισώσεις πεπερασμένων διαφορών σύμφωνα με το επιλεγμένο ρητό σχήμα (Koutitas 1988):

$$\frac{\zeta_i^{n+1} - \zeta_i^n}{\Delta t} + \frac{(U \overline{(d+\zeta)})_{i+1,j}^n - (U \overline{(d+\zeta)})_{i,j}^n}{\Delta x} + \frac{(V \overline{(d+\zeta)})_{i,j+1}^n - (V \overline{(d+\zeta)})_{i,j}^n}{\Delta y} = 0 \quad (3.32)$$

$$\frac{U_{i,j}^{n+1} - U_{i,j}^n}{\Delta t} + U_{i,j}^n \frac{U_{i+1,j}^n - U_{i-1,j}^n}{2\Delta x} + \bar{V}_{i,j}^n \frac{U_{i,j+1}^n - U_{i,j-1}^n}{2\Delta y} + g \frac{\zeta_{i,j}^{n+1} - \zeta_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} = I^{n+1} \quad (3.33)$$

$$\frac{V_{i,j}^{n+1} - V_{i,j}^n}{\Delta t} + \bar{U}_{i,j}^n \frac{V_{i+1,j}^n - V_{i-1,j}^n}{2\Delta x} + V_{i,j}^n \frac{V_{i,j+1}^n - V_{i,j-1}^n}{2\Delta y} + g \frac{\zeta_{i,j}^{n+1} - \zeta_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y} = I^{n+1} \quad (3.34)$$

Όπου I είναι το ολοκλήρωμα συνέλιξης, Δt και $\Delta x, \Delta y$ είναι τα χρονικά και χωρικά βήματα αντίστοιχα και η άνω παύλα υποδηλώνει μέση τιμή σύμφωνα με το Σχήμα 3.3 :

$$\overline{(d+\zeta)}_{i+1,j}^n = \left((d+\zeta)_{i,j}^n + (d+\zeta)_{i+1,j}^n \right) / 2 \quad , \quad \overline{(d+\zeta)}_{i,j}^n = \left((d+\zeta)_{i,j}^n + (d+\zeta)_{i-1,j}^n \right) / 2 \quad (3.35)$$

$$\overline{(d+\zeta)}_{i,j+1}^n = \left((d+\zeta)_{i,j}^n + (d+\zeta)_{i,j+1}^n \right) / 2 \quad , \quad \overline{(d+\zeta)}_{i,j}^n = \left((d+\zeta)_{i,j}^n + (d+\zeta)_{i,j-1}^n \right) / 2 \quad (3.36)$$

$$\bar{U}_{i,j}^n = \left(U_{i,j}^n + U_{i+1,j}^n + U_{i,j-1}^n + U_{i+1,j-1}^n \right) / 4 \quad , \quad \bar{V}_{i,j}^n = \left(V_{i,j}^n + V_{i,j+1}^n + V_{i-1,j}^n + V_{i-1,j+1}^n \right) / 4 \quad (3.37)$$

Τα ολοκληρώματα συνέλιξης υπολογίζονται αριθμητικά. Πειράματα έχουν αποδείξει ότι είναι υψίστης σημασίας να χρησιμοποιούνται ψηλότερης τάξης μέθοδοι όπως ο εκτεταμένος κανόνας Simpson ή ο Newton's 3/8.

3.6 Θραύση κυματισμών (Kennedy et al. 1999)

Όπως αναφέρθηκε, η κατάστρωση ενός μαθηματικού μοντέλου που θα υπολογίζει τη διάδοση και τη μεταμόρφωση του προφίλ των κυματισμών αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς στόχους όλων των ακτομηχανικών. Γι' αυτό το λόγο, το μοντέλο θα πρέπει να προσομοιάζει (μαζί με άλλα) φαινόμενα όπως μη γραμμικής ρήγωσης, περίθλασης, διάθλασης, θραύσης και υπερπήδησης κυματισμών. Δύο είναι οι τρόποι προσομοίωσης της απώλειας ενέργειας λόγω θραύσης στα μοντέλα Boussinesq, είτε με την εισαγωγή ενός όρου τυρβώδους συνεκτικότητας όπως θα περιγράφεται εδώ είτε με την εισαγωγή ενός όρου επιφανειακού κυλίνδρου (Madsen et al. 1997).

Οι Kennedy et al. (1999) παρουσίασαν ένα μοντέλο τυρβώδους συνεκτικότητας παρόμοιο με του Zelt (1991), αλλά με κάποιες προσθήκες και διαφορές ώστε να αποδώσουν μια πιο ρεαλιστική περιγραφή της έναρξης και διάδοσης της θραύσης. Τον όρο τυρβώδους συνεκτικότητας τον εισήγαγαν στις εξισώσεις ορμής του Nwogu (1993), οι οποίες είναι κατεστρωμένες σε όρους ενός αυθαίρετα επιλεγμένου βάθους z_a ($=-0.531h$ βέλτιστο για σύγκλιση των αποτελεσμάτων με την έκφραση της γραμμικής διασποράς) και είναι κατάλληλες μόνο για μη θραυόμενους κυματισμούς. Έτσι λοιπόν οι Kennedy et al. (1999) εισήγαγαν έναν όρο R_b που μοντελοποιεί την τυρβώδη μίξη και τη διάχυση, στο δεξιά μέρος της εξίσωσης ορμής:

$$u_{at} + \dots - R_b = 0 \quad (3.38)$$

όπου

$$R_{bx} = \frac{1}{d+\zeta} \left(\left[v((d+\zeta)u_\alpha)_x \right]_x + \frac{1}{2} \left[v((d+\zeta)u_\alpha)_y + v((d+\zeta)v_\alpha)_x \right]_y \right) \quad (3.39)$$

$$R_{by} = \frac{1}{d+\zeta} \left(\left[v((d+\zeta)u_\alpha)_y \right]_y + \frac{1}{2} \left[v((d+\zeta)u_\alpha)_y + v((d+\zeta)v_\alpha)_x \right]_x \right) \quad (3.40)$$

Πολλαπλασιάζοντας τις εξισώσεις ορμής με $(d+\zeta)$ και ολοκληρώνοντας σε ένα περιστατικό θραύσης, αυτοί οι πρόσθετοι όροι φαίνεται να διατηρούνται στην ορμή. Η συμπεριφορά του μοντέλου γίνεται έτσι σταθερή στην περιοχή μιας θραυόμενης κορυφής.

Ο όρος v είναι μια συνάρτηση του χώρου και του χρόνου και προσδιορίζεται με ένα παρόμοιο τρόπο του Zelt (1991), αλλά με σημαντικές διαφορές. Η τυρβώδης συνεκτικότητα δίνεται από τον τύπο:

$$v = B\delta_b^2(d + \zeta)\zeta_t \quad (3.41)$$

Όπου δ_b είναι ένας συντελεστής μήκους μίξης.

Από τα αποτελέσματα πολλών εργαστηριακών δοκιμών ο συντελεστής δ_b παίρνει την αδιάστατη τιμή $\delta_b=1.2$. Οι υπολογισμοί είναι σχεδόν ανεπηρέαστοι στις αλλαγές της τιμής αυτής της παραμέτρου, σε ένα διάστημα $\{0.9-1.5\}$ δίνει παρόμοια αποτελέσματα. Η ποσότητα B της εξίσωσης (3.41) ποικίλει ομαλά από το 0 έως το 1, για να αποφευχθεί μια απότομη εκκίνηση της θραύσης και της συνεπαγόμενης αστάθειας. Ορίζεται από:

$$B = \begin{cases} 1, & \zeta_t \geq 2\zeta_t^* \\ \zeta_t/\zeta_t^* - 1, & \zeta_t^* < \zeta_t \leq 2\zeta_t^* \\ 0, & \zeta_t \leq \zeta_t^* \end{cases} \quad (3.42)$$

Η παράμετρος ζ_t^* καθορίζει την αρχή και τη διακοπή της θραύσης. Η χρήση της ζ_t σαν μια αρχική παράμετρο, εξασφαλίζει με ένα απλό τρόπο ότι η διάχυση συγκεντρώνεται στο έμπροσθεν μέτωπο του κύματος, όπως στη φύση. Ο Zelt (1991) υπέθεσε ότι οι παράμετροι αυτού του είδους έχουν σταθερή τιμή, κάτι που δεν συνάδει με την πραγματικότητα. Για παράδειγμα, στη φύση, κυματισμοί θραύσεως τύπου κυλίσεως και εκτινάξεως δεν ξεκινούν να θραύονται μέχρι το κύμα να ανατραπεί, αλλά αφού ξεκινήσει η θραύση θα συνεχιστεί μέχρι να προσεγγίσει την ακτή ή μέχρι να φτάσει σε ένα μικρότερο σταθερό επίπεδο στο οποίο θα ανασχηματιστεί (Horikawa & Kuo 1966). Μια παρόμοια υπόθεση χρησιμοποιήθηκε στο μοντέλο θραύσης των Schäffer et al. (1993).

Στο μοντέλο των Kennedy et al. (1999) το γεγονός της θραύσης ξεκινάει όταν το ζ_t ξεπεράσει μια αρχική κατώτατη τιμή, αλλά, καθώς το φαινόμενο αναπτύσσεται, το κύμα θα συνεχίσει να θραύεται ακόμα και αν το ζ_t πέσει κάτω από αυτή την τιμή. Έτσι το μέγεθος του ζ_t^* μειώνεται στο χρόνο από κάποια αρχική τιμή $\zeta_t^{(1)}$ σε μια τελική ποσότητα $\zeta_t^{(F)}$. Δεν υπάρχουν στοιχεία για το ποια μορφή παίρνει αυτή μείωση, συνεπώς χρησιμοποίησαν μια απλή γραμμική σχέση για τη μοντελοποίηση της εξέλιξης του ζ_t^* . Αυτή είναι η ακόλουθη:

$$\zeta_t^* = \left\{ \begin{array}{ll} \zeta_t^{(F)}, & t \geq T^* \\ \zeta_t^{(I)} + \left[(t - t_0 / T^*) \cdot (\zeta_t^{(F)} - \zeta_t^{(I)}) \right], & 0 \leq t - t_0 < T^* \end{array} \right\} \quad (3.43)$$

Όπου T^* είναι ο χρόνος μετάβασης, t_0 είναι η χρονική στιγμή έναρξης της θραύσης και $t-t_0$ το χρονικό του γεγονότος της θραύσης το οποίο είναι μη αρνητικό. Οι προεπιλεγμένες τιμές των $\zeta_t^{(I)}$ και $\zeta_t^{(F)}$ που χρησιμοποιήσαν είναι $0.65\sqrt{gd}$ και $0.15\sqrt{gd}$ αντίστοιχα. Η τιμή του χρόνου μετάβασης ορίζεται ως $T^* = 5\sqrt{d/g}$. Καμία από αυτές τις τιμές όπως τονίζουν στη μελέτη τους οι ίδιοι, δεν είναι απόλυτες. Επιλέχθηκαν έπειτα από πλειάδα υπολογιστικών δοκιμών για διαφορετικές τιμές παραμέτρων, με κριτήριο την καλύτερη προσέγγιση πειραματικών μετρήσεων έχοντας ως βάση τις εξισώσεις των Nwogu (1993) και Wei et al. (1995). Για χρήση των συγκεκριμένων τιμών σε άλλα μοντέλα Boussinesq, με διαφορετικές γραμμικές και μη γραμμικές συμπεριφορές, θα πρέπει να ελέγχεται η καταλληλότητά τους.

Στην πραγματικότητα, ακόμα και η μορφή του κριτηρίου έναρξης της θραύσης είναι κατά μία έννοια αυθαίρετη. Για τους θαλάσσιους κυματισμούς, τύπου θραύσης εκτινάξεως και κύλισης, το φαινόμενο ξεκινάει όταν η κορυφή του κύματος ανατραπεί, μια συνθήκη που δεν μπορεί να εμφανισθεί στα ομοιώματα Boussinesq. Γι' αυτό το λόγο επιλέχτηκε το προσεγγιστικό κριτήριο ζ_t^* . Συγκρινόμενο με άλλα κριτήρια όπως η κλίση της ελεύθερης επιφάνειας (Schäffer et al. 1993) ή η κυρτότητα της κ.α., το καθένα έχει θετικά και αρνητικά σημεία. Δύο θετικά της χρήσης του κριτηρίου ζ_t^* είναι:

- Η ποσότητα ζ_t είναι ήδη γνωστή από τους υπολογισμούς Boussinesq
- Και το αριθμητικό σχήμα επίλυσης παρουσιάζει ικανοποιητική σταθερότητα συγκρινόμενο με τα υπόλοιπα.

Το μεγαλύτερο μειονέκτημα του είναι ότι σε μερικές περιπτώσεις, όπως στα στάσιμα υδραυλικά άλματα, το κριτήριο μπορεί να μετατοπιστεί σε φαινόμενο Doppler στο σημείο όπου η έναρξη της θραύσης δεν αναγνωρίζεται. Για τη προσομοίωση της διάδοσης των κυματισμών σε μια οριζόντια διάσταση (1DH) τα γεγονότα της θραύσης προσδιορίζονται σε ικανοποιητικότατο βαθμό. Η ποσότητα t_0 , δηλαδή η χρονική στιγμή που παρατηρείται η έναρξη της θραύσης, θα ποικίλει γενικώς (μέσα σε ένα σύστημα) για διαφορετικά γεγονότα θραύσης, αλλά είναι απλό ζήτημα να

ακολουθεί κάθε συγκεκριμένο γεγονός καθώς διαδίδεται προς την ακτή και έτσι να γίνεται γνωστό το χρονικό κάθε γεγονότος. Συνεπώς το χρονικό $t-t_0$ της θραύσης θα είναι μικρό και το ζ_t^* θα είναι ελαφρώς λιγότερο από το $\zeta_t^{(I)}$. Παρόλα αυτά συγχρόνως μπορεί να υπάρχει ένα άλλο γεγονός θραύσης στην εσωτερική επιφανειακή ζώνη, όπου $t-t_0 > T^*$ και συνεπώς $\zeta_t^* = \zeta_t^{(F)}$.

3.7 Οριακές συνθήκες

Τα αριθμητικά σχήματα επίλυσης των μοντέλων Boussinesq συμπληρώνονται από κατάλληλες οριακές συνθήκες. Οι οριακές συνθήκες που κατά κανόνα απαντώνται στη βιβλιογραφία αναφέρονται σε

- Όρια γένεσης κύματος στο εσωτερικό του πεδίου (Internal wave generation)
- Όρια ακτινοβολίας ή απορροφητικά όρια (transmitting or absorbing boundaries)

Οι περιπτώσεις αυτές αναλύονται στη συνέχεια.

3.7.1 Όρια γένεσης κύματος (Lee & Suh 1998)

Ενδιαφέρον παρουσιάζει ο τρόπος με τον οποίο εισάγεται η κυματική διαταραχή στο υπολογιστικό πεδίο. Η απλούστερη προσέγγιση συνίσταται στον καθορισμό στο ανάντη όριο του καννάβου των τιμών των συναρτήσεων $\zeta(t)$, $u(t)$, $v(t)$ σε κάθε χρονικό βήμα (Wei & Kirby 1995). Σημειώνεται ότι η προσέγγιση αυτή δεν επιτρέπει την διαχείριση ανακλώμενων κυμάτων που επιστρέφουν στο όριο, αποδεικνύεται όμως αποτελεσματική στις περισσότερες περιπτώσεις.

Εξέλιξη στο πρόβλημα της γένεσης αποτελεί η τεχνική της συνάρτησης πηγής για την παραγωγή του κύματος στο εσωτερικό της υπολογιστικής περιοχής. Η εφαρμογή στοιβάδων απορρόφησης (sponge layers) κοντά στα όρια του πεδίου αφαιρεί τη δυνατότητα για γένεση των κυματισμών κοντά σε αυτά, οπότε για τη δημιουργία των επιθυμητών κυμάτων καθίσταται απαραίτητη η εισαγωγή ενός όρου πηγής στο εσωτερικό του πεδίου.

Η πρώτη προσπάθεια έγινε από τους Larsen και Dancy (1983), οι οποίοι πρόσθεταν και αφαιρούσαν μάζα από την υπολογιστική περιοχή κατά μήκος μιας γραμμής ή σημείου στην περίπτωση του μονοδιάστατου ομοιώματος. Προσπάθησαν δηλαδή να παράγουν έναν αρχικό κυματισμό ταχύτητας c και ανύψωσης ζ^I (όπου ο εκθέτης I υποδηλώνει τον αρχικό κυματισμό εισαγωγής) ο οποίος διαδίδεται με μία γωνία θ από τη γραμμή γένεσης l . Αυτός ο κυματισμός έχει ταχύτητα $c \sin \theta$ κάθετα

στο 1. Εάν η απόσταση μεταξύ των προοδευτικών σημείων στο 1 είναι Δs , τότε ο όγκος ρευστού κατά το 1 είναι $\zeta^1 c \sin \theta \Delta s$ και στις δύο κατευθύνσεις. Αυτή η ποσότητα πρέπει να εξισορροπηθεί προσθέτοντας όγκο στο σύστημα. Αφού ένα σημείο του καννάβου περικλείει μια περιοχή $\Delta x \Delta y$, όπου Δx και Δy τα χωρικά διαστήματα στις x- και y- διευθύνσεις αντίστοιχα, η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας που πρέπει να προστεθεί σε κάθε σημείο του 1 είναι:

$$\zeta^* = 2\zeta^1 c \Delta t \frac{\Delta s}{\Delta x \Delta y} \sin \theta \quad (3.44)$$

Στη μία διάσταση η εξίσωση (3.68) γίνεται:

$$\zeta^* = 2\zeta^1 Cr \quad (3.45)$$

Όπου $Cr = c \Delta t / \Delta x$ είναι ο αριθμός Courant

Στο Σχήμα 3.4 απεικονίζεται ένας μονοδιάστατος υπολογισμός από τους Larsen και Dancy (1983), στο οποίο φαίνεται το σημείο γένεσης ($x=200m$) των κυματισμών (Cnoidal στην περίπτωση αυτή) και η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας όταν στο αριστερό άκρο ο κυματισμός ανακλάται πλήρως. Στο σχήμα απεικονίζεται ένα στάσιμο κύμα αριστερά της πηγής και αποτυπώνεται το διαδιδόμενο κύμα δεξιά της πηγής με διπλάσιο ύψος από το αρχικό χωρίς όμως να διαστρεβλώνεται περνώντας από το σημείο πηγής.

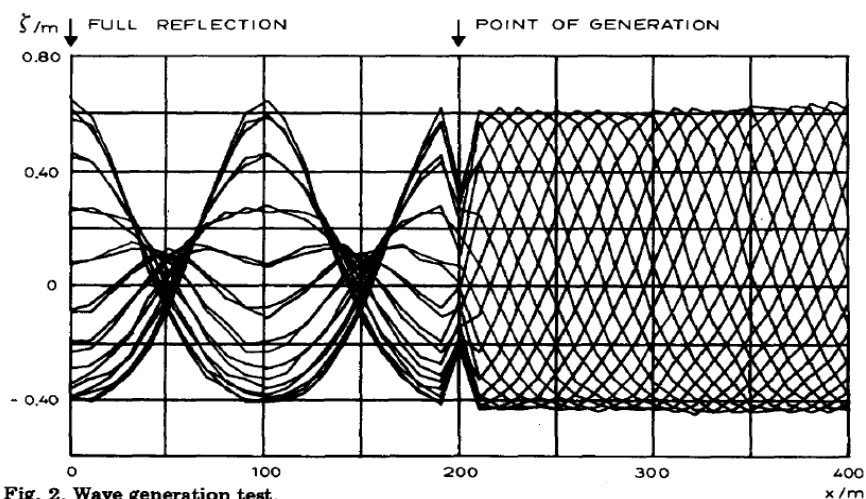


Fig. 2. Wave generation test.

