



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ &**  
**ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

Υπολογισμός του συντελεστή κυματικής μετάδοσης με χρήση νευρωνικών δικτύων & πειραματικών μετρήσεων.



**Θεοδώρα Χ. Πυρπυρή**

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:

**Βασιλική Κ. Τσουκαλά**, Επ. Καθηγήτρια ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2014



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

**Υπολογισμός του συντελεστή κυματικής  
μετάδοσης με χρήση νευρωνικών δικτύων &  
πειραματικών μετρήσεων.**

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

**Θεοδώρα Χ. Πυρπιρή**

dpyrpiri@hotmail.com

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:

**Βασιλική Κ. Τσουκαλά, Επ. Καθηγήτρια ΕΜΠ**

Αθήνα, Οκτώβριος 2014



## Ευχαριστίες

Με το πέρας αυτής της διπλωματικής εργασίας ολοκληρώνεται επίσημα ο κύκλος των προπτυχιακών μου σπουδών. Είμαι σίγουρη πως τα χρόνια που πέρασα στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών θα τα θυμάμαι για πάντα και θα τα αναπολώ.

Ως εκ τούτου θα ήθελα πρωτίστως να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την αμέριστη συμπαράσταση και υπομονή τους σε όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου καθώς και όλους τους φίλους μου που ήταν δίπλα μου στις όμορφες αλλά και στις δύσκολες στιγμές που όλοι μας συναντήσαμε στη διάρκεια των σπουδών μας. Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την επίκουρη καθηγήτρια του Ε.Μ.Π., κυρία Βασιλική Τσουκαλά για τη βοήθεια και τις πολύτιμες συμβουλές της κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας. Το συνεχές ενδιαφέρον που επέδειξε, με ενθάρρυνε να συνεχίσω με σταθερούς ρυθμούς, ενώ οι επισημάνσεις και οι διορθώσεις της ήταν καθοριστικές για την διαμόρφωση της παρούσας έρευνας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κύριο Μιχάλη Χονδρό, υποψήφιο διδάκτορα του ΕΜΠ καθώς και την κυρία Βασιλική Κατσαρδή, Λέκτορα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας για τη συστηματική καθοδήγησή τους και το συνεχές ενδιαφέρον που μου παρείχαν για την εξέλιξη της εργασίας αυτής.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη φίλη μου Έφη Μόσχου και τον ξάδελφό μου Χάρη Μερτή, για τη συνεισφορά τους στη διεκπεραίωση αυτής της εργασίας.

Θεοδώρα Πυρπιρή

Αθήνα

Οκτώβριος 2014



## Περιεχόμενα

<b>Περίληψη</b> .....	xι
<b>Abstract</b> .....	xiii
<b>1.Εισαγωγή</b> .....	1
1.1 Αντικείμενο της εργασίας .....	1
1.2 Πρωτότυπα σημεία μέσω νευρωνικών δικτύων .....	2
1.3 Διάρθρωση εργασίας.....	2
<b>2.Αγωγοί Ανανέωσης Υδάτων</b> .....	5
2.1 Γενικά περί αγωγών ανανέωσης.....	5
2.2 Αγωγοί ανανέωσης στον ελλαδικό χώρο .....	8
2.3 Φαινόμενο της κυματικής μετάδοσης και εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού .....	10
2.3.1 Κυματικά φαινόμενα λόγω του αγωγού ανανέωσης.....	10
2.4 Πειραματική προσομοίωση μετάδοσης των κυματισμών διαμέσου οπών και αγωγών ανανέωσης.....	12
2.4.1 Μετρήσεις σε φυσικά προσομοιώματα .....	12
2.4.2 Μετασχηματισμοί κυματισμών κατά τη διέλευσή τους μέσα από αγωγό ανανέωσης.....	14
<b>3.Περιγραφή των Πειραματικών Διατάξεων</b> .....	17
3.1 Διατιθέμενα στοιχεία .....	17
3.2 Πειραματικές μετρήσεις σε διδιάστατη διώρυγα δοκιμών .....	17
3.2.1 Περιγραφή της πειραματικής εγκατάστασης .....	17
3.2.2 Διαδικασία μετρήσεων κυμάτων.....	20
3.2.3 Βαθμονόμηση διώρυγας και μετρητών.....	20
3.2.4 Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων.....	21
3.2.5 Συμπεράσματα από τη μελέτη των πειραματικών διατάξεων .....	25

3.3 Πειραματικές μετρήσεις σε τριδιάστατο φυσικό ομοίωμα .....	26
3.3.1 Περιγραφή της πειραματικής εγκατάστασης .....	26
3.3.2 Διαδικασία μετρήσεων κυμάτων.....	29
3.3.3 Βαθμονόμηση διώρυγας και μετρητών.....	29
3.3.4 Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων.....	29
3.3.5 Συμπεράσματα από τη μελέτη των πειραματικών διατάξεων .....	31
3.4 Δεδομένα $K_i$ για την κατάστροψη του ΤΝΔ.....	31
<b>4. Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα .....</b>	<b>37</b>
4.1 Γενικά περί Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων .....	37
4.1.1 Από τα Βιολογικά στα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα.....	37
4.1.2 Ιδιότητες Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων .....	40
4.2 Τύποι Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων .....	42
4.2.1 Αρχιτεκτονική Νευρωνικών Δικτύων.....	42
4.2.2 Αλγόριθμοι εκπαίδευσης.....	43
4.3 Παράμετροι βελτιστοποίησης Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων .....	44
4.3.1 Αρχικοποίηση Βαρών.....	44
4.3.2 Τερματισμός Εκπαίδευσης.....	45
4.3.3 Επιλογή Συνόλου Εκπαίδευσης, Επαλήθευσης και Γενίκευσης .....	46
4.4 Σχεδίαση Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου .....	47
4.4.1 Προεπεξεργασία Δεδομένων .....	48
4.5 Εφαρμογές Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων .....	49
<b>5. Κατάστροψη και Εφαρμογή Προτεινόμενου Μοντέλου .....</b>	<b>51</b>
5.1 Σύνθετη προσομοίωση.....	51
5.2 Επιλογή μεταβλητών εισόδου και εξόδου.....	54
5.3 Εφαρμογή Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων πρόσθιας τροφοδότησης .....	55
5.3.1 Κατασκευή ΤΝΔ- με βάση τον εισερχόμενο κυματισμό, όπως μετράται από τον πλησιέστερο στην κυματογεννήτρια μετρητή .....	56



5.3.2 Κατασκευή TNA- με βάση τον εισερχόμενο κυματισμό, όπως μετράται από τον πλησιέστερο στο έργο μετρητή.....	63
5.4 Επαλήθευση προτεινόμενου μοντέλου .....	68
5.4.1 Σύγκριση TNA- $K_{t1}$ .....	68
5.4.2 Σύγκριση TNA- $K_{t2}$ .....	70
<b>6.Συμπεράσματα και Προτάσεις .....</b>	<b>73</b>
6.1 Συμπεράσματα από την εφαρμογή της εμπειρικής σχέσης.....	73
6.2 Συμπεράσματα από την εφαρμογή του προτεινόμενου μοντέλου.....	74
6.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα .....	75
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>77</b>



## Κατάλογος Σχημάτων

**Σχήμα 2.1** Διάγραμμα αλληλεπίδρασης λιμένα – περιβάλλοντος (Πηγή: ΟΛΘ, ΑΕ).

**Σχήμα 2.2** Διαμόρφωση ανεμογενούς ρεύματος σε περιορισμένο πεδίο (Πηγή: Καραμπάς, 2004).

**Σχήμα 2.3** Ομοίωμα κυματοθραύστη (με κατακόρυφο μέτωπο) με αγωγό ανανέωσης.

**Σχήμα 2.4** Παραδείγματα τριών λιμενικών έργων με αγωγούς ανανέωσης στην Ελλάδα (Πηγή: Tsoukala and Moutzouris, 2009).

**Σχήμα 2.5** Απεικόνιση αγωγού ανανέωσης τοποθετημένου σε κυματοθραύστη (Πηγή: Tsoukala and Moutzouris, 2009).

**Σχήμα 2.6** Σχηματική απεικόνιση σε κάτοψη και τομή των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στους εμπειρικούς τύπους.

**Σχήμα 3.1** Φωτογραφία της διώρυγας κυματισμών βαρύτητας «Δημήτρης Κοιλάκος» (Πηγή: Κουρής, 2010).

**Σχήμα 3.2** Σκαρίφημα διάταξης αγωγού ανανέωσης (Πηγή: Γιαννάκη, 2005).

**Σχήμα 3.3** Θέση μετρητών στη διώρυγα κυματισμών για κυματοθραύστη με κατακόρυφο μέτωπο – πλάγια όψη.

**Σχήμα 3.4** Ενδεικτικές χρονοσειρές ανύψωσης ελεύθερης επιφάνειας του πειράματος A25.

**Σχήμα 3.5** Φυσικό προσομοίωμα κυματοθραύστη με κατακόρυφο μέτωπο και αγωγό ανανέωσης χωρίς άνω όριο (Πηγή: Τσουκαλά κ.ά., 2013).

**Σχήμα 3.6** Σκαρίφημα πειραματικής διάταξης πειραματικών μετρήσεων στη δεξαμενή (Πηγή: Τσουκαλά κ.ά., 2013).

**Σχήμα 3.7** Ενδεικτικές χρονοσειρές ανύψωσης ελεύθερης επιφάνειας των πειραμάτων 26 και 28 (Πηγή: Τσουκαλά κ.ά., 2013).

**Σχήμα 4.1** Βιολογικό δίκτυο ανάλογο με το Τεχνητό (Πηγή: Πλέρου, 2012).

**Σχήμα 4.2.** Τεχνητός Νευρώνας (Πηγή: Γιαννακάκης, 2003).

**Σχήμα 4.3** Συναρτήσεις ενεργοποίησης.

**Σχήμα 4.4** Αρχιτεκτονική ΤΝΔ (Πηγή: Γιαννακάκης, 2003).

**Σχήμα 5.1** Διάγραμμα ροής σύνθετης προσομοίωσης.

**Σχήμα 5.2.** Αρχιτεκτονική Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου.

**Σχήμα 5.3** Μεταβολή μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE), με την αύξηση των κρυμμένων νευρώνων.

**Σχήμα 5.4** Αλγόριθμος εκπαίδευσης `trainlm` για το ΤΝΔ.

**Σχήμα 5.5** Συντελεστής συσχέτισης του ΤΝΔ κατά την Εκπαίδευση.

**Σχήμα 5.6** Συντελεστής συσχέτισης του ΤΝΔ κατά τη Συνολική Εφαρμογή.

**Σχήμα 5.7** Συντελεστής συσχέτισης του ΤΝΔ με δεδομένα τους Κρυμμένους Νευρώνες.

**Σχήμα 5.8** Κατασκευή Νευρωνικού Δικτύου Πρόσθιας Τροφοδότησης (Feed Forward  $nn$ ).

**Σχήμα 5.9** Συντελεστής συσχέτισης του ΤΝΔ κατά την Εκπαίδευση.

**Σχήμα 5.10** Συντελεστής συσχέτισης του ΤΝΔ κατά τη Συνολική Εφαρμογή.

**Σχήμα 5.11** Σύγκριση του συντελεστή μετάδοσης  $K_{11}$  των πειραματικών μετρήσεων, του προτεινόμενου μοντέλου και της εμπειρικής σχέσης Tsoukala *et al.* (2010).

**Σχήμα 5.12** Σύγκριση του συντελεστή μετάδοσης  $K_{12}$  των πειραματικών μετρήσεων, του προτεινόμενου μοντέλου και της εμπειρικής σχέσης Tsoukala *et al.* (2010).

## Κατάλογος Πινάκων

**Πίνακας 3.1** Χαρακτηριστικά των πειραματικών διατάξεων.

**Πίνακας 3.2** Απεικόνιση του εξαγόμενου αρχείου αποτελεσμάτων, από το πρόγραμμα H.R. WaveData, για την ανάλυση των πειραματικών μετρήσεων.

**Πίνακας 3.3** Κώδικας MatLab για την παραγωγή των επιθυμητών χρονοσειρών.

**Πίνακας 3.4** Χαρακτηριστικά των πειραματικών διατάξεων.

**Πίνακας 3.5** Θέσεις μετρητών στην πειραματική διάταξη.

**Πίνακας 3.6** Απεικόνιση του εξαγόμενου αρχείου αποτελεσμάτων, από το πρόγραμμα H.R. WaveData, για την ανάλυση των πειραματικών μετρήσεων.

**Πίνακας 3.7** Μέσο ύψος κύματος  $H_{mean}$ , στο διδιάστατο φυσικό ομοίωμα.

**Πίνακας 3.8** Μέσο ύψος κύματος  $H_{mean}$ , στο τριδιάστατο φυσικό ομοίωμα.

**Πίνακας 3.9.α** Συντελεστής κυματικής μετάδοσης  $K_{t1}$  στο διδιάστατο φυσικό ομοίωμα.

**Πίνακας 3.9.β** Συντελεστής κυματικής μετάδοσης  $K_{t1}$  στο τριδιάστατο φυσικό ομοίωμα.

**Πίνακας 3.10.α** Συντελεστής κυματικής μετάδοσης  $K_{t2}$  στο διδιάστατο φυσικό ομοίωμα.

**Πίνακας 3.10.β** Συντελεστής κυματικής μετάδοσης  $K_{t2}$  στο τριδιάστατο φυσικό ομοίωμα.

**Πίνακας 5.1** Δεδομένα εισόδου και εξόδου στο  $TND - K_{t1}$  για το διδιάστατο ομοίωμα.

**Πίνακας 5.2** Δεδομένα εισόδου και εξόδου στο  $TND - K_{t1}$  για το τριδιάστατο ομοίωμα.

**Πίνακας 5.3** Δεδομένα εισόδου και εξόδου στο  $TND - K_{t2}$  για το διδιάστατο ομοίωμα.

**Πίνακας 5.4** Δεδομένα εισόδου και εξόδου στο  $TND - K_{t2}$  για το τριδιάστατο ομοίωμα.

**Πίνακας 5.5** Δεδομένα που δεν χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του  $TND - K_{t1}$ .

**Πίνακας 5.6** Τυχαία επιλογή δεδομένων, από τα ήδη χρησιμοποιούμενα, για την Επαλήθευση.

**Πίνακας 5.7** Δεδομένα που δεν χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του ΤΝΔ – Κt<sub>2</sub>.

**Πίνακας 5.8** Τυχαία επιλογή δεδομένων, από τα ήδη χρησιμοποιούμενα, για την Επαλήθευση.

## Πίνακας Συμβόλων

*Αναφορικά με τα Πειράματα και τους Εμπειρικούς Τύπους*

$H_t$	:το μεταδιδόμενο ύψος κύματος κατάντη
$H_i$	:το ύψος του προσπίπτοντος κυματισμού
$K_t = \frac{H_t}{H_i}$	:ο συντελεστής κυματικής μετάδοσης
$h_s$	:το μισό του ύψους του αγωγού ανανέωσης
$l$	:το μήκος του αγωγού ανανέωσης
$b$	:το πλάτος του αγωγού ανανέωσης
$h$	:το ύψος του αγωγού ανανέωσης
$\alpha$	:η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού
$\xi = \tan\varphi / \sqrt{2\pi H_i / gT^2}$	:ο αριθμός Iribarren
$d$	:το βάθος του νερού
$\mu = \sin\varphi / \sqrt{2\pi H_i / gT^2}$	:μία αδιάστατη παράμετρος
$h_f$	:η απόσταση του πυθμένα του αγωγού ανανέωσης από τον πυθμένα της θάλασσας στα ανάντη
$P_i$	:μετρητές (probes)

*Αναφορικά με τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΤΝΔ)*

$R$	:ο συντελεστής παλινδρόμησης (Regression)
$x_i \quad i=1,2, \dots, p$	:σύναψη εισόδων του ΤΝΔ

$w_i \quad i=1,2,\dots,p$  : συντελεστές βάρους εισόδων του ΤΝΔ

$\theta$  : πόλωση - επιπλέον είσοδος νευρώνα

$u = \sum_{i=1}^p w_i x_i - \theta$  : ολικό άθροισμα νευρώνα

$y = f(u)$  : η έξοδος του ΤΝΔ



## Περίληψη

Η παράκτια ζώνη, αποτελεί το συνδετικό κρίκο μεταξύ του οικοσυστήματος της ξηράς και της θάλασσας και ταυτόχρονα μία ζώνη εύθραυστης ισορροπίας για τη συνέχειά τους, η οποία συχνά διαταράσσεται από τις διάφορες εμπορικές ή τουριστικές δραστηριότητες. Πιο συγκεκριμένα, οι λιμενολεκάνες αποτελούν το πιο ευαίσθητο σημείο της ζώνης αυτής, αφού στο εσωτερικό τους αναπτύσσονται όλες αυτές οι δραστηριότητες. Σημαντικό λοιπόν ζήτημα, για τον ορθό σχεδιασμό ενός λιμενικού έργου, αποτελεί η εξασφάλιση της καλής ποιότητας του νερού εντός της λιμενολεκάνης με κατασκευές χαμηλού κόστους και λειτουργίας. Συνηθέστερη μέθοδο λοιπόν, για την ταχύτερη ανακυκλοφορία των υδάτων, αποτελεί η διαμόρφωση αγωγών ανανέωσης των υδάτων, επί των έργων προστασίας του λιμένα, λόγω της απλότητας της κατασκευής τους και του χαμηλού κόστους συντήρησής τους.

Στην παρούσα εργασία, υπολογίζεται ο συντελεστής κυματικής μετάδοσης  $K_t$ , διά μέσου ενός αγωγού ανανέωσης, τοποθετημένου στο κέντρο ενός κυματοθραύστη και με το μέσο του να βρίσκεται στη στάθμη ηρεμίας ύδατος, με τη χρήση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (ΤΝΔ) και πειραματικών μετρήσεων. Ο συντελεστής  $K_t$ , υπολογίζεται για δύο περιπτώσεις: α) για θεωρούμενο προσπίπτοντα κυματισμό, τον παραγόμενο κυματισμό, όπως αυτός καταγράφεται κοντά στον κυματιστήρα παραγωγής κυματισμών και β) για προσπίπτοντα κυματισμό, τον κυματισμό ο οποίος καταγράφεται αμέσως ανάντη του αγωγού ανανέωσης. Πιο συγκεκριμένα, επεξεργάστηκαν ήδη πραγματοποιημένες πειραματικές μετρήσεις του ύψους του κυματισμού ανάντη και κατάντη του κυματοθραύστη με αγωγό ανανέωσης στο μέσο του, στη διδιάστατη διώρυγα δοκιμών του Εργαστηρίου Λιμενικών Έργων (ΕΛΕ), στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο και συμπληρώθηκαν από όμοιες μετρήσεις πειραμάτων σε τριδιάστατο φυσικό ομοίωμα στο ΕΛΕ. Τα εισερχόμενα κυματικά χαρακτηριστικά και η γεωμετρία των αγωγών ανανέωσης των δύο πειραματικών ομάδων, λειτούργησαν ως δεδομένα εισόδου για την κατάστρωση του ΤΝΔ. Στόχος των παραπάνω είναι η βελτιστοποίηση ενός νέου μοντέλου, ώστε να καθίσταται ακριβής η πρόβλεψη του συντελεστή κυματικής μετάδοσης  $K_t$ , σε κάθε νέα περίπτωση. Επιπλέον, ο συντελεστής  $K_t$  υπολογίζεται από την ήδη υπάρχουσα εμπειρική σχέση Tsoukala *et al.* (2010), που αφορά σε έργο με κατακόρυφο μέτωπο.

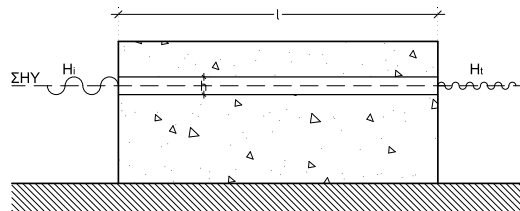
Το νέο προτεινόμενο μοντέλο τελικά επαληθεύεται στην πρόγνωση του συντελεστή μετάδοσης με νέες πειραματικές μετρήσεις και συγκρίνεται με αυτόν όπως προκύπτει από την εμπειρική σχέση, παρουσιάζοντας τελικά καλύτερη απόδοση.

Στην περίπτωση που το μοντέλο βελτιωθεί και ενισχυθεί με καινούρια πειραματικά δεδομένα, θα είναι δυνατόν με βάση αυτό, να προβλέπεται με μεγάλη αξιοπιστία ο συντελεστής  $K_t$ , σε διαφορετικές περιπτώσεις (διαφορετικές γεωμετρίες κυματοθραύστη ή αγωγού ανανέωσης, διαφορετική γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού κλπ.). Επιπλέον, θα προβλέπονται επαρκώς τα χαρακτηριστικά του κυματισμού εντός της λιμενολεκάνης και με την κατάλληλη διαμόρφωση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των αγωγών ανανέωσης, δεν θα υπερβαίνουν τα επιθυμητά όρια.

## Abstract

### 1.Introduction

Designing a harbor does not require only adequate knowledge of how to build a stable breakwater, but also the hydrodynamic field in the study area and the bad effects of the upcoming activities that will take place in this, may cause. The problem may become even greater, because of the reduction of the wave disturbance, that a breakwater provokes. The placement of flushing culverts across the breakwaters is a simple and convenient method, used in order to provide the periodic exchange of the harbor's basin water, which improves the water quality. In the present study, an application of composite modeling is presented, for the wave transmission through flushing culverts. Specifically, experimental measurements are used and an Artificial Neural Network (ANN) is structured for precisely forecasting the transmission coefficient of this proposed model.



**Figure 1** Sketch of the breakwater with a flushing culvert.

### 2.Experimental Data

Measurements were obtained from experiments that took place in a 2D and a 3D flume at the Laboratory of Harbor Works, at National Technical University of Athens, equipped with a flap – type wave generator. The experimental layouts incorporated a vertical front slope

following by a flushing culvert across the breakwater with a variety of geometrical characteristics. The characteristics are shown in Table 2.1 and Table 2.2.

**Table 2.1** Experimental data in 2D flume.

Flushing culverts dimensions				
a/a	h (cm)	l (cm)	b (cm)	$\phi$ (°)
A	12	50	18	90
B	12	50	24	90

**Table 2.2** Experimental data in 3D flume.

Flushing culverts dimensions				
a/a	h (cm)	l (cm)	b (cm)	$\phi$ (°)
1.1	10	86	10	90
2.1	10	86	8,5	90

Water surface elevation time series were measured using resistance type wave probes along the flume. Both geometrical characteristics and the incident wave height, are used as input data for the ANN.