Σχήμα 3.4: Δοκιμή γένεσης κυματισμών εσωτερικά του υπολογιστικού πεδίου (Larsen & Dancy 1983).

Ο Wei (1997) διαπίστωσε ότι ενώ αυτή η μέθοδος εφαρμόζεται με επιτυχία στον έκκεντρο κάναβο που χρησιμοποιήσαν οι προαναφερόμενοι, στην περίπτωση μη έκκεντρου κανάβου εμφανίζεται θόρυβος γύρω από το σημείο της πηγής. Για το λόγο αυτό οι Gobbi και Kirby (1999) ακολουθώντας την προσέγγιση των Wei et al. (1999), κάνουν την υπόθεση ότι η συνάρτηση πηγής κατανέμεται με τη μορφή γκαουσιανού σχήματος (Gaussian shape).

Έτσι, αν το τοπικό βάθος στη περιοχή της πηγής είναι σταθερό και θέλουμε να παράγουμε μονοχρωματικούς κυματισμούς γωνιακής συχνότητας ω , η συνάρτηση πηγής γράφεται (για μονοδιάστατα προβλήματα):

$$f_s(x, t) = D_s \exp\left[-\beta_s (x - x_s)^2 \sin(\omega t)\right] \quad (3.46)$$

Όπου x_s είναι το κέντρο της συνάρτησης πηγής, το β_s καθορίζει το πόσο επικεντρωμένη είναι η συνάρτηση πηγής και D_s είναι το μέτρο της συνάρτησης πηγής. Υποθέτοντας ότι το παραγόμενο κύμα έχει μικρό εύρος, προκύπτει χρησιμοποιώντας συναρτήσεις Green αναλυτική έκφραση για το D_s (Gobbi και Kirby 1999).

Παρόλο που η γκαουσιανή παράμετρος σχήματος β_s είναι τυχαία, στην πράξη η τιμή της έχει μεγάλη επιρροή στο πόσο καλά η συνάρτηση πηγής παράγει το επιθυμητό κύμα. Θεωρητικά η τιμή του β_s θα έπρεπε να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη, έτσι ώστε η συνάρτηση πηγής να είναι περισσότερο επικεντρωμένη. Ωστόσο, προκύπτει ότι αν η περιοχή της πηγής είναι στενή τα παραγόμενα κύματα παρουσιάζουν διαταραχές, ενώ όταν έχουν πεπερασμένο εύρος εμφανίζεται παράλληλα και θόρυβος. Καθορίζοντας το πλάτος της περιοχής της πηγής W_s να είναι ίσο με την απόσταση μεταξύ δύο συντεταγμένων (που ισαπέχουν από το κέντρο πηγής) όπου $e^{-\beta_s(x-x_s)^2} = e^{-5}$ μπορούμε να γράψουμε:

$$W_s = 2\sqrt{5/\beta_s} \quad (3.47)$$

Μετά από δοκιμές διαπιστώθηκε ότι όσον αφορά τους μονοχρωματικούς κυματισμούς μια πηγή με πλάτος W_s , ίσο περίπου με το μήκος κύματος, δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για ένα ευρύ φάσμα υψών και κυματαριθμών.

Τέλος οι Lee και Suh (1998) μελέτησαν τη γένεση κυματισμών για δύο χρόνο-εξαρτώμενα μοντέλα εξισώσεων ήπιας κλίσης των Copeland (1985) και Radder Dingemans (1985). Προσέγγισαν την εσωτερική παραγωγή κυμάτων από δυο οπτικές

γωνίες, της μεταφοράς μάζας και της μεταφοράς ενέργειας. Οι οποίες μελετήθηκαν με τη χρήση της ταχύτητας φάσης και της ταχύτητας ενέργειας αντίστοιχα για τις διαταραχές της ταχύτητας των εισερχόμενων κυματισμών. Απέδειξαν ότι η προσέγγιση της μεταφοράς μάζας που χρησιμοποιήθηκε από τους Larsen & Dancy (1983) για τις εξισώσεις Boussinesq του Peregrine (1967) και από τους Madsen και Larsen για τις εξισώσεις Copeland, δεν μπορεί καταλλήλως να παράγει κύματα για τις εξισώσεις Radder Dingemans (1985). Οι χρόνο-εξαρτώμενες εξισώσεις προβλέπουν την εξέλιξη της ενέργειας των κυματισμών καθώς και της αλλαγής της ταχύτητας φάσης. Αυτό υποδηλώνει η ταχύτητα ενέργειας είναι η ταχύτητα διαταραχών που προκαλούνται από τους εισερχόμενους κυματισμούς. Η προσέγγιση των γεωμετρικών οπτικών χρησιμοποιείται για την απόκτηση της εικονικής εξίσωσης και της εξίσωσης μεταφοράς για την ταχύτητα φάσης και έτσι προκύπτει η ταχύτητα ενέργειας για τα χρόνο-εξαρτώμενα μοντέλα. Στο μοντέλο Copeland, η ταχύτητα ενέργειας είναι ίση με την ταχύτητα φάσης και έτσι και οι δυο οπτικές προσέγγισης δίνουν τα ίδια αποτελέσματα. Ωστόσο, όπως διατύπωσαν οι ίδιοι δεν είναι σίγουρο εάν η προσέγγιση της μεταφοράς ενέργειας μπορεί να εφαρμοστεί σε άλλα μοντέλα Boussinesq.

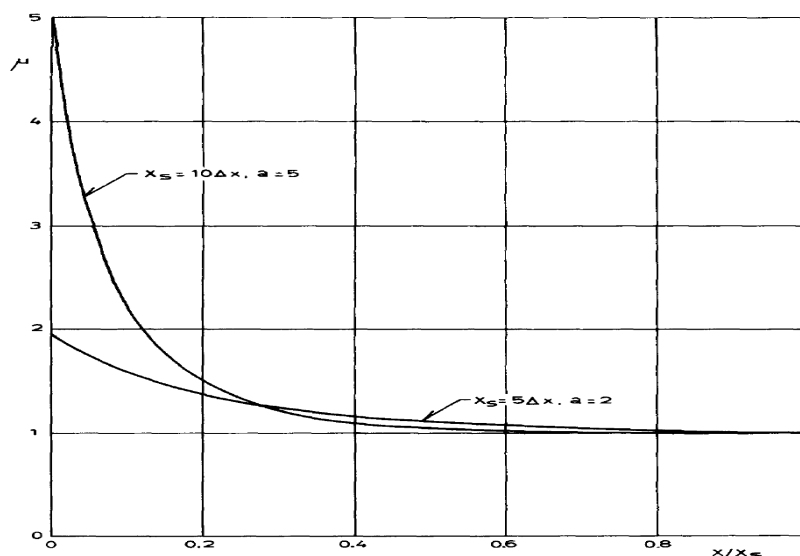
3.8 Απορροφητικά όρια

Η απορρόφηση των κυματισμών στα ανοιχτά όρια ή όρια ακτινοβολίας είναι ένα ζήτημα που έχει απασχολήσει πολλούς ερευνητές στο παρελθόν. Οι Israeli και Orszag (1981) κατέδειξαν ότι με το συνδυασμό μίας στοιβάδας απορρόφησης (sponge layer) στην περιοχή του ορίου και μίας συνθήκης ακτινοβολίας ανώτερης τάξης (όπως αυτή των Engquist και Majda, 1977) επιτυγχάνεται ικανοποιητική απορρόφηση των εξερχόμενων κυμάτων.

Οι Larsen & Dancy (1983) επίσης χρησιμοποίησαν την τεχνική της στοιβάδας απορρόφησης (sponge layer) στα ανοιχτά όρια για την απορρόφηση των κυματισμών. Σύμφωνα με την τεχνική τους οι στοιβάδες απορρόφησης απορροφούν βαθμιαία την ενέργεια του κύματος πολλαπλασιάζοντας τα ζ , u , και v με μία συνάρτηση $\mu(x)$. Εάν οι στοιβάδες απορρόφησης είναι στο διάστημα $0 \leq x \leq x_s$ τότε:

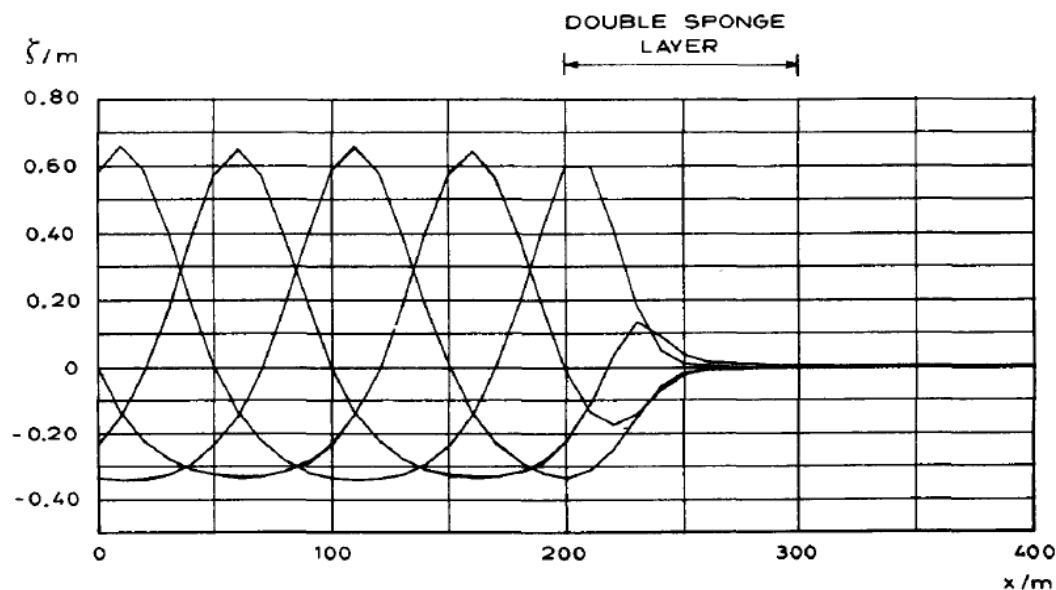
$$\mu(x) = \begin{cases} \exp\left[\left(2^{-x/\Delta x} - 2^{-x_s/\Delta x}\right) \ln \alpha\right] & 0 \leq x \leq x_s \\ 1 & x_s < x \end{cases} \quad (3.48)$$

Όπου a είναι μια σταθερά που εξαρτάται από τον αριθμό των γραμμών του κανάβου στη στοιβάδα. Η συνάρτηση $\mu(x)$ διαγράφεται στο Σχήμα 3.6 για δυο διαφορετικά σετ τιμών των $x_s/\Delta x$ και a . Η συνάρτηση είναι συνεχής για $x=x_s$.



Σχήμα 3.6: Η συνάρτηση μ για δυο διαφορετικά διαστήματα
στοιβάδων απορρόφησης (Larsen & Dancy 1983).

Για να αποτυπώσουν τα αποτελέσματα αυτής της τεχνικής δημιούργησαν ένα πεδίο, στο αριστερό άκρο του οποίου παρήγαγαν κυματισμούς Cnoidal ύψους ενός μέτρου. Τα χωρικά διαστήματα του κανάβου είναι $\Delta x=10\text{m}$, και έχουν τοποθετήσει δυο στοιβάδες η καθεμία πλάτους $5\Delta x$, συμμετρικά της γραμμής $x=250$. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.7 η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας δύσκολα διακρίνεται μετά το διπλό πέρασμα από τις στοιβάδες απορρόφησης.



Σχήμα 3.7: Δοκιμή αποτελεσματικότητας τεχνικήςστοιβάδων απορρόφησης (sponge layer, Larsen & Dancy 1983).

Τέλος, παρουσιάζεται το βελτιωμένο σχήμα των Yoon και Choi (2001). Η συνάρτηση v που πολλαπλασιάζεται με τα ζ , u , και v δίνεται:

$$v(x_*) = \exp\left[-\left(b^{x_*/\Delta x} - b^{x_s/\Delta x}\right)\ln \Lambda\right], \quad 0 \leq x_* \leq x_s \quad (3.49)$$

$$v(x_*) = 1, \quad x_* > x_s \quad (3.50)$$

Και

$$b = [1 + r_s + \exp(-1/r_s)] \quad (3.51)$$

$$r_s = 10/t_s \quad (3.52)$$

Όπου x_s είναι το πλάτος της στοιβάδας απορρόφησης, x_* η τοποθεσία της, t_s ο αριθμός των σημείων του κανάβου που ανήκουν στη στοιβάδα και η παράμετρος Λ ισούται με 2.

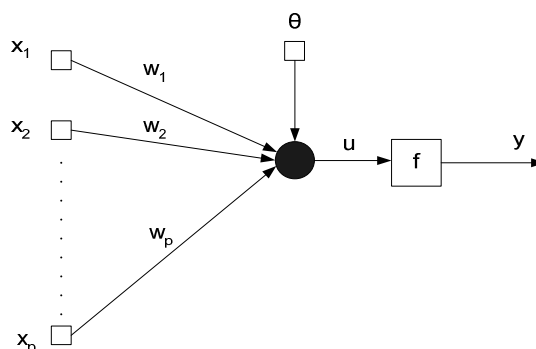
4. ΤΕΧΝΗΤΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι βασικές αρχές λειτουργίας των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (ΤΝΔ). Αρχικά, περιγράφονται οι βασικές κατηγορίες νευρωνικών δικτύων. Ακολουθούν τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες τους, καθώς και οι τομείς εφαρμογής τους. Βαρύτητα δίνεται στα πολυεπίπεδα νευρωνικά δίκτυα και στην εκπαίδευση με τον αλγόριθμο της όπισθεν διάδοσης σφάλματος. Τέλος, αναλύεται ο αλγόριθμος αυτός καθώς και οι τροποποιημένες μορφές του.

4.2 Περιγραφή Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων

Τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΤΝΔ) προέρχονται από την προσπάθεια προσομοίωσης του τρόπου λειτουργίας του ανθρώπινου εγκεφάλου και γενικότερα του νευρικού συστήματος. Είναι παράλληλοι κατανεμημένοι επεξεργαστές αποτελούμενοι από απλές μονάδες επεξεργασίας που λέγονται νευρώνες και οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα αποθήκευσης «γνώσης» μέσω της εμπειρίας που αποκτούν κατά την διαδικασία εκπαίδευσης. Η στοιχειώδης μονάδα επεξεργασίας ενός ΤΝΔ λέγεται τεχνητός νευρώνας (neuron). Κάθε νευρώνας έχει έναν συγκεκριμένο αριθμό εισόδων και εξόδων αλλά και συνάψεων οι οποίες τον συνδέουν με τους άλλους νευρώνες και χαρακτηρίζονται από μία τιμή βάρους. Οι τιμές των βαρών των συνδέσεων αποτελούν την γνώση που είναι αποθηκευμένη στο δίκτυο και καθορίζουν την λειτουργικότητά του. Ένας τυπικός τεχνητός νευρώνας φαίνεται στο σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1: Τεχνητός Νευρώνας

Όπως φαίνεται ο νευρώνας είναι μία σύναψη των εισόδων του $x_i \quad i=1,2,\dots,p$ δηλαδή άθροισμα με συντελεστές βάρους $w_i \quad i=1,2,\dots,p$. Ο νευρώνας ενδεχομένως μπορεί να έχει μία επιπλέον είσοδο θ , που είναι γνωστή ως *πόλωση (bias)*, και χρησιμοποιείται προκειμένου να αυξήσει ή να μειώσει το αποτέλεσμα της σύναψης ενός νευρώνα ανάλογα με το αν αυτό είναι θετικό ή αρνητικό. Έτσι το ολικό άθροισμα του νευρώνα δίνεται από τον τύπο

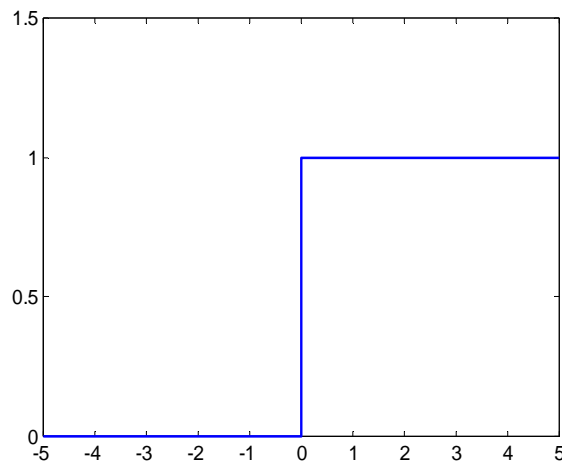
$$u = \sum_{i=1}^p w_i x_i - \theta$$

Το άθροισμα αυτό αποτελεί το όρισμα μιας γραμμικής ή μη γραμμικής συνάρτησης μετασχηματισμού f , η οποία ονομάζεται συνάρτηση ενεργοποίησης οπότε η έξοδος y του ΤΝΔ δίνεται από τη σχέση

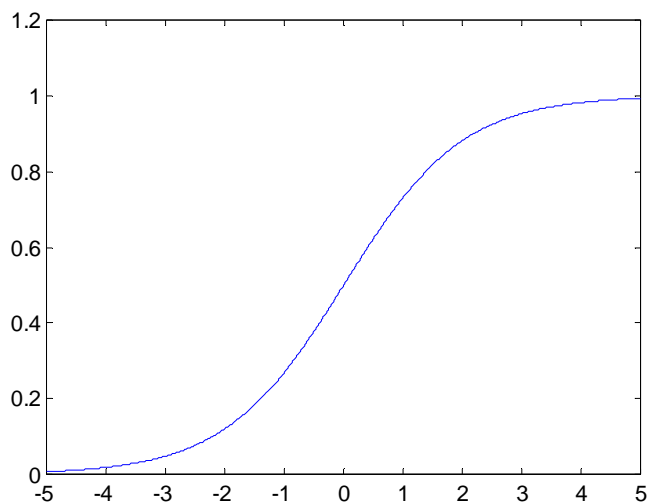
$$y = f(u)$$

Υπάρχουν διάφορες συναρτήσεις ενεργοποίησης οι κυριότερες των οποίων είναι

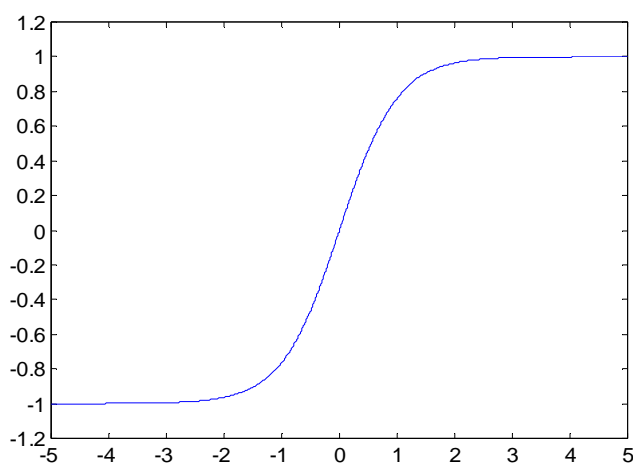
- Συνάρτηση κατωφλίου (Σχήμα 4.2α)
- Σιγμοειδής εφαπτομενική συνάρτηση (Σχήμα 4.2β)
- Σιγμοειδής υπερβολική εφαπτομενική συνάρτηση (Σχήμα 4.2γ)



(4.2α)



(4.2β)



(4.2γ)

Σχήμα 4.2: Συναρτήσεις ενεργοποίησης

Οι νευρώνες σε ένα ΝΔ είναι οργανωμένοι σε επίπεδα (layers). Τα εξωτερικά σήματα εφαρμόζονται στους νευρώνες του επιπέδου εισόδου (input layer). Οι έξοδοι των νευρώνων του επιπέδου εισόδου μεταφέρουν τις πληροφορίες τους στους νευρώνες των ενδιάμεσων ή κρυμμένων επιπέδων (hidden layers), οι οποίοι δεν έχουν

άμεση σχέση με το περιβάλλον. Τέλος, οι νευρώνες του επιπέδου εξόδου (output layer) ενημερώνουν το χρήστη για την έξοδο του ΝΔ. Όταν καθένας από τους νευρώνες ενός επιπέδου συνδέεται με όλους τους νευρώνες του επόμενου επιπέδου, τότε το ΝΔ είναι πλήρως συνδεδεμένο (fully connected), αλλιώς είναι μερικώς συνδεδεμένο (partially connected).