### 3. Artificial Neural Network

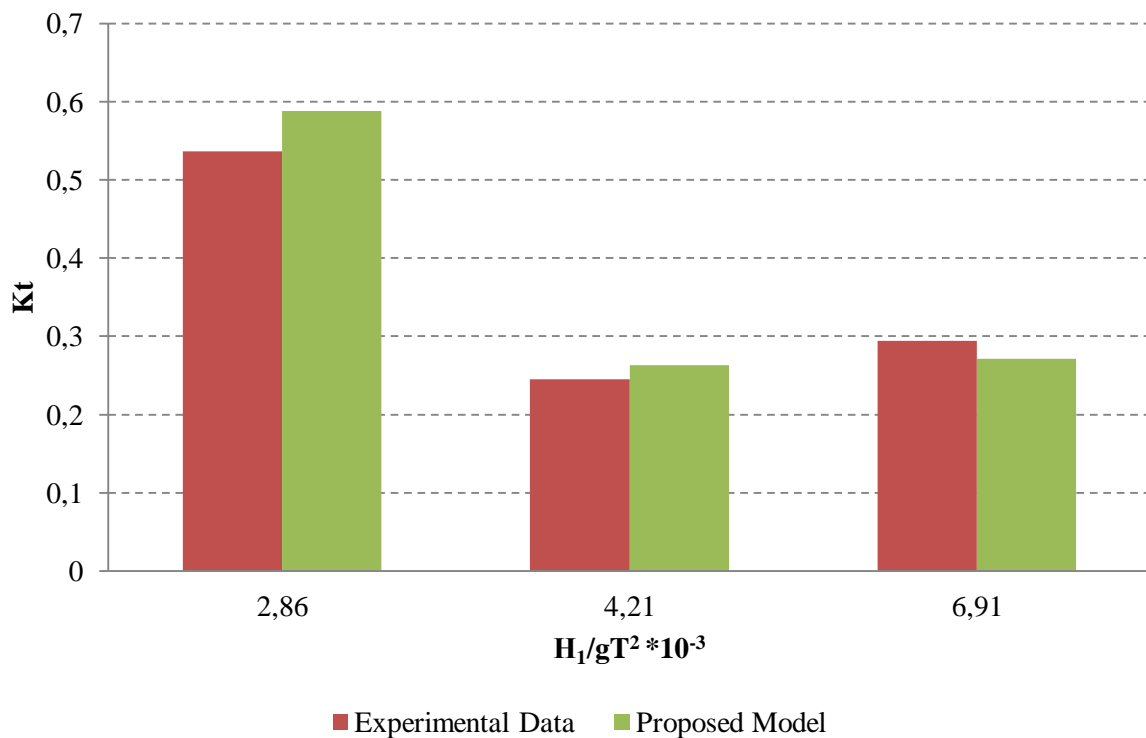
An ANN can be defined as a mathematical model tending to save empirical knowledge and make it available for applications. An ANN simulates the structure of a biological brain but also functional aspects related to knowledge storage. In the present study, a forward – feeding type of ANN is used, to produce high order statistical terms.

### 4. Verification of the Model and Results

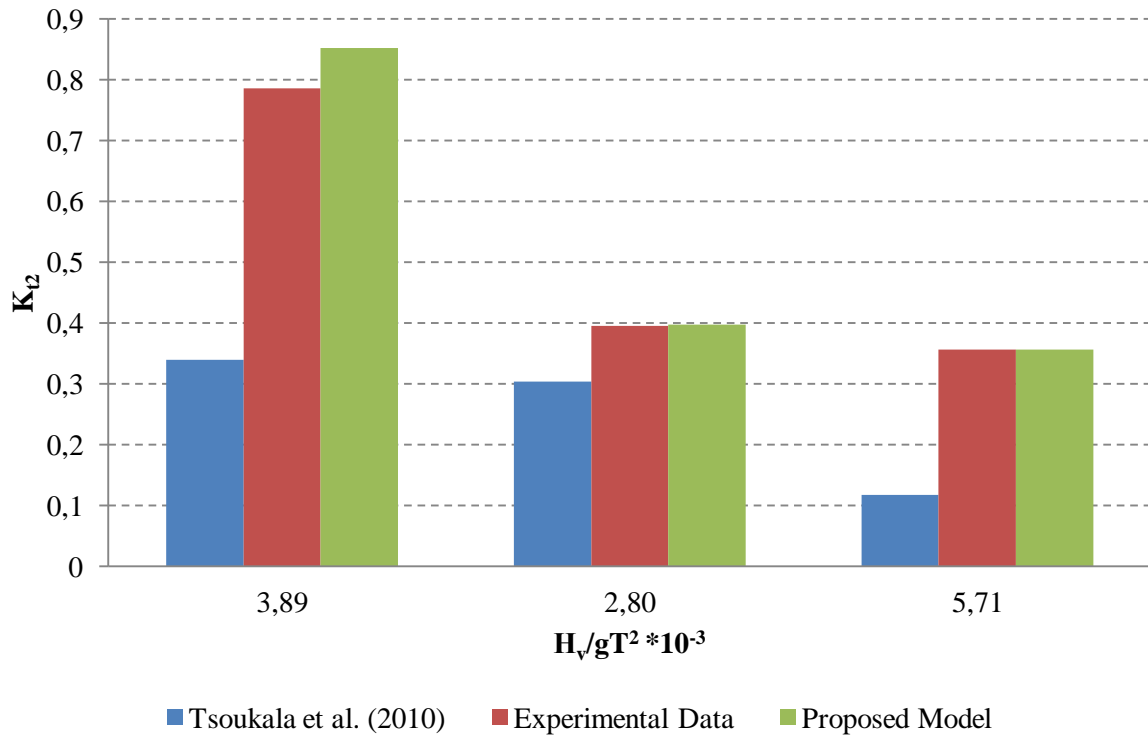
The input data that include in the ANN consist of  $\vec{F} = \left( \frac{h_s}{H_i}, \frac{l}{gT^2}, \frac{b}{H_i} \right)$ . The value of the transmission coefficient based on experimental data and is estimated for two different cases:  $K_{tl}$  – the incident wave height is based on the measurement that derived from the closest to

the wave generator probe and  $K_{t2}$  – the incident wave is based on the measurement that derived from the closest to the breakwater probe. So, to separated ANNs are made with different output data ( $K_{t1}$ ,  $K_{t2}$ ). In the following figures the proposed models are compared with the experimental results giving the transmission coefficient. The second proposed model, which is referring to  $K_{t2}$ , is also compared with the empirical relationship Tsoukala *et al.* (2010) proposed the following expression, for flushing culvert across a vertical front slope breakwater:

$$K_t = \frac{H_t}{H_i} = \left( 0,135 \frac{b}{H_i} + 0,048 \frac{2h_s}{H_i} 0,030 \frac{h_f}{H_i} 0,026 \frac{d}{H_i} 0,036 \frac{l}{H_i} \right) * \mu^{-0,681} \quad (4.1)$$



**Figure 4.1** Comparison of  $K_t$  results by Experimental Data and the Proposed Model –  $K_{t1}$ .



**Figure 4.2** Comparison of  $K_t$  results by empirical formula; Experimental Data and the Proposed Model –  $K_{t2}$ .

## 5. Conclusions

The ANNs that derived from this study seem to be reliable despite the limitation of the available experiment data. Also, the second model showed an improvement in the behavior in comparison with the empirical formula. Future research should focus on obtaining further experimental data, which could lead in improving the models' accuracy.

# 1.Εισαγωγή

## 1.1 Αντικείμενο της εργασίας

Συνήθως κατά το σχεδιασμό λιμενικών έργων δίνεται έμφαση μόνο στην ευστάθεια των έργων, χωρίς να διερευνάται η δυνατότητα ανανέωσης των υδάτων, με αποτέλεσμα την ποιοτική υποβάθμιση των υδάτων, λόγω των λειτουργιών και δραστηριοτήτων που λαμβάνουν χώρα εντός του έργου. Ωστόσο οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις θαλάσσιων κατασκευών και η επίδρασή τους στην ποιότητα των υδάτων, έχουν αποκτήσει ένα διαρκώς αυξανόμενο ενδιαφέρον. Διάφοροι μέθοδοι όπως η διάνοιξη οπών ή η κατασκευή αγωγών στα εξωτερικά λιμενικά έργα, επιτρέπουν τη μετάδοση των εξωτερικών υδάτων στο εσωτερικό, εξασφαλίζοντας την επαρκή ανανέωσή τους, εντός της λιμενολεκάνης.

Για το βέλτιστο σχεδιασμό των διαστάσεων του αγωγού ανανέωσης, είναι απαραίτητη η γνώση των κυματικών χαρακτηριστικών (ύψος κύματος και περίοδος) στην υπήνεμη και την προσήνεμη πλευρά του αγωγού. Για την καλύτερη κατανόηση όλων των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή γύρω από αυτούς, κατασκευάζονται φυσικά προσομοιώματα ώστε να αναπαρασταθεί το φυσικό φαινόμενο υπό κλίμακα. Η προσέγγιση αυτή όμως, είναι χρονοβόρα και δαπανηρή. Για το λόγο αυτό, επιχειρήθηκε κατά το παρελθόν (Tsoukala and Moutzouris, 2009; Στάμου κ.ά., 2008; Tsoukala *et al.*, 2010) η ανάπτυξη εμπειρικών σχέσεων, δηλαδή εξισώσεων που αποτυπώνουν το αποτέλεσμα των πιθανών πραγματοποιούμενων μετασχηματισμών των κυματισμών, η οποία όμως στερείται ακρίβειας, αφού δεν μπορούν να “φωτογραφηθούν” όλες οι φυσικές παράμετροι που συνθέτουν ένα παράκτιο φαινόμενο. Έτσι λοιπόν, αναπτύσσεται μία νέα μέθοδος η οποία συνδυάζει τις πειραματικές μετρήσεις μαζί με έναν αλγόριθμο εκπαίδευσης, ένα Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο (ΤΝΔ), για την κατανόηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των υδροδυναμικών και μορφολογικών χαρακτηριστικών, ώστε να επιτευχθεί η ασφαλέστερη πρόβλεψη σεναρίων με μεταβαλλόμενα αρχικά δεδομένα.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αποτελεί ο υπολογισμός του συντελεστή κυματικής διάδοσης ( $K_d$ ) μέσω των αγωγών ανανέωσης επί έργου με κατακόρυφο μέτωπο, σύμφωνα με πειραματικές μετρήσεις και έναν αλγόριθμο ΤΝΔ που καταστρώθηκε, όπως εξηγείται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 5. Τα εισερχόμενα κυματικά χαρακτηριστικά και η

γεωμετρία των αγωγών ανανέωσης χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου στο ΤΝΔ που καταστρώθηκε για δύο περιπτώσεις: υπολογισμός του συντελεστή  $K_t$  για θεωρούμενο εισερχόμενο κυματισμό αυτόν, όπως μετράται πλησίον της κυματογεννήτριας και αυτόν, όπως μετράται ακριβώς ανάντη του κυματοθραύστη (Κεφάλαιο 3). Στόχος αυτών, είναι η δημιουργία ενός σύνθετου μοντέλου βελτιστοποίησης για την ακριβέστερη πρόγνωση του συντελεστή μετάδοσης σε κάθε νέα περίπτωση.

## 1.2 Πρωτότυπα σημεία μέσω νευρωνικών δικτύων

Η παρούσα εργασία μπορεί να χαρακτηριστεί ως πρωτότυπη, καθώς επιχειρεί τη χρησιμοποίηση των ΤΝΔ, για τον υπολογισμό του συντελεστή κυματικής μετάδοσης  $K_t$ , με την αξιοποίηση πειραματικών μετρήσεων, οι οποίες διεξήχθησαν σε διδιάστατες και τριδιάστατες πειραματικές διατάξεις. Η εργασία αυτή, έχει ως στόχο την πρόβλεψη του συντελεστή μετάδοσης  $K_t$  διαμέσου αγωγού ανανέωσης επί έργου με κατακόρυφο μέτωπο, προκειμένου να αποφευχθεί η απαίτηση διεξαγωγής πειραματικών μετρήσεων σε ανάλογες περιπτώσεις.

## 1.3 Διάρθρωση εργασίας

Η εργασία περιλαμβάνει, εκτός από την παρούσα εισαγωγή (Κεφάλαιο 1), όπου εισάγεται για πρώτη φορά η σημασία της επαρκούς ανανέωσης των υδάτων και περιγράφεται ο σκοπός και το αντικείμενο της παρούσας εργασίας, έξι ακόμα κεφάλαια.

Στο Κεφάλαιο 2, επισημαίνεται η σπουδαιότητα της κατασκευής των αγωγών ανανέωσης επί των εξωτερικών λιμενικών έργων. Παρατίθενται παραδείγματα υφιστάμενων έργων στην Ελλάδα και περιγράφονται σχετικές πειραματικές μετρήσεις που έχουν διεξαχθεί στο Εργαστήριο Λιμενικών Έργων του Ε.Μ.Π. μαζί με τα συμπεράσματά τους. Τέλος πραγματοποιείται η βιβλιογραφική καταγραφή των εμπειρικών σχέσεων που αφορούν τον συντελεστή μετάδοσης  $K_t$ .

Στο Κεφάλαιο 3, περιγράφονται τα πειράματα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν, τα φυσικά προσομοιώματα κάθε ομάδας πειραμάτων στις εγκαταστάσεις του Εργαστηρίου Λιμενικών



Έργων, ενώ καταγράφονται τελικά τα απαιτούμενα για την κατασκευή ενός ΤΝΔ (κεφάλαιο 4), αποτελέσματα.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται οι βασικές αρχές λειτουργίας των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων, περιγράφονται τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητές τους και η σύνδεσή τους με τη λειτουργία του ανθρώπινου εγκεφάλου.

Στο Κεφάλαιο 5 καταστρώνεται το νέο προτεινόμενο μοντέλο, το οποίο προέρχεται από την εκπαίδευση του ΤΝΔ από τις πειραματικές μετρήσεις όπως παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 3 και εφαρμόζει όλα όσα αναφέρθηκαν στο προηγούμενο Κεφάλαιο. Στο τέλος του Κεφαλαίου πραγματοποιείται η επαλήθευση του μοντέλου και η σύγκρισή του με τους εμπειρικούς τύπους (Κεφάλαιο 2).

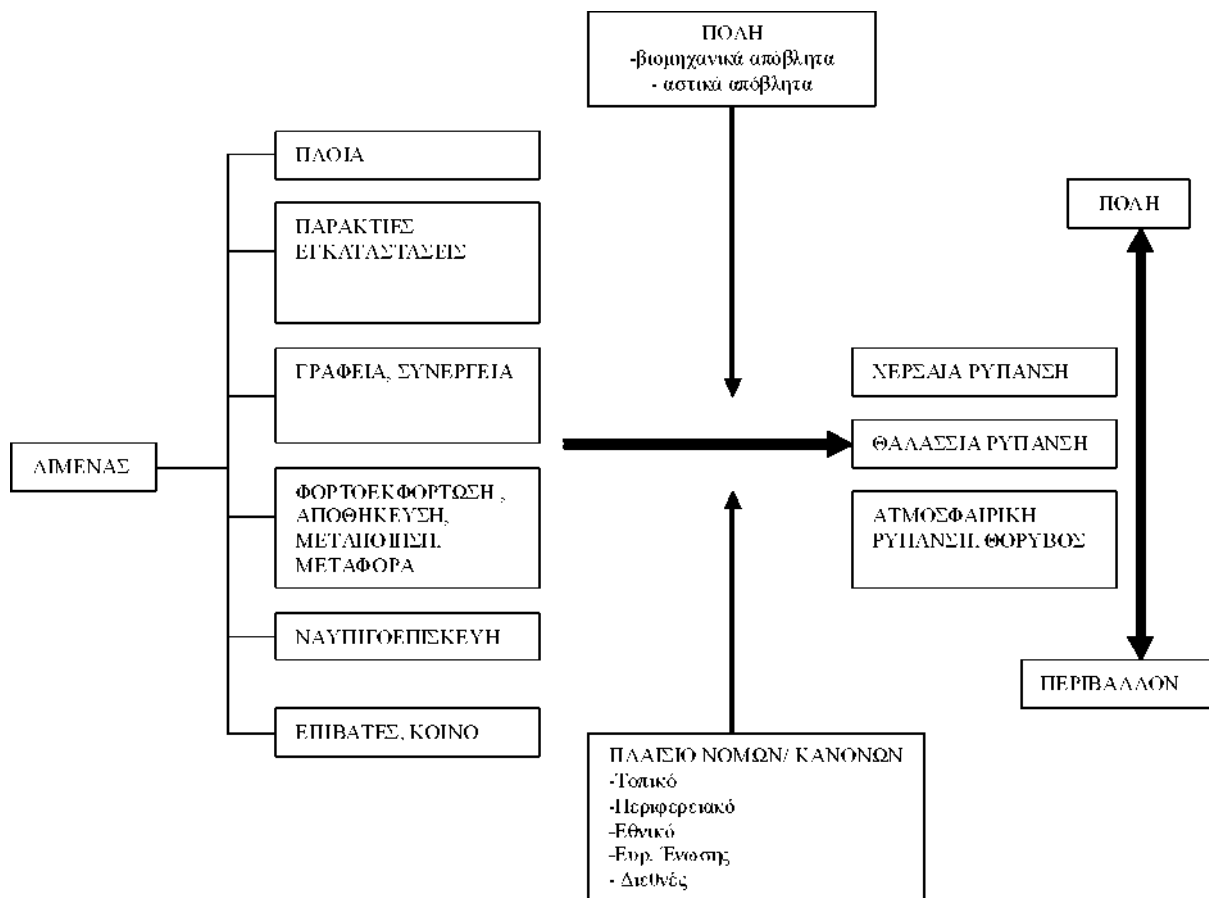
Στο Κεφάλαιο 6 συνοψίζονται τα συμπεράσματα από την παρούσα εργασία και διατυπώνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.



## 2. Αγωγοί Ανανέωσης Υδάτων

### 2.1 Γενικά περί αγωγών ανανέωσης

Η ανάπτυξη του θαλάσσιου εμπορίου και η κατασκευή λιμενικών έργων έχουν καταστήσει σημαντικό το ρόλο του Πολιτικού Μηχανικού για την εξασφάλιση της υψηλής ποιότητας και λειτουργικότητας των υποδομών. Κύριο μέλημα για την ομαλή λειτουργία των δραστηριοτήτων εντός της λιμενολεκάνης είναι η κατασκευή έξαλων κυματοθραυστών, ώστε να απομειώνεται η κυματική ενέργεια στην υπήνεμη πλευρά τους και να επιτρέπεται η ομαλή λειτουργία των δραστηριοτήτων. Παράλληλα όμως προκαλείται χαμηλός ρυθμός ανακυκλοφορίας των υδάτων και υποβαθμίζεται η ποιότητά τους, απελευθερώνοντας δυσοσμίες και επιβαρύνοντας τα τοπικά υδάτινα οικοσυστήματα και το ανθρωπογενές περιβάλλον (Σχήμα 2.1).

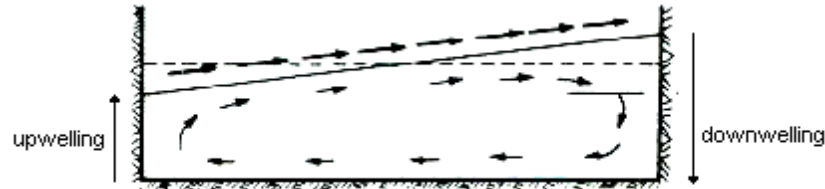


Σχήμα 2.1 Διάγραμμα αλληλεπίδρασης λιμένα – περιβάλλοντος (Πηγή: ΟΛΘ, ΑΕ).

Η ύπαρξη πλήθους λιμένων, ειδικότερα στην Ελλάδα, με έντονη την οικιστική ανάπτυξη γύρω από το λιμένα, καθιστά απαραίτητη την κατάστροψη ενός σχεδίου για την αντιμετώπιση της συνθετότητας των εμφανιζόμενων περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η υποβάθμιση της ποιότητας των υδάτων στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης, επιφέρει υποβάθμιση και στην ποιότητα ζωής των κατοίκων από την κακοσμία των υδάτων και τη ρύπανσή τους. Λόγους για την υποβάθμιση της ποιότητας των υδάτων, αποτελούν η παράνομη απόρριψη απορριμμάτων και λυμάτων από τα ελλιμενίζοντα πλοία και η διαφυγή ρυπογόνου φορτίου κατά την φορτοεκφόρτωσή τους. Προκειμένου λοιπόν, να αμβλυνθούν τέτοιου είδους προβλήματα, απαιτείται η παρέμβαση του Πολιτικού Μηχανικού με τεχνικά έργα, ώστε να εξαλειφθεί ή να ανασταλεί η τέτοιου είδους ρύπανση που προκαλείται, μέσω της επαρκούς ανανέωσης των υδάτων. Ωστόσο, ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο, ώστε να διαχειριστεί ολοκληρωμένα το πρόβλημα, παίζει και ο καθορισμός αντισταθμιστικών μέτρων για τους κατοίκους των γύρω περιοχών, εφ' όσον οι επιπτώσεις στο ανθρωπογενές περιβάλλον εξακολουθούν να υπάρχουν.

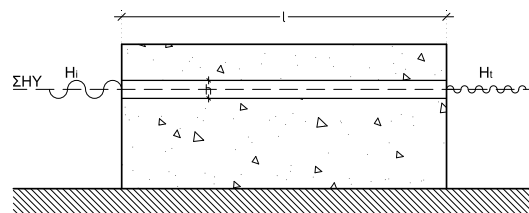
Κύριοι φυσικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ανανέωση των υδάτων είναι η παλίρροια, η κυματογενής και η ανεμογενής κυκλοφορία (παλιρροιακά, ανεμογενή και κυματογενή ρεύματα). Μέθοδοι όπως η τοποθέτηση αναδευτήρων (δημιουργία τεχνητής κυκλοφορίας), αντλιών (άντληση καθαρού νερού εκτός της λιμενολεκάνης), υπερχειλιστών (αποβολή επιφανειακών λυμάτων) και αγωγών ανανέωσης (επιτρέπουν τη φυσική κυκλοφορία των υδάτων εντός και εκτός της λιμενολεκάνης) έχουν αναπτυχθεί για την ταχύτερη ανανέωση των υδάτων στο εσωτερικό των παράκτιων έργων. Δημοφιλέστερη και πιο οικονομική λύση αποτελούν οι αγωγοί ανανέωσης, λόγω του χαμηλού κόστους κατασκευής και συντήρησής τους. Σκοπός της κατασκευής τους είναι μέσω της ενίσχυσης του πεδίου ταχυτήτων εντός της λιμενολεκάνης να κάνουν αποτελεσματικότερη και ταχύτερη (10-32%) την ανανέωση των υδάτων (Stamou *et al.*, 2004). Οι αγωγοί ανανέωσης είναι ουσιαστικά, ανοίγματα (κυκλικής ή ορθογωνικής διατομής) τοποθετούμενα καθ' ύψος της διατομής, τα οποία κατασκευάζονται είτε στην ελεύθερη επιφάνεια σε ηρεμία, έτσι ώστε το μέσο του ύψους τους να συμπίπτει με αυτήν είτε στο μέσο του έργου (υποθαλάσσιοι αγωγοί), με διαστάσεις ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες της περιοχής. Στην Ελλάδα προτιμάται η πρώτη διάταξη αφού ο άνεμος που κινητοποιεί τα επιφανειακά στρώματα της θάλασσας (Σχήμα 2.2) είναι σημαντικότερο αίτιο κυκλοφορίας από την παλιρροιακή δράση (Fountoulis and Memos, 2005). Επιπλέον η διάταξη αυτή υπερέχει της δεύτερης, αφού με την τοποθέτηση του αγωγού

σε μεγάλο βάθος υπάρχει ο κίνδυνος της μεταφοράς και της εναπόθεσης ιζημάτων εντός του λιμένα.



**Σχήμα 2.2** Διαμόρφωση ανεμογενούς ρεύματος σε περιορισμένο πεδίο (Πηγή: Καραμπάς, 2004).

Μέσω των αγωγών ανανέωσης (Σχήμα 2.3) εισρέουν κυματισμοί από την εξωτερική πλευρά του λιμένα εντός της λιμενολεκάνης. Παράλληλα με την αύξηση της ταχύτητας των υγρών σωματιδίων και των έντονων στροβιλισμών που δημιουργούνται (Tsoukala and Moutzouris, 2009), μειώνεται ο χρόνος ανανέωσης των υδάτων. Ως χρόνος ανανέωσης των υδάτων αναφέρεται ο απαιτούμενος για την απομάκρυνση των υδάτων του λιμένα χρόνος, για μία δεδομένη παροχή. Για λιμένες μονής εισόδου, ένας μέσος όρος καθημερινής ανταλλαγής νερού που αντιστοιχεί περίπου στο ένα τρίτο του μέσου όγκου του νερού του λιμένα, θεωρείται επαρκής για την αποφυγή της στασιμότητας του νερού (Dunham and Finn, 2002). Το «άδειασμα» αυτό των νερών της λιμενολεκάνης που επιτυγχάνεται, επιφέρει την ποιοτική αναβάθμισή τους παρ' όλες τις δραστηριότητες που λαμβάνουν μέρος εντός αυτής διατηρώντας την ισορροπία της οικολογικής κατάστασης στην παράκτια ζώνη.