4.2.1 Ιδιότητες Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων

Τα ΤΝΔ έχουν ιδιαίτερη υπολογιστική ισχύ λόγω της ιδιότητάς τους να εκπαιδεύονται και να επεξεργάζονται παράλληλα πληροφορίες. Άμεση συνέπεια της ικανότητας εκπαίδευσης είναι η ικανότητα γενίκευσης, δηλαδή η ικανότητα τους να ανταποκρίνονται σε δεδομένα που δεν έχουν αντιμετωπίσει άλλη φορά αλλά για τα οποία μπορούν να βγάλουν συμπεράσματα από την εκπαίδευση την οποία έχουν υποστεί. Οι κυριότερες εφαρμογές τους είναι σε μη-γραμμικά προβλήματα που δεν μπορούν εύκολα να περιγραφούν με κανόνες ή μαθηματικούς τύπους. Η εκτεταμένη χρήση σε τέτοιου είδους προβλήματα οφείλεται στη μη απαίτηση a priori υποθέσεων για τη στατιστική κατανομή των χρησιμοποιούμενων δεδομένων, αλλά και στη δυνατότητα εξαγωγής κρυμμένης πληροφορίας από αυτά, κάτι που δεν μπορεί να γίνει εύκολα με τις συνήθεις στατιστικές μεθόδους.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό των ΝΔ είναι η ανοχή τους σε σφάλματα, γεγονός που οφείλεται στο μεγάλο αριθμό νευρώνων από τον οποίο αποτελούνται. Έτσι, βλάβη σε έναν ή περισσότερους νευρώνες δεν επηρεάζει αισθητά τη συνολική απόδοση του ΤΝΔ.

4.2.2 Τύποι Νευρωνικών Δικτύων

Τα ΝΔ διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα

- (α) με την αρχιτεκτονική
- (β) το χρησιμοποιούμενο αλγόριθμο εκπαίδευσης.

Η επιλογή του κατάλληλου ΝΔ εξαρτάται από τον τύπο του μελετούμενου προβλήματος

4.2.3 Αρχιτεκτονική Νευρωνικών Δικτύων

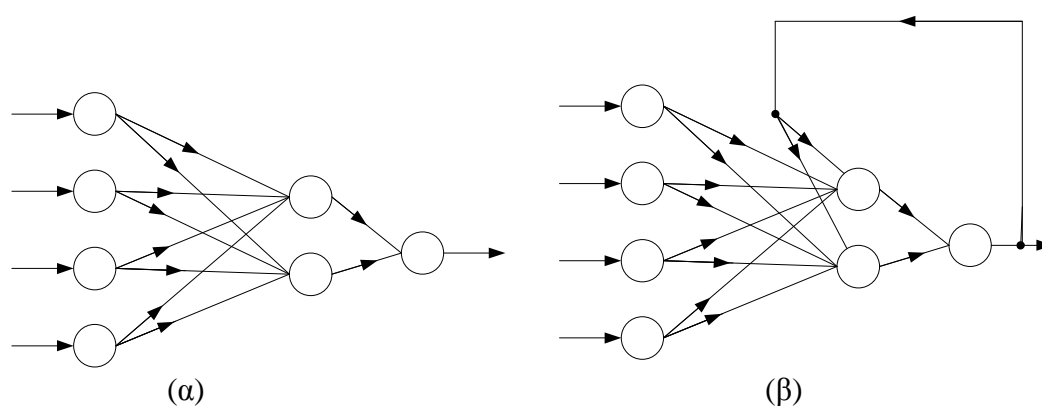
Οι δύο βασικές ιδιότητες που καθορίζουν την αρχιτεκτονική ενός ΤΝΔ είναι το πλήθος των στρωμάτων και ο τρόπος σύνδεσης των νευρώνων μεταξύ τους.

Βάσει αυτής της κατηγοριοποίησης διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- Δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης (feed-forward)
- Δίκτυα ανατροφοδότησης (recurrent)

Στα δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης τα σήματα μεταφέρονται προς μία μόνο κατεύθυνση, από επίπεδα εισόδου προς επίπεδα εξόδου. Αν δεν υπάρχει κάποιο ενδιάμεσο επίπεδο αναφερόμαστε σε ΝΔ πρόσθιας τροφοδότησης ενός επιπέδου (single layer feed-forward), ενώ στην περίπτωση ενός ή περισσότερων ενδιάμεσων επιπέδων αναφερόμαστε σε πολυεπίπεδα ΝΔ πρόσθιας τροφοδότησης (multilayer feed-forward). Στα ΝΔ πρόσθιας τροφοδότησης δεν επιτρέπονται αναδράσεις, δηλαδή η έξοδος ενός νευρώνα να αποτελεί την είσοδο σε νευρώνα του ίδιου ή προηγούμενου επιπέδου.

Αντίθετα, στην περίπτωση των ΝΔ ανατροφοδότησης επιτρέπονται αναδράσεις και συνεπώς τα σήματα μπορούν να μεταφέρονται και προς τις δύο κατευθύνσεις. Και σε αυτή την περίπτωση μπορούμε να έχουμε ένα ή περισσότερα ενδιάμεσα επίπεδα. Τα παραπάνω φαίνονται στο σχήμα 4.3



Σχήμα 4.3: (α) ΤΝΔ πρόσθιας τροφοδότησης και (β) ΤΝΔ ανατροφοδότησης

Υπάρχουν βέβαια και κατηγοριοποιήσεις σε σχέση με τον αριθμό των επιπέδων. Επίσης τα ΤΝΔ διαχωρίζονται ανάλογα με τον αριθμό των νευρώνων που έχουν σε κάθε επίπεδο αλλά και του τρόπου που αυτά συνδέονται μεταξύ τους.

4.2.4 Αλγόριθμοι Εκπαίδευσης

Ένα ΤΝΔ για να μπορεί να εξάγει συμπεράσματα από τα δεδομένα που εισάγονται σε αυτό πρέπει πρώτα να περάσει από μία διαδικασία εκπαίδευσης. Στην διαδικασία αυτή, μεταβάλλονται οι συντελεστές βάρους του προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη τιμή τους, δηλαδή η τιμή που θα ανταποκρίνεται καλύτερα στις ανάγκες του προβλήματος. Για τον σκοπό αυτό έχουν προταθεί διάφοροι αλγόριθμοι εκπαίδευσης που χωρίζονται σε 3 κατηγορίες

- εκπαίδευση με επίβλεψη (supervised training)
- εκπαίδευση χωρίς επίβλεψη (unsupervised training)
- υβριδική εκπαίδευση (hybrid training).

Στην εκπαίδευση με επίβλεψη οι είσοδοι εφαρμόζονται στο ΝΔ ταυτόχρονα με την επιθυμητή έξοδο του δικτύου και τα βάρη μεταβάλλονται με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιηθεί η διαφορά μεταξύ της εξόδου του ΝΔ και της επιθυμητής εξόδου. Ο πιο δημοφιλής αλγόριθμος αυτής της κατηγορίας είναι ο αλγόριθμος όπισθεν διάδοσης σφάλματος (back-propagation). Η ενισχυμένη εκπαίδευση (reinforcement training) είναι ειδική περίπτωση της εκπαίδευσης με επίβλεψη. Στην ενισχυμένη εκπαίδευση ή εκπαίδευση με ημιεπίβλεψη, αντί για τη σωστή έξοδο εξάγεται ένας χαρακτηρισμός σχετικός με την απόδοση του ΤΝΔ και τα βάρη μεταβάλλονται έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα «κακού» χαρακτηρισμού του ΝΔ.

Στην εκπαίδευση χωρίς επίβλεψη η επιθυμητή έξοδος δεν είναι γνωστή. Εφαρμόζεται στο ΝΔ ένα σύνολο από εισόδους-χαρακτηριστικά και το ΤΝΔ αναζητά από μόνο του την «κρυμμένη πληροφορία» που υπάρχει στα δεδομένα για να πραγματοποιήσει την ταξινόμηση.

Στην υβριδική εκπαίδευση, ένα μέρος των βαρών ανανεώνεται με εκπαίδευση με επίβλεψη, ενώ ένα άλλο με εκπαίδευση χωρίς επίβλεψη. Συνήθως η εκπαίδευση χωρίς επίβλεψη εφαρμόζεται στα πρώτα επίπεδα νευρώνων, έτσι ώστε τα δεδομένα να ομαδοποιηθούν ανάλογα με τη σχετική ομοιότητα τους, ενώ σε επόμενα επίπεδα

νευρώνων εφαρμόζεται ο αλγόριθμος της Όπισθεν Διάδοσης Σφάλματος, έτσι ώστε οι ομάδες που προέκυψαν να συσχετισθούν με την επιθυμητή έξοδο.

4.3 Παράμετροι βελτιστοποίησης ΤΝΔ

4.3.1 Αρχικοποίηση Βαρών

Έχει αποδειχτεί ότι η ταχύτητα σύγκλισης ενός ΤΝΔ εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα αρχικά βάρη. Για το λόγο αυτό πραγματοποιείται αρχικοποίηση της μήτρας βαρών είτε με τυχαία αρχικά βάρη, ή χρησιμοποιώντας ως αρχικά βάρη τις προσεγγιστικές λύσεις που προκύπτουν από άλλες τεχνικές μοντελοποίησης όπως είναι η μέθοδος πρωτευουσών συνιστωσών, ο ταξινομητής κοντινότερου γείτονα κ.λ.π. με σκοπό τόσο τη μείωση του απαιτούμενου χρόνου εκπαίδευσης, όσο και τη μείωση της πιθανότητας σύγκλισης σε κάποιο τοπικό ελάχιστο (μη τυχαία αρχικοποίηση).

Στην τυχαία αρχικοποίηση τα αρχικά βάρη παίρνουν μικρές τυχαίες τιμές. Οι τιμές αυτές χρειάζεται να είναι τυχαίες προκειμένου να μην υπάρχουν συμμετρίες, δηλαδή κάθε νευρώνας να επεξεργάζεται διαφορετικές συναρτήσεις. Στην αντίθετη περίπτωση η απόκριση όλων των νευρώνων του ίδιου επιπέδου θα ήταν παρόμοια, το συγκεκριμένο επίπεδο θα συμπεριφερόταν σαν να αποτελείται ουσιαστικά από ένα νευρώνα, με αποτέλεσμα η πληροφορία για το σφάλμα να είναι παρόμοια και συνεπώς η μεταβολή των βαρών κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης θα ήταν δύσκολη. Η επιλογή «μικρών» τιμών αρχικοποίησης των βαρών είναι απαραίτητη προκειμένου να αποφεύγεται η μετάβαση των σιγμοειδών συναρτήσεων σε κόρο. Μεγάλα βάρη μπορούν να ενισχύσουν μια μεσαίου μεγέθους είσοδο παράγοντας πολύ μεγάλες τιμές για τα αθροίσματα που σημαίνει πολύ μεγάλη είσοδο για τους νευρώνες του επόμενου επιπέδου. Αυτό θα έχει ως συνέπεια οι νευρώνες να κινηθούν σε επίπεδες επιφάνειες κοντά στο σημείο εκκίνησης ή να εγκλωβιστούν σε κάποιο τοπικό ελάχιστο. Από την άλλη, οι τιμές των βαρών δεν επιτρέπεται να είναι πάρα πολύ μικρές, γιατί αυτό σημαίνει πολύ μικρή τιμή για το σήμα σφάλματος επιδρώντας στην ταχύτητα εκπαίδευσης. Για την τυχαία αρχικοποίηση των βαρών έχουν αναπτυχθεί διάφορες μεθοδολογίες οι περισσότερες από τις οποίες αναφέρονται στο εύρος των αρχικών τιμών.

Στη μη τυχαία αρχικοποίηση, το ΝΔ ξεκινά από μια σχετικά καλή λύση και ο αλγόριθμος της όπισθεν διάδοσης σφάλματος χρησιμοποιείται στη συνέχεια για την εύρεση της βέλτιστης λύσης. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται ο απαιτούμενος χρόνος εκπαίδευσης προκειμένου το σύστημα να συγκλίνει στο πραγματικό ολικό ελάχιστο και όχι σε κάποιο τοπικό.

4.3.2 Τερματισμός Εκπαίδευσης

Ο καθορισμός της χρονικής στιγμής τερματισμού της εκπαίδευσης ενός ΤΝΔ είναι πολύ σημαντικό ζήτημα. Αν η εκπαίδευση σταματήσει πολύ νωρίς τότε ενδεχομένως το ΤΝΔ να μην έχει εκπαιδευτεί επαρκώς (δεν έχει μάθει σωστά) και δεν μπορεί να ανταποκριθεί στις ανάγκες του προβλήματος κάνοντας λάθος εκτιμήσεις για τα δεδομένα. Αντίθετα αν το ΤΝΔ αφεθεί να εκπαιδευτεί παραπάνω από όσο χρειάζεται τότε κινδυνεύει να υπερεκπαιδευτεί και να χάσει την ικανότητα γενίκευσης. Σε αυτή την περίπτωση το ΤΝΔ «αποστηθίζει» τα δεδομένα εκπαίδευσης σε τέτοιο βαθμό που δεν μπορεί να εκτιμήσει σωστά δεδομένα που απέχουν λίγο από αυτά. Είναι ζητούμενο λοιπόν η εύρεση του βέλτιστου αριθμού εποχών εκπαίδευσης ώστε να μεγιστοποιηθεί η απόδοση του δικτύου.

Συνήθη κριτήρια τερματισμού της εκπαίδευσης είναι τα παρακάτω:

- Η τιμή της συνάρτησης σφάλματος να είναι μικρότερη από μία προκαθορισμένη τιμή.
- Να έχει εκτελεστεί προκαθορισμένος αριθμός επαναλήψεων
- Η κλίση της συνάρτησης σφάλματος να είναι μικρότερη από μια προκαθορισμένη τιμή.

4.3.3 Επιλογή Συνόλου Εκπαίδευσης, Επαλήθευσης και Γενίκευσης

Η απόδοση και η ικανότητα γενίκευσης ενός ΝΔ εξαρτώνται άμεσα από την ποσότητα και την ποιότητα των δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν για την εκπαίδευση του. Το σύνολο εκπαίδευσης θα πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικό των διαφορετικών προτύπων που χαρακτηρίζουν το προς επίλυση πρόβλημα. Η απόκριση ενός εκπαιδευμένου ΝΔ είναι πάρα πολύ καλή σε δεδομένα παραπλήσια αυτών που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια εκπαίδευσης του (*παρεμβολή-interpolation*), ενώ

δεν ισχύει το ίδιο σε περιπτώσεις ακραίες σε σχέση με τα δεδομένα εκπαίδευσης (*υπερβολή-extrapolation*). Αυτό καθιστά προφανή την απαίτηση για δεδομένα εκπαίδευσης που καλύπτουν όσο το δυνατό μεγαλύτερο εύρος πιθανών διαφορετικών τιμών, έτσι ώστε να μειώνεται η πιθανότητα παρουσίασης ακραίων περιπτώσεων. Επίσης, τα διάφορα πρότυπα θα πρέπει να εκπροσωπούνται με παρόμοια ποσοστά στα σύνολα εκπαίδευσης, επαλήθευσης και γενίκευσης.

4.3.4 Σχεδίαση Νευρωνικού Δικτύου

Ο αριθμός των επιπέδων και το πλήθος νευρώνων από τους οποίους αποτελείται το καθένα καθορίζουν την αρχιτεκτονική και είναι πολύ σημαντικοί παράμετροι για την λειτουργία ενός ΤΝΔ.

Το πλήθος των επιπέδων, και δη των ενδιάμεσων επιπέδων αφού το επίπεδο εισόδου και εξόδου είναι υποχρεωτικά, καθορίζει την πολυπλοκότητα του προβλήματος που μπορεί να λύσει το ΤΝΔ. Ένα ενδιάμεσο επίπεδο δημιουργεί μια υπερεπιφάνεια, ενώ δύο ενδιάμεσα επίπεδα συνδυάζουν τις υπερεπιφάνειες για τη δημιουργία κυρτών περιοχών απόφασης. Στην πράξη δε χρησιμοποιούνται σχεδόν ποτέ περισσότερα από δύο ενδιάμεσα επίπεδα, αφού αυτά είναι αρκετά για τη δημιουργία περιοχών ταξινόμησης οποιασδήποτε μορφής. Ωστόσο, έχειδειχτεί ότι ακόμα και με ένα ενδιάμεσο επίπεδο το ΤΝΔ είναι ικανό να αναπαραστήσει οποιαδήποτε συνεχή συνάρτηση πολλών μεταβλητών.

Μετά το πλήθος των επιπέδων χρειάζεται να καθοριστεί το πλήθος των νευρώνων που θα έχει κάθε επίπεδο. Για το επίπεδο εισόδου ο αριθμός των νευρώνων εξαρτάται από το πλήθος των χαρακτηριστικών που χρησιμοποιούνται για το προς επίλυση πρόβλημα. Για το επίπεδο εξόδου οι νευρώνες καθορίζονται πάλι από την φύση του προβλήματος ανάλογα με τι εξόδους χρειάζεται να δώσει. Αυτό το οποίο χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στη σχεδίαση του ΤΝΔ είναι ο αριθμός των νευρώνων των ενδιάμεσων επιπέδων αφού αυτός συνδέεται με την απόδοση του ΤΝΔ. Συγκεκριμένα, μικρός αριθμός νευρώνων στα ενδιάμεσα επίπεδα μπορεί να αποτύχει να λύσει το πρόβλημα, ενώ μεγάλος αριθμός έχει χρονοβόρα εκπαίδευση και μπορεί να υποπέσει σε υπερεκπαίδευση.

Γενικά δεν υπάρχει μέθοδος που να βρίσκει τον βέλτιστο αριθμό νευρώνων στο ενδιάμεσο επίπεδο αλλά μόνο εμπειρικές μελέτες που οι περισσότερες σχετίζονται

άμεσα με την φύση του προβλήματος, το μέγεθος του συνόλου εκπαίδευσης, την ποιότητα των δεδομένων κλπ. Το εύρος τιμών που πρέπει να έχουν οι νευρώνες στο ενδιάμεσο επίπεδο έχει τεθεί να έχει κατώτατο όριο το 2 και ως ανώτατο $2N+1$, όπου N ο αριθμός δεδομένων του διανύσματος εισόδου. Η εμπειρική μελέτη δείχνει ότι ο πιο πιθανός αριθμός νευρώνων είναι \sqrt{MN} , όπου M ο αριθμός των νευρώνων του επιπέδου εξόδου, ή το 75% του αριθμού των νευρώνων του επιπέδου εισόδου. Πάντως για την ολοκληρωμένη μελέτη ενός ΤΝΔ εκτελούνται συνεχείς εκπαιδεύσεις του ΝΔ για διαφορετικό αριθμό ενδιάμεσων νευρώνων και επιλέγεται εκείνος που ικανοποιεί με καλύτερο τρόπο το κριτήριο τερματισμού της εκπαίδευσης, ανεξάρτητα από τους παραπάνω κανόνες οι οποίοι απλά δίνουν μια τάξη μεγέθους για το ζήτημα. Έτσι, υπάρχουν μέθοδοι που ξεκινούν την εκπαίδευση με μικρό αριθμό νευρώνων και συνεχίζουν προσθέτοντας επιπλέον νευρώνες (μέθοδοι ανάπτυξης - constructive methods), ανάλογα με τη συμπεριφορά του κριτηρίου τερματισμού, ή αντίστροφα ξεκινούν από μεγάλο αριθμό νευρώνων και χρησιμοποιώντας *μεθοδολογίες περιορισμού νευρώνων (pruning methods)* βρίσκουν το βέλτιστο αριθμό τους.