**Σχήμα 2.3** Ομοίωμα κυματοθραύστη (με κατακόρυφο μέτωπο) με αγωγό ανανέωσης.

## 2.2 Αγωγοί ανανέωσης στον ελλαδικό χώρο

Η τοποθέτηση αγωγών ανανέωσης είναι μέθοδος, η οποία έχει εφαρμοστεί σε πολλές περιπτώσεις στον ελλαδικό χώρο, ωστόσο στηρίζεται κυρίως σε εμπειρικούς κανόνες, χωρίς να εξασφαλίζεται πάντοτε η αποτελεσματικότητα της λειτουργίας τους. Σε περιπτώσεις όπου έχουν ήδη τοποθετηθεί αγωγοί ανανέωσης, έχει παρατηρηθεί μη επαρκής ανανέωση των υδάτων και σε άλλες μεγάλη κυματική διαταραχή, που δυσχεραίνει το ασφαλές αγκυροβόλιο στα ελλιμενίζοντα πλοία. Συμπερασματικά, για την επίτευξη του βέλτιστου σχεδιασμού ενός τέτοιου έργου, θα πρέπει να συνδυαστεί η μέγιστη δυνατή ανανέωση των υδάτων σε σύντομο χρονικό διάστημα με την ελάχιστη δυνατή κυματική διαταραχή στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης, ώστε ο λιμένας να εξακολουθεί να επιτρέπει τον ασφαλή ελλιμενισμό των σκαφών και να μην επηρεάζονται οι βασικές λειτουργίες φορτοεκφόρτωσής του.

Συνολικά στην Ελλάδα υπάρχουν περισσότερα από 600 λιμάνια διαφορετικών μεγεθών και λειτουργιών, οπότε η διερεύνηση του ορθού σχεδιασμού των αγωγών ανανέωσης καθίσταται επιτακτική. Όπως προαναφέρθηκε, δεδομένου ότι η διακύμανση της στάθμης της θάλασσας λόγω της παλίρροιας είναι μικρή και επικρατεί η ανεμογενής κυκλοφορία των υδάτων, προτιμάται οι αγωγοί να τοποθετούνται με το διαμήκη άξονά τους στη στάθμη ηρεμίας ύδατος, εμποδίζοντας ταυτόχρονα τη μεταφορά ιζημάτων στη λιμενολεκάνη, αφού οι αγωγοί βρίσκονται σε απόσταση από τον πυθμένα. Χαρακτηριστικά παραδείγματα λιμενικών έργων με αγωγούς ανανέωσης υδάτων, τοποθετημένους στο ύψος της ελεύθερης επιφάνειας ύδατος σε ηρεμία, αποτελούν η μαρίνα στη Μυτιλήνη, στην Καλαμάτα καθώς επίσης και το αλιευτικό καταφύγιο στο Μάτι (Σχήμα 2.4).



Σχήμα 2.4.1 Αγωγοί ανανέωσης στη Μυτιλήνη



Σχήμα 2.4.2 Αγωγοί ανανέωσης στην Καλαμάτα



Σχήμα 2.4.3 Αγωγοί ανανέωσης στο Μάτι

**Σχήμα 2.4** Παραδείγματα τριών λιμενικών έργων με αγωγούς ανανέωσης στην Ελλάδα (Πηγή: Tsoukala and Moutzouris, 2009).

## 2.3 Φαινόμενο της κυματικής μετάδοσης και εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού

### 2.3.1 Κυματικά φαινόμενα λόγω του αγωγού ανανέωσης

Ένας κυματισμός κατά τη διέλευσή του μπορεί να συναντήσει διάφορα στερεά όρια, τα οποία επιδρούν στα χαρακτηριστικά του. Στερεά όρια τα οποία μπορεί αν συναντήσει ο κυματισμός είναι ο πυθμένας, οπότε και εμφανίζονται φαινόμενα διάθλασης ή και θραύσης του κυματισμού ή ένα μέτωπο έργου προστασίας, όπου παρατηρείται γένεση υψηλών αρμονικών και φαινόμενα ανάκλασης, περίθλασης και θραύσης. Όλα τα προηγούμενα συνθέτουν ένα πολύπλοκο πρόβλημα στην αλληλεπίδραση κυματισμού-τεχνικών έργων.

Η περίπτωση ενός προσπίπτοντος κύματος σε κυματοθραύστη με αγωγό ανανέωσης αποτελεί μία ειδική περίπτωση του μετώπου. Η μετάδοση κυματισμών διαμέσου των αγωγών ανανέωσης μπορεί να συμβεί είτε υπό συνθήκες ελεύθερης ροής, ή ροής σε αγωγό υπό πίεση είτε με συνδυασμό και των δύο. Στην παρούσα διπλωματική εξετάζεται η περίπτωση ροής με ελεύθερη επιφάνεια. Εξαιτίας της παρουσίας ενός αγωγού ανανέωσης, μέρος της προσπίπτουσας κυματικής ενέργειας εισέρχεται και μεταδίδεται πίσω από τον κυματοθραύστη. Οι Tsoukala and Moutzouris (2009), έχουν επισημάνει τους μετασηματισμούς των κυματισμών που συμβαίνουν κατά τη διείσδυση αυτή και οι οποίοι οφείλονται σε μερική ανάκλαση (λόγω της απότομης αλλαγής του πυθμένα στο όριο του κυματοθραύστη), παραγωγή αποσβενόμενων ιδιομορφών (οφείλονται επίσης σε αλλαγές του πυθμένα), πιθανή θραύση, παραγωγή αρμονικών ανώτερης τάξης (μέρος της κυματικής ενέργειας μεταφέρεται μέσα στον αγωγό σε αρμονικές ανώτερης τάξης και οι οποίες τελικά αποσβάνουν μακριά από αυτόν).

Στην προσήνεμη πλευρά καθώς ένας κυματισμός προσπίπτει σε ένα κυματοθραύστη, ένα μέρος της ενέργειας ανακλάται, ένα μέρος μετατρέπεται σε ενέργεια θραύσης και ένα μέρος του αγωγού διαβιβάζεται μέσω του αγωγού ανανέωσης στην υπήνεμη πλευρά. Λόγω της ανάκλασης μέρους της κυματικής ενέργειας που προσπίπτει στον κυματοθραύστη, δημιουργείται μη τέλειος στάσιμος κυματισμός, έως ότου ο λόγος του ύψους του εισερχόμενου στον αγωγό κύματος προς το βάθος του νερού ξεπεράσει μία κρίσιμη τιμή (~0,8) (Κουτίτας, 1994), οπότε επέρχεται θραύση του κύματος, η οποία θεωρείται σύνηθες φαινόμενο σε αγωγούς ανανέωσης τοποθετούμενους στην κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια.

Στην υπήνεμη πλευρά, καθώς τα κύματα διαδίδονται μέσα στον αγωγό ανανέωσης, μέρος της ενέργειας κύματος μεταφέρεται από μια κυματική συνιστώσα στις υψηλότερες αρμονικές



του, λόγω της μη γραμμικότητας των κυματισμών (Ohyama and Nadaoka, 1994; Losada *et al.*, 1997). Τα κύματα που διαβιβάζονται μέσω ενός αγωγού ανανέωσης μπορούν να παράγουν δύο ή περισσότερα κύματα, με αποτέλεσμα ένα μεγάλο τμήμα της ενέργειας μεταφέρεται απότομα στις ελεύθερες υψηλότερες αρμονικές (Tsoukala *et al.*, 2010). Επίσης, το φαινόμενο της περίθλασης είναι αυτό που παίζει ιδιαίτερο ρόλο στην υπήνεμη πλευρά του αγωγού ανανέωσης.

## 2.4 Πειραματική προσομοίωση μετάδοσης των κυματισμών διαμέσου οπών και αγωγών ανανέωσης

Για την εκτίμηση της κυματικής μετάδοσης κατάντη του αγωγού ανανέωσης, αποτελεί καθοριστική σημασία ο συντελεστής κυματικής μετάδοσης  $K_t$  ο οποίος υπολογίζεται από την εξίσωση:

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

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

### 2.4.1 Μετρήσεις σε φυσικά προσομοιώματα

Πειράματα, που σχετίζονται με τη λειτουργία των αγωγών ανανέωσης (Σχήμα 2.5), έχουν διεξαχθεί κατά το παρελθόν στο εργαστήριο, με την κατασκευή ομοιωμάτων δύο ή τριών διαστάσεων. Μελέτες σχετικές έχουν πραγματοποιηθεί και εξακολουθούν να πραγματοποιούνται σε παγκόσμια κλίμακα, προκειμένου να περιγραφούν ικανοποιητικά τα χαρακτηριστικά της λειτουργίας τους. Για παράδειγμα, οι Tuck (1971) και Guiney *et al.* (1972) μελέτησαν την επίδραση του πλάτους ενός ανοίγματος σε εμπόδιο στην κυματική μετάδοση πειραματικά και διαπιστώθηκε ότι αύξηση του λόγου του μήκους του αγωγού προς το ύψος του αποφέρει μείωση του συντελεστή μετάδοσης ενέργειας, ενώ η αύξηση του λόγου του πλάτους του αγωγού προς το βάθος του νερού συνεπάγεται μείωσή του.

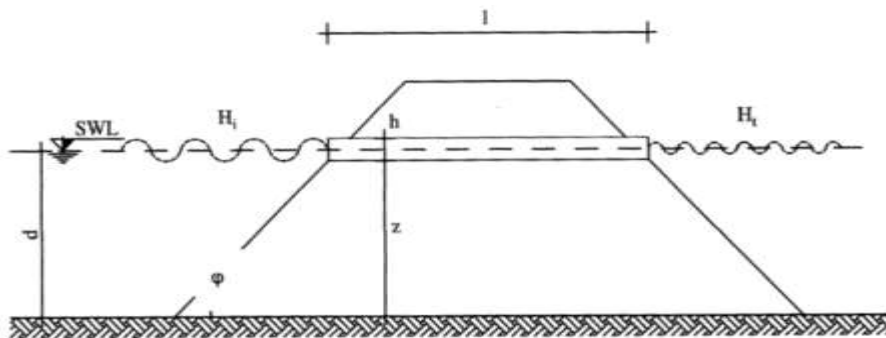
Μεγάλος αριθμός εργαστηριακών πειραμάτων, επιπλέον, έχουν διεξαχθεί στο Εργαστήριο Λιμενικών Έργων του ΕΜΠ, με στόχο την ποσοτικοποίηση του συντελεστή μετάδοσης  $K_t$ , και οι οποίοι περιγράφονται στη συνέχεια.

Οι Παπαϊωάννου κ.ά. (1999) πραγματοποίησαν μετρήσεις σε φυσικό ομοίωμα της μαρίνας Αγίου Νικολάου Κρήτης, με κλίμακα 1:60, με στόχο την πειραματική διερεύνηση της κυματικής διείσδυσης εντός της λιμενολεκάνης, μετά την κατασκευή τεχνητού μεταβλητού διάκενου στον προσήνεμο μόλο του λιμένα. Τελικά προέκυψε ότι αύξηση του πλάτους του ανοίγματος του, επιφέρει αύξηση στο ύψος κύματος στο εσωτερικό του λιμένα.

Η Μπαλάσκα (2005) μελέτησε την κυματική διείσδυση στο φυσικό ομοίωμα του καταφυγίου τουριστικών σκαφών στον Άγιο Κήρυκο της Ικαρίας (υπό κλίμακα 1:60) και του τουριστικού

καταφυγίου στο Κολυμβάρι της Κρήτης (υπό κλίμακα 1:100). Τα συμπεράσματα των προηγούμενων μετρήσεων αφορούν τη γεωμετρία των αγωγών αλλά και τα χαρακτηριστικά των κυματισμών. Αύξηση του πλάτους των αγωγών και του μήκους κύματος των προσπιπτόντων κυματισμών αυξάνει το ποσοστό του διερχόμενου κυματισμού.

Η Γιαννάκη (2005) διεξήγαγε πειράματα στη διδιάστατη διώρυγα κυματισμών του Εργαστηρίου Λιμενικών Έργων του Ε.Μ.Π, προκειμένου να μελετήσει την επίδραση που προκαλούν οι αγωγοί ανανέωσης στα κυματικά χαρακτηριστικά. Κατασκευάστηκαν τρεις διατάξεις αγωγών ανανέωσης ύδατος και εξετάστηκε η επίδραση των διαφορετικών χαρακτηριστικών των αγωγών ανανέωσης στην κυματική διαταραχή της υπήνεμης πλευράς του ομοιώματος, κρατώντας σταθερό το ύψος σε κάθε περίπτωση. Τελικά, προέκυψε ότι αύξηση του πλάτους του αγωγού ανανέωσης, του προσπίπτοντος κυματισμού και της περιόδου του κυματισμού, αυξάνει το ύψος του διεισδύοντος κυματισμού.



**Σχήμα 2.5** Απεικόνιση αγωγού ανανέωσης τοποθετημένου σε κυματοθραύστη (Πηγή: Tsoukala and Moutzouris, 2009).

Ο Σιγαλός (2006) σε φυσικό ομοίωμα του λιμένα Κολυμβαρίου Κρήτης, μελέτησε τη συμβολή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των αγωγών ανανέωσης στην κυματική διείσδυση της διαταραχής εντός της λιμενολεκάνης. Παρατηρήθηκε μετά τη διεξαγωγή των πειραμάτων ότι αύξηση της περιόδου του παραγόμενου κυματισμού, αυξάνει το ποσοστό του διεισδύοντος κυματισμού εντός της λιμενολεκάνης. Επίσης, ενώ η αύξηση του μήκους του αγωγού φαίνεται να μην έχει ιδιαίτερη επίδραση στην μεταβολή του ύψους του διεισδύοντος κυματισμού, αύξηση του ύψους του αγωγού για γωνίες πρόσπτωσης  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$ , προκαλεί αύξησή του.

Οι Μπρέμπος και Ντεβές (2007) μελέτησαν την επίδραση της θέσης του αγωγού ανανέωσης ως προς την ελεύθερη επιφάνεια. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε σταθερό βάθος, και ο αγωγός τοποθετήθηκε σε τρεις διαφορετικές θέσεις: η στάθμη ηρεμίας στο κάτω όριο, στο μέσο και στο άνω όριο του αγωγού. Τελικά, προέκυψε ότι, με την τοποθέτηση του άνω και του κάτω ορίου του αγωγού στη στάθμη ηρεμίας, αύξηση του προσπίπτοντος κυματισμού επιφέρει αύξηση του συντελεστή κυματικής διαταραχής, ενώ με την τοποθέτηση του κέντρου του αγωγού στη στάθμη ηρεμίας, τελικά παρατηρείται μείωση του συντελεστή.

#### 2.4.2 Μετασχηματισμοί κυματισμών κατά τη διέλευσή τους μέσα από αγωγό ανανέωσης

Οι Tsoukala and Moutzouris (2009), επεσήμαναν τους μετασχηματισμούς των κυματισμών κατά τη μετάδοση των κυμάτων μέσω των αγωγών ανανέωσης στη λιμενολεκάνη και οι οποίοι περιλαμβάνουν φαινόμενα όπως τη μερική ανάκλαση (λόγω της αλλαγής του πυθμένα στο όριο του κυματοθραύστη) αλλά και τη θραύση των κυματισμών. Ωστόσο εστίασαν στα τριδιάστατα χαρακτηριστικά του προβλήματος και πιο συγκεκριμένα στην περίθλαση της στένωσης του αγωγού ανανέωσης. Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων που διεξήχθησαν στις δεξαμενές δοκιμών του Ε.Λ.Ε, κατέληξαν μέσω διαστατικής ανάλυσης στο συμπέρασμα, ότι ο συντελεστής  $K_t$ , μπορεί να υπολογισθεί ως συνάρτηση του μισού του ύψους του αγωγού  $h_s$ , του ύψους του προσπίπτοντος κυματισμού  $H_i$ , του μήκους του αγωγού ανανέωσης  $l$ , του πλάτους του αγωγού  $b$ , του ύψους του αγωγού  $h$  και της γωνίας πρόσπτωσης  $\alpha$  (Σχήμα 2.6), ως εξής:

$$K_t = \left( 0,1 \left( \frac{h_s}{H_i} \right)^{0,76} + \left( 2,64 \left( \frac{l}{H_i} \right)^{0,032} - 3 \left( \frac{b}{H_i} \right)^{-0,05} \right) * (1 - \exp(0,21 * \xi)) \right) * (\sin \alpha)^{2/3} \quad (2.1)$$

όπου  $\xi$  ο αριθμός Iribarren  $\xi = \tan \varphi / \sqrt{2\pi H_i / g T^2}$  και  $\varphi$  η γωνία κλίσης του κυματοθραύστη.

Οι Στάμου κ.ά. (2008), μέσω παλινδρομικής ανάλυσης μετρήσεων που διεξήχθησαν σε διδιάστατη και τριδιάστατη δεξαμενή κατέληξαν στις παρακάτω εμπειρικές σχέσεις, που αφορούν στο συντελεστή κυματικής μετάδοσης:

Από τα αποτελέσματα στη 2D δεξαμενή:

$$K_t = \frac{H_t}{H_i} = \left( -0,161 \frac{2h_s}{d} - 0,029 \frac{l}{d} + 0,235 \frac{b}{d} + 0,088 \sin a \right) * \xi^{0,664} \quad (2.2)$$

όπου d το βάθος του νερού

Αντίστοιχα στη 3D δεξαμενή:

$$K_t = \frac{H_t}{H_i} = \left( -0,039 \frac{2h_s}{d} - 0,134 \frac{l}{d} + 0,578 \frac{b}{d} + 0,232 \sin a \right) * \xi^{0,845} \quad (2.3)$$

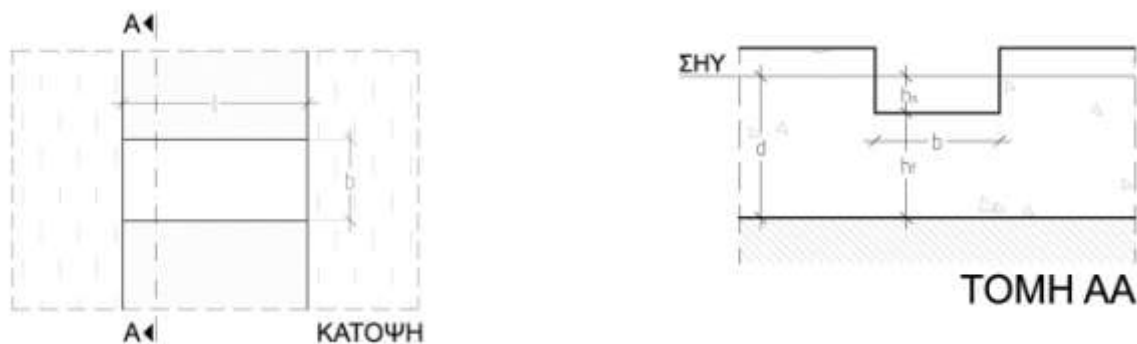
Από το σχηματισμό μιας ενιαίας εξίσωσης:

$$K_t = \frac{H_t}{H_i} = \left( -0,283 \frac{2h_s}{d} + 0,001 \frac{l}{d} - 0,051 \frac{b}{d} + 0,002 \sin a + 0,311 \right) * \xi^{0,995} \quad (2.4)$$

Στη συνέχεια η Tsoukala *et al.*(2010), λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στη διώρυγα κυματισμών στο Ε.Λ.Ε, πρότεινε την ακόλουθη εμπειρική εξίσωση, μέσω μη γραμμικής πολλαπλής παλινδρόμησης:

$$K_t = \frac{H_t}{H_i} = \left( 0,135 \frac{b}{H_i} + 0,048 \frac{2h_s}{H_i} + 0,030 \frac{h_f}{H_i} + 0,026 \frac{d}{H_i} + 0,036 \frac{l}{H_i} \right) * \mu^{-0,681} \quad (2.5)$$

όπου  $h_f$  η απόσταση του πυθμένα του αγωγού ανανέωσης από τον πυθμένα της θάλασσας στα ανάντη και  $\mu$  η αδιάστατη παράμετρος  $\mu = \sin\phi / \sqrt{2\pi H_i / g T^2}$ .



**Σχήμα 2.6** Σχηματική απεικόνιση σε κάτοψη και τομή των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στους εμπειρικούς τύπους.



### **3. Περιγραφή των Πειραματικών Διατάξεων**

#### **3.1 Διατιθέμενα στοιχεία**

Πηγή των πειραματικών δεδομένων αποτέλεσαν μετρήσεις οι οποίες έγιναν στο Εργαστήριο Λιμενικών Έργων: α) τα δεδομένα των μετρήσεων των πειραμάτων, όπως προέκυψαν από την εργασία της Γιαννάκη (2005), με τίτλο «Πειραματική διερεύνηση της επίδρασης των αγωγών ανανέωσης ύδατος στα κυματικά χαρακτηριστικά και στην οξυγόνωση της εσωτερικής περιοχής παράκτιων έργων» και β) τα μέσα ύψη κύματος που προήλθαν από την έκθεση Π.Ε.Β.Ε.(2010) των Τσουκαλά κ.ά. (2013) με τίτλο «Διερεύνηση διάδοσης κυματικής διαταραχής σε παράκτια έργα μέσω των αγωγών ανανέωσης». Στην παρούσα διπλωματική επεξεργάστηκαν τα δεδομένα των μετρήσεων των πειραμάτων όπως προέκυψαν από την εργασία της Γιαννάκη, προκειμένου να εξαχθούν οι χρονοσειρές ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας και άρα τα μέσα ύψη των κυματισμών, να συνδυαστούν με τα μέσα ύψη κύματος της δεύτερης ομάδας πειραμάτων και τελικά να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή του ΤΝΔ.

#### **3.2 Πειραματικές μετρήσεις σε διδιάστατη διώρυγα δοκιμών**

##### *3.2.1 Περιγραφή της πειραματικής εγκατάστασης*

Τα πειράματα που διεξήχθησαν στη διώρυγα κυματισμών «Δημήτρης Κοιλάκος» του Εργαστηρίου Λιμενικών Έργων του Ε.Μ.Π., είχαν ως στόχο τη διερεύνηση της διάδοσης της κυματικής διαταραχής και της μεταφοράς του οξυγόνου στην υπήνεμη πλευρά ενός ομοιώματος λιμενικού έργου με κατακόρυφο μέτωπο μέσω αγωγού ανανέωσης ύδατος.

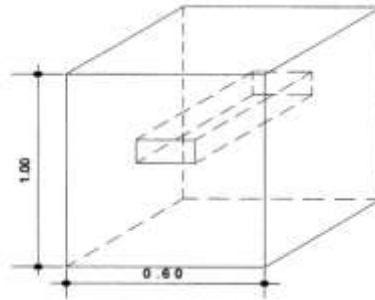


**Σχήμα 3.1** Φωτογραφία της διώρυγας κυματισμών βαρύτητας «Δημήτρης Κοιλάκος» (Πηγή: Κουρής, 2010).

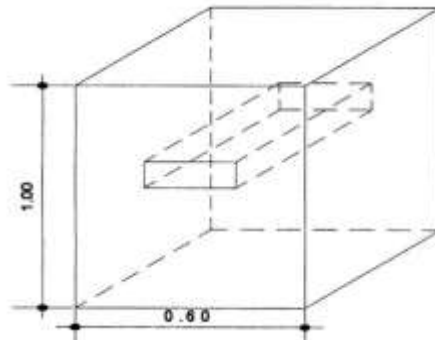
Η διώρυγα κυματισμών έχει σχήμα ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου με εσωτερικές διαστάσεις 27,00 m x 0,60 m x 1,53 m και είναι κατασκευασμένη από οπλισμένο σκυρόδεμα. Στο δεξί άκρο της διώρυγας είναι εγκατεστημένη κυματογεννήτρια παραγωγής μηχανικών κυμάτων (αποτελείται από έναν ηλεκτρονικό κινητήρα, το κιβώτιο ταχυτήτων, το μετατροπέα της κίνησης και το πτερύγιο), στο αριστερό άκρο υπάρχει αποσβεστήρας κυμάτων, από πρανές με κροκάλες, όπως και στο δεξιό άκρο πίσω από το πτερύγιο του κυματιστήρα. Ένα μέτρο από το πτερύγιο της κυματογεννήτριας, υπάρχει κατασκευή από παράλληλες, διατηρητές μεταλλικές πλάκες (με διαστάσεις 1,0 m x 1,0 m), ώστε να αποσβαινούνται οι πλευρικές διαταραχές και να αποφεύγεται το φαινόμενο της περίθλασης (για την αποκατάσταση της διδιάστατης ροής).

Στο φυσικό κατακόρυφο ομοίωμα (μεταλλικής κατασκευής) κατασκευάστηκε αγωγός ανανέωσης ορθογωνικής διατομής με μεταβαλλόμενα γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Οι μετρήσεις που συμπεριλαμβάνονται στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκαν για δύο διαφορετικές διαστάσεις αγωγού ανανέωσης.





Σχήμα 3.2.α Διάταξη A (b=18 cm, l=50 cm)



Σχήμα 3.2.β Διάταξη B (b=24 cm, l=50 cm)

Σχήμα 3.2 Σκαρίφημα διάταξης αγωγού ανανέωσης (Πηγή: Γιαννάκη, 2005).

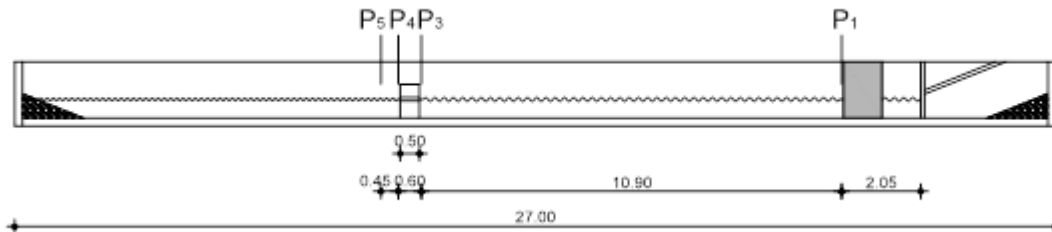
Στη συνέχεια συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά των δύο διατάξεων (Πίνακας 3.1). Και στις δύο σειρές πειραμάτων η στάθμη ηρεμώντος ύδατος (ΣΥΗ) βρισκόταν στο μέσον του ύψους του αγωγού (το βάθος νερού ήταν 0,60 m). Τα πειράματα διεξήχθησαν για τρεις διαφορετικές περιόδους ( $T_1=1,48$  s,  $T_2=1,10$  s,  $T_3=0,90$  s).

Πίνακας 3.1 Χαρακτηριστικά των πειραματικών διατάξεων.

Διαστάσεις αγωγού ανανέωσης				
Κωδικός διάταξης	Ύψος κατασκευής (cm)	Μήκος l (cm)	Πλάτος b (cm)	Ύψος h (cm)
A	100	50	18	12
B	100	50	24	12

Για κάθε διάταξη εξετάστηκαν 15 διαφορετικοί κυματισμοί, για την καταγραφή των οποίων χρησιμοποιήθηκαν 4 μετρητές τύπου αντιστάσεως (είναι σε θέση να μετρούν σε βάθη νερού από 7 cm έως 80 cm). Από αυτούς οι δύο μετρητές τοποθετήθηκαν σε σταθερές θέσεις σε

απόσταση  $x=2,0$  m (θέση 1) και  $x=13,0$  m (θέση 2), από το περύγιο της κυματογεννήτριας, ενώ από τους άλλους δύο, ο πρώτος τοποθετήθηκε ακριβώς κατάντη του αγωγού (θέση 3) και ο δεύτερος σε απόσταση από την κατάντη πλευρά ίση με το μήκος του αγωγού ανανέωσης (θέση 4).



**Σχήμα 3.3** Θέση μετρητών στη διώρυγα κυματισμών για κυματοθραύστη με κατακόρυφο μέτωπο – πλάγια όψη.

### 3.2.2 Διαδικασία μετρήσεων κυμάτων

Οι μετρητές που προαναφέρθηκαν (*wave probes*) τύπου αντιστάσεως, μετρούν τη στιγμιαία μεταβολή της στάθμης του ύδατος. Αποτελούνται από δύο ηλεκτρόδια στερεωμένα σε στέλεχος στηριζόμενο σε ενταντήρα που στερεώνεται πλευρικά της διώρυγας. Η διαφορετική στάθμη του νερού δημιουργεί διαφορετική διαφορά δυναμικού, η οποία μεταφράζεται σε μεταβολή της ελεύθερης επιφάνειας, μέσω ενός ενισχυτή σήματος στον ηλεκτρονικό υπολογιστή, όπου συλλέγονται και καταγράφονται τα δεδομένα.

### 3.2.3 Βαθμονόμηση διώρυγας και μετρητών

Για την εξασφάλιση της μεγαλύτερης ακρίβειας των μετρήσεων, έχει προηγηθεί η βαθμονόμηση της πειραματικής εγκατάστασης, μέσω δοκιμαστικών πειραμάτων, ώστε να βρεθούν τα χαρακτηριστικά των κυμάτων που παράγει η κυματογεννήτρια. Επιπλέον για να εξασφαλιστεί η σωστή αναγωγή της μηδενικής τιμής των οργάνων και της διαφοράς δυναμικού σε διαφορά της στάθμης του ύδατος, πριν από κάθε σειρά μετρήσεων πραγματοποιείται απόπλυση και καθαρισμός των οπών των στελεχών των μετρητών (κάθε μετρητής έχει πέντε οπές ανά 2 cm), προκειμένου να απομακρυνθούν τα άλατα που δημιουργούνται στην επιφάνειά τους, αλλά και επανατοποθέτησή των μετρητών προκειμένου να επιτυγχάνεται όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια κατά τις μετρήσεις.

### 3.2.4 Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων

Για τη συλλογή και την επεξεργασία των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πακέτο H.R. WaveData – Data acquisition and analysis software program της αγγλικής εταιρείας H.R. Wallingford, το οποίο δημιουργεί και αποθηκεύει αρχεία καταγραφής και βαθμονόμησης των μετρήσεων των κυματισμών. Αφού καθοριστεί η συχνότητα καταγραφής των σημάτων που καταγράφει ο κάθε μετρητής και το σύστημα μονάδων, δημιουργείται ένα αρχείο στο οποίο αποθηκεύονται τα αρχεία των μετρήσεων.

**Πίνακας 3.2** Απεικόνιση του εξαγόμενου αρχείου αποτελεσμάτων, από το πρόγραμμα H.R. WaveData, για την ανάλυση των πειραματικών μετρήσεων.

C:\HR Wavedata\teresa_02\anres_T0003_C00_2005Apr25h13m51.csv	
C:\HR WaveData\Teresa_02\	
25/Apr/2005 13:51	
C:\HR Wavedata\teresa_02\Test_0003_2005Apr25h12m07.wvd	
C:\HR Wavedata\teresa_02\calib_0001_2005Apr25h11m55.wvd	
Job number: Teresa_02	
Test number 3	
Channel 0 , 5 channels, numbered from zero	
probe 1	
metres	
Scale unspecified	
No scaling applied to results	
Values expressed in model terms	
0.05 second scanning interval.	
6144 data values test length.	
256 data values, recording block length.	
6144 values in series.	
0.1052515199999995 data points missing.	
0 data points duplicate.	
0 data points out of range	
From inspection of data ...	
307.15 second time-span.	
0.05 second start time.	
307.2 second end time.	
All recorded data analysed	
No trend removal.	
No smoothing of data	
No smoothing of spectrum	
-1.651950E-001,	metres, mean value.
2.500670E+001,	metres, maximum value
-2.193390E+001,	metres, minimum value
1.490958E+001,	metres, standard deviation
5.963832E+001,	metres, HS
1.490928E+001,	metres, RMS about threshold 0
6.738281E-001,	hertz, Fp
1.484058E+000,	seconds, Tp
1.383046E+000,	seconds, Tm (spectral calc)
2.080000E+002,	number, waves recorded
1.476683E+000,	seconds, Tbar (wave count)
4.689183E+001,	metres, Hmax
4.650432E+001,	metres, H10
4.631156E+001,	metres, H3
4.574537E+001,	metres, Hbar
4.578928E+001,	metres, HRMS

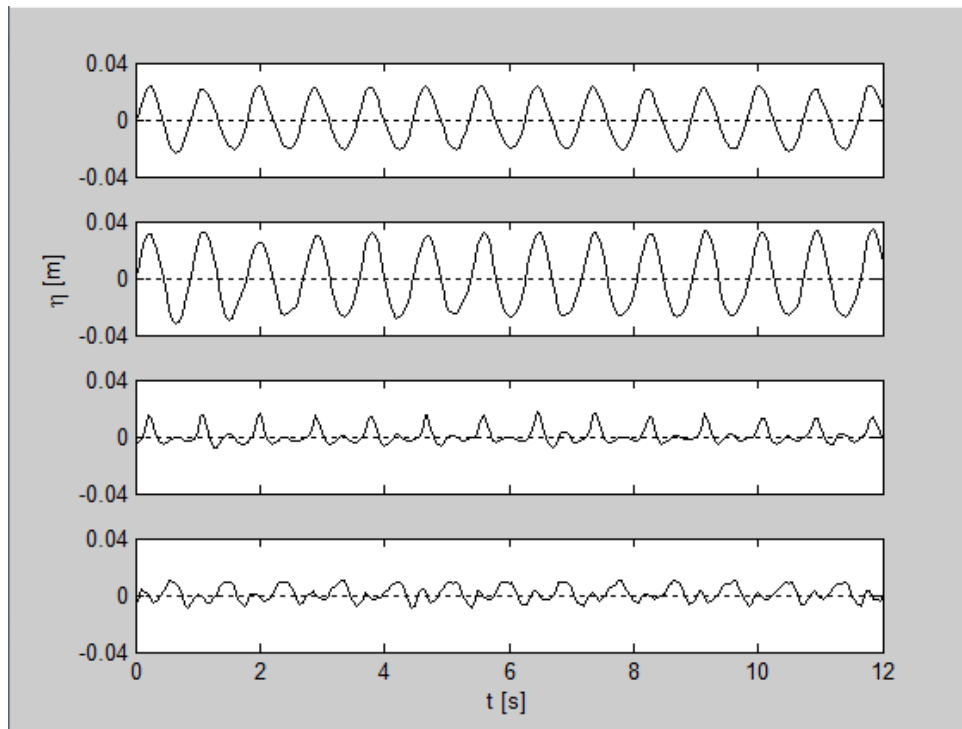
Έπειτα ξεκινά η διαδικασία εκτέλεσης των πειραμάτων με τη ρύθμιση της ταχύτητας και της εκκεντρότητας της κυματογεννήτριας. Στην παρούσα εργασία κάθε μέτρηση διαρκεί 307 s και επαληθεύεται από την επόμενη μέτρηση ίσης διάρκειας. Μετά το πέρας των δύο

διαδοχικών μετρήσεων διακόπτεται η λειτουργία της γεννήτριας και μεταβάλλεται η ταχύτητα για την επόμενη ομάδα μετρήσεων.

Αφού ολοκληρωθούν οι μετρήσεις, συλλέγονται όλα τα δεδομένα σε ένα συγκεντρωτικό φύλλο Excel και τελικά μέσω του προγράμματος MatLab μεταφράζονται μέσω ενός κώδικα (Πίνακας 3.3) στις επιθυμητές χρονοσειρές ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας (Σχήμα 3.4). Η μεταβολή του ύψους κύματος της ελεύθερης επιφάνειας προσδιορίζεται με τη βασική παραδοχή ότι το ένα ορισμένο κύμα είναι ανεξάρτητο από οποιοδήποτε άλλο. Η ανάλυση κάθε καταγραφής, για τον προσδιορισμό του μέσου ύψους κύματος για κάθε μετρητή για κάθε ομάδα πειραμάτων, βασίζεται στον προσδιορισμό των περιεχόμενων διαδοχικών κυμάτων με τη μέθοδο «τομή της μέσης στάθμης προς τα πάνω» (zero up – crossing method).

**Πίνακας 3.3** Κώδικας MatLab για την παραγωγή των επιθυμητών χρονοσειρών.

```
13
14 - T=0.9;
15 - OBP=eta_up;
16 - t=OBP(:,1);
17 - for kk=2:5
18 -     if kk<3
19 -
20 -         probe=kk-1
21 -     else
22 -         probe=kk
23 -     end
24 -     eta_up_crossing
25 - end
26
27
28 - eta_up(:,2:end)=eta_up(:,2:end)/100;
29 - figure
```



**Σχήμα 3.4** Ενδεικτικές χρονοσειρές ανύψωσης ελεύθερης επιφάνειας του πειράματος A25.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι ο χρόνος καταγραφής της κάθε μέτρησης θεωρείται μεγάλος, αφού στο χρόνο αυτό ο κυματισμός που ξεκινά από το ένα άκρο της διάρυγας προλαβαίνει να υποστεί πολλαπλές ανακλάσεις, φαινόμενα τα οποία δεν είναι αντιπροσωπευτικά των πραγματικών. Το ίδιο συμβαίνει και με τις επαναληπτικές μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί για κάθε καταγραφή. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκαν οι πρώτες μετρήσεις κάθε ομάδας και έγινε η εκ νέου επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων, για την εξαγωγή πιο αντιπροσωπευτικών αποτελεσμάτων. Πιο συγκεκριμένα, προτιμάται μέρος των μετρήσεων αυτών, οι οποίες έχουν καταγραφεί στο χρόνο στον οποίο μπορεί να εμφανιστούν φαινόμενα τα οποία εμφανίζονται ενδεχομένως και σε έναν πραγματικό λιμένα. Οπότε και τα αποτελέσματα των μετρήσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη σωστή εξαγωγή συμπερασμάτων. Παράδειγμα εσφαλμένης θεώρησης, αποτελεί η καταγραφή μέτρησης η οποία ανήκει σε χρονική στιγμή κατά την οποία ο κυματισμός αφού έχει φτάσει στο απορροφητικό αριστερό άκρο της δεξαμενής έχει επιστρέψει ξανά στο ομοίωμα. Τελικά και σύμφωνα με τα προηγούμενα, υπολογίζονται τα μέσα ύψη κύματος  $H_{\text{mean}}$ , τα οποία και χρησιμοποιούνται σαν δεδομένα για την κατάστρωση του προτεινόμενου μοντέλου και τελικά την εκτίμηση του συντελεστή κυματικής μετάδοσης  $K_t$ .

### 3.2.5 Συμπεράσματα από τη μελέτη των πειραματικών διατάξεων

Από την παραπάνω μελέτη προέκυψε ότι αύξηση του πλάτους του αγωγού ανανέωσης αυξάνει το ύψος του διεισδύοντος κυματισμού ενώ αύξηση του μήκους του αγωγού μειώνει το ύψος του διεισδύοντος κυματισμού. Επίσης, αύξηση του ύψους και της περιόδου του προσπίπτοντος κυματισμού αυξάνει το ύψος του διεισδύοντος κυματισμού. Τέλος, ο συντελεστής της κυματικής διείσδυσης μειώνεται με αύξηση της καμπυλότητας του προσπίπτοντος κυματισμού.

### 3.3 Πειραματικές μετρήσεις σε τριδιάστατο φυσικό ομοίωμα

#### 3.3.1 Περιγραφή της πειραματικής εγκατάστασης

Προκειμένου να γίνει κατανοητή η επίδραση στην κυματική διείδυση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του αγωγού ανανέωσης, της ανάκλασης του μετώπου, της βαθυμετρίας χρησιμοποιούνται ως συμπληρωματικές των προηγούμενων νέες πειραματικές μετρήσεις. Τα πειράματα διεξήχθησαν στη Δεξαμενή Δοκιμών Δ<sub>1</sub> του Εργαστηρίου Λιμενικών Έργων του Ε.Μ.Π., σε κλίμακα 1:70, με εξωτερικές διαστάσεις 26,80 m x 24,30 m και βάθος 1,00 m. Εντός της δεξαμενής είναι εγκατεστημένο σύστημα παραγωγής μονοχρωματικών και τυχαίων κυματισμών, ενώ τα τοιχώματά της προκειμένου να εξασφαλίζεται χαμηλός συντελεστής ανάκλασης, έχουν κατασκευασθεί αποσβεστικές επενδύσεις από λιθορριπή με κλίση πρανών 1:2. Για τη δημιουργία των κυμάτων χρησιμοποιήθηκε σύστημα γεννήτριας, που διαθέτει υδραυλικό μηχανισμό – κινητήρα, υδραυλικά έμβολα, κυματιστήρες, σύστημα ελέγχου και κατάλληλο λογισμικό. Ο υδραυλικός μηχανισμός κινεί τα έμβολα, τα οποία είναι εγκατεστημένα επί των κυματιστήρων και κινούν τους βραχίονες των γεννητριών, οι οποίοι κινούν το κατακόρυφο μέτωπο και παράγονται τα κύματα. Για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν ο ένας εκ των δύο κυματιστήρων, με ύψος 1,20 m και πλάτος 6,00 m, με δυνατότητα μετατόπισης, ώστε να διέρχεται κυματισμός υπό διαφορετική γωνία πρόσπτωσης.

Στο φυσικό ομοίωμα (Σχήμα 3.5) κατασκευάσθηκε ένας τυπικός κυματοθραύστης (από ξύλο) με κατακόρυφο μέτωπο (σε πυθμένα σταθερού βάθους  $h=15$  cm), στον οποίο ενσωματώθηκε αγωγός ανανέωσης από αλουμίνιο. Το φυσικό προσομοίωμα έχει διαστάσεις 86 cm x 225 cm x 387 cm (πλάτος x ύψος x μήκος).





**Σχήμα 3.5** Φυσικό προσομοίωμα κυματοθραύστη με κατακόρυφο μέτωπο και αγωγό ανανέωσης χωρίς άνω όριο (Πηγή: Τσουκαλά κ.ά., 2013).

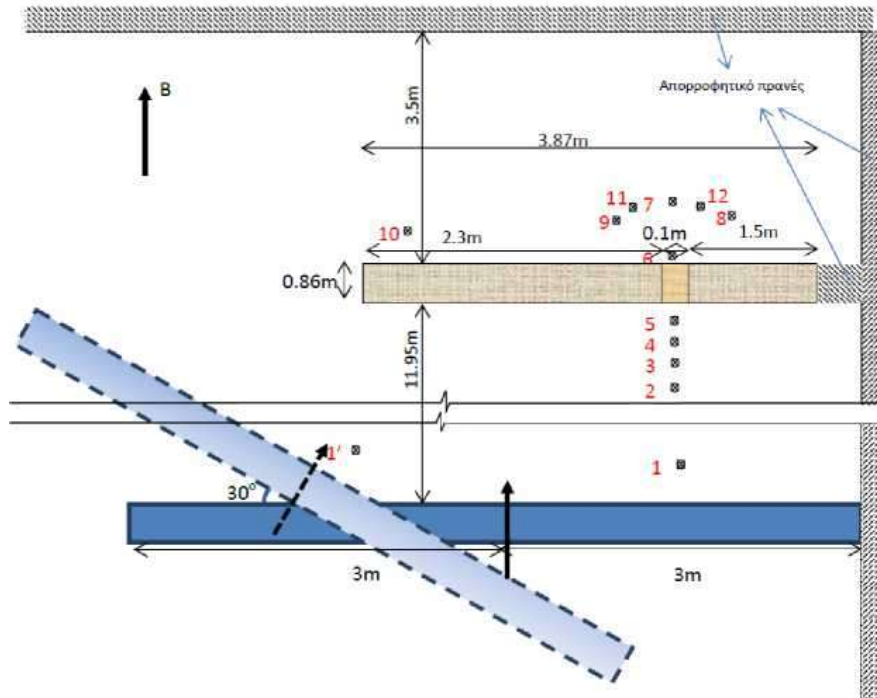
Οι πειραματικές διατάξεις που ελέγχθηκαν επισυνάπτονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3.4). Τα πειράματα, των οποίων τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία, εκτελέστηκαν για δύο διαφορετικές διατάξεις και γωνία πρόσπτωσης ίση με  $90^\circ$ , για δύο διαφορετικές περιόδους ( $T_1=0,6$  s,  $T_2=0,75$  s) και ύψος κύματος  $H$  με εύρος από 1,38 cm έως 6,19 cm (σχεδόν γραμμικοί κυματισμοί έως έντονα μη γραμμικοί κυματισμοί).

**Πίνακας 3.4** Χαρακτηριστικά των πειραματικών διατάξεων.

Διαστάσεις αγωγού ανανέωσης				
Κωδικός διάταξης	Μήκος $l$ (cm)	Πλάτος $b$ (cm)	Ύψος $h$ (cm)	Γωνία πρόσπτωσης $\varphi(^\circ)$
1.1	86	10	10	90
2.1	86	8,5	10	90

Για την καταγραφή των κυματικών χαρακτηριστικών χρησιμοποιήθηκαν 12 μετρητές κύματος τύπου αντιστάσεως (αποτελούνται από δύο σύρματα και στηρίζονται σε τρίποδο), οι οποίοι μετρούν τη στιγμιαία μεταβολή της στάθμης του ύδατος. Όλοι οι μετρητές εκτός του  $P_1$  παραμένουν στις ίδιες θέσεις για όλες τις μετρήσεις, ενώ ο  $P_1$  τοποθετείται σε διαφορετική θέση ανάλογα τη γωνία πρόσπτωσης (σε κάθετη απόσταση 2 m από τον κυματιστήρα). Οι μετρητές  $P_2, P_3, P_4$  χρησιμεύουν για τον υπολογισμό του συντελεστή ανάκλασης, οι μετρητές  $P_5, P_6$  καταγράφουν τον κυματισμό ανάντη και κατόντη του αγωγού, ενώ οι μετρητές  $P_7, P_{11}$ ,

$P_{12}$  χρησιμεύουν για τον υπολογισμό του συντελεστή περίθλασης, όπως και οι μετρητές  $P_8$  και  $P_9$  και ο μετρητής  $P_{10}$  χρησιμοποιείται για την καταγραφή των παραγόμενων από περίθλαση κυματισμών (Σχήμα 3.6 και Πίνακας 3.5).



**Σχήμα 3.6** Σκαρίφημα πειραματικής διάταξης πειραματικών μετρήσεων στη δεξαμενή (Πηγή: Τσουκαλά κ.ά., 2013).

**Πίνακας 3.5** Θέσεις μετρητών στην πειραματική διάταξη.

Μετρητής	Οριζόντια απόσταση από κεντρικό άξονα αγωγού (m)	Κατακόρυφη απόσταση από κυματιστήρα (m)
P1	0,00	2,00
P2	0,00	11,01
P3	0,00	11,19
P4	0,00	11,69
P5	0,00	11,85
P6	0,00	12,91
P7	0,00	13,31
P8	0,25	13,06
P9	-0,25	13,06
P10	-1,80	13,06
P11	0,22	13,26
P12	-0,22	13,26

### 3.3.2 Διαδικασία μετρήσεων κυμάτων

Οι μετρητές που προαναφέρθηκαν (wave probes) τύπου αντιστάσεως, μετρούν τη στιγμιαία μεταβολή της στάθμης του ύδατος και λειτουργούν όπως προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3.2.2.