4.3.5 Προεπεξεργασία Δεδομένων

Τα διανύσματα εισόδου πριν εφαρμοστούν στους νευρώνες του επιπέδου εισόδου πρέπει να υποστούν κάποιο είδος προεπεξεργασίας. Η προεπεξεργασία έχει ως στόχο την αναγωγή των δεδομένων σε τέτοιο εύρος τιμών έτσι ώστε αυτά να μην βρίσκονται σε περιοχή των σιγμοειδών συναρτήσεων που παρουσιάζουν κόρο. Παράλληλα τα δεδομένα εισόδου κανονικοποιούνται, έτσι ώστε η μέση τιμή τους να είναι ίση με μηδέν και η τυπική απόκλιση ίση με ένα. Με αυτόν τον τρόπο όλοι οι συντελεστές βάρους «μαθαίνουν» με την ίδια περίπου ταχύτητα. Εναλλακτικά, τα δεδομένα μπορούν να κανονικοποιηθούν από 0 έως 1 ή -1 έως 1 ανάλογα με το αν η χρησιμοποιούμενη συνάρτηση μετασχηματισμού είναι η σιγμοειδής εφαιτομενική ή η υπερβολική. Τέλος, για την επιτάχυνση του αλγόριθμου της όπισθεν διάδοσης σφάλματος θα πρέπει οι μεταβλητές του διανύσματος εισόδου να είναι ασυσχέτιστες, κάτι που μπορεί να επιτευχθεί με διάφορες μεθοδολογίες μείωσης της διάστασης του διανύσματος εισόδου σε ένα ΝΔ. Ιδανικά, θα έπρεπε να εξεταστούν όλοι οι 2^N διαφορετικοί συνδυασμοί των N μεταβλητών του διανύσματος εισόδου και να επιλεγούν εκείνες οι μεταβλητές που ικανοποιούν με βέλτιστο τρόπο κάποια

συνάρτηση ποιότητας που μπορεί να είναι είτε το κριτήριο τερματισμού του ΝΔ ή κάποιο μέτρο απόστασης, πληροφορίας, εξάρτησης κ.λ.π. Επειδή, η συγκεκριμένη μέθοδος έχει μεγάλο υπολογιστικό κόστος ακόμη και για σχετικά μικρό πλήθος μεταβλητών συνήθως χρησιμοποιούνται τεχνικές, οι οποίες βασίζονται σε ευρετικές μεθόδους επιλογής, οι οποίες επιχειρούν να εξισορροπήσουν την υπολογιστική πολυπλοκότητα με την ικανοποίηση της συνάρτησης ποιότητας.

4.4 Εφαρμογές Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων

Τα ΤΝΔ έχουν ευρεία εφαρμογή σε ένα μεγάλο φάσμα περιοχών και τα αποτελέσματα που δίνουν τα καθιστούν ως ένα αρκετά υποσχόμενο εργαλείο στον τομέα ταξινόμησης προτύπων αλλά και σε πολύπλοκα προβλήματα στατιστικής υφής. Τα πιο δημοφιλή ΤΝΔ, με βάση το πλήθος των εφαρμογών τους, είναι τα πολυεπίπεδα ΤΝΔ πρόσθιας τροφοδότησης εκπαιδευμένα με τον αλγόριθμο της όπισθεν διάδοσης σφάλματος.

Εφαρμογές τους έχουν ήδη αναπτυχθεί στην αναγνώριση γραφής, αναγνώριση εικόνων, αναγνώριση φωνής, μετατροπή κειμένου σε φωνή. Επίσης έχουν εφαρμοστεί επιτυχώς για τη βελτιστοποίηση διαδικασιών ελέγχου, που αφορούν είτε στην παραγωγή, για συμπίεση εικόνων και για αναζήτηση σε μεγάλες βάσεις δεδομένων με σκοπό την εξόρυξη χρήσιμης πληροφορίας. Τα τελευταία χρόνια τα ΝΔ χρησιμοποιούνται και ως εργαλεία βραχυπρόθεσμων και μακροπρόθεσμων προβλέψεων σε χρηματιστηριακές εφαρμογές μετεωρολογικά φαινόμενα κ.λπ. Επίσης έχουν χρησιμοποιηθεί για την επίλυση κλασσικών αλγορίθμων όπως αυτό του περιπλανώμενου πωλητή (travelling salesman's problem).

5 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ

5.1 Πειραματική Διώρυγα

5.1.1 Διαστάσεις – Περιγραφή

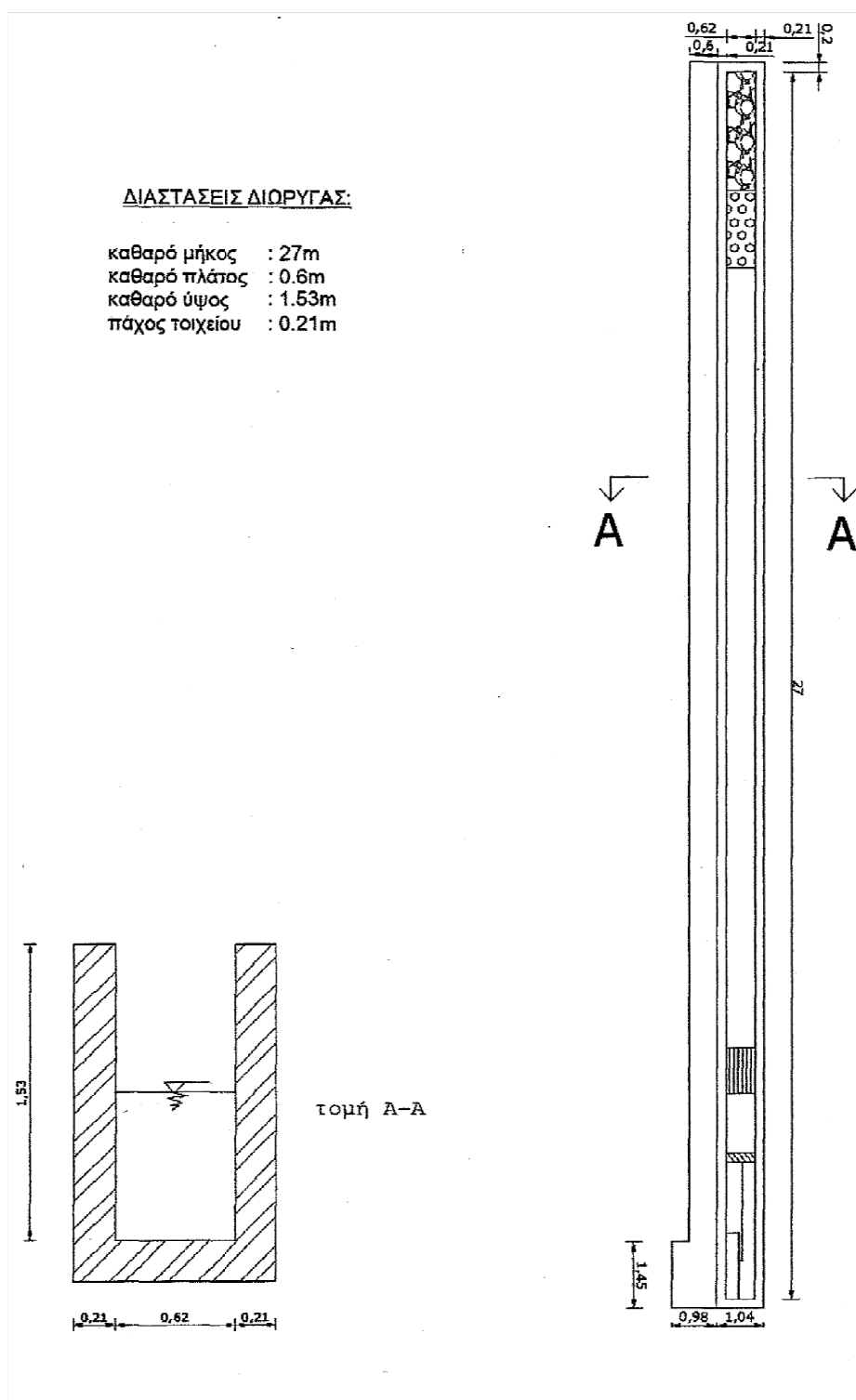
Η διώρυγα κυματισμών βαρύτητας που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση των πειραματικών μετρήσεων βρίσκεται στο Εργαστήριο Λιμενικών Έργων του ΕΜΠ στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου. Έχει σχήμα ορθογωνίου παραλληλογράμμου με διαστάσεις (Βερναρδάκης, 1990):

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

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

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

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



Σχήμα 5.1: Κάτοψη και τομή της πειραματικής διώρυγας.



Εικόνα 5.1: Άποψη της πειραματικής διώρυγας από την πλευρά της κυματογεννήτριας.



Εικόνα 5.2: Άποψη του εσωτερικού της διώρυγας βαρύτητας του εργαστηρίου λιμενικών έργων.

5.1.2 Κυματογεννήτρια

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



Εικόνα 5.3: Κυματογεννήτρια στο άκρο της διώρυγας τοποθετημένη στο βάθρο.

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

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



Εικόνα 5.4: Πτερύγιο κυματιστήρα και διάταξη διάτρητων πλακών ομαλοποίησης του κυματισμού.

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



Εικόνα 5.5: Το κιβώτιο ταχυτήτων της κυματογεννήτριας το οποίο καθορίζει τις περιόδους παραγόμενου κυματισμού.

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

5.1.3 Παραγόμενοι κυματισμοί

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

Πίνακας 5.1: Όρια παραγόμενων κυματισμών.

D(βάθος)	Hmin	Hmax
(m)	(cm)	(cm)
0.40	1.12	12.20
0.50	1.38	16.20
0.60	2.20	20.00
0.70	1.90	23.70

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

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

Με τη χρησιμοποίηση της μεθόδου της γραμμικής παρεμβολής και γνωρίζοντας ότι για $V=0$ είναι $T_0=2.12\text{sec}$ και για $V=4$ είναι $T=1.04\text{sec}$ έχουμε τον παρακάτω πίνακα αντιστοιχίας ταχυτήτων κυματιστήρα και περιόδων παραγόμενων κυματισμών :

Πίνακας 5.2: Ταχύτητες κυματιστήρα – περίοδοι παραγόμενων κυματισμών.

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

Στην παρούσα εργασία ο κυματιστήρας χρησιμοποιήθηκε μόνο για $V=0$, $V=1$ και $V=2$ και για περιόδους κυματισμών $T_0=2.12\text{ sec}$, $T_1=1.85\text{ sec}$ και $T_2=1.58\text{ sec}$ αντίστοιχα.

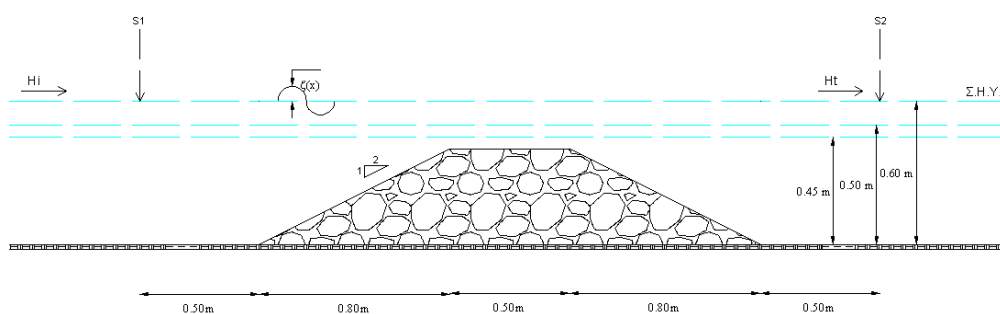
5.2 Διαδικασία μετρήσεων

Οι πειραματικές μετρήσεις αποσκοπούν στην καταγραφή των υψών κυματισμού ανάντη και κατόντη του Υ.Κ. στη διάρρυγα του Εργαστηρίου Λιμενικών Έργων. Οι μετρήσεις των υψών κυματισμού έγιναν με ανάγνωση σε κατακόρυφους κατάλληλα βαθμονομημένους χάρακες, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.7.

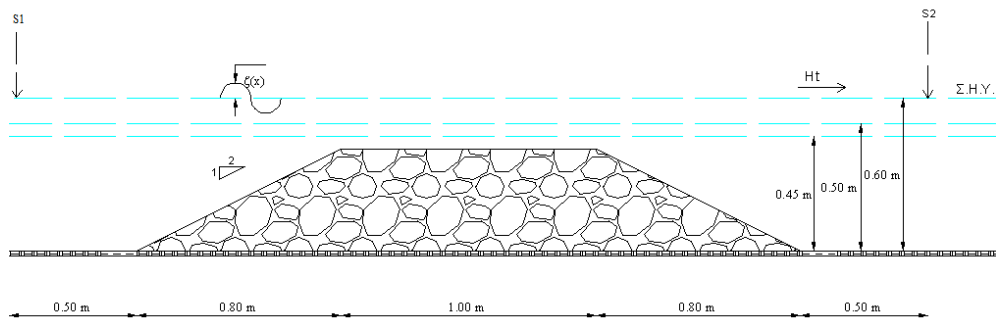


Εικόνα 5.6: Βαθμονομημένος γνώμονας για τις οπτικές παρατηρήσεις.

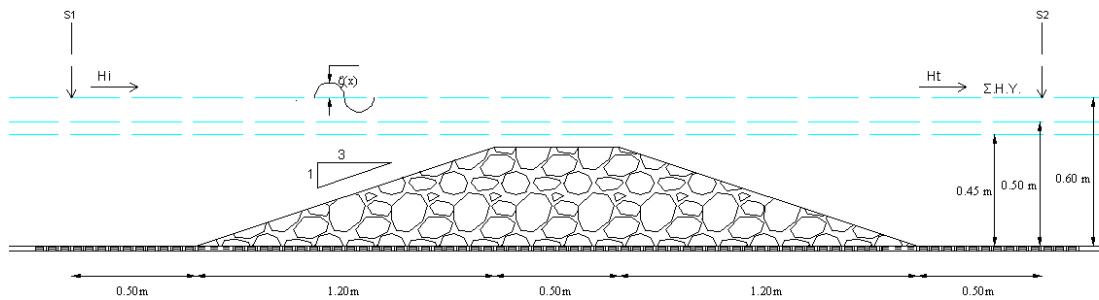
Για την παραγωγή των κυματισμών χρησιμοποιήθηκε η κυματογεννήτρια του εργαστηρίου στη διώρυγα. Ο κυματιστήρας χρησιμοποιήθηκε μόνο για ταχύτητες $V=0$, $V=1$ και $V=2$ και για περιόδους κυματισμών $T=2.12$ sec, $T=1.85$ sec και $T=1.58$ sec αντίστοιχα. Το βάθος νερού που χρησιμοποιήθηκε ήταν 45cm, 50cm και 60cm αντίστοιχα. Οι κλίσεις των πρανών ανάντη και κατόντη του κυματοθραύστη κατασκευάστηκαν 1:2 και 1:3. Επιπρόσθετα επιλέχθηκαν δύο πλάτη στέγης, 50 cm και 100 cm. Παρακάτω δίδονται σε σκαριφήματα οι τέσσερις διατάξεις των Υ.Κ.



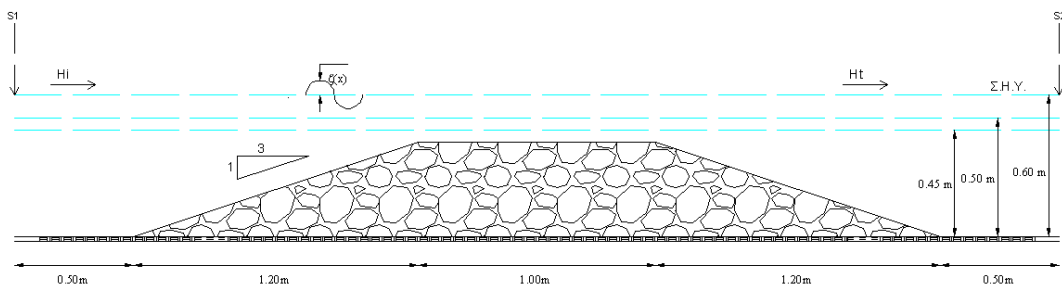
Σχήμα 5.2: Πειραματική διάταξη Υ.Κ με πλάτος στέγης 0.50 m και κλίση πρανών 1:2 (Σενάριο 1)



Σχήμα 5.3: Πειραματική διάταξη Υ.Κ με πλάτος στέψης 1.00 m και κλίση πρανών 1:2
(Σενάριο 2)



Σχήμα 5.4: Πειραματική διάταξη Υ.Κ με πλάτος στέψης 0.50 m και κλίση πρανών 1:2
(Σενάριο 3)



Σχήμα 5.5: Πειραματική διάταξη Υ.Κ με πλάτος στέψης 1.00 m και κλίση πρανών 1:3
(Σενάριο 4)

Οι μεταβολές αυτές τόσο στα κυματικά χαρακτηριστικά, όσο και στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του Υ.Κ οδήγησαν στην απόκτηση 72 μετρήσεων ύψους κυματισμού ανάντη και κατάντη.