### 3.3.3 Βαθμονόμηση διώρυγας και μετρητών

Η βαθμονόμηση των μετρητών κύματος απαιτείται πριν την έναρξη των μετρήσεων, ώστε να γίνεται σωστή αναγωγή της μηδενικής τιμής των οργάνων, οπότε και πραγματοποιείται μέσω του προγράμματος Calibration of data inputs του λογισμικού πακέτου H.R. Wave Data. Ενώ προηγήθηκε και καθαρισμός των μετρητών από τυχόν άλατα στην επιφάνεια των στελεχών τους.

### 3.3.4 Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων

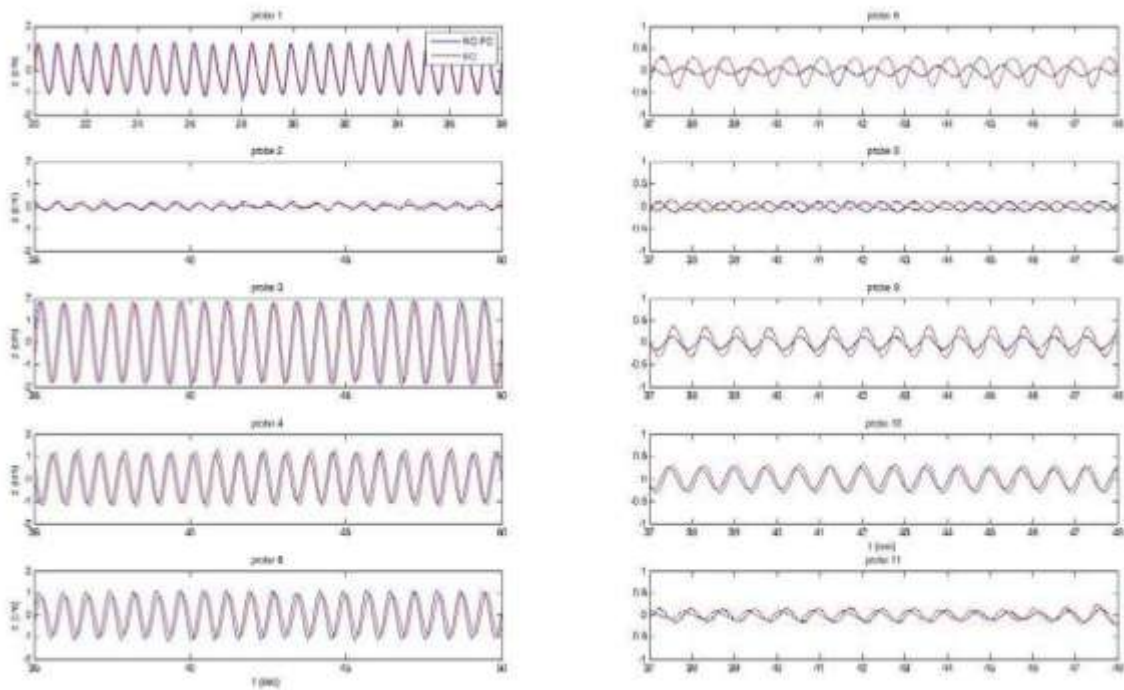
Για τη συλλογή και την επεξεργασία των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε όμοια με το πείραμα στη διδιάστατη διώρυγα δοκιμών, το λογισμικό πακέτο H.R. WaveData – Data acquisition and analysis software program της αγγλικής εταιρείας H.R. Wallingford. Η συχνότητα

καταγραφής των σημάτων που καταγράφει ο κάθε μετρητής είναι ίση με 100 Hz. Κάθε πειραματική μέτρηση διαρκεί 81,92 s. Αφού λοιπόν ορισθούν οι παράμετροι για την επεξεργασία, προκύπτουν τα χαρακτηριστικά μεγέθη στα αρχεία των αποτελεσμάτων.

**Πίνακας 3.6** Απεικόνιση του εξαγόμενου αρχείου αποτελεσμάτων, από το πρόγραμμα H.R. WaveData, για την ανάλυση των πειραματικών μετρήσεων.

C:\HRWavedata\FAR02B\anres T0001 C01 2011 Nov24h14m25.csv			
C:\HR WaveData\FAR02B\			
C:\HRWavedata\FAR02B\FAR02BYTest 1 2011 Novi BhG9m35.wvd			
C:\HRWavedata\FAR02B\FAR02B\calib 1 2011 Nov16h09m35.wvd			
Job number: FAR02B			
Test number 1			
Channel 1	64 channels	numbered from one	
CH1			
mm			
Scale unspecified			
No scaling applied to results			
Values expressed in model terms			
0.02 second scanning interval.			
65754 data values test length.			
512 data v	recording block length.		
65536 values in series.			
0 data points missing.			
2.27G0G000000001 data points duplicate.			
65536 data points out of range			
From inspection of data ...			
1310.7 second time-span.			
0.02 second start time.			
1310.72 second end time.			
Truncated data series			
No trend removal.			
No smoothing of data			
No smoothing of spectrum			
4.92E-01	mm	mean value.	
1.48E+01	mm	maximum value	
<i>mmmm</i>	mm	minimum value	
3.88E+00	mm	standard deviation	
1.55E+01	mm	HΞ	
3.91 E+00	mm	RMS about threshold 0	
1.17E+00	hertz	Fp	
8.53E-01	seconds	Tp	
5.93E-01	seconds	Tm (spectral calc)	
1.73E+03	number	waves recorded	
7.59E-01	seconds	Tbar (wave count)	
1.96E+01	mm	Hmax	
1.56E+01	mm	H10	
1.39E+01	mm	H3	
1.07E+01	mm	Hbar	
1.12E+01	mm	HRMS	

Για την εξαγωγή των μέσων υψών κυματισμού, αφού υπολογισθούν οι χρόνοι διάδοσης του πρώτου παραγόμενου κυματισμού (για τους λόγους που προαναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 3.2.4) παράγονται οι επιθυμητές χρονοσειρές ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας.



**Σχήμα 3.7** Ενδεικτικές χρονοσειρές ανύψωσης ελεύθερης επιφάνειας των πειραμάτων 26 και 28 (Πηγή: Τσουκαλά κ.ά., 2013).

### 3.3.5 Συμπεράσματα από τη μελέτη των πειραματικών διατάξεων

Η παραπάνω έρευνα αποδεικνύει ότι μεγαλύτερο πλάτος αγωγού ανανέωσης επιτρέπει μεγαλύτερη διείσδυση κυματικής ενέργειας, ενώ μικρότερο πλάτος αγωγού οδηγεί σε εντονότερη περίθλαση του κυματισμού κατόντη του αγωγού και άρα σε μεγαλύτερους συντελεστές διείσδυσης στην περιοχή αυτή, οι οποίοι γίνονται πάλι μικρότεροι προς το πέρας της διώρυγας. Επιπλέον οι συντελεστές μετάδοσης αυξάνονται (τριπλασιάζονται) παρουσία του αγωγού ανανέωσης.

Συγκρίνοντας τα συμπεράσματα της διδιάστατης και της τριδιάστατης διώρυγας, προκύπτει ότι και στις δύο περιπτώσεις, αύξηση του πλάτους του αγωγού ανανέωσης, επιφέρει αύξηση στο ύψος του διεισδύοντος κυματισμού και άρα αύξηση της κυματικής ενέργειας μέσα στη λιμενολεκάνη.

### 3.4 Δεδομένα $K_t$ για την κατάστρωση του ΤΝΔ

Αρχικά για κάθε ομάδα πειραμάτων (διδιάστατο και τριδιάστατο) υπολογίζονται τα μέσα ύψη κύματος του κάθε μετρητή, για κάθε διάταξη του αγωγού ανανέωσης, για γωνία πρόσπτωσης

του εισερχόμενου κυματισμού ίση με  $90^\circ$  και για κάθε περίοδο του εισερχόμενου κυματισμού, όπως αυτά προέκυψαν μετά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των πειραμάτων.

**Πίνακας 3.7** Μέσο ύψος κύματος  $H_{mean}$ , στο διάστημα φυσικό ομοίωμα.

a/a	a/a	T (sec)	b (cm)	l(cm)	hs(cm)	P1(cm)	P3(cm)	P4(cm)	P5(cm)
T1	A.23	0,90				2,494	3,101	0,841	0,695
T2	A.25	0,90				4,201	6,938	1,053	1,096
T3	A.27	0,90				6,212	8,595	1,570	0,957
T4	A.29	0,90				8,127	10,920	1,926	1,946
T5	A.31	0,90				9,295	14,089	2,127	1,669
T6	A.13	1,10				4,996	7,096	1,224	1,212
T7	A.15	1,10				4,996	7,100	1,157	1,234
T8	A.17	1,10	18	50	12	8,241	13,428	2,406	2,038
T9	A.19	1,10				11,887	19,290	3,535	2,832
T10	A.21	1,10				12,677	22,122	3,679	2,718
T11	A.3	1,48				2,883	5,096	0,998	0,691
T12	A.5	1,48				5,06	8,949	1,727	1,043
T13	A.7	1,48				7,402	12,646	3,551	1,403
T14	A.9	1,48				9,93	16,009	3,36	1,782
T15	A.11	1,48				12,628	19,224	3,381	1,742
T16	B.23	0,90				2,271	3,094	1,221	1,249
T17	B.25	0,90				4,367	5,767	1,552	1,201
T18	B.27	0,90				6,275	7,94	2,012	1,943
T19	B.29	0,90				7,933	10,233	2,45	2,323
T20	B.31	0,90				8,965	11,345	2,654	2,474
T21	B.13	1,10				2,084	3,589	1,403	0,945
T22	B.15	1,10				7,532	12,984	2,378	1,893
T23	B.17	1,10	24	50	12	7,532	12,297	2,226	2,064
T24	B.19	1,10				11,459	17,783	4,005	4,174
T25	B.21	1,10				13,066	20,850	4,309	3,776
T26	B.3	1,48				3,015	4,779	1,290	0,741
T27	B.5	1,48				5,246	8,224	2,103	1,121
T28	B.7	1,48				7,481	12,796	3,010	2,078
T29	B.9	1,48				9,876	16,148	4,877	2,152
T30	B.11	1,48				12,006	20,623	5,363	1,591

**Πίνακας 3.8** Μέσο ύψος κύματος  $H_{mean}$ , στο τριδιάστατο φυσικό ομοίωμα.

a/a	a/a	T(sec)	b(cm)	l(cm)	2hs(cm)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P8	P9	P10	P11
V1	5					1,556	0,491	2,230	2,997	0,989	0,776	0,485	0,447	0,419	0,175
V2	6	0,6	10	86	10	1,940	0,550	2,770	3,730	1,210	1,000	0,610	0,600	0,540	0,290
V3	7					2,510	0,830	3,560	4,750	1,580	1,310	0,790	0,780	0,690	0,400
V4	8					3,850	1,290	5,500	7,230	2,410	2,030	1,190	1,180	1,090	0,600
V5	9					1,454	0,636	2,708	2,923	0,272	0,757	0,417	0,487	0,427	0,153
V6	10	0,6	8,5	86	10	1,860	0,800	3,480	3,690	0,450	0,990	0,490	0,610	0,560	0,240
V7	11					2,414	1,148	4,242	4,629	0,622	1,262	0,697	0,770	0,758	0,290
V8	12					3,660	1,850	6,360	6,890	1,000	1,930	1,070	1,160	1,200	0,480
V9	19					1,770	0,770	2,800	1,670	1,790	0,500	0,120	0,490	0,450	0,079
V10	20					2,200	0,940	3,410	1,990	2,100	0,630	0,180	0,600	0,560	0,093
V11	21	0,75	10	86	10	2,520	1,110	3,820	2,300	2,430	0,700	0,180	0,690	0,650	0,130
V12	22					2,810	1,220	4,270	2,570	2,710	0,800	0,260	0,700	0,740	0,150
V13	23					3,530	1,610	5,420	3,280	3,460	0,990	0,320	1,010	0,970	0,190
V14	24					3,810	1,730	5,850	3,540	3,720	1,070	0,360	1,090	1,070	0,280
V15	27					2,010	0,290	3,180	2,130	1,670	0,610	0,120	0,610	0,530	0,140
V16	28	0,75	8,5	86	10	2,321	0,370	3,581	2,418	1,876	0,694	0,170	0,681	0,603	0,237
V17	29					2,580	0,410	4,020	2,710	2,120	0,780	0,180	0,780	0,680	0,200
V18	30					3,810	0,640	5,920	4,080	3,150	1,120	0,330	1,040	1,060	0,350

Έπειτα ακολουθούν οι πίνακες με τα αποτελέσματα των δύο πειραματικών μετρήσεων, όπου παραθέτουν του τελικούς συντελεστές  $K_t$  των διατάξεων που χρησιμεύουν σαν δεδομένα εξαγωγής (βλ. Κεφάλαιο 5) στην κατάστρωση του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου. Για τον υπολογισμό των συντελεστών χρησιμοποιήθηκαν τα  $H_{mean}$  των επιλεγόμενων χρονοσειρών, δηλαδή η μέση τιμή των καταγραφόντων κυματισμών. Στους πίνακες παρακάτω επισυνάπτονται οι τιμές των συντελεστών για τον μετρητή κατάντη του κυματοθραύστη με τον αγωγό ανανέωσης, για κάθε περίοδο του εισερχόμενου κυματισμού και για κάθε διάταξη του αγωγού ανανέωσης για δύο διαφορετικές περιπτώσεις: για εισερχόμενο κυματισμό αυτόν του πλησιέστερου στην κυματογεννήτρια μετρητή ( $K_{t1} = H_{κατάντη} / H_{εισερχ.κυματιστήρα}$ ) και αυτόν του πλησιέστερου στο έργο μετρητή ( $K_{t2} = H_{κατάντη} / H_{ανάντη}$ ).

Για το διδιάστατο φυσικό ομοίωμα ο κυματισμός πλησιέστερα στην κυματογεννήτρια καταγράφεται από το μετρητή  $P_1$  και ο συντελεστής  $K_{t1}$  ισούται με το λόγο  $H_{P4}/H_{P1}$  (Πίνακας 3.9.α). Όμοια και στο τριδιάστατο ομοίωμα ο αντίστοιχος συντελεστής  $K_{t1}$  ισούται με το λόγο  $H_{P6}/H_{P1}$  (Πίνακας 3.9.β).

Αναφορικά με τη δεύτερη περίπτωση και τον υπολογισμό του συντελεστή  $K_{12}$ , στο διδιάστατο ομοίωμα ισούται με το λόγο  $H_{P4}/H_{P3}$  (Πίνακας 3.10.α), αφού ο μετρητής  $P_3$  βρίσκεται ακριβώς ανάντη του έργου και στο τριδιάστατο ομοίωμα με το λόγο  $H_{P6}/H_{P5}$  (Πίνακας 3.10.β) επειδή ο μετρητής  $P_5$  βρίσκεται ακριβώς ανάντη του κυματοθραύστη και στο μέσο του αγωγού ανανέωσης.



**Πίνακας 3.9.α** Καταγραφή  $K_{t1}$  στο δισδιάστατο φυσικό ομοίωμα.

a/a	a/a	$K_{t1}$
T1	A.23	0,337
T2	A.25	0,251
T3	A.27	0,253
T4	A.29	0,237
T5	A.31	0,229
T6	A.13	0,245
T7	A.15	0,232
T8	A.17	0,292
T9	A.19	0,297
T10	A.21	0,290
T11	A.3	0,346
T12	A.5	0,341
T13	A.7	0,480
T14	A.9	0,338
T15	A.11	0,268
T16	B.23	0,538
T17	B.25	0,355
T18	B.27	0,321
T19	B.29	0,309
T20	B.31	0,296
T21	B.13	0,673
T22	B.15	0,316
T23	B.17	0,296
T24	B.19	0,350
T25	B.21	0,330
T26	B.3	0,428
T27	B.5	0,401
T28	B.7	0,402
T29	B.9	0,494
T30	B.11	0,447

**Πίνακας 3.9.β** Καταγραφή  $K_{t1}$  στο τρισδιάστατο φυσικό ομοίωμα.

a/a	a/a	$K_{t1}$
V1	5	0,499
V2	6	0,515
V3	7	0,522
V4	8	0,527
V5	9	0,521
V6	10	0,532
V7	11	0,523
V8	12	0,527
V9	19	0,282
V10	20	0,286
V11	21	0,278
V12	22	0,285
V13	23	0,280
V14	24	0,281
V15	27	0,303
V16	28	0,299
V17	29	0,302
V18	30	0,294

**Πίνακας 3.10.α** Καταγραφή  $K_{t_2}$  στο δισδιάστατο φυσικό ομοίωμα.

a/a	a/a	$K_{t_2}$
T1	A.23	0,271
T2	A.25	0,152
T3	A.27	0,183
T4	A.29	0,176
T5	A.31	0,151
T6	A.13	0,172
T7	A.15	0,163
T8	A.17	0,179
T9	A.19	0,183
T10	A.21	0,166
T11	A.3	0,196
T12	A.5	0,193
T13	A.7	0,281
T14	A.9	0,210
T15	A.11	0,176
T16	B.23	0,395
T17	B.25	0,269
T18	B.27	0,253
T19	B.29	0,239
T20	B.31	0,234
T21	B.13	0,391
T22	B.15	0,183
T23	B.17	0,181
T24	B.19	0,225
T25	B.21	0,207
T26	B.3	0,270
T27	B.5	0,256
T28	B.7	0,235
T29	B.9	0,302
T30	B.11	0,260

**Πίνακας 3.10.β** Καταγραφή  $K_{t_2}$  στο τρισδιάστατο φυσικό ομοίωμα.

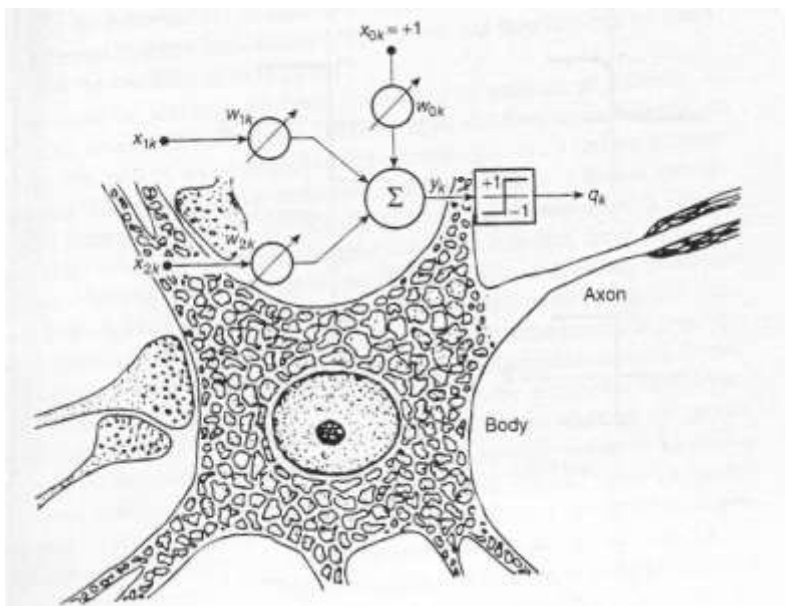
a/a	a/a	$K_{t_2}$
V1	5	0,785
V2	6	0,826
V3	7	0,829
V4	8	0,842
V5	9	2,783
V6	10	2,200
V7	11	2,029
V8	12	1,930
V9	19	0,279
V10	20	0,300
V11	21	0,288
V12	22	0,295
V13	23	0,286
V14	24	0,288
V15	27	0,365
V16	28	0,370
V17	29	0,368
V18	30	0,356

## 4.Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα

### 4.1 Γενικά περί Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων

#### 4.1.1 Από τα βιολογικά στα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα

Τα νευρωνικά δίκτυα αναπτύχθηκαν μέσα από τις διεξαγωγές ερευνών (1960-1980) της Τεχνητής Νοημοσύνης (κλάδος της επιστήμης των υπολογιστών που ασχολείται με τη σχεδίαση συστημάτων που επιδεικνύουν χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τη νοημοσύνη στην ανθρώπινη συμπεριφορά), μέσω προσπαθειών μίμησης της ανοχής σε βλάβες και τη δυνατότητα εξόρυξης γνώσης μέσα από βιολογικά νευρωνικά συστήματα, μοντελοποιώντας τη δομή των χαμηλών επιπέδων του εγκεφάλου. Τα ΤΝΔ προέρχονται λοιπόν από την προσπάθεια προσομοίωσης του τρόπου λειτουργίας του ανθρώπινου εγκεφάλου και γενικότερα του νευρικού συστήματος, του τρόπου δηλαδή που αυτός επεξεργάζεται πληροφορίες (Σχήμα 4.1).

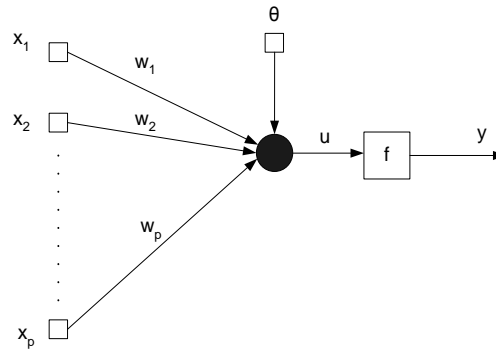


Σχήμα 4.1 Βιολογικό δίκτυο ανάλογο με το Τεχνητό (Πηγή: Πλέρου, 2012).

Τα ΤΝΔ αποτελούν μία συλλογή μεγάλου αριθμού συνδεδεμένων στοιχείων επεξεργασίας που ονομάζονται νευρώνες. Μελετώντας τα βιολογικά νευρωνικά δίκτυα που υπάρχουν στον εγκέφαλο, παρατηρούμε ότι αποτελούνται επίσης από νευρώνες (μικρότερο τμήμα του εγκεφάλου που είναι ικανό να επεξεργαστεί πληροφορίες). Οι βιολογικοί νευρώνες αποτελούνται από τρία βασικά τμήματα: το σώμα, τον άξονα και τους δενδρίτες. Οι δενδρίτες λαμβάνουν τα σήματα από γειτονικούς νευρώνες, ή διαφορετικά ηλεκτρονικούς παλμούς που διαδίδονται από τον άξονα του νευρώνα πομπού, ενώ το σώμα αθροίζει τα εισερχόμενα σήματα. Όταν αρκετά εισερχόμενα σήματα έχουν ληφθεί αποστέλλεται το επεξεργασμένο σήμα στους γειτονικούς νευρώνες μέσω του άξονα, έτσι ώστε ενώ κάθε νευρώνας δέχεται πολλά σήματα ως είσοδο, μετά την επεξεργασία τους διαδίδει μόνο ένα (Golden, 1996).

Όπως προαναφέρθηκε, τα ΤΝΔ αποτελούν μια προσπάθεια προσέγγισης της λειτουργίας του ανθρώπινου εγκέφαλου από μια μηχανή και έχουν της ικανότητα να εκτελούν υπολογισμούς με μαζικό παράλληλο τρόπο (Hopfield, 1985). Αποτελούνται και αυτά από τους νευρώνες (*neurons*) οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους, λειτουργούν αρμονικά και είναι οργανωμένοι σε στρώματα (*Layers*). Κάθε νευρώνας έχει πολλές εισόδους (*Inputs*) αλλά μόνο μία έξοδο (*Output*), η οποία μπορεί να αποτελεί είσοδο για άλλους νευρώνες (Σχήμα 4.2). 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. Όταν καθένας από τους νευρώνες ενός επιπέδου συνδέεται με όλους τους νευρώνες του επομένου επιπέδου, τότε το Νευρωνικό Δίκτυο είναι πλήρως συνδεδεμένο (*fully connected*), αλλιώς είναι μερικώς συνδεδεμένο (*partially connected*).

Οι συνδέσεις μεταξύ των νευρώνων διαφέρουν μεταξύ τους και η σπουδαιότητά τους προσδιορίζεται από τον συντελεστή βάρους για κάθε σύναψη. Η συνεργασία των νευρώνων καθορίζεται από την συνάρτηση μεταφοράς η οποία καθορίζει την κάθε έξοδο σε σχέση με τις εισόδους και τους συντελεστές βάρους. Η επεξεργασία κάθε νευρώνα καθορίζεται από την συνάρτησης ενεργοποίησης (Σχήμα 4.3), η οποία καθορίζει την έξοδο σε σχέση με τις εισόδους και τους συντελεστές βάρους (State, Vlamos 2000).



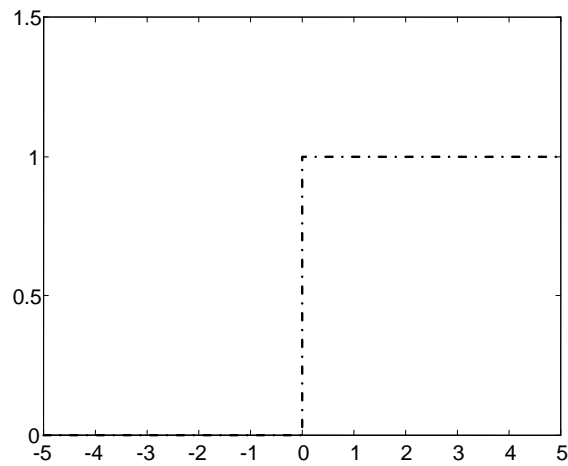
**Σχήμα 4.2.** Τεχνητός Νευρώνας (Πηγή: Γιαννακάκης, 2003).

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  $\theta$ , 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:

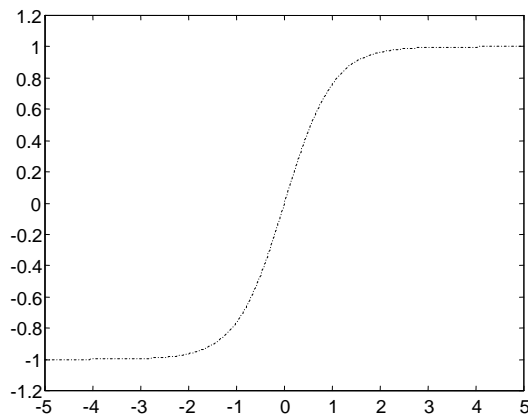
$$u = \sum_{i=1}^p w_i x_i - \theta \quad (4.1)$$

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

$$y = f(u) \quad (4.2)$$



**Σχήμα 4.3.α** Συνάρτηση κατωφλίου.



**Σχήμα 4.3.β** Σιγμοειδής υπερβολική εφαπτομενική συνάρτηση.

**Σχήμα 4.3** Συναρτήσεις ενεργοποίησης.

#### 4.1.2 Ιδιότητες Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων

Τα ΤΝΔ έχουν ιδιαίτερη υπολογιστική σημασία λόγω της ιδιότητάς τους να εκπαιδεύονται αλλά και να επεξεργάζονται παράλληλα πληροφορίες. Άμεση συνέπεια της ικανότητας εκπαίδευσής τους, είναι η ικανότητα γενίκευσης, δηλαδή η δυνατότητά 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 αφορούν σε μη-γραμμικά προβλήματα που δεν μπορούν εύκολα να περιγραφούν με κανόνες ή μαθηματικούς τύπους. Η εκτεταμένη χρήση των ΤΝΔ σε τέτοιου είδους προβλήματα, οφείλεται στη μη απαίτηση 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. Επιπλέον, τα ΤΝΔ εμφανίζουν ανοχή σε σφάλματα, γεγονός που οφείλεται στο μεγάλο αριθμό νευρώνων από τον οποίο αποτελούνται, αφού βλάβη σε έναν ή περισσότερους νευρώνες δεν επηρεάζει αισθητά τη συνολική απόδοση του ΤΝΔ.

Ωστόσο, τα Νευρωνικά Δίκτυα δε δίνουν πάντα βέλτιστες λύσεις σε όλα τα προβλήματα, όπως για παράδειγμα σε αυτά για τα οποία έχουν ήδη αναπτυχθεί μαθηματικά ή αλγοριθμικά μοντέλα επίλυσης, πιο αξιόπιστα από τα ΤΝΔ. Επίσης, τα ΤΝΔ αποτελούν ένα «μαύρο κουτί» για τους επιστήμονες, αφού η εξήγηση του τρόπου με τον οποίο επιλύονται τα προβλήματα είναι δυσνόητη και άρα δεν συγκρατούνται επαρκείς πληροφορίες για περαιτέρω έρευνα.

## 4.2 Τύποι Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων

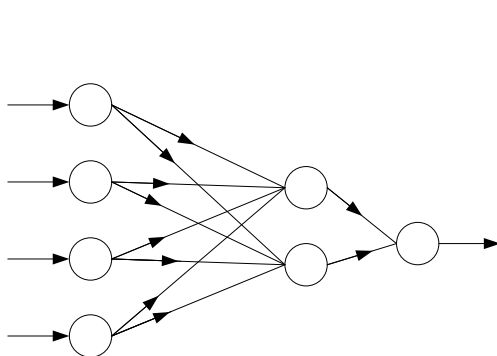
Ανάλογα με τον τύπο του μελετούμενου προβλήματος, επιλέγεται και το κατάλληλο ΤΝΔ. Τα Νευρωνικά Δίκτυα διακρίνονται σε κατηγορίες, ανάλογα:

- με την αρχιτεκτονική
- με το χρησιμοποιούμενο αλγόριθμο εκπαίδευσης.

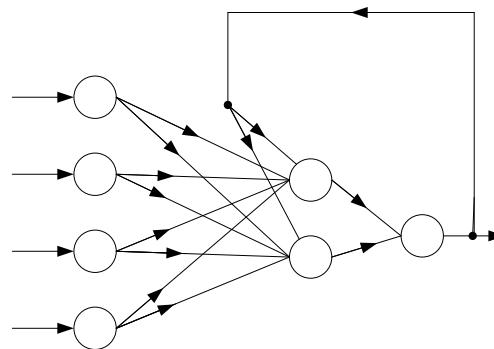
### 4.2.1 Αρχιτεκτονική Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων

Η αρχιτεκτονική ενός ΤΝΔ (Σχήμα 4.4), καθορίζεται από το πλήθος των στρωμάτων και τον τρόπο σύνδεσης των νευρώνων και έτσι διακρίνονται σε δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης (*feed-forward*) και δίκτυα ανατροφοδότησης (*recurrent*).

Τα σήματα που μεταφέρονται προς μόνο μία κατεύθυνση, από τα επίπεδα εισόδου προς τα επίπεδα εξόδου, ονομάζονται δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης και ειδικότερα αν δεν περιέχουν κάποιο ενδιάμεσο επίπεδο, Νευρωνικά Δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης ενός επιπέδου (*single layer feed-forward*) ή πολυεπίπεδα Νευρωνικά Δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης αν περιέχουν ένα ή περισσότερα ενδιάμεσα επίπεδα (*multilayer feed-forward*). Στα Νευρωνικά Δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης δεν επιτρέπεται η έξοδος του ενός νευρώνα να αποτελεί την είσοδο σε νευρώνα του ίδιου ή προηγούμενου επιπέδου (ανάδραση) (Σχήμα 4.4.α).



**Σχήμα 4.4.α** ΤΝΔ πρόσθιας τροφοδότησης



**Σχήμα 4.4.β** ΤΝΔ ανατροφοδότησης

**Σχήμα 4.4** Αρχιτεκτονική ΤΝΔ (Πηγή: Γιαννακάκης, 2003).



Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.4.β, στα ΤΝΔ ανατροφοδότησης, επιτρέπονται οι αναδράσεις και τα σήματα μπορούν να μεταφέρονται και προς τις δύο κατευθύνσεις. Όμοια με τα ΤΝΔ πρόσθιας τροφοδότησης, μπορούν να υπάρξουν Νευρωνικά Δίκτυα ανατροφοδότησης ενός επιπέδου ή πολυεπίπεδα.

#### 4.2.2 Αλγόριθμοι εκπαίδευσης

Ένα ΤΝΔ προκειμένου να εξάγει συμπεράσματα από τα δεδομένα που εισάγονται πρέπει πρωτίστως να περάσει από «εκπαίδευση». Κατά την εκπαίδευση, επιτυγχάνεται η βέλτιστη τιμή των συντελεστών βάρους, έτσι ώστε αυτή να ανταποκρίνεται καλύτερα στις ανάγκες του κάθε προβλήματος, μέσω ενός αλγορίθμου εκπαίδευσης. Ο καταλληλότερος αλγόριθμος εκπαίδευσης επιλέγεται ανάμεσα από τις εξής τρεις κατηγορίες: την εκπαίδευση με επίβλεψη (*supervised training*), την εκπαίδευση χωρίς επίβλεψη (*unsupervised training*) και την υβριδική εκπαίδευση (*hybrid training*).

Η εκπαίδευση με επίβλεψη, όπου οι είσοδοι εφαρμόζονται στο ΤΝΔ ταυτόχρονα με την επιθυμητή έξοδο του δικτύου, ενώ τα βάρη μεταβάλλονται έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η διαφορά μεταξύ της εξόδου του Νευρωνικού περιλαμβάνει τον πιο διαδεδομένο αλγόριθμο της κατηγορίας, αυτόν της όπισθεν διάδοσης σφάλματος (*back-propagation*). Ειδική περίπτωση της εκπαίδευσης με επίβλεψη, αποτελεί η ενισχυμένη εκπαίδευση (*reinforcement training*) ή ημienenισχυμένη εκπαίδευση, κατά την οποία 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 ΤΝΔ.

Η εκπαίδευση χωρίς επίβλεψη, αναφέρεται στις περιπτώσεις όπου η επιθυμητή έξοδος δεν είναι γνωστή, οπότε το ΤΝΔ αναζητά από μόνο του την «κρυμμένη πληροφορία» που υπάρχει στα δεδομένα για να πραγματοποιήσει την ταξινόμηση.

Η υβριδική εκπαίδευση, αποτελεί ένα συνδυασμό εκπαίδευσης με επίβλεψη και εκπαίδευσης χωρίς επίβλεψη. Στα πρώτα επίπεδα νευρώνων εφαρμόζεται συνήθως η εκπαίδευση χωρίς επίβλεψη, ώστε τα δεδομένα να ομαδοποιηθούν ανάλογα με τη σχετική τους ομοιότητα, ενώ σε επόμενα επίπεδα νευρώνων εφαρμόζεται η εκπαίδευση με επίβλεψη και πιο συγκεκριμένα ο αλγόριθμος της όπισθεν διάδοσης σφάλματος, ώστε οι ομάδες που προκύπτουν να συσχετισθούν με την επιθυμητή έξοδο.

### 4.3 Παράμετροι βελτιστοποίησης Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων

#### 4.3.1 Αρχικοποίηση βαρών

Αποδεδειγμένα η ταχύτητα σύγκλισης ενός ΤΝΔ εξαρτάται κυρίως από τα αρχικά βάρη, οπότε πρέπει να πραγματοποιείται αρχικοποίηση της μήτρας βαρών είτε με τυχαία αρχικά βάρη ή χρησιμοποιώντας ως αρχικά βάρη τις προσεγγιστικές λύσεις που προκύπτουν από άλλες τεχνικές μοντελοποίησης. Παραδείγματα τέτοιων τεχνικών αποτελούν η μέθοδος πρωτεύουσών συνιστωσών και ο ταξινομητής κοντινότερου γείτονα. Στην τυχαία αρχικοποίηση τα αρχικά βάρη παίρνουν μικρές τυχαίες τιμές. Τυχαίες ώστε να μην υπάρχουν συμμετρίες (κάθε νευρώνας επεξεργάζεται διαφορετικές συναρτήσεις) και μικρές προκειμένου να αποφεύγεται η μετάβαση σιγμοειδών συναρτήσεων σε κόρο, αλλά όχι πολύ μικρές γιατί αυτό θα σήμαινε πολύ μικρή τιμή για το σήμα του σφάλματος, επιδρώντας στην ταχύτητα της εκπαίδευσης. Στην αντίθετη περίπτωση, αν η απόκριση των νευρώνων του ίδιου επιπέδου ήταν παρόμοια, το συγκεκριμένο επίπεδο θα συμπεριφερόταν σαν να αποτελείται από ένα νευρώνα, οπότε η πληροφορία για το σφάλμα θα ήταν παρόμοια και η μεταβολή των βαρών θα ήταν δύσκολη. Επιπλέον, αν τα αρχικά βάρη έπαιρναν μεγάλες τιμές θα οδηγούσαν σε μεγάλο μέγεθος εισόδους για τους νευρώνες του επόμενου επιπέδου και άρα οι νευρώνες θα έτειναν να κινηθούν σε επίπεδες επιφάνειες κοντά στο σημείο εκκίνησης. Για την τυχαία αρχικοποίηση βαρών έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι, οι περισσότερες από τις οποίες αναφέρονται στο εύρος των αρχικών τιμών.

Στη μη τυχαία αρχικοποίηση βαρών, το ΤΝΔ ξεκινά από μια καλή λύση, ενώ ο αλγόριθμος της όπισθεν διάδοσης σφάλματος καταλήγει στη βέλτιστη λύση, μειώνοντας τον απαιτούμενο χρόνο εκπαίδευσης, ώστε να συγκλίνει στο πραγματικό ολικό ελάχιστο.

#### 4.3.2 Τερματισμός εκπαίδευσης

Για τη σωστή ολοκλήρωση της εκπαίδευσης, παίζει σημαντικό ρόλο ο καθορισμός της χρονικής στιγμής τερματισμού ενός ΤΝΔ. Αν η εκπαίδευση τελειώσει νωρίς, ενδεχομένως το ΤΝΔ να μην έχει εκπαιδευτεί καλά και κατά συνέπεια να μην λειτουργεί σωστά, οπότε να μην μπορεί να ανταποκριθεί επαρκώς στις ανάγκες του προβλήματος καταλήγοντας σε λάθος συμπεράσματα. Ενώ, αν η εκπαίδευση συνεχιστεί για παραπάνω απ' όσο χρειάζεται, τότε πιθανότατα να χάσει την ικανότητα γενίκευσης, δηλαδή να μην μπορεί να εκτιμήσει σωστά τα δεδομένα που απέχουν λίγο από τα δεδομένα εκπαίδευσης.

Συνήθη κριτήρια τερματισμού της εκπαίδευσης είναι τα παρακάτω:

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

Τα παραπάνω κριτήρια εξαρτώνται από τις παραμέτρους του ΤΝΔ, χωρίς να λαμβάνουν υπ' όψη τον παράγοντα γενίκευσης του ΤΝΔ, δηλαδή την ικανότητά του να ανταποκρίνεται σωστά σε καινούρια δεδομένα. Για τη βελτίωση της γενίκευσης, έχουν προταθεί διάφοροι μέθοδοι τερματισμού της εκπαίδευσης, όπως η μέθοδος του έγκαιρου τερματισμού (*early stopping*). Για την πραγματοποίηση της παραπάνω μεθόδου απαιτούνται δύο φάσεις: η φάση εκπαίδευσης (*training phase*), κατά την οποία χρησιμοποιούνται δύο σύνολα δεδομένων, το σύνολο εκπαίδευσης (*training set*) και το σύνολο επαλήθευσης (*validation set*) και η φάση γενίκευσης (*testing phase*).

Ένα ΤΝΔ εκπαιδεύεται μέσω των δεδομένων εκπαίδευσης, ενώ η διαδικασία ολοκληρώνεται με τη μεγιστοποίηση της απόδοσης του ΤΝΔ στο σύνολο της επαλήθευσης, οπότε και οι βέλτιστες τιμές για τις μήτρες των βαρών αποθηκεύονται για να χρησιμοποιηθούν μετέπειτα στη φάση της γενίκευσης. Κατά τη φάση γενίκευσης, οι είσοδοι στο ΤΝΔ αποτελούν τα δεδομένα του συνόλου γενίκευσης και η έξοδος που προκύπτει δίνει μία εκτίμηση για την ικανότητα του ΤΝΔ να ανταποκρίνεται σε καινούρια δεδομένα.

#### 4.3.3 Επιλογή συνόλου εκπαίδευσης, επαλήθευσης και γενίκευσης

Η ποσότητα και η ποιότητα των δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν για την εκπαίδευση του ΤΝΔ, καθορίζουν την απόδοση και την ικανότητα γενίκευσης του ΤΝΔ. Το σύνολο της εκπαίδευσης πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικό των προτύπων που χαρακτηρίζουν το προς επίλυση πρόβλημα, ώστε η απόκριση του εκπαιδευμένου ΤΝΔ να μην είναι καλή μόνο σε δεδομένα παραπλήσια αυτών που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσής του (παρεμβολή-*interpolation*) αλλά και σε περιπτώσεις πολύ διαφορετικές συγκριτικά με τα δεδομένα αυτά (υπερβολή-*extrapolation*). Για το λόγο αυτό λοιπόν, είναι απαραίτητη η επιλογή μεγάλου εύρους πιθανών διαφορετικών τιμών εκπαίδευσης για να αποφεύγεται η πιθανότητα εμφάνισης ακραίων περιπτώσεων. Τέλος, στα σύνολα εκπαίδευσης, επαλήθευσης και γενίκευσης θα πρέπει τα πρότυπα να εκπροσωπούνται με παρόμοια ποσοστά.

#### 4.4 Σχεδίαση Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου

Για τη λειτουργία ενός ΤΝΔ, πολύ σημαντικές παράμετροι αποτελούν ο αριθμός των επιπέδων και ειδικά ο αριθμός των ενδιάμεσων επιπέδων (αφού το επίπεδο εισόδου και εξόδου είναι υποχρεωτικά) και το πλήθος των νευρώνων από τους οποίους αποτελείται το καθένα δίκτυο.

Το πλήθος των επιπέδων, καθορίζει την πολυπλοκότητα του προβλήματος που μπορεί να λύσει το ΤΝΔ. Στην πράξη δεν χρησιμοποιούνται περισσότερα από δύο ενδιάμεσα επίπεδα, αφού δύο υπερεπιφάνειες είναι αρκετές για τη δημιουργία περιοχών ταξινόμησης οποιασδήποτε μορφής, αν και ακόμα και με ένα μόνο ενδιάμεσο επίπεδο το ΤΝΔ είναι ικανό να αναπαραστήσει οποιαδήποτε συνεχή συνάρτηση πολλών μεταβλητών.

Το πλήθος των νευρώνων που θα έχει κάθε επίπεδο, καθορίζεται μετά το πλήθος των επιπέδων. Για το επίπεδο εισόδου ο αριθμός των νευρώνων εξαρτάται από το πλήθος των χαρακτηριστικών που χρησιμοποιούνται για το προς επίλυση πρόβλημα, ενώ για το επίπεδο εξόδου οι νευρώνες καθορίζονται από το τι εξόδους χρειάζεται να δώσει το πρόβλημα. Ο αριθμός των νευρώνων των ενδιάμεσων επιπέδων χρήζει ιδιαίτερης προσοχής κατά τη σχεδίαση ενός ΤΝΔ, αφού συνδέεται με την απόδοση του ΤΝΔ. Για παράδειγμα, μικρός αριθμός νευρώνων σε ενδιάμεσα επίπεδα, μπορεί να αποτύχει να λύσει το πρόβλημα, ενώ αντίθετα μεγάλος αριθμός νευρώνων μπορεί να καταλήξει σε υπερεκπαίδευση.

Για τον υπολογισμό λοιπόν, του βέλτιστου αριθμού νευρώνων σε ενδιάμεσο επίπεδο χρησιμοποιούνται εμπειρικές σχέσεις που οι περισσότερες σχετίζονται άμεσα με την φύση του προβλήματος, το μέγεθος του συνόλου εκπαίδευσης, την ποιότητα των δεδομένων. Το εύρος των τιμών που πρέπει να έχουν οι νευρώνες στο ενδιάμεσο επίπεδο, έχει τεθεί αν έχει κατώτατο όριο το 2 και ανώτατο το  $2N+1$ , όπου  $N$  ο αριθμός των δεδομένων του διανύσματος εισόδου, με συνήθη αριθμό νευρώνων την τιμή  $\sqrt{MN}$ , όπου  $M$  ο αριθμός των νευρώνων του επιπέδου εξόδου ή το 75% του αριθμού των νευρώνων του επιπέδου εισόδου. Για την ολοκληρωμένη μελέτη ενός ΤΝΔ, εκτελούνται συνεχείς εκπαιδεύσεις του δικτύου για διαφορετικό αριθμό ενδιάμεσων νευρώνων και επιλέγεται εκείνος που ικανοποιεί καλύτερα το κριτήριο τερματισμού της εκπαίδευσης, ανεξάρτητα των παραπάνω. Υπάρχουν λοιπόν μέθοδοι που ξεκινούν την εκπαίδευση με μικρό αριθμό νευρώνων και συνεχίζουν προσθέτοντας επιπλέον νευρώνες (μέθοδοι ανάπτυξης - *constructive methods*), αλλά και το αντίστροφο (μέθοδοι περιορισμού νευρώνων - *pruning methods*).

#### 4.4.1 Προεπεξεργασία Δεδομένων

Τα διανύσματα εισόδου, πριν εφαρμοστούν στους νευρώνες του επιπέδου εισόδου, πρέπει να υποστούν κάποιου είδους επεξεργασία. Η προεπεξεργασία λοιπόν, έχει ως στόχο τα δεδομένα εισόδου να κανονικοποιούνται, έτσι ώστε η μέση τιμή τους να είναι ίση με μηδέν και η τυπική απόκλιση ίση με ένα, οπότε και όλοι οι συντελεστές βάρους να «μαθαίνουν» με την ίδια ταχύτητα. Εναλλακτικά, τα δεδομένα μπορούν να κανονικοποιηθούν από 0 έως 1 ή -1 έως 1 ανάλογα με το αν η χρησιμοποιούμενη συνάρτηση μετασχηματισμού είναι σιγμοειδής ή εφαπτομενική.

Για την επιτάχυνση του αλγορίθμου της όπισθεν διάδοσης σφάλματος, θα πρέπει οι μεταβλητές του διανύσματος εισόδου να είναι ασυσχέτιστες, μέσω διαφόρων μεθόδων μείωσης της διάστασης του διανύσματος εισόδου σε ένα ΤΝΔ. Ιδανικά πρέπει να εξεταστούν όλοι οι  $2^N$  διαφορετικοί συνδυασμοί των  $N$  μεταβλητών του διανύσματος εισόδου και να επιλέγονται οι μεταβλητές εκείνες που ικανοποιούν με βέλτιστο τρόπο κάποια συνάρτηση ποιότητας (κριτήριο τερματισμού ΤΝΔ ή κάποιο μέτρο απόστασης, πληροφορίας). Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει μεγάλο υπολογιστικό κόστος, οπότε χρησιμοποιούνται τεχνικές, οι οποίες βασίζονται σε ευρετικές μεθόδους επιλογής και επιχειρούν να εξισορροπήσουν την υπολογιστική πολυπλοκότητα με την ικανοποίηση της συνάρτησης ποιότητας.

#### 4.5 Εφαρμογές Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων

Τα ΤΝΔ έχουν ευρεία εφαρμογή και τα αποτελέσματα που δίνουν τα καθιστούν ένα αρκετά υποσχόμενο εργαλείο σε προβλήματα στατιστικής υφής. Τα πιο δημοφιλή ΤΝΔ, με βάση το πλήθος των εφαρμογών τους, είναι τα πολυεπίπεδα ΤΝΔ πρόσθιας τροφοδότησης εκπαιδευμένα με τον αλγόριθμο πρόσθιας διάδοσης σφάλματος.