Πριν από κάθε μέτρηση γινόταν ανάγνωση του βάθους νερού από τους βαθμονομημένους γνώμονες. Έπειτα, πραγματοποιούνταν ψηφιακή λήψη της μεταβολής της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας στους 2 σταθμούς με κάμερα υψηλής ευκρίνειας. Στην συνέχεια, με την χρήση λογισμικού επεξεργασίας οπτικοακουστικού υλικού δόθηκε η δυνατότητα ανάκτησης της μέγιστης κορυφής και ελάχιστης κοιλίας διέλευσης των κυματισμών με μεγάλη ακρίβεια. Παρατίθενται στους παρακάτω 4 πίνακες τα ύψη κυματισμού για όλα τα σενάρια:

Πίνακας 5.2.A Ύψη κυματισμού στον ανάντη (S1) και κατάντη (S2) σταθμό από τις πειραματικές μετρήσεις. (Σενάριο 1)

Ταχύτητα κυματογεννήτριας	Βάθος (m)	Περίοδος κυματισμού (sec)	H ₁ (m)	H ₂ (m)
0	0.45	2.12	0.052	0.056
	0.50		0.056	0.044
	0.60		0.086	0.082
1	0.45	1.85	0.061	0.049
	0.50		0.068	0.081
	0.60		0.111	0.105
2	0.45	1.58	0.072	0.046
	0.50		0.102	0.089
	0.60		0.149	0.109

Πίνακας 5.2.Β Ύψη κυματισμού στον ανάντη (S_1) και κατάντη (S_2) σταθμό από τις πειραματικές μετρήσεις. (Σενάριο 2)

Ταχύτητα κυματογεννήτριας	Βάθος (m)	Περίοδος κυματισμού (sec)	H_1 (m)	H_2 (m)
0	0.45	2.12	0.043	0.030
	0.50		0.063	0.049
	0.60		0.080	0.069
1	0.45	1.85	0.062	0.032
	0.50		0.081	0.062
	0.60		0.097	0.081
2	0.45	1.58	0.074	0.022
	0.50		0.084	0.077
	0.60		0.132	0.090

Πίνακας 5.2.Γ Ύψη κυματισμού στον ανάντη (S_1) και κατάντη (S_2) σταθμό από τις πειραματικές μετρήσεις. (Σενάριο 3)

Ταχύτητα κυματογεννήτριας	Βάθος (m)	Περίοδος κυματισμού (sec)	H_1 (m)	H_2 (m)
0	0.45	2.12	0.054	0.040
	0.50		0.059	0.046
	0.60		0.091	0.076
1	0.45	1.85	0.062	0.048
	0.50		0.077	0.082
	0.60		0.126	0.09
2	0.45	1.58	0.071	0.057
	0.50		0.095	0.082
	0.60		0.140	0.108

Πίνακας 5.2.Δ Ύψη κυματισμού στον ανάντη (S_1) και κατάντη (S_2) σταθμό από τις πειραματικές μετρήσεις. (Σενάριο 4)

Ταχύτητα κυματογεννήτριας	Βάθος (m)	Περίοδος κυματισμού (sec)	H_1 (m)	H_2 (m)
0	0.45	2.12	0.050	0.048
	0.50		0.056	0.047
	0.60		0.087	0.065
1	0.45	1.85	0.066	0.036
	0.50		0.069	0.066
	0.60		0.114	0.099
2	0.45	1.58	0.073	0.029
	0.50		0.086	0.065
	0.60		0.156	0.115

Σημειώνεται ότι η μέτρηση του ύψους κυματισμού κατάντη του Υ.Κ στο σταθμό S_2 , πραγματοποιήθηκε μεταξύ της μέγιστης διερχόμενης κορυφής και της ελάχιστης διερχόμενης κοιλίας. Αυτός ο τρόπος υπολογισμού ήταν ο μοναδικά εφικτός με τα υπάρχοντα όργανα μέτρησης, δίνοντας το μέγιστο εύρος της κατάντη κυματομορφής, που σε πολλές περιπτώσεις έπαινε να είναι μονοχρωματική.

Το μοντέλο του ύφαλου κυματοθραύστη κατασκευάστηκε με τη χρήση κροκάλων μέσου μεγέθους-διαμέτρου περί των 8 cm στην εξωτερική στρώση, ενώ υπήρχε και εσωτερική υπόστρωση διαμέτρου 3 cm, ώστε να μειωθεί η διαπερατότητα. Σημαντικό βήμα, επίσης, αποτέλεσε η χωροθέτηση του Υ.Κ σε επαρκή απόσταση από τον κυματιστήρα έτσι ώστε ο προσπίπτων κυματισμός να μην αλλοιώνεται. Κατάντη του μοντέλου παρατηρήθηκε το φαινόμενο της μερικής ανάκλασης των κυματισμών, με αποτέλεσμα την επιστροφή τους στο πεδίο μετρήσεων, παρά την υφιστάμενη ακτή. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίστηκε με την τοποθέτηση πρόσθετου απορροφητικού στρώματος κυλινδρικών στοιβάδων - συρματοπλεγμάτων στο αριστερό άκρο της διώρυγας, το οποίο απεικονίζεται στην παρακάτω φωτογραφία. (Εικόνα 5.7)



Εικόνα 5.7: Απορροφητικό στρώμα κυλινδρικών στοιβάδων-συρματοπλεγμάτων

5.3 ΠΟΡΩΔΕΣ

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

$$V_{\text{δοχ}} = V_w = M_w \cdot \rho_w$$

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

$$V_{ολ} = V_{κεν} + V_s$$

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

$$M_{ολ} = M_s + M_{\alpha} = M_s$$

Στο δοχείο μπαίνει νερό που καταλαμβάνει όλο τον όγκο των κενών κι αυτό ζυγίζεται πάλι $M_{ολw}$. Αφαιρώντας τους λίθους και ζυγίζοντας το νερό που μένει M_w' υπολογίζεται ο όγκος του δηλαδή ο όγκος των κενών.

$$V_{κεν} = V'_w = M'_w \cdot \rho_w$$

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

$$n = \frac{V_{κεν}}{V_{ολ}}$$

Η πυκνότητα του συμπαγούς πετρώματος υπολογίζεται ως:

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s}$$

Η πυκνότητα του υλικού υπολογίζεται από:

$$\rho = \frac{M_{ολ}}{V_{ολ}}$$

Για το υλικό του κυματοθραύστη, η τιμή του πορώδους υπολογίστηκε $n=0.48$

6 ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

6.1 Σύνθετη Προσομοίωση

6.1.1 Εισαγωγή

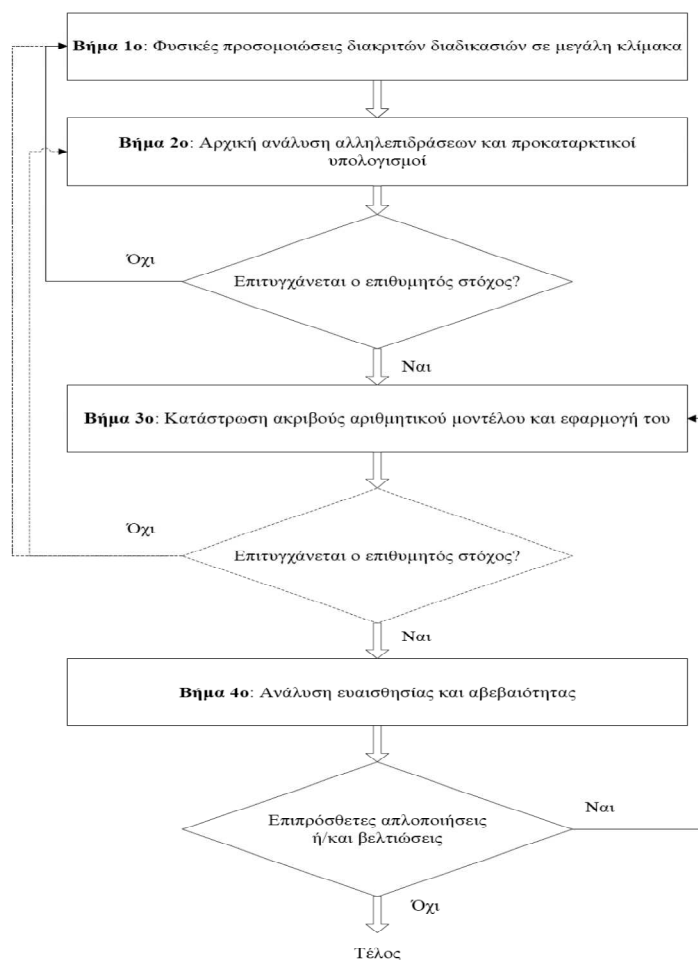
Η αρχή της σύνθετης προσομοίωσης συνίσταται στην κατάστρωση πλήρως αξιόπιστων μοντέλων, συμπεριλαμβανομένων των φυσικών, αριθμητικών και αναλυτικών, υποδιαιρώντας ένα πολύπλοκο πρόβλημα σε ξεχωριστές και πιο απλές διαδικασίες, οι οποίες μπορούν να περιγραφούν από κατάλληλες μεθόδους. Ο Oumeraci (2009) παραθέτει στην εργασία του μια προτεινόμενη πορεία σύνθετης προσομοίωσης (Σχήμα 6.1) με τα τέσσερα κύρια βήματα της να είναι τα εξής:

Βήμα 1^ο: Σειρές απλών φυσικών προσομοιώσεων σε μεγαλύτερη κλίμακα για κάθε διαδικασία (υδροδυναμικό πεδίο, στερεοπαροχή κ.α.) που συνθέτει το πρόβλημα. Εφαρμογή αναλυτικών/ημι-εμπειρικών σχέσεων και αριθμητικών προσομοιώσεων για την πρόβλεψη και περιγραφή διαδικασιών που δεν αποκτήθηκαν επαρκώς από το φυσικό μοντέλο.

Βήμα 2^ο: Αρχική ανάλυση για την κατανόηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των υδροδυναμικών, μορφοδυναμικών και μορφολογικών διαδικασιών και δόμηση ενός προκαταρκτικού υπολογιστικού μοντέλου που συνδυάζει τα αποτελέσματα του πρώτου βήματος με την ανάλυση αυτή. Ανάλογα με τα υπολογιστικά αποτελέσματα καθορίζεται εάν χρειάζονται πρόσθετα εργαστηριακά πειράματα για την επίτευξη του επιθυμητού στόχου.

Βήμα 3^ο: Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των προηγούμενων βημάτων καταστρώνεται ένα λεπτομερές υπολογιστικό μοντέλο που εφαρμόζεται για την πρόβλεψη σεναρίων με μεταβαλλόμενα αρχικά δεδομένα (π.χ. βάθη νερού, εισερχόμενες κυματικές συνθήκες, γεωμετρικά χαρακτηριστικά κατασκευής κ.α.).

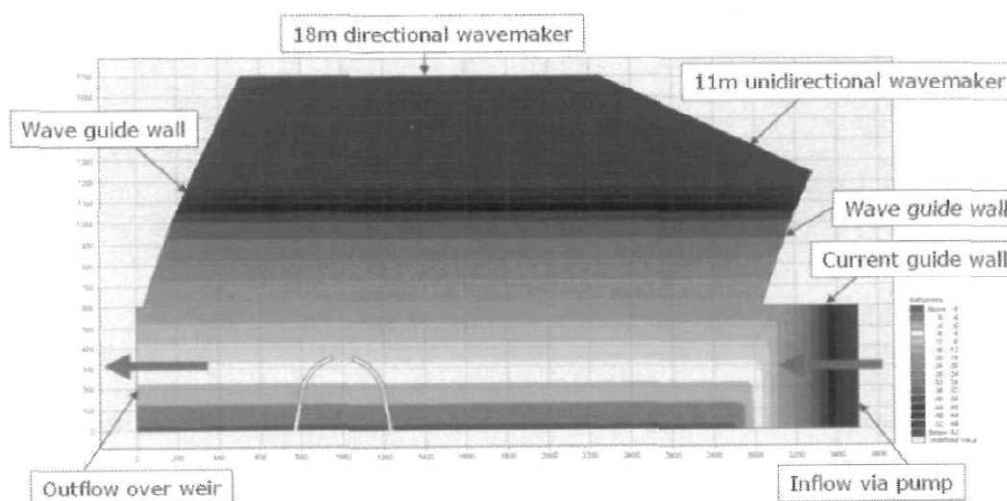
Βήμα 4^ο: Πραγματοποιείται μια ανάλυση ευαισθησίας για να εξακριβωθούν οι εισερχόμενοι παράμετροι με την μεγαλύτερη επιρροή στα αποτελέσματα και ένας μεγάλος αριθμός προσομοιώσεων για τον καθορισμό των διαστημάτων αβεβαιότητας.



Σχήμα 6.1: Διάγραμμα ροής σύνθετης προσομοίωσης.

Τα τελευταία χρόνια πολλοί ερευνητές υιοθέτησαν το συνδυασμό φυσικών και αριθμητικών μοντέλων. Οι Grunnet et al. (2008) μελέτησαν τη στερεοπαροχή, λόγω ρεύματος κατά μήκος της ακτής, γύρω από μια λιμενική εγκατάσταση θέλοντας να προσδιορίσουν το ποσοστό του ιζήματος που εισέρχεται στη λιμενολεκάνη. Εργαστηριακές μετρήσεις έγιναν στην πειραματική διάταξη της εικόνας 6.2, όπου διακρίνονται οι κυματογεννήτριες, η εξωτερική προστασία του λιμένα και οι θέσεις εισροής και απορροής του νερού προσομοιώνοντας την κίνηση του ρεύματος. Με τη βοήθεια του αριθμητικού μοντέλου που χρησιμοποίησαν κατάφεραν να τροφοδοτήσουν το φυσικό ομοίωμα με πληροφορίες όπως οι οριακές συνθήκες, μετατρέποντας την πρωτότυπη κλίμακα των δεδομένων σε εργαστηριακή, δεδομένων

των φυσικών περιορισμών. Παράγοντας λοιπόν αυτές τις κατάλληλες συνθήκες, η κλίμακα του μοντέλου μπορεί συνάγεται από τα όρια του ύψους κυματισμού σε σχέση με τη λειτουργία της κυματογεννήτριας για ένα συγκεκριμένο βάθος καθώς επίσης και τη χωρική απαίτηση για τη γένεση ενός πλήρους ανεπτυγμένου ρεύματος με δεδομένες τις διαστάσεις της δεξαμενής. Το μαθηματικό μοντέλο αποδείχθηκε χρήσιμο και για τη διαστασιολόγηση του λιμένα και της τοποθεσίας του μεταξύ των πλευρικών ορίων. Επιπρόσθετα προσέφερε μια αρχική εκτίμηση για τις συνθήκες στερεοπαροχής, διασφαλίζοντας ότι το ίζημα θα μετακινηθεί στο εργαστηριακό πείραμα. Από την άλλη μεριά το φυσικό προσομοίωμα παρείχε πολύτιμες πληροφορίες για το ίζημα στη λιμενολεκάνη και για την κατάντη διάβρωση. Δηλαδή το ποσοστό (5%) της παρατηρούμενης στερεοπαροχής, στο εσωτερικό του λιμένα της πειραματικής διάταξης, μπορεί να λειτουργήσει ως εσωτερική οριακή συνθήκη στο αριθμητικό.



Σχήμα 6.2: Πειραματική διάταξη Grunnet et al. (2008).

Ακόμα πιο πρόσφατα οι Van den Boogaard et al. (2009) προσπάθησαν να κατασκευάσουν ένα αριθμητικό μοντέλο, τροφοδοτούμενο από ένα περιορισμένο αριθμό πειραματικών μετρήσεων, που μπορεί να υπολογίσει με ικανοποιητική ακρίβεια τα φορτία που δέχονται οι πόδες προστασίας των εξωτερικών λιμενικών έργων υπό κρίσιμες κυματικές συνθήκες. Τέλος οι van Gent et al. (2007) σε μια έρευνα που προηγήθηκε κατασκεύασαν ένα αριθμητικό μοντέλο Νευρωνικού Δικτύου χρησιμοποιώντας 10,000 φυσικά πειράματα για τον υπολογισμό της υπερπήδησης.

Στην παρούσα μελέτη μια παρόμοια προσέγγιση ακολουθείται για να υπολογίσει με ακρίβεια το συντελεστή κυματικής μετάδοσης πάνω από ύφαλα εμπόδια, με βάση ένα μικρό αριθμό πειραματικών μετρήσεων και εκμεταλλεύονται έναν αλγόριθμο ΤΝΔ. Το βασικό σημείο αυτής της εργασίας και η βασική διαφορά από τις παραπάνω μελέτες είναι η χρησιμοποίηση ενός επιπλέον αριθμητικού μοντέλου Boussinesq για την ελαχιστοποίηση μεγάλου όγκου πειραματικών δεδομένων και το διάστημα επιρροής των νευρωνικών δικτύων.

6.2 Επιλογή μεταβλητών εισόδου και εξόδου

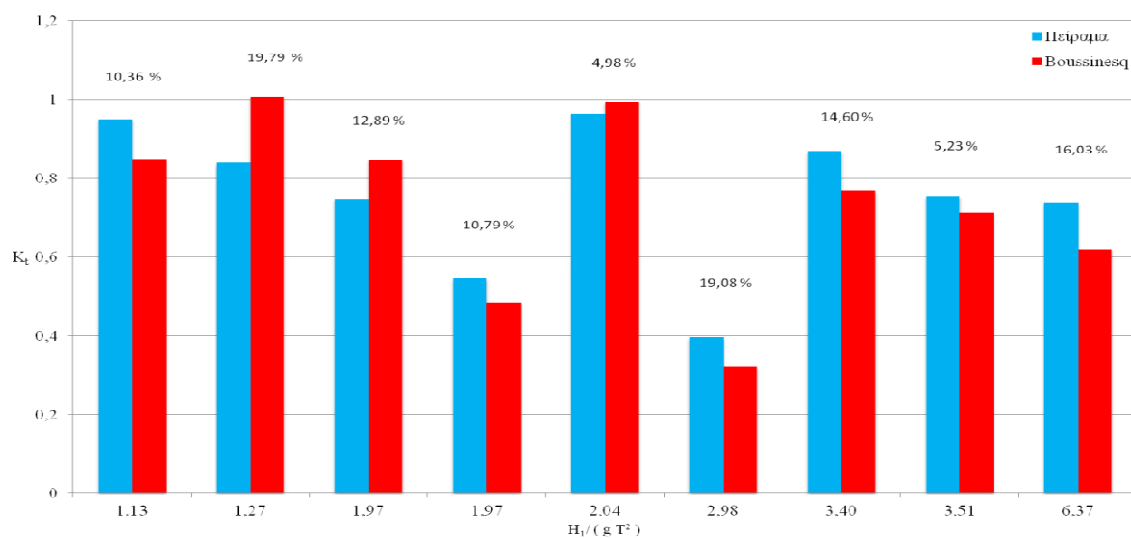
Το ζητούμενο στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία είναι η σωστή πρόβλεψη του συντελεστή μετάδοσης K_t , συνδυάζοντας το νευρωνικό και το μαθηματικό μοντέλο. Οι κυρίαρχες παράμετροι που επηρεάζουν το συντελεστή είναι: ο εισερχόμενος κυματισμός (H_o, T), το βάθος νερού d , και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ύφαλου αδιαπέρατου κυματοθραύστη ($F_c, d_c, B_c, \tan \alpha, \tan \beta$). Οι επτά παράμετροι $\bar{\Omega} = (H_o, T, d, F_c, d_c, \tan \alpha, \tan \beta)$ μπορούν να συνδυαστούν με πολλούς διαφορετικούς τρόπους οδηγώντας σε ποικίλες πιθανές επιλογές δεδομένων εισόδου. Στη συγκεκριμένη μελέτη οι τρεις αδιάστατες παράμετροι που επιλέχθηκαν είναι οι εξής: η σταθερά Iribaren (ξ), το σχετικό πλάτος στέψης (B/L) και το σχετικό ελεύθερο ύψος (F/H_o). Η τελευταία είναι εμφανώς συνδεδεμένη με το ποσό της κυματικής ενέργειας που μεταδίδεται πάνω από το ύφαλο τραπέζιο άρα και το ύψος του κυματισμού κατάντη. Το σχετικό πλάτος στέψης έχει σχέση με την ποσότητα του νερού που προσπίπτει από ανάντη και με τη θραύση πάνω στη στέψη. Η παράμετρος ξ παίρνει υπόψη της και την κλίση της προσήνεμης πλευράς του ύφαλου κυματοθραύστη και καθορίζει τον τύπο θραύσης:

$\xi = \tan \alpha (H_o/L_o)^{-1/2}$ Συνεπώς τα δεδομένα εισόδου στο νευρωνικό δίκτυο είναι $\bar{\Omega} = (\xi, B/L, F/H_o)$. Η τιμή του συντελεστή μετάδοσης από τις πειραματικές μετρήσεις, K_{tp} , διαφέρει από αυτή, K_{tm} , που υπολογίζει το μαθηματικό μοντέλο Boussinesq, $\Delta K = K_{tp} - K_{tm}$. Αυτή η διαφορά επιλέχθηκε ως δεδομένο εξόδου για το νευρωνικό δίκτυο και εξαρτάται άμεσα από τις παραπάνω παραμέτρους $\Delta K = f(\bar{\Omega})$. Το επόμενο βήμα μιας συμβατικής προσέγγισης θα ήταν ο προσδιορισμός μιας σχετικά κατάλληλης έκφρασης για την άκρως μη γραμμική συνάρτηση f . Αυτή η έκφραση θα