Εφαρμογές τους έχουν ήδη αναπτυχθεί στην αναγνώριση γραφής, αναγνώριση εικόνων, αναγνώριση φωνής, μετατροπή κειμένου σε φωνή. Επιπλέον, έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία για τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών ελέγχου που αφορούν στην παραγωγή ή τη συμπίεση εικόνων και για την αναζήτηση σε βάσεις δεδομένων, με σκοπό την εξόρυξη χρήσιμης πληροφορίας. Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται και ως εργαλεία βραχυπρόθεσμων και μακροπρόθεσμων προβλέψεων σε μετεωρολογικά φαινόμενα, χρηματιστηριακές εφαρμογές και άλλα. Τέλος, έχουν χρησιμοποιηθεί και για την επίλυση κλασσικών αλγορίθμων, όπως αυτό του περιπλανώμενου πωλητή (*travelling salesman's problem*). Το πρόβλημα αυτό (TSP) είναι ουσιαστικά η μοντελοποίηση της ερώτησης: «Από μια δεδομένη και πεπερασμένη λίστα πόλεων που περιλαμβάνει και τις μεταξύ τους αποστάσεις, ποιά είναι το πιο σύντομο μονοπάτι που περνά από κάθε πόλη μόνο μια φορά και καταλήγει στην αρχική πόλη;»

Πέρα από την εφαρμογή των ΤΝΔ σε πολλούς επιστημονικούς τομείς, ιδιαίτερα δημοφιλής είναι η χρήση τους σε τομείς Βιοϊατρικής Τεχνολογίας. Έτσι έχουν χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη συστημάτων αναγνώρισης, επεξεργασίας και ανάλυσης δισδιάστατων ή τρισδιάστατων βιοϊατρικών σημάτων, σε προβλήματα μοντελοποίησης βιολογικών συστημάτων και στην ανάπτυξη συστημάτων διάγνωσης.

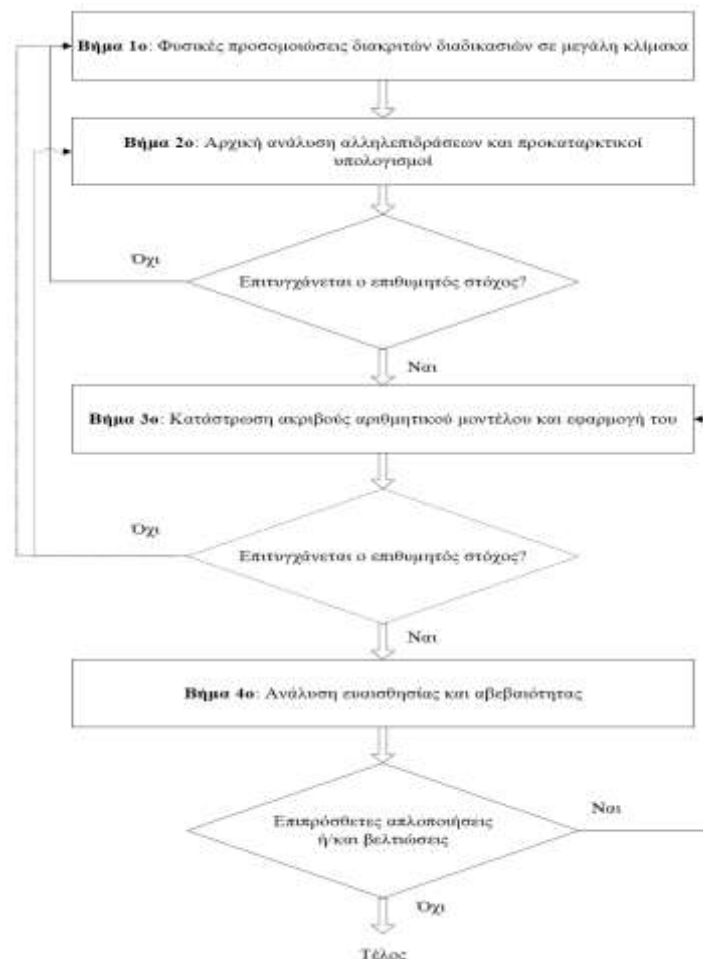




## 5. Κατάστρωση και Εφαρμογή Προτεινόμενου Μοντέλου

### 5.1 Σύνθετη προσομοίωση

Η αρχή της σύνθετης προσομοίωσης συνίσταται στην κατάστρωση πλήρως αξιόπιστων μοντέλων, συμπεριλαμβανομένων των φυσικών και αναλυτικών, αναλύοντας 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 5.1) με τέσσερα κύρια βήματα:



Σχήμα 5.1 Διάγραμμα ροής σύνθετης προσομοίωσης κατά τον Oumeraci (2009).

Στην αρχή, κατασκευάζονται απλές φυσικές προσομοιώσεις, σε μεγαλύτερη κλίμακα για κάθε διαδικασία (μερική ανάκλαση, θραύση κυματισμών κ.ά.) που συνθέτει το πρόβλημα και εφαρμόζονται οι αναλυτικές/ εμπειρικές σχέσεις, ώστε να περιγράψουν τις διαδικασίες που δεν αποκτήθηκαν επαρκώς από το φυσικό μοντέλο. Έπειτα, δομείται ένα προκαταρκτικό υπολογιστικό μοντέλο, το οποίο συνδυάζει το προηγούμενο βήμα με μία αρχική ανάλυση για την κατανόηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των υδροδυναμικών και των μορφολογικών διαδικασιών. Ανάλογα με τα υπολογιστικά αποτελέσματα του μοντέλου, κρίνεται η απαίτηση ή μη επιπλέον εργαστηριακών πειραμάτων για την επίτευξη του επιθυμητού στόχου. Αφού λοιπόν χαρακτηρισθούν επαρκή τα αποτελέσματα των προηγούμενων βημάτων, καταστρώνεται ένα λεπτομερές υπολογιστικό μοντέλο, που εφαρμόζεται για την πρόβλεψη των σεναρίων με μεταβαλλόμενα αρχικά δεδομένα. Ως δεδομένα εισόδου μπορούν να χρησιμοποιηθούν γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κατασκευής, το βάθος του νερού ή οι εισερχόμενες κυματικές συνθήκες. Τέλος, πραγματοποιείται μία ανάλυση ευαισθησίας για να εξακριβωθούν οι εισερχόμενοι παράμετροι με τη μεγαλύτερη επιρροή στα αποτελέσματα.

Τα τελευταία χρόνια πολλοί ερευνητές υιοθέτησαν το συνδυασμό φυσικών και αριθμητικών μοντέλων. Οι Van Gent *et al.* (2005), μελέτησαν την υπερπήδηση του κυματισμού σε παράκτιες κατασκευές. Χρησιμοποίησαν περί τα 10.000 πειραματικά δεδομένα από 165 ανεξάρτητες εργασίες, περιγραφόμενες από 31 παραμέτρους, προκειμένου να προβλέψουν την υπερπήδηση. Καταρχάς συγκέντρωσαν όλα τα δεδομένα και έπειτα έκριναν και κατέγραψαν τα πιο αξιόπιστα από αυτά. Εν συνεχεία, καθόρισαν τις 31 παραμέτρους και τις διέκριναν σε παραμέτρους σχετικές με υδραυλικές πληροφορίες (χαρακτηριστικά κύματος, όγκος υπερπηδούμενου νερού) και σε παραμέτρους σχετικές με πρόσθετες γενικές πληροφορίες (αξιοπιστία ή πολυπλοκότητα της δοκιμής), οπότε να μπορούν να προσομοιώσουν όλα τα είδη των παράκτιων δομών σε ένα μοντέλο. Λόγω του ότι πολλές παράμετροι επηρεάζουν το κύμα ώστε να υπερπηδήσει σε παράκτιες κατασκευές, είναι δύσκολο να περιγραφούν οι επιπτώσεις κάθε μίας ξεχωριστά, οπότε είναι απαραίτητη η δημιουργία ενός Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου. Ένα ΤΝΔ λοιπόν, απαιτείται σε ανάλογες περιπτώσεις όπου η αλληλεξάρτηση των παραμέτρων είναι ασαφής, αρκεί φυσικά να υπάρχουν επαρκή πειραματικά δεδομένα. Τελικά οι Van Gent *et al.*, μετά τη διαλογή των δεδομένων, συγκέντρωσαν 8.300 δοκιμές που έδωσαν υπερπήδηση, ώστε να τις εισάγουν στο ΤΝΔ και αυτό να βρει τη συσχέτιση μεταξύ των παραμέτρων. Πραγματοποιήθηκε έτσι η «εκπαίδευση του ΤΝΔ», αφού διαχωριστούν τα δεδομένα εισόδου και εξόδου. Μετά την εκπαίδευση, χρησιμοποιήθηκαν νέοι ή άορατοι για το δίκτυο συνδυασμοί εισόδου – εξόδου,

ώστε να αξιολογηθεί η απόδοση του μοντέλου. Τέλος, οι διαδικασίες εκπαίδευσης – εξέτασης της απόδοσης επαναλήφθηκαν πολλές φορές, μέχρι να εξασφαλισθεί η αξιοπιστία των προβλέψεων του ΤΝΔ (τυπική απόκλιση ή διαστήματα εμπιστοσύνης 95%).

Πιο πρόσφατα οι Grunnet *et al.* (2008), μελέτησαν με παρόμοιο τρόπο τη στερεοπαροχή λόγω ρεύματος κατά μήκος της ακτής, γύρω από μια λιμενική εγκατάσταση. Το μαθηματικό μοντέλο, αποδείχθηκε χρήσιμο κατά την τη συλλογή πληροφοριών που αφορούσαν στις οριακές συνθήκες και τελικά στη διαστασιολόγηση του λιμένα, ενώ το φυσικό προσομοίωμα παρείχε πληροφορίες για την προσάμμωση στη λιμενολεκάνη και την κατάντη διάβρωση. Τέλος οι Van den Boogaard *et al.* (2009), ανέπτυξαν κατ' αντιστοιχία ένα αριθμητικό μοντέλο τροφοδοτούμενο από έναν περιορισμένο αριθμό πειραματικών μετρήσεων για τον υπολογισμό των φορτίων που δέχονται οι πόδες προστασίας των εξωτερικών λιμενικών έργων υπό κρίσιμες κυματικές συνθήκες.

Στην παρούσα εργασία, παρουσιάζεται μία ανάλογη προσέγγιση, προκειμένου να υπολογιστεί με ακρίβεια ο συντελεστής κυματικής μετάδοσης  $K_i$  διά μέσου αγωγών ανανέωσης, με βάση ένα μικρό αριθμό πειραματικών μετρήσεων και τη χρήση ενός ΤΝΔ. Επιπλέον, συγκρίνονται τα αποτελέσματα με εμπειρικούς τύπους, αλλά και με καινούρια για το δίκτυο πειραματικά δεδομένα, προκειμένου να επιβεβαιωθεί η αξιοπιστία του ΤΝΔ.

## 5.2 Επιλογή μεταβλητών εισόδου και εξόδου

Το ζητούμενο στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, όπως προαναφέρθηκε, είναι η σωστή πρόβλεψη του συντελεστή κυματικής μετάδοσης  $K_t$ . Οι κύριες παράμετροι που επηρεάζουν το συντελεστή (Κεφάλαιο 2), είναι ο εισερχόμενος κυματισμός ( $H_i, T, \tan a$ ), το ύψος του αγωγού ανανέωσης, άρα και το μισό του ( $h_s$ ), το μήκος του αγωγού ανανέωσης ( $l$ ) και το πλάτος του αγωγού ανανέωσης ( $b$ ). Οι παράμετροι αυτοί  $\vec{F} = (H_i, T, h_s, l, b, \tan a)$  μπορούν να συνδυαστούν με πολλούς διαφορετικούς τρόπους και να δημιουργήσουν πολλά πιθανά δεδομένα εισόδου. Στη συγκεκριμένη εργασία μελετάται κυματισμός, ο οποίος προσπίπτει κάθετα στο μέτωπο, οπότε οι τρεις αδιάστατοι παράμετροι εισόδου που επιλέχθηκαν είναι οι εξής: ο λόγος του μισού του ύψους του αγωγού προς το εισερχόμενο ύψος κύματος  $\left(\frac{h_s}{H_i}\right)$ , ο λόγος του μήκους του αγωγού ανανέωσης προς το τετράγωνο της περιόδου του εισερχόμενου κυματισμού πολλαπλασιασμένου επί την επιτάχυνση της βαρύτητας  $\left(\frac{l}{gT^2}\right)$  και ο λόγος του πλάτους του αγωγού ανανέωσης προς το εισερχόμενο ύψος κύματος  $\left(\frac{b}{H_i}\right)$ .

Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται είναι συνδεδεμένες με το ποσό της κυματικής ενέργειας που μεταδίδεται μέσα από τον αγωγό ανανέωσης και περιλαμβάνουν όλους τους παράγοντες που επηρεάζουν το συντελεστή  $K_t$ . Συνεπώς τα δεδομένα εισόδου στο ΤΝΔ είναι:

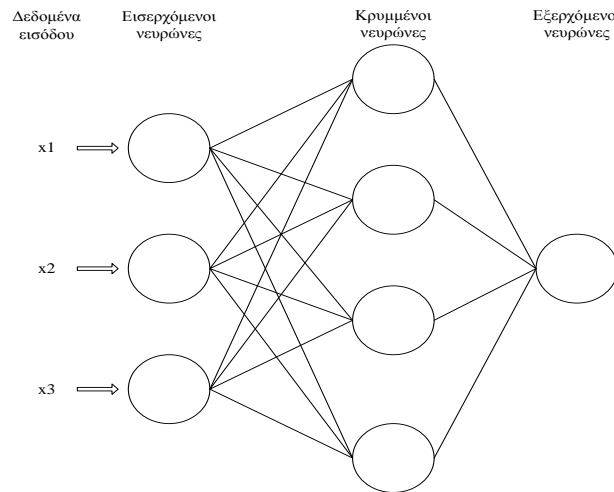
$$\vec{F} = \left( \frac{h_s}{H_i}, \frac{l}{gT^2}, \frac{b}{H_i} \right).$$

Εδώ σημειώνεται ότι, έχουν δημιουργηθεί δύο διαφορετικά ΤΝΔ: το

πρώτο κατασκευάζεται με βάση τον εισερχόμενο κυματισμό όπως μετράται από τον πλησιέστερο στην κυματογεννήτρια μετρητή και το δεύτερο με βάση αυτόν όπως μετράται από τον πλησιέστερο στο έργο μετρητή.

### 5.3 Εφαρμογή Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων πρόσθιας τροφοδότησης

Για τον ακριβή προσδιορισμό του ΤΝΔ, προσδιορίζεται η αρχιτεκτονική του δικτύου, δηλαδή το στρώμα εισόδου και εξόδου, αλλά και ο βέλτιστος αριθμός των κρυμμένων στρωμάτων και ο αριθμός των νευρώνων στο κάθε ένα στρώμα.



**Σχήμα 5.2.** Αρχιτεκτονική Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου.

Η αύξηση του αριθμού των κρυμμένων νευρώνων, οδηγεί σε περισσότερους βαθμούς ελευθερίας, οπότε επιφέρει μείωση στις διαφορές μεταξύ των δεδομένων εξόδου του ΤΝΔ και των πειραματικών μετρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκπαίδευση. Παρ' όλα αυτά μεγάλη αύξηση στον αριθμό των κρυμμένων νευρώνων είναι πιθανόν το ΤΝΔ να εμφανίσει μη επιθυμητό θόρυβο ή διακυμάνσεις που επηρεάζουν την ακρίβεια των πραγματικών προβλέψεων.

Επιπλέον η ακρίβεια κατά την εκπαίδευση αυξάνεται με τη μείωση του τετραγωνικού σφάλματος (RMSE), ενώ η ακρίβεια κατά την επαλήθευση μειώνεται με την αύξηση του αντίστοιχου RMSE, όπου το RMSE αποτελεί το μέσο ποσοτικοποίησης της απόκλισης των προβλεπόμενων από τα πραγματικά δεδομένα εξόδου. Κατά γενικό κανόνα το RMS σφάλμα μειώνεται όσο ο αριθμός των κρυμμένων νευρώνων είναι μικρός, ενώ γίνεται πιο σταθερό για

μεγάλους αριθμούς νευρώνων. Για το συγκεκριμένο δίκτυο, αποτυπώθηκε το εκτιμώμενο RMS σφάλμα, για διαφορετικό πλήθος κρυμμένων νευρώνων.

### *5.3.1 Κατασκευή TNΔ- με βάση τον εισερχόμενο κυματισμό, όπως μετράται από τον πλησιέστερο στην κυματογεννήτρια μετρητή*

Αφού συλλέχθηκαν όλα τα πειραματικά δεδομένα από το διδιάστατο και το τριδιάστατο πειραματικό μοντέλο και καθορίστηκαν ποια θα χρησιμοποιηθούν τελικά στην παρούσα εργασία (χρησιμοποιήθηκαν όλα τα πειραματικά δεδομένα τα οποία αφορούσαν εισερχόμενο κυματισμό κάθετα προσπίπτων στο ομοίωμα), κατεγράφησαν 48 αξιοποιήσιμα δεδομένα προκειμένου να προβλεφθεί ο συντελεστής κυματικής μετάδοσης διαμέσου αγωγού ανανέωσης. Από αυτά τα 48 δεδομένα, τα 2 (πειραματική μέτρηση B.23 του διδιάστατου πειράματος και 30 του τριδιάστατου) δεν εισήχθησαν στο δίκτυο, έτσι ώστε να χρησιμοποιηθούν στο τέλος κατά την αξιολόγηση του TNΔ.

Στο Κεφάλαιο 5.2 περιγράφονται οι μεταβλητές εισόδου στο TNΔ, ενώ στο Κεφάλαιο 3.4 περιγράφονται τα δεδομένα εξόδου. Αυτά αποτυπώνονται στους παρακάτω πίνακες (Πίνακας 5.1 και Πίνακας 5.2) (δεν περιέχονται οι 2 πειραματικές μετρήσεις B.23, 30).

**Πίνακας 5.1** Δεδομένα εισόδου και εξόδου στο ΤΝΔ –  $Kt_1$  για το διάστημα ομοίωμα.

a/a	a/a	hs/H <sub>1</sub>	l/gT <sup>2</sup>	b/H <sub>1</sub>	Kt <sub>1</sub>
T1	A.23	4,8115	0,0629	7,2173	0,3372
T2	A.25	2,8565	0,0629	4,2847	0,2507
T3	A.27	1,9317	0,0629	2,8976	0,2527
T4	A.29	1,4766	0,0629	2,2148	0,2370
T5	A.31	1,2910	0,0629	1,9365	0,2288
T6	A.13	2,4019	0,0421	3,6029	0,2450
T7	A.15	2,4019	0,0421	3,6029	0,2316
T8	A.17	1,4561	0,0421	2,1842	0,2920
T9	A.19	1,0095	0,0421	1,5143	0,2974
T10	A.21	0,9466	0,0421	1,4199	0,2902
T11	A.3	4,1623	0,0233	6,2435	0,3462
T12	A.5	2,3715	0,0233	3,5573	0,3413
T13	A.7	1,6212	0,0233	2,4318	0,4797
T14	A.9	1,2085	0,0233	1,8127	0,3384
T15	A.11	0,9503	0,0233	1,4254	0,2677
T17	B.25	2,7479	0,0629	5,4958	0,3554
T18	B.27	1,9124	0,0629	3,8247	0,3206
T19	B.29	1,5127	0,0629	3,0253	0,3088
T20	B.31	1,3385	0,0629	2,6771	0,2960
T21	B.13	5,7582	0,0421	11,5163	0,6732
T22	B.15	1,5932	0,0421	3,1864	0,3157
T23	B.17	1,5932	0,0421	3,1864	0,2955
T24	B.19	1,0472	0,0421	2,0944	0,3495
T25	B.21	0,9184	0,0421	1,8368	0,3298
T26	B.3	3,9801	0,0233	7,9602	0,4279
T27	B.5	2,2875	0,0233	4,5749	0,4009
T28	B.7	1,6041	0,0233	3,2081	0,4024
T29	B.9	1,2151	0,0233	2,4301	0,4938
T30	B.11	0,9995	0,0233	1,9990	0,4467

**Πίνακας 5.2** Δεδομένα εισόδου και εξόδου στο ΤΝΔ –  $Kt_1$  για το τριδιάστατο ομοίωμα.

a/a	a/a	hs/H <sub>1</sub>	l/gT <sup>2</sup>	b/H <sub>1</sub>	Kt <sub>1</sub>
V1	5	6,4267	0,2435	6,4267	0,177
V2	6	5,1546	0,2435	5,1546	0,240
V3	7	3,9841	0,2435	3,9841	0,253
V4	8	2,5974	0,2435	2,5974	0,249
V5	9	6,8776	0,2435	5,8459	0,563
V6	10	5,3763	0,2435	4,5699	0,533
V7	11	4,1425	0,2435	3,5211	0,466
V8	12	2,7322	0,2435	2,3224	0,480
V9	19	5,6497	0,1559	5,6497	0,044
V10	20	4,5455	0,1559	4,5455	0,044
V11	21	3,9683	0,1559	3,9683	0,053
V12	22	3,5587	0,1559	3,5587	0,055
V13	23	2,8329	0,1559	2,8329	0,055
V14	24	2,6247	0,1559	2,6247	0,075
V15	27	4,9751	0,1559	4,2289	0,084
V16	28	4,3085	0,1559	3,6622	0,126
V17	29	3,8760	0,1559	3,2946	0,094



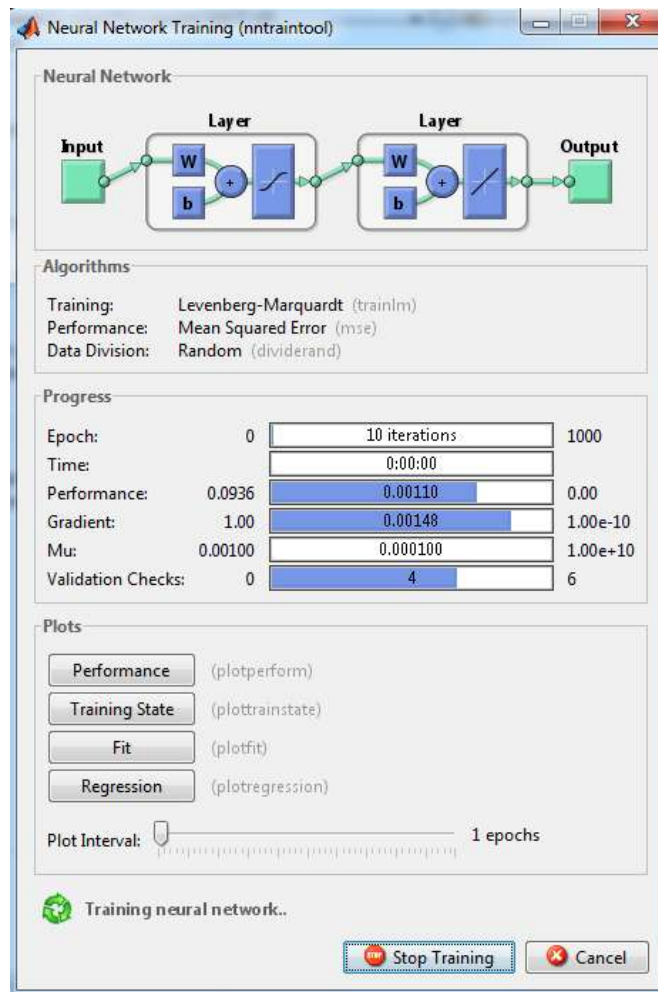
Αφού εισαχθούν τα δεδομένα και καθοριστούν οι κρυμμένοι νευρώνες (Σχήμα 5.3), ξεκινά η εκπαίδευση του δικτύου.