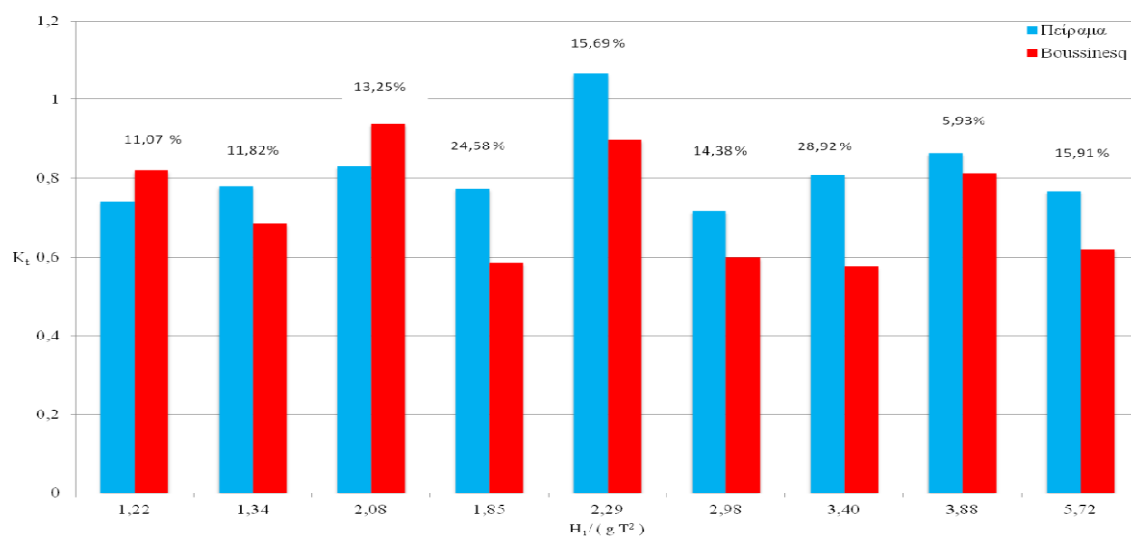
περιείχε έναν αριθμό συντελεστών που θα καθορίζονταν από τα πειραματικά δεδομένα μέσω τεχνικών παλινδρόμησης. Αντίθετα στην παρούσα προσέγγιση η σχέση μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών και της εξαρτημένης μεταβλητής μορφώνεται από το νευρωνικό δίκτυο χωρίς την ανάγκη να προκαθοριστεί η έκφραση της f . Επίσης η γνώση που έχει αποκτήσει το δίκτυο από το πρώτο στάδιο αποθηκεύεται στην ενίσχυση των σχέσεων μεταξύ των νευρώνων (συναπτόμενα βάρη).

6.3 Εφαρμογή μοντέλου Boussinesq

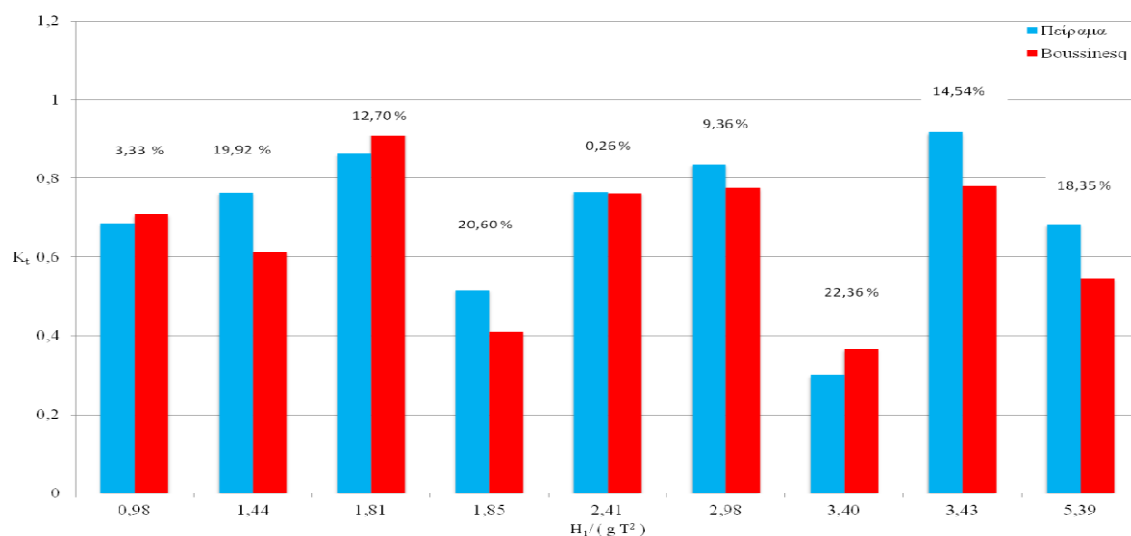
Το μοντέλο Boussinesq εφαρμόστηκε για τα 32 από τα 36 σενάρια εισερχόμενων κυματισμών (τα υπόλοιπα 4 χρησιμοποιούνται για επαλήθευση). Το μοντέλο σε αρκετές περιπτώσεις παρουσίασε εξαιρετική ακρίβεια στην πρόβλεψη του συντελεστή μετάδοσης με απόκλιση 0.1-5%. Ωστόσο εμφανίστηκαν και αποκλίσεις έως και 25% οι οποίες οφείλονται στην αδυναμία του μοντέλου να προσομοιώσει τη μετάδοση ενέργειας από χαμηλότερες συχνότητες στις υψίσυχνες, τη γένεση υψηλότερων αρμονικών στη στέψη και κατάντη του ύψαλου τραπεζίου όπως επίσης και στην αδυναμία περιγραφής της θραύσης τύπου εκτινάξεως. Σημειώνεται επίσης, ότι η μέτρηση του ύψους κυματισμού κατάντη του Υ.Κ στο σταθμό S_2 , στο μοντέλο Boussinesq πραγματοποιήθηκε όπως ακριβώς και στις πειραματικές μετρήσεις, δηλαδή μεταξύ της μέγιστης διερχόμενης κορυφής και της ελάχιστης διερχόμενης κοιλίας. Με αυτό τον τρόπο, γίνεται μια όσο το δυνατόν πιο δίκαια σύγκριση μεταξύ αριθμητικού μοντέλου και πειραματικών μετρήσεων. Στα επόμενα ραβδογράμματα (Διαγράμματα 6.1.A-B-Γ-Δ) παρουσιάζονται οι πειραματικές μετρήσεις συγκρινόμενες με τους υπολογισμούς του μοντέλου για τριανταέξι σενάρια των Πινάκων 5.2.A-B-Γ-Δ και αναγράφονται τα απόλυτα ποσοστά απόκλισης.



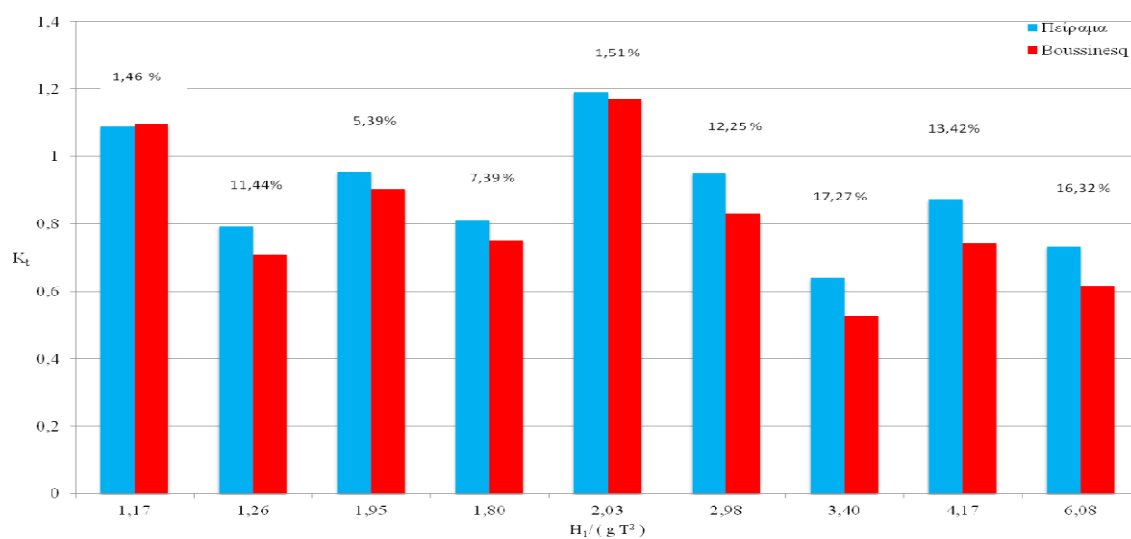
Διάγραμμα 6.1.A: Προβλέψεις συντελεστή μετάδοσης K_i μοντέλου Boussinesq και απόλυτα ποσοστά απόκλισης του.



Διάγραμμα 6.1.B: Προβλέψεις συντελεστή μετάδοσης K_i μοντέλου Boussinesq και απόλυτα ποσοστά απόκλισης του.



Διάγραμμα 6.1.Γ Προβλέψεις συντελεστή μετάδοσης K_t μοντέλου Boussinesq και απόλυτα ποσοστά απόκλισης του.

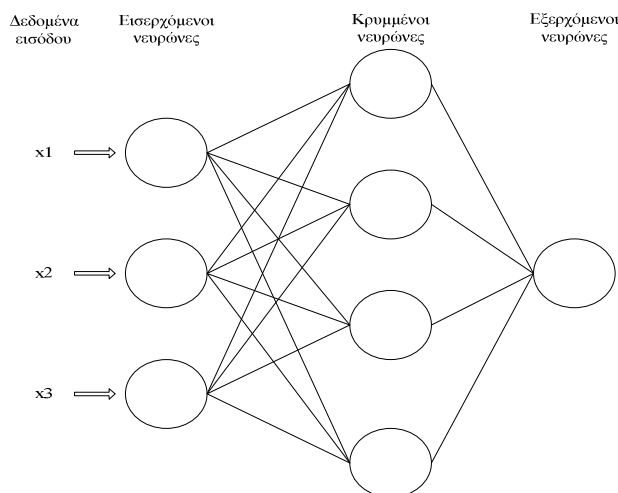


Διάγραμμα 6.1.Δ Προβλέψεις συντελεστή μετάδοσης K_t μοντέλου Boussinesq και απόλυτα ποσοστά απόκλισης του.

6.4 Εφαρμογή ΤΝΔ

Για να προσδιορίσουμε ακριβώς το νευρωνικό δίκτυο, εκτός από το στρώμα εισόδου και εξόδου, χρειάζεται να προσδιορίσουμε το βέλτιστο αριθμό κρυμμένων

στρώματων όπως επίσης και τον αριθμό των νευρώνων στο καθένα από αυτά. Όλα τα στρώματα ονομάζονται αρχιτεκτονική του δικτύου (Σχήμα 6.3).



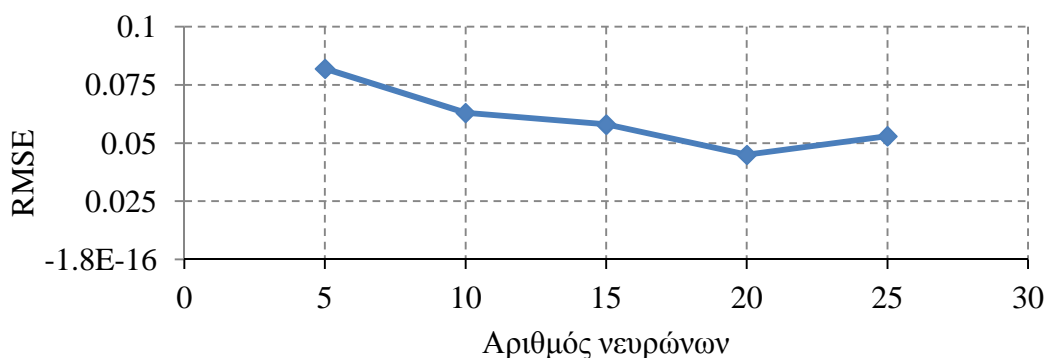
Σχήμα 6.3: Αρχιτεκτονική Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου.

Αυξάνοντας τον αριθμό των νευρώνων στο κρυμμένο στρώμα, οι διαφορές μεταξύ των δεδομένων εξόδου του ΤΝΔ ($\Delta K_{\text{TN}\Delta}$) και των πειραματικών μετρήσεων (ΔK_{obs}) που χρησιμοποιήθηκαν για το στάδιο της εκπαίδευσης θα μειωθούν επειδή περισσότεροι κρυμμένοι νευρώνες οδηγούν σε περισσότερους βαθμούς ελευθερίας στο μοντέλο. Ωστόσο μετά από ένα συγκεκριμένο αριθμό κρυμμένων νευρώνων, το ΤΝΔ τείνει να εμφανίζει θόρυβο και διακυμάνσεις το οποίο δεν είναι επιθυμητό για την ακρίβεια των πραγματικών προβλέψεων. Καθώς η απόδοση του δικτύου για την φάση της εκπαίδευσης αυξάνεται και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) μειώνεται, η ακρίβεια μειώνεται για τη φάση της επαλήθευσης και το αντίστοιχο (RMS) αυξάνεται. Όπου το μέσο τετραγωνικό σφάλμα αποτελεί ένα μέσο ποσοτικοποίησης της απόκλισης των προβλεπόμενων από τα πραγματικά δεδομένα εξόδου (για τον αριθμό των επαληθεύσεων N , στην εκπαίδευση) και ορίζεται ως:

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^{n=N} ((\log \Delta K_{\text{obs}})_n - (\log \Delta K_{\text{TN}\Delta})_n)^2} \quad (1)$$

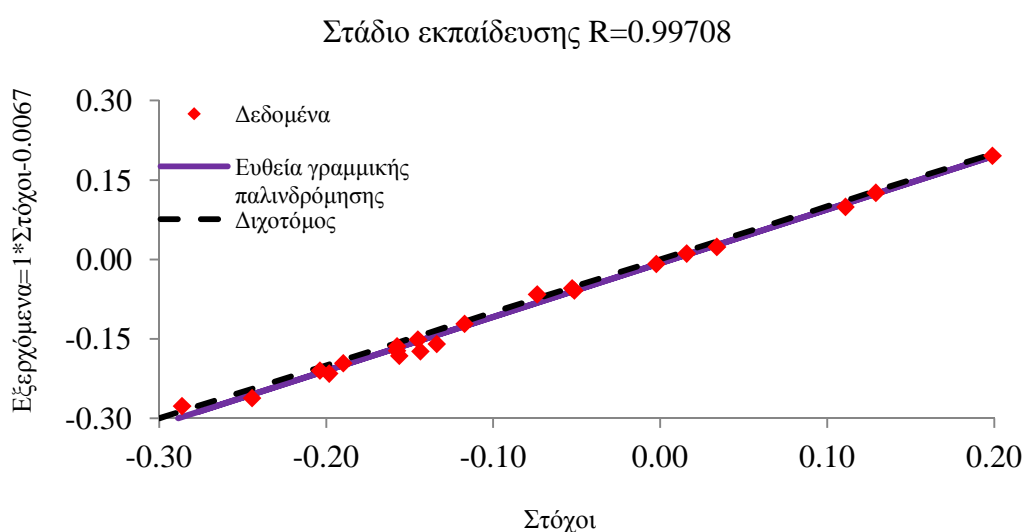
Σε αυτή την περίπτωση το ΤΝΔ έχει ξεπεράσει το βέλτιστο σημείο εκπαίδευσης. Έτσι ο βέλτιστος αριθμός κρυμμένων νευρώνων μπορεί να υπολογιστεί εφαρμόζοντας το δίκτυο πολλές φορές για ένα διάστημα αριθμών νευρώνων. Το σχήμα 6.5 απεικονίζει την απόδοση του νευρωνικού μοντέλου για διαφορετικούς

αριθμούς νευρώνων. Είναι φανερό ότι το RMS σφάλμα μειώνεται απότομα όσο ο αριθμός των νευρώνων είναι μικρός και αρχίζει να γίνεται πιο σταθερό για μεγαλύτερους αριθμούς. Βάσει των αποτελεσμάτων ο αριθμός των κρυμμένων νευρώνων επιλέχθηκε ίσος με 20 εφόσον περισσότεροι δεν αυξάνουν την ακρίβεια ενώ περιπλέκει την αρχιτεκτονική του δικτύου.

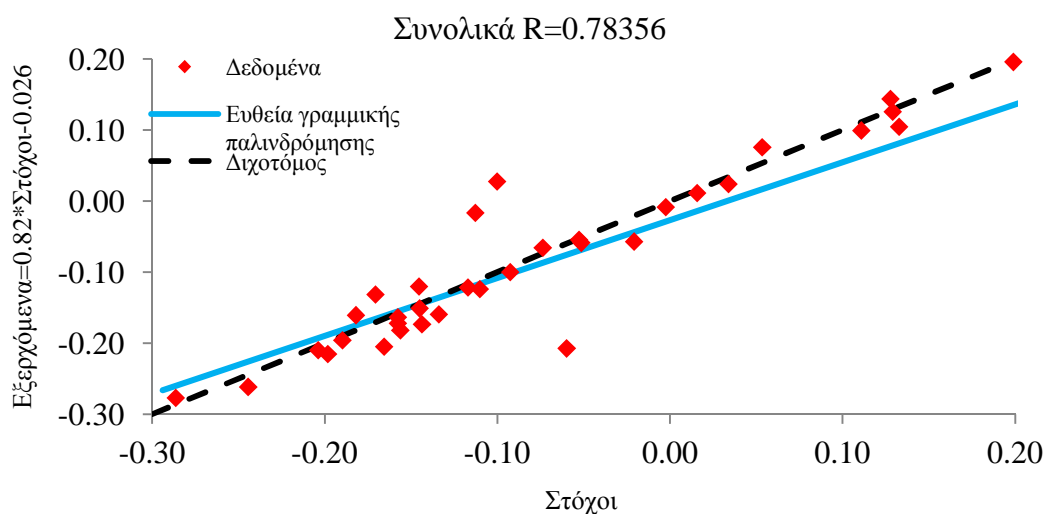


Διάγραμμα 6.2: Μεταβολή μέσου τετραγωνικού σφάλματος με την αύξηση των κρυμμένων νευρώνων.

Τα διαγράμματα 6.3.A-B απεικονίζουν την συσχέτιση των αποτελεσμάτων του ΤΝΔ με τους επιθυμητούς στόχους, δηλαδή τις πειραματικές μετρήσεις, για το στάδιο της εκπαίδευσης και της συνολικής εφαρμογής με συντελεστές $R=0.99$ και $R=0.78$ αντίστοιχα. Η αποδοτικότητα του μοντέλου βελτιώνεται με τη σύγκλιση της ευθείας της γραμμικής παλινδρόμησης (συμπαγής γραμμή) με τη διαγώνιο (διακεκομμένη).

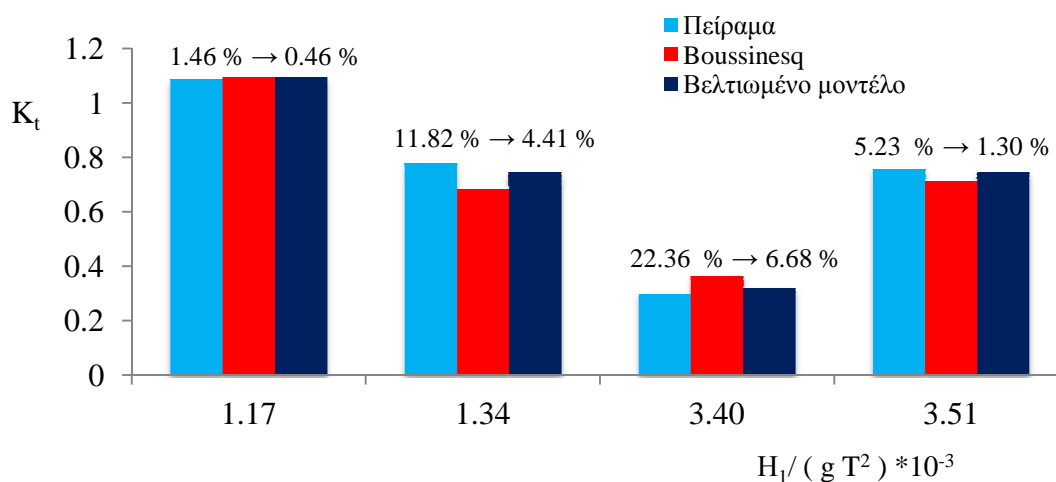


Διάγραμμα 6.3.A Συντελεστής συσχέτισης υπολογισμών του ΤΝΔ με τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα στο στάδιο της Εκπαίδευσης.



6.5 Επαλήθευση Βελτιωμένου Μοντέλου

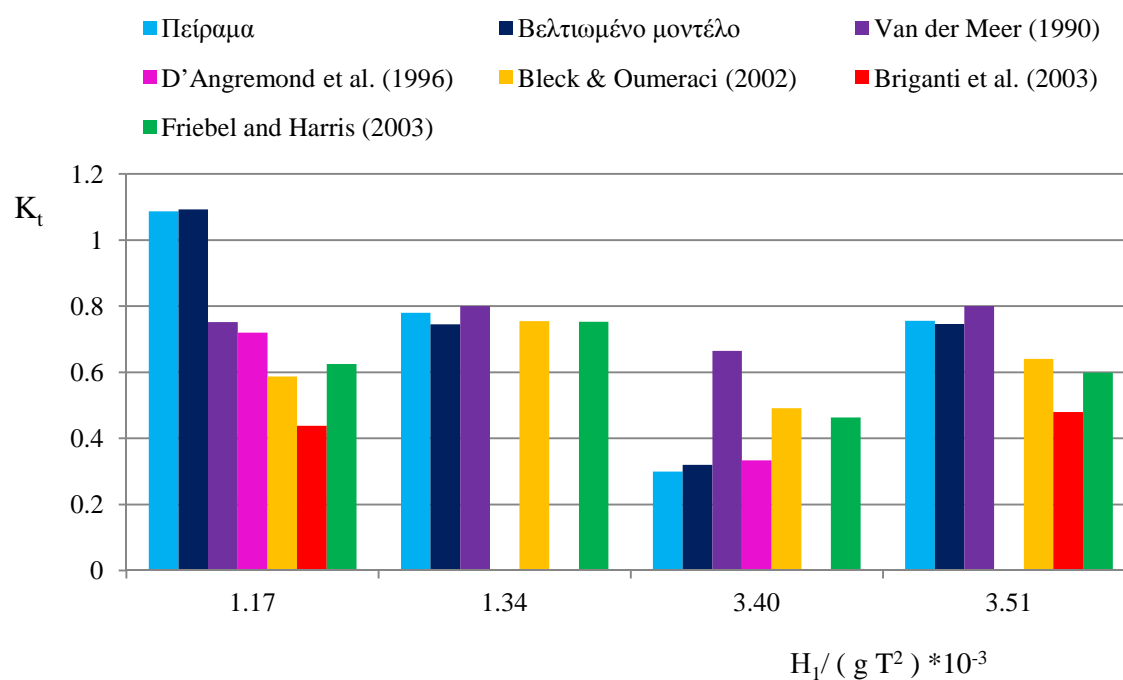
Το TNΔ ουσιαστικά βελτιώνει τις προβλέψεις του μαθηματικού μοντέλου Boussinesq προβλέποντας την απόκλιση από το πείραμα. Για την εξέταση του βελτιωμένου μοντέλου επιλέχθηκαν τέσσερις πειραματικές μετρήσεις με αρχικά ποσοστά απόκλισης 1.46 %, 5.23 %, 11.82 % και 22.36 %, τα οποία αντιπροσωπεύουν το εύρος απόκλισης των παραπάνω 32 προσομοιώσεων. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στο επόμενο ραβδόγραμμα (Διάγραμμα 6.4).



Διάγραμμα 6.4: Σύγκριση συντελεστή μετάδοσης K_t πειραματικών μετρήσεων, μοντέλου Boussinesq και βελτιωμένου μοντέλου.

Το βελτιωμένο μοντέλο συγκρίνεται με ημιεμπειρικές σχέσεις όπως αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 2 για την εκτίμηση του συντελεστή μετάδοσης.

Η σύγκριση των παραπάνω σχέσεων με το βελτιωμένο μοντέλο και τα πειραματικά δεδομένα απεικονίζονται στο Διάγραμμα 6.5 και παρατηρείται μια ακριβέστερη πρόβλεψη του συντελεστή μετάδοσης από το προτεινόμενο μοντέλο και για τις τρεις περιπτώσεις.



Διάγραμμα 6.5: Σύγκριση συντελεστή μετάδοσης K_t πειραματικών μετρήσεων, βελτιωμένου μοντέλου και εμπειρικών σχέσεων.

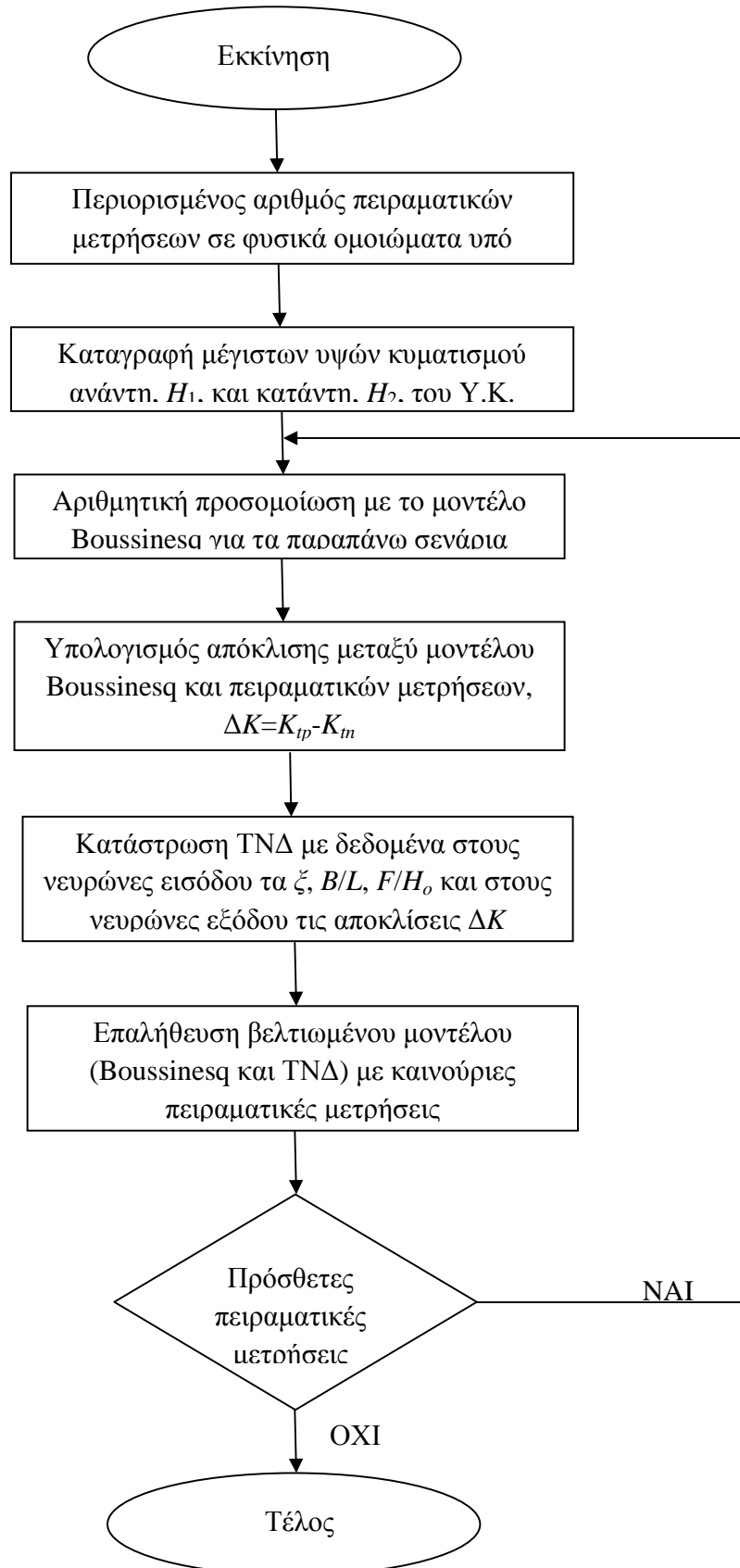
7 Συμπεράσματα - Προτάσεις

Στα πλαίσια της παρούσας προπτυχιακής εργασίας επιχειρήθηκε μια ολοκληρωμένη βιβλιογραφική επισκόπηση των εμπειρικών σχέσεων υπολογισμού του συντελεστή μετάδοσης, των αριθμητικών μοντέλων Boussinesq και των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων. Επιπλέον έγιναν πειράματα στο Εργαστήριο Λιμενικών Έργων για διαφορετικές γεωμετρικές διατάξεις ύφαλων κυματοθραυστών και μετρήθηκαν τα ύψη κυματισμού στην ανάντη και κατάντη παρειά. Τέλος, πραγματοποιήθηκε η κατάστρωση και επαλήθευση ενός βελτιωμένου μοντέλου που συνδυάζει τη γνώση από πειραματικές μετρήσεις με την εφαρμογή αριθμητικών ομοιωμάτων.

Τα κύρια συμπεράσματα της εργασίας συνοψίζονται στα εξής:

- Η σύνθετη προσομοίωση συνδυάζει δυο μεθόδους, της φυσικής προσομοίωσης και της αριθμητικής. Τα δυο μοντέλα αλληλοτροφοδοτούνται με πληροφορίες με στόχο την καλύτερη πρόβλεψη των κυματικών χαρακτηριστικών με παράλληλο κέρδος σε χρόνο και κόστος.
- Το ΤΝΔ που καταστρώθηκε δείχνει ικανοποιητική συμπεριφορά και βελτιώνει κατά πολύ την πρόβλεψη του μοντέλου Boussinesq για το συντελεστή μετάδοσης, πάνω από ύφαλο αδιαπέρατο κυματοθραύστη, παρά το σχετικά περιορισμένο μητρώο δεδομένων εισόδου.
- Το προτεινόμενο μοντέλο είναι σε θέση να υπολογίσει με μεγάλη ακρίβεια τον συντελεστή κυματικής μετάδοσης K_t σε μια καινούρια έρευνα χωρίς να χρειάζεται πρόσθετες πειραματικές μετρήσεις.

Στο επόμενο διάγραμμα ροής συνοψίζεται η πορεία που ακολουθήθηκε στην παρούσα έρευνα για την κατάστρωση ενός βελτιωμένου μοντέλου που συνδυάζει ταυτόχρονα τη γνώση από υπάρχουσες πειραματικές μετρήσεις, τις αριθμητικές προσομοιώσεις με το μοντέλο Boussinesq και την ευελιξία ενός ΤΝΔ, με στόχο την βέλτιστη πρόβλεψη του συντελεστή κυματικής K_t μετάδοσης πάνω από Υ.Κ.



Ορισμένες προτάσεις που θα μπορούσαν να οδηγήσουν προς την κατεύθυνση της βελτίωσης-εξέλιξής του είναι:

- Η αξιοποίηση περισσότερων πειραματικών δεδομένων,
- Η εισαγωγή περισσότερων παραμέτρων όπως το πορώδες και τέλος
- Ο προσδιορισμός των διαστημάτων εμπιστοσύνης για τις προβλέψεις του μοντέλου.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Κώδικας προγράμματος Fortran

Παρακάτω δίνεται ο κώδικας προγράμματος Fortran 90 (version 6.6) που συντάχθηκε για την επίλυση του μονοδιάστατου ομοιώματος (1D) Boussinesq.

```
implicit real*8 (a-h,o-z)
parameter (ijm=80000)
dimension u(ijm),c2(ijm),c3(ijm),zn(ijm)
dimension dnmax(ijm),h(ijm),dnmin(ijm)
dimension z(ijm),c(ijm),un(ijm),pxdd(8000,8000)
dimension d(ijm),zxf(ijm),zxx(ijm)
dimension dkm(ijm),sumx(ijm),ctb(ijm)
dimension zt(ijm),itb(ijm),dk(ijm),tmsr(80000)
sum=0.
tr=4.
ga=9.81
jv1=1
jv2=2
iad=134
data dt,dx,per,im,tend /.0025,.05,1.0,700,100/
data depth/.8/
den=0.002
nm=int(tend/dt)+1
do 10 i=1,im
d(i)=depth
zxf(i)=0.
10 continue
```

```

pi=3.141593
aleno=9.81*(per**2)/2.0/3.14
do 876 i=1,im
alen=aleno
39  alenp=alen
akapa=2*3.14/alenp
akd=akapa*d(i)
alen = aleno *tanh(akd)
dlen = abs(alen - alenp)
if (dlen.gt.0.0001) goto 39
c(i)=9.81*per/(2*3.14)*tanh(akd)
876  continue
iis=int(tr*d(jv2)/dx)
do iii=jv2+iis+1,im-iis-1
iksi=int(tr*d(jv2)/dx)
do i=iii-iksi,iii+iksi
x=abs((i-iii)*dx)
ddd=(d(iii)+d(i))/2.
pxd=pi*x/4./ddd
if (pxd.lt..001) pxd=.001
pxdd(iii,i)=9.81/pi/d(iii)*log(tanh(pxd))
end do
end do
cbrk=1.2
c_dm=0.01
itbrk=0
et1=0.35
et2=0.15
coeft=5.0
ddk=dx*0.05

```

```

do i=1,im
itb(i)=float(nm)
ctb(i)=0.35
end do

open (unit=10,file='tms.dat')
open (unit=11,file='station1.dat')
open (unit=13,file='station3.dat')
open (unit=14,file='station4.dat')
open (unit=15,file='station5.dat')

do i=1,40000
read (10,*) tmsr(i)
end do

t=0.0
n=0
ian=0
40 t=t+dt
n=n+1
ian=ian+1
iter=0
write (*,*) t,zn(631)
do 100 i=2,im-1
dd=(d(i)+z(i))
ux=dd*(u(i+1)-u(i))/dx
zx=(z(i+1)-z(i-1))/2./dx
dex=(d(i+1)-d(i-1))/2./dx
ddx=(zx+dex)*(u(i+1)+u(i))/2.
zn(i)=z(i)-dt*(ux)-dt*ddx
100 continue

iis=int(tr*d(jv2)/dx)
do iii=jv2+iis+1,im-iis-1

```

```

iksi=int(tr*d(jv2)/dx)
  do i=iii-iksi,iii+iksi
zx=(zn(i)-zn(iii)-zn(i-1)+zn(iii-1))/dx
zxk(i)=zx*pxdd(iii,i)
end do

  sumx(iii)=zxk(iii-iksi)+zxk(iii+iksi)+4.*zxk(iii-iksi+1)
do i=iii-iksi+1,iii+iksi-1,2
sumx(iii)=sumx(iii)+2.*zxk(i)
  sumx(iii)=sumx(iii)+4.*zxk(i+1)
end do

  sumx(iii)=sumx(iii)*dx/3.
  end do

do i=jv2+iis+1,im-iis-1
zx=(zn(i)-zn(i-1))/dx
zxf(i)=sumx(i)
end do

  do 120 i=3,im-2

H(I)=D(I)+Zn(I)
if (d(I).gt.DEN) THEN
HH=d(I)
ELSE
HH=H(I)
END IF

ux=(u(i+1)-u(i-1))/dx/2.

IF (d(i).gt.DEN) THEN
HX=(Zn(I)-Zn(I-1))/DX
DNX=(DK(I+1)-DK(I-1))/2./DX
DNX=0.
DKX=DNX*HX*U(I)/HH+2*DK(I)*HX*UX/HH+DNX*UX
ELSE

```

```

    DKX=(DK(I+1)-DK(I-1))/2./DX
DKX=0.
END IF

    DUX=DT*(U(I+1)-2*U(I)+U(I-1))/(DX**2)

    DISP1=DK(I)*DUX
DISP2=DT*DKX

    DISPX=DISP1+DISP2

    dispx=0.

    uu=(u(i+1)+u(i-1))/2.

    ux=(u(i+1)-u(i-1))/dx/2.

    uux=dt*uu*ux

        zx=(zn(i)-zn(i-1))/dx

        if (i.lt.jv2+iis+1.or.i.gt.im-iis-1) then

            un(i)=u(i)-dt*((c(i)**2)/d(i))*zx-uux+dispx

        else

            un(i)=u(i)-dt*9.81*zx+dt*zxf(i)-uux+dispx

        end if

120  continue

    do i=2,im-1

        ZBXP=(Zn(i+1)-Zn(i-1))/2./DX

        HH=D(i)+ZN(i)

        zt(i)=(zn(i)-z(i))/dt

        etmp=max(0.00001,abs(zbxp))

angle=0.

atmp=45.0/180*pi

iage=min(itb(i+1),itb(i-1))

iage=min(iage,itb(i))

        if(iage.LT.nm)then

            dp=max(ddk,d(i))

            trnt=coef*sqrt(dp/ga)

```

```

        et_tc=et1-(et1-et2)*float(ian-iage)*dt/trnt
        ctb(i)=max(et_tc,et2)
    else
        ctb(i)=et1
    endif
end do

do i=1,im
    dk(i)=0.
end do

do i=2,im-1
    HH=D(i)+Zn(i)
    zt(i)=(zn(i)-z(i))/dt
dp=max(ddk,HH)
et_tc=ctb(i)*sqrt(ga*dp)
tmp=zt(i)
if(tmp.LE.et_tc)then
    cbr=0.
    itb(i)=nm
else
    cbr=min(1.0,(tmp/et_tc-1.0))
    itbrk=1
    itb(i)=min(itb(i),ian)
endif
if(zn(i)+d(i).LT.ddk)then
    cbr=1.0
dp=max(ddk,abs(zn(i)))
endif
dk(i)=cbr*cbrk**2*dp*abs(zt(i))
enddo

do ii=1,2

```

```

do i=2,im-1
dk(i)=.6*dk(i)+.2*dk(i+1)+.2*dk(i-1)
end do

end do

ntend=int(tend/dt)

nbe=ntend-int(2*per/dt)

if(n.gt.nbe)then
sum=sum+un(100)*dt
else
end if

jva=jv1+iis+iad
jvb=jv2+iis+iad

alen=c(jva)*per

delta=.3

bta=80./((delta*alen)**2)

z1=tmsr(n)*.052

do i=1,im
chi=i*dx
chis=jvb*dx

fsource=exp(-bta*(chi-chis)**2)

zn(i)=zn(i)+z1*fsource
end do

write (11,*) t,zn(250)

write (13,*) t,zn(400)

write (14,*) t,zn(500)

write (15,*) t,zn(600)

do 665 i=1,10

ml1=i-10

ml2=-10.0

rm=exp((1.8**(ml1)-1.8**(ml2))*1.6)

```



```

    zn(i)=zn(i)/rm
665  un(i)=un(i)/rm
    do 675 i=20,10,-1
        ml1=10-i
        ml2=-10.
        rm=exp((1.8**(ml1)-1.8**(ml2))*1.6)
        zn(i)=zn(i)/rm
675  un(i)=un(i)/rm
c    north b.c.
    ims=im-20
    do 667 i=ims,im-10
        ml1=i-im+10
        ml2=-10.0
        rm=exp((1.8**(ml1)-1.8**(ml2))*1.6)
c    write (*,*) rm
        zn(i)=zn(i)/rm
667  un(i)=un(i)/rm
    ims1=im-10
    do 677 i=im,ims1,-1
        ml1=i-im
        ml2=-10
        rm=exp((1.8**(ml1)-1.8**(ml2))*1.6)
        zn(i)=zn(i)/rm
c        write (*,*) rm
677  un(i)=un(i)/rm
    q1=u(im)
    q2=u(im-1)
    ux=(q1-q2)/dx
    un(1)=un(2)
    un(im)=u(im)-dt*c(im)*ux

```

```

afl=.25
  rps=afl*per/dt
  irps=int(afl*per/dt)
  dif=abs(ian/rps-int(ian/irps))
  IF (dif.lt..01*dt) THEN
do i=jv2+iis-2,im-iis-1
  zn(i)=0.9*zn(i)+.05*zn(i-1)+.05*zn(i+1)
  un(i)=0.9*un(i)+.05*un(i-1)+.05*un(i+1)
  end do
  end if
do 405 i=1,im
  z(i)=zn(i)
405  u(i)=un(i)
  nper=int(2*per/dt)
  nendh=int(tend/dt-nper)
  if (n.ge.nendh) then

do 185 i=1,im
  if (zn(i).gt.dnmax(i)) then
    dnmax(i) = zn(i)
  else
    end if
  if (zn(i).lt.dnmin(i)) then
    dnmin(i) = zn(i)
  else
    end if
185  continue
  else
  end if
do 187 i=1,im

```

```

187  h(i)=dnmax(i)-dnmin(i)
      if (t.lt.tend) then
      goto 40
      else
      do i=1,im
      disx=(i)*dx
      zx=(zn(i)-zn(i-1))/dx
      end do
95  format (3f12.5)
      write (*,*) sum/(2.*per)
      stop
      endif
      end

```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β : Αποτελέσματα του αριθμητικού μοντέλου Boussinesq για όλα τα σενάρια.

Ύψη κυματισμού στον ανάντη (S1) και κατάντη (S2) σταθμό από τις πειραματικές μετρήσεις.

(Σενάριο 1)

Ταχύτητα κυματογεννήτριας	Βάθος (m)	Περίοδος κυματισμού (sec)	H ₁ (m)	H ₂ (m)
0	0.45	2.12	0.052	0.057
	0.50		0.056	0.039
	0.60		0.086	0.078
1	0.45	1.85	0.061	0.045
	0.50		0.068	0.080
	0.60		0.111	0.092
2	0.45	1.58	0.072	0.038
	0.50		0.102	0.077
	0.60		0.149	0.091

Ύψη κυματισμού στον ανάντη (S1) και κατόντη (S2) σταθμό από τις πειραματικές μετρήσεις.

(Σενάριο 2)

Ταχύτητα κυματογεννήτριας	Βάθος (m)	Περίοδος κυματισμού (sec)	H ₁ (m)	H ₂ (m)
0	0.45	2.12	0.043	0.030
	0.50		0.063	0.039
	0.60		0.080	0.078
1	0.45	1.85	0.062	0.025
	0.50		0.081	0.062
	0.60		0.097	0.073
2	0.45	1.58	0.074	0.027
	0.50		0.084	0.066
	0.60		0.132	0.073

Ύψη κυματισμού στον ανάντη (S1) και κατόντη (S2) σταθμό από τις πειραματικές μετρήσεις.

(Σενάριο 3)

Ταχύτητα κυματογεννήτριας	Βάθος (m)	Περίοδος κυματισμού (sec)	H ₁ (m)	H ₂ (m)
0	0.45	2.12	0.054	0.044
	0.50		0.059	0.041
	0.60		0.091	0.086
1	0.45	1.85	0.062	0.036
	0.50		0.077	0.069
	0.60		0.126	0.077
2	0.45	1.58	0.071	0.041
	0.50		0.095	0.077
	0.60		0.140	0.090

Ύψη κυματισμού στον ανάντη (S1) και κατόντη (S2) σταθμό από τις πειραματικές μετρήσεις.

(Σενάριο 4)

Ταχύτητα κυματογεννήτριας	Βάθος (m)	Περίοδος κυματισμού (sec)	H ₁ (m)	H ₂ (m)
0	0.45	2.12	0.050	0.043
	0.50		0.056	0.056
	0.60		0.087	0.073
1	0.45	1.85	0.066	0.032
	0.50		0.069	0.069
	0.60		0.114	0.085
2	0.45	1.58	0.073	0.023
	0.50		0.086	0.062
	0.60		0.156	0.097

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Παρακάτω δίνεται μια καταγραφή των δημοσιεύσεων, συγγραμμάτων, εργασιών και βιβλίων, στα οποία βασίστηκε η ανάπτυξη της παρούσας εργασίας, κυρίως της διεθνούς βιβλιογραφίας. Οι αναφορές ταξινομούνται αλφαβητικά.

- Abbott, M.B., Larsen, J., Madsen, P.A., Tao, J., 1983. Simulation of wave breaking and runup. In: Seminar on Hydrodynamics of waves in coastal areas, vol.7. Moscow, 146-149.
- Abbott, M.B., McCowan, A.D., Warren, I.R., 1984. Accuracy of short-wave numerical models. In: J. Hydr. Eng. 110 (10), 1287-1301.
- Abbott, M.B., Petersen, H.M., and Skovgaard, O., 1978. On the Numerical Modelling of Short-waves in Shallow Water, Journal of Hydraulic Research, 16, 3.
- Ahrens, J.P., 1987. Characteristics of Reef Breakwaters, Technical Report CERC-87-17, U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg.
- Allsop, NWH 1983. Low-crest Breakwaters, Studies in Random Waves, Proc Coastal Structures 1983, Arlington, Virginia, pp 94-107.
- Bleck, M., and Oumeraci, H., 2002. Hydraulic Performance of Artificial Reefs: Global and Local Description, Proc 28th Int. Conf. on Coastal Engineering, Cardiff, UK.
- Boussinesq, J., 1871. Theorie de L'intumescence Liquide Appelee Onde Solitaire ou de Translation se Propageant dans un Canal Rectangulaire. In: Comptes Rendus Acad. Sci. Paris, Vol 72, pp 755-759.
- Boussinesq, J., 1872. Theory des ondes et des remous qui se propagent le long d'un canal rectangulaire horizontal, en communiquant au liquid contenu dans ce canal des vitesses sensiblement pareilles de la surface au fond. In: Journal de Mathematiques Pures et Appliques Serie. 17, 55-108.

- Briganti, R., Van der Meer, J.W., Buccino, M., Calabrese, M., 2003 Wave transmission behind low crested structures,” Proc Coastal Structures, ASCE, Portland, Oregon, pp 580-592.
- Brocchini, M., Cherubini, P., Lovenitti, L., 1991. An extension of Boussinesq type model to the surf zone. In: Computer modeling in Ocean engineering, Arcilla, A.S., Pastor, M., Zienkiewicz, O.C., Schrefler, B.A. (eds.). Balkema, Rotterdam, 349-359.
- Brocchini, M., Drago, M., Lovenitti, L., 1992. The modeling of short waves in shallow waters: comparison of numerical models based on Boussinesq and Serre equations. In: Proceedings of the 23rd Coastal Conference, Venice, 76-88.
- CEM, Coastal Engineering Manual, 2008, In: <http://chl.erdc.usace.army.mil/cem> Last access: June 2010.
- Chester, W., 1968. Resonant oscillations of water waves. In: Proc. Royal Society A. 306, pp. 5-22.
- Chondros, M.K., Memos, C.D., Karambas T.V., 2009. A Boussinesq-type model incorporating breaking waves. In: Proceedings of the 33rd IAHR Congress, Vancouver.
- Coastal Engineering Manual 2004, CEM 2.01 Professional Edition, US Army Coefficient Formulae from Submerged Breakwater Physical Models.
- Copeland, G.J.M., 1985. A practical alternative to the mild-slope wave equation. In: Coastal Eng. 9, pp. 125-149.
- Daemen, IFR 1991. Wave Transmission at Low-Crested Structures, MSc Thesis
- Daemrich, K, and Kahle, W., 1985. Schutzwirkung von Unterwasser Wellen brechern unter dem Einfluss unregelmässiger seegangswellen, Technical Report, Franzius Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen, Report Heft 61 (in German).
- Daemrich, K., Mai, S., and Ohle, N., 2001. Wave Transmission at Rubble Mound Structures, First German-Chinese Joint Symposium on Coastal and Ocean Engineering, April 10-12 2002, Rostock, Germany.
- D'Angremond, K., Van der Meer, J.W., and De Jong, R.J., 1996. Wave Transmission at Low-crested Structures, Proc 25th Int. Conf. on Coastal Engineering, Orlando, Florida, 1996, pp. 2418-2426.
- Deigaard, R., 1989. Mathematical modeling of waves in the surf zone. In: Prog. Rep. 69. ISVA, Technical University, Lyngby Ser A 377, 331-348.

- Englund, F., 1981. A simple theory for weak hydraulic jumps. In: Progress report No. 54. Institute of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering, Technical University of Denmark, Lyngby.
- Engquist, B., Majda, A., 1977. Absorbing boundary conditions for the numerical simulation of waves. In: Math. Comp. 31, 629-651.
- Friebel, H.C, and Harris, L.E, (2003). Re-evaluation of Wave Transmission
- Gobbi M.F., Kirby J.T., 1999. Wave evolution over submerged sills: tests of a high-order Boussinesq model. In: Coastal Engineering 37_1999.57–96.
- Grunnet, N., Lohier, S., Deigaard, R., 2008. Proceedings of the 31st International Conference of Coastal Engineering, September, Hamburg.
- Hamm, L., Madsen, P.A., Peregrine, D.H., 1993. Wave transformation in the nearshore zone: a review. In: Coastal Eng. 21, 5-39.
- Haykin, Simon (1999). Neural Networks, A Comprehensive Foundation. Prentice Hall International, Inc, New Jersey
- Hearn, J.K, 1987. An analysis of stability of and wave modifications due to low crested, sacrificial breakwaters, MSc Thesis, University of Florida, UFL/COEL/MP-87-1.
- Horikawa, K., Kuo, C.T., 1966. A study on wave transformation inside surf zone. In: Proc., Int. Conf. Coastal Eng., ASCE, New York, 217–233.
- Ilachinski, Andrew (2001). Cellular Automata, A Discrete Universe. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- Israeli, M., Orszag, S.A., 1981. Approximation of radiation boundary conditions. In: J. Comp. Phys. 41, 115-135.
- Karambas, T.V., 1999. A unified model for periodic non linear dispersive wave in intermediate and shallow water. In: Journal of Coastal Research, Vol 15, No 1, pp. 128-139.
- Karambas, T.V., Koutitas, C., 1992. A breaking wave propagation model based on the Boussinesq equations. In: Coastal eng. 18, 1-19.
- Karambas, T.V., Memos, C.D., 2009. A Boussinesq model for nonlinear fully dispersive water waves. In: Journal of Waterw., Port, Coastal, and Ocean Engr. Vol.135, Number 5, pp.187-199.

- Karambas, T.V., Tozer, N.P., 2001. Breaking waves in the surf and swash zone. In: J. of Coastal Research.
- Kennedy, A.B., Chen, Q., Kirby, J.T., Dalrymple, R.A., 1999. Part 1. Boussinesq modeling of wave transformation, breaking, and run-up I: 1D. In: J. of Waterw., Port, Coastal, and Ocean Engr. January/February 2000.
- Kirby, J.T., Wei, G., 1994. Derivation and properties of a fully nonlinear model for weakly dispersive waves. In: Proceedings of IAHR Symposium: Waves-Physical and Numerical Modelling, Vancouver, 386-395.
- Larsen, J., Dancy, H., 1983. Open boundaries in short wave simulations – a new approach. In: Coastal Engineering 7, 285–297.
- Lee, C., Suh, K.D., 1998. Internal generation of waves for time-dependent mild-slope equations. In: Coastal Engineering, 34, pp. 35-57.
- Madsen P.A., Svendsen, I.A., 1983. Turbulent bores and hydraulic jumps. In: J. Fluid Mech. 129, 1-25.
- Madsen, P.A., 1981. A model for a turbulent bore. In: Series paper No. 28. Institute of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering, Technical University of Denmark, Lyngby.
- Madsen, P.A., Schäffer, H.A., Sørensen, O.R., 1997a. Surf zone dynamics simulated by a Boussinesq type model: part 1. Model description and cross-shore motion of regular waves. In: Coast. Eng. 32, 255– 287.
- Mei, C.C., LeMéhauté, B., 1966. Note on the equations of long waves over an uneven bottom. In: J. Geophys. Res. 71 (2), 393-400.
- Nwogu, O., 1993. Alternative form of Boussinesq equations for nearshore wave propagation. In: Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, vol 119, no. 6. pp. 618-638.
- Nwogu, O., 1996. Numerical prediction of breaking waves and currents with a Boussinesq model. In: Book of Abstracts, 25th Coastal Engineering Conference, Orlando, 216-217.
- Oumeraci, H., 2009. Composite modeling. 11 August 2009, HYDRALAB III, viewed 15 October 2010,
http://www.hydralab.eu/TA_publications.asp?by=documentLanguage&byway=desc#d.
 Overtopping of Impermeable Breakwaters, CERC Coastal Engineering

- Peregrine, D.H., 1967. Long waves on a beach. In: *Journal of Fluid Mechanics* 27, pp. 815-827.
- Powell, KA, and Allsop, NWH 1985. "Low-Crested Breakwaters, Hydraulic
- Radder, A.C., Dingemans, M.W., 1985. Canonical equations for almost periodic, weakly nonlinear gravity waves. In: *Wave Motion* 7, 473–485.
- Rubblemound Breakwaters, MSc Thesis, Queen's University, Ontario, Canada.
- Calabrese, M., Vicinanza, D., and Buccino, M., 2003. Low-crested and Submerged Breakwaters in Presence of Broken Waves, *HydroLab II Towards a Balanced Methodology in European Hydraulic Research*, Budapest, pp. 8/1-8/23.
- Schäffer, H.A., Deigaard, R., Madsen, P.A., 1992. A two dimensional surf zone model based on the Boussinesq equations. In: *Proceedings of the 23rd Coastal Engineering Conference on Coastal Engineering*, asce, 1057-1071.
- Schäffer, H.A., Madsen, P.A., Deigaard, R.A., 1993. A Boussinesq model for waves breaking in shallow water. In: *Coast. Eng.*, 20, 185–202..
- Seabrook, SR 1997. Investigation of the Performance of Submerged Rubblemound Breakwaters, MSc Thesis, Queen's University, Ontario, Canada.
- Seabrook, SR, and Hall, KR, 1998. Wave Transmission at Submerged Rubble Mound Breakwaters, *Proc 26th Int Conf on Coastal Engineering*, ASCE, pp 2000-2013.
- Seelig, WN 1980. Estimation of Wave Transmission Coefficients for Overtopping of Impermeable Breakwaters, *CERC Coastal Engineering Technical Aid* 80-7.
- Shore Protection Manual. 1984. 4th ed., 2 Vol. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, U.S. Government Printing Office, Washington, DC.
- Svendsen, I.A., 1984. Wave heights and set-up in a surf zone. In: *Coastal Eng.* 44, 1-12.
- Svendsen, I.A., Madsen, P.A., 1984. A turbulent bore on a beach. In: *J. Fluid Mech.* 148, 73-96.
- Tanaka, N., 1976. Effects of Submerged Rubblemound Breakwater on Wave
- Tao, J., 1983. Computation of wave runup and breaking on the beach. In: *Acta Oceanologica Sinica*, Beijing, 6 (5), 692-700 (in Chinese). *Technical Aid* 80-7.
- Transmission at Low-crested Structures, *Proc 25th Int Conf on Coastal Engineering*, Orlando, Florida, 1996, pp. 2418-2426.

- Tsutsui, S., Suzuyama, K., Ohki, K., 1998. Model equations of nonlinear dispersive waves in shallow water and an application of its simplified version to wave evolution on the step-type reef. In: Coastal Engineering Journal, 40, no 1, pp. 41-60.
- Van der Meer, J.W, 1990. Data on Wave Transmission due to Overtopping, Technical Report, Delft Hydraulics Report, No H986.
- Van den Boogaard, H.F.P., Gerritsen, H., Caires, S., van Gent, M.R.A., 2009. In: Proceedings of the 33rd IAHR Congress, Vancouver.
- Van der Meer, J.W., 1988. Rock Slopes and Gravel Beaches under Wave Attack, Ph.D. thesis, Delft University of Technology, Delft Hydraulics Report, No 396.
- Van der Meer, J.W., and Daemen, I.F.R., 1994. Stability and wave transmission at low crested rubble mound structures, J.Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, 1994, Vol 100, No 1, pp 1-19.
- Van der Meer, J.W., and d'Angremond, K.,1991. Wave transmission at lowcrested structures, Coastal structures and breakwaters, Thomas Telford, London, England, pp 25-42.
- Van der Meer, J.W., Briganti, R., Wang, B., and Zanuttigh, B.,2005.Wave transmission at low-crested structures, including oblique wave attack, Proc Int Conf on Coastal Engineering, ASCE, 2004, Lisbon, Portugal.
- Van Gent, M.R.A., van den Boogaard, H.F.P., Pozueta, B., Medina, J.R., 2007. In: Coastal Engineering. 54, 586-593.
- Veeramony, J., Svendsen, I.A., 2000. The flow in surf-zone waves. In: Coastal Engineering, 39, pp. 93-122.
- Wei, G., 1997. Simulation of water waves by Boussinesq models. In: Dissertation, University of Delaware, 202pp.
- Wei, G., Kirby, J.T., Sinha, A., 1999. Generation of waves in Boussinesq models using a source function model. In: Coast. Engrg., 36, 271–299.
- Wei, G., Kirby, T., 1995. Time-dependent numerical code for extended Boussinesq equations. In: Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, vol. 121, no. 5, pp. 251-261.
- Yu, K., Svendsen, I.A., 1996. A Boussinesq type breaking wave with vorticity. In: Book of abstracts, 25th Coastal engineering conference, Orlando, 166-167.

- Zelt, J.A., 1991. The run-up of nonbreaking and breaking solitary waves. In: *Coast. Eng.*, 15, 205–246.
- Αργυράκης, Πάνος (2001). *Τεχνητή Νοημοσύνη – Εφαρμογές*. Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.
- Βερναδάκης, Σ., 1990. Βαθμονόμηση Διώρυγας Κυματισμών Βαρύτητας Εργαστηρίου Λιμενικών Έργων ΕΜΠ. Διπλωματική εργασία, Εργαστήριο Λιμενικών Έργων ΕΜΠ, Αθήνα.
- Διαμαντάρας, Κ. (2007) *Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα*, Κλειδάριθμος
- Μακρής Χ., 2007. Μετάδοση Κυματισμού κατάντη Ύφαλου Κυματοθραύστη. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, ΔΠΜΣ, Σχ. Πολιτικών Μηχανικών, Βιβλιοθήκη Ζωγράφου.
- Ματσατσίνης Ν., *Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων*, Εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών, 2010