**Σχήμα 5.3** Μεταβολή μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE), με την αύξηση των κρυμμένων νευρώνων.

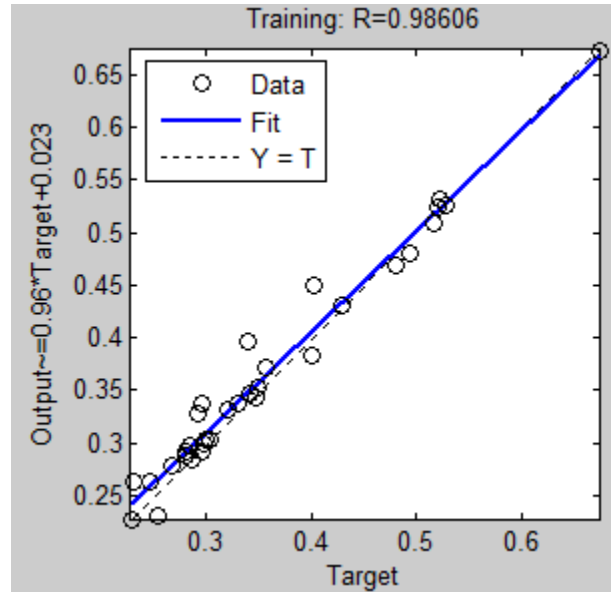
Το πλήθος των κρυμμένων νευρώνων καθορίζει το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE) και άρα την ακρίβεια στην εκπαίδευση. Το RMS σφάλμα μειώνεται όσο ο αριθμός των νευρώνων είναι μικρός, ενώ σταθεροποιείται για μεγάλους αριθμούς νευρώνων. Στη συγκεκριμένη εργασία και με γνώμονα τον παραπάνω γενικό κανόνα, αλλά κυρίως το παραπάνω διάγραμμα, το οποίο είναι προσαρμοσμένο στο συγκεκριμένο ΤΝΔ που εξετάζεται, επιλέχθηκαν 10 συνολικά κρυμμένοι νευρώνες. Περισσότεροι κρυμμένοι νευρώνες περιπλέκουν την αρχιτεκτονική του δικτύου αλλά και δεν αυξάνουν την ακρίβειά του.

Για την εκπαίδευση του δικτύου χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος `trainlm` (Σχήμα 5.4), η οποία εκπαίδευει γρήγορα το δίκτυο, αφού δεν απαιτούνται πολλές επαναλήψεις για τη σταθεροποίηση του δικτύου. Υπάρχει η δυνατότητα παρακολούθησης της εξέλιξης της εκπαίδευσης, όπως αυτή πραγματοποιείται μέσω του ΤΝΔ, αλλά και η εύρεση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE).



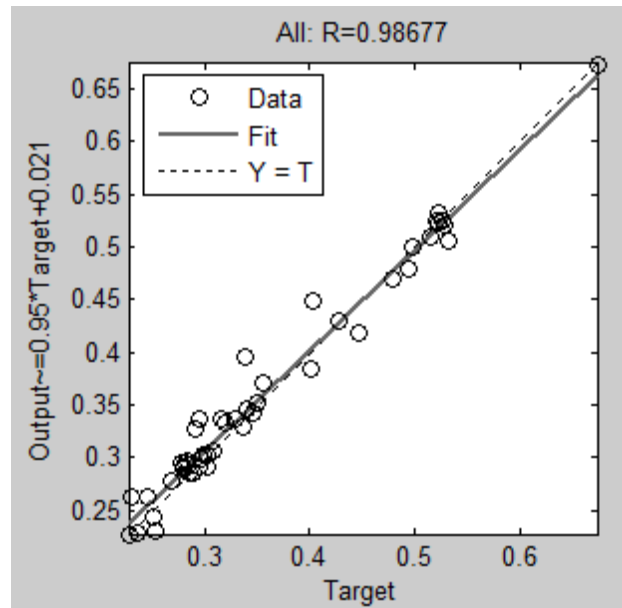
Σχήμα 5.4 Αλγόριθμος εκπαίδευσης trainlm για το ΤΝΔ.

Εν συνεχεία, εμφανίζεται η συσχέτιση των αποτελεσμάτων του ΤΝΔ με τους επιθυμητούς στόχους ή διαφορετικά με τις πειραματικές μετρήσεις κατά το στάδιο της εκπαίδευσης αλλά και της συνολικής εφαρμογής, απεικονιζόμενη και σε σχετικά διαγράμματα.



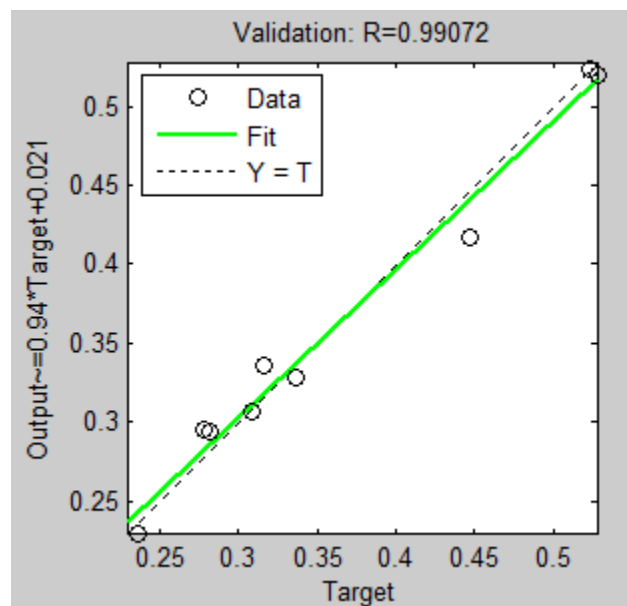
**Σχήμα 5.5** Συντελεστής συσχέτισης του ΤΝΔ κατά την Εκπαίδευση.

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 5.5), η αποδοτικότητα του μοντέλου βελτιώνεται με τη σύγκλιση της ευθείας της γραμμικής παλινδρόμησης (συμπαγής γραμμή) με τη διαγώνιο (διακεκομμένη γραμμή). Κατά την εκπαίδευση ο συντελεστής R ισούται με 0,99 τιμή που προσεγγίζει το 1. Ο συντελεστής R (Παλινδρόμηση – Regression), μετρά τη συσχέτιση μεταξύ των αποτελεσμάτων και των στόχων (R=1 σημαίνει μια στενή σχέση, ενώ R=0 μια τυχαία σχέση).



**Σχήμα 5.6** Συντελεστής συσχέτισης του ΤΝΔ κατά τη Συνολική Εφαρμογή.

Όμοια με την εκπαίδευση και κατά τη συνολική εφαρμογή (Σχήμα 5.6), ο συντελεστής  $R=0,99$  φανερώνει την επαρκή αποδοτικότητα του δικτύου. Επιπλέον επισυνάπτεται και το διάγραμμα «επικύρωσης» της σωστής κατάρτισης του δικτύου ( $R=0,99$ ) ξεχωριστά (Σχήμα 5.7).



**Σχήμα 5.7** Συντελεστής συσχέτισης του ΤΝΔ με δεδομένα τους Κρυμμένους Νευρώνες.

5.3.2 Κατασκευή ΤΝΔ- με βάση τον εισερχόμενο κυματισμό, όπως μετράται από τον πλησιέστερο στο έργο μετρητή

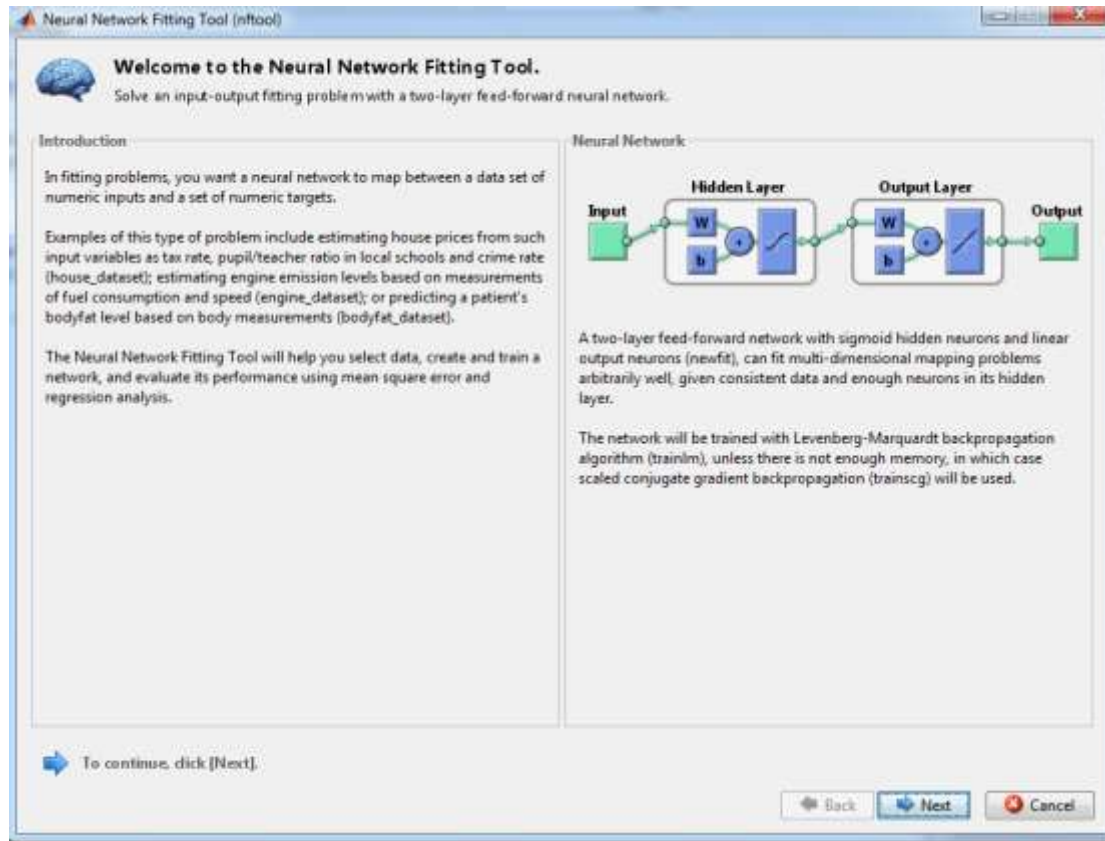
Κατ' αντιστοιχία των όσων περιγράφηκαν παραπάνω μετά τη συλλογή των πειραματικών δεδομένων από τα δύο πειράματα, έχουν καταγραφεί 48 αξιοποιήσιμα δεδομένα (Πίνακας 5.3 και Πίνακας 5.4) από τα οποία τα 2 (πειραματική μέτρηση Α.23 του διδιάστατου πειράματος και 5 του τριδιάστατου), θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια για την αξιολόγηση του ΤΝΔ. Στους πίνακες που ακολουθούν, δεν περιλαμβάνονται οι 2 αυτές μετρήσεις.

**Πίνακας 5.3** Δεδομένα εισόδου και εξόδου στο ΤΝΔ –  $Kt_2$  για το διδιάστατο ομοίωμα.

a/a	a/a	hs/H <sub>v</sub>	l/gT <sup>2</sup>	b/H <sub>v</sub>	Kt <sub>2</sub>
T2	A.25	1,7296	0,0629	2,5944	0,1518
T3	A.27	1,3962	0,0629	2,0942	0,1827
T4	A.29	1,0989	0,0629	1,6484	0,1764
T5	A.31	0,8517	0,0629	1,2776	0,1510
T6	A.13	1,6911	0,0421	2,5366	0,1725
T7	A.15	1,6901	0,0421	2,5352	0,1630
T8	A.17	0,8937	0,0421	1,3405	0,1792
T9	A.19	0,6221	0,0421	0,9331	0,1833
T10	A.21	0,5424	0,0421	0,8137	0,1663
T11	A.3	2,3548	0,0233	3,5322	0,1958
T12	A.5	1,3409	0,0233	2,0114	0,1930
T13	A.7	0,9489	0,0233	1,4234	0,2808
T14	A.9	0,7496	0,0233	1,1244	0,2099
T15	A.11	0,6242	0,0233	0,9363	0,1759
T16	B.23	3,8785	0,0629	7,7569	0,3946
T17	B.25	2,0808	0,0629	4,1616	0,2691
T18	B.27	1,5113	0,0629	3,0227	0,2534
T19	B.29	1,1727	0,0629	2,3454	0,2394
T20	B.31	1,0577	0,0629	2,1155	0,2339
T21	B.13	3,3435	0,0421	6,6871	0,3909
T22	B.15	0,9242	0,0421	1,8484	0,1831
T23	B.17	0,9758	0,0421	1,9517	0,1810
T24	B.19	0,6748	0,0421	1,3496	0,2252
T25	B.21	0,5755	0,0421	1,1511	0,2067
T26	B.3	2,5110	0,0233	5,0220	0,2699
T27	B.5	1,4591	0,0233	2,9183	0,2557
T28	B.7	0,9378	0,0233	1,8756	0,2352
T29	B.9	0,7431	0,0233	1,4863	0,3020
T30	B.11	0,5819	0,0233	1,1637	0,2600

**Πίνακας 5.4** Δεδομένα εισόδου και εξόδου στο ΤΝΔ –  $Kt_2$  για το τριδιάστατο ομοίωμα.

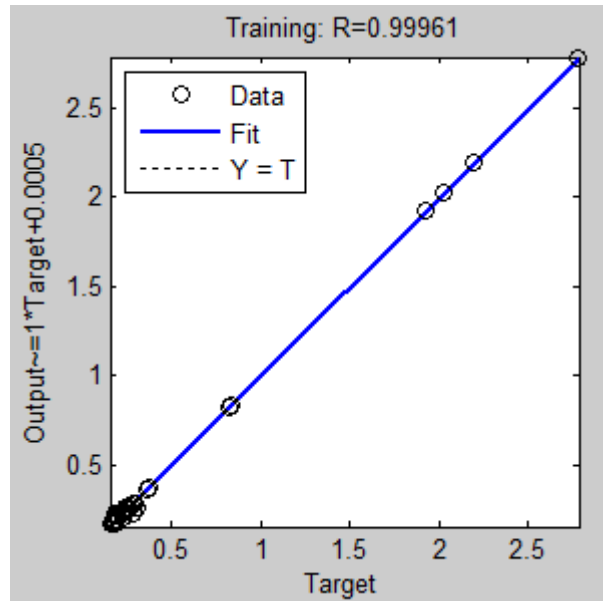
a/a	a/a	hs/H <sub>v</sub>	l/gT <sup>2</sup>	b/H <sub>v</sub>	Kt <sub>2</sub>
V2	6	8,2645	0,2435	8,2645	0,8264
V3	7	6,3291	0,2435	6,3291	0,8291
V4	8	4,1494	0,2435	4,1494	0,8423
V5	9	36,7647	0,2435	31,2500	2,7831
V6	10	22,2222	0,2435	18,8889	2,2000
V7	11	16,0772	0,2435	13,6656	2,0289
V8	12	10,0000	0,2435	8,5000	1,9300
V9	19	5,5866	0,1559	5,5866	0,2793
V10	20	4,7619	0,1559	4,7619	0,3000
V11	21	4,1152	0,1559	4,1152	0,2881
V12	22	3,6900	0,1559	3,6900	0,2952
V13	23	2,8902	0,1559	2,8902	0,2861
V14	24	2,6882	0,1559	2,6882	0,2876
V15	27	5,9880	0,1559	5,0898	0,3653
V16	28	5,3305	0,1559	4,5309	0,3699
V17	29	4,7170	0,1559	4,0094	0,3679
V18	30	3,1746	0,1559	2,6984	0,3556



**Σχήμα 5.8** Κατασκευή Νευρωνικού Δικτύου Πρόσθιας Τροφοδότησης (Feed Forward  $nn$ ).

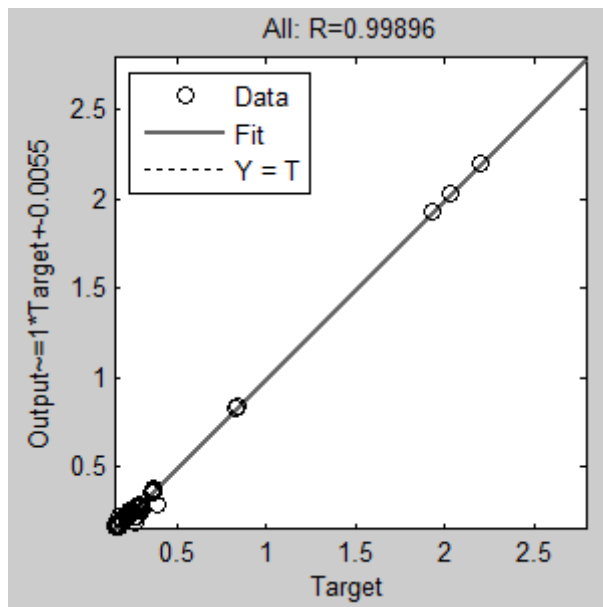
Όμοια με προηγουμένως, κατασκευάζεται ένα ΤΝΔ πρόσθιας τροφοδότησης, δύο επιπέδων (Σχήμα 5.8). Μετά την εισαγωγή των δεδομένων και τον καθορισμό των κρυμμένων νευρώνων σε 10, εκπαιδεύεται το δίκτυο μέσω της μεθόδου `trainlm`. Σε αυτήν την περίπτωση απαιτήθηκαν ακόμα λιγότερες επαναλήψεις για τη σταθεροποίηση του δικτύου.

Έπειτα, απεικονίζεται η συσχέτιση των αποτελεσμάτων του ΤΝΔ με τους επιθυμητούς στόχους κατά το στάδιο της εκπαίδευσης αλλά και της συνολικής εφαρμογής, στα σχετικά διαγράμματα (Σχήμα 5.9 και Σχήμα 5.10).



Σχήμα 5.9 Συντελεστής συσχέτισης του ΤΝΔ κατά την Εκπαίδευση.

Κατά την εκπαίδευση ο συντελεστής  $R \approx 1$  ( $R=0,9996$ ) τιμή που σημαίνει μια στενή σχέση μεταξύ αποτελεσμάτων και στόχων.



Σχήμα 5.10 Συντελεστής συσχέτισης του ΤΝΔ κατά τη Συνολική Εφαρμογή.



Όμοια με την εκπαίδευση και κατά τη συνολική εφαρμογή (Σχήμα 5.10), ο συντελεστής  $R \approx 1$  ( $R=0,99896$ ) φανερώνει την επαρκή αποδοτικότητα του δικτύου.

## 5.4 Επαλήθευση προτεινόμενου μοντέλου

Το ΤΝΔ ουσιαστικά, πρόκειται για ένα μοντέλο που εκπαιδεύεται επαρκώς, ώστε να προβλέπει όσο το δυνατόν ορθότερα, το συντελεστή κυματικής μετάδοσης διαμέσου αγωγού ανανέωσης. Στη συνέχεια συγκρίνονται και τα δύο δίκτυα με τις εμπειρικές σχέσεις όπως αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 2, αλλά και τα πειραματικά δεδομένα.

### 5.4.1 Σύγκριση ΤΝΔ- $K_{t1}$

Υπενθυμίζεται εδώ ότι ο συντελεστής κυματικής μετάδοσης για αυτή την περίπτωση προέκυψε από :  $K_{t1} = H_{κατάντη} / H_{εισερχ.κυματιστήρα}$ , δηλαδή από το μετρητή που βρίσκεται πλησίον του κυματιστήρα και για τα δύο πειράματα. Επιπλέον από το Κεφάλαιο 2 υπενθυμίζεται η εμπειρική σχέση που θα χρησιμοποιηθεί για τη σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα και το ΤΝΔ που κατασκευάστηκε:

$$K_t = \frac{H_t}{H_i} = \left( 0,135 \frac{b}{H_i} + 0,048 \frac{2h_s}{H_i} + 0,030 \frac{h_f}{H_i} + 0,026 \frac{d}{H_i} + 0,036 \frac{l}{H_i} \right) * \mu^{-0,681} \quad (5.1)$$

Οι εμπειρικές σχέσεις (2.1) και (2.4) που αναφέρθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο, δεν μπορούν να εφαρμοστούν, αφού πρόκειται για πρανές με κατακόρυφο μέτωπο ( $\xi=0$ ).

Όπως προαναφέρθηκε, δεν χρησιμοποιήθηκαν δύο από τα δεδομένα των πειραματικών μετρήσεων στην κατάστρωση του ΤΝΔ (Πίνακας 5.4), έτσι ώστε να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της απόδοσής του. Πέραν αυτών των τιμών ωστόσο, θα χρησιμοποιηθεί και μία ακόμα, η οποία έχει συμπεριληφθεί και στο ΤΝΔ, ώστε η επαλήθευση να γίνει ολοκληρωμένα (Πίνακας 5.5).

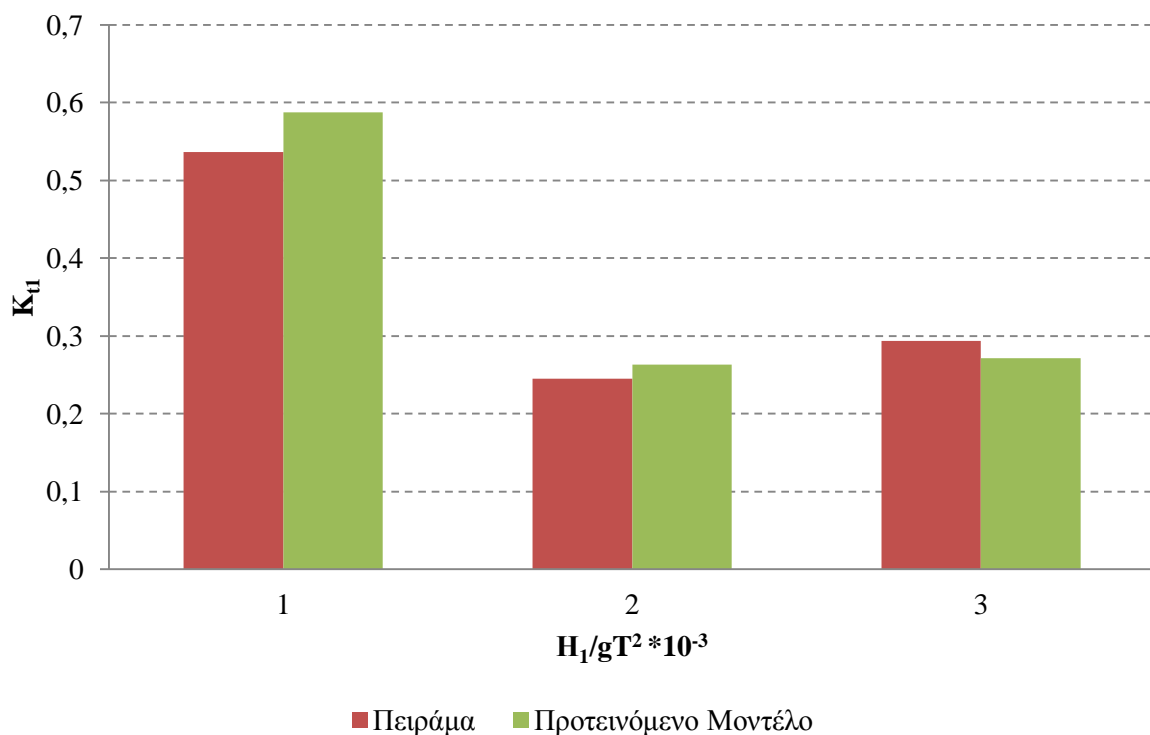
**Πίνακας 5.5** Καταγραφή δεδομένων που δεν χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του ΝΔ.

a/a	a/a	hs/H <sub>v</sub>	l/gT <sup>2</sup>	b/H <sub>v</sub>	K <sub>t1</sub>
T16	B.23	5,2840	0,0629	10,568	0,5376
V18	30	2,6247	0,1559	2,2310	0,1110

**Πίνακας 5.6** Τυχαία επιλογή δεδομένων, από τα ήδη χρησιμοποιούμενα, για την Επαλήθευση.

a/a	a/a	hs/H <sub>v</sub>	l/gT <sup>2</sup>	b/H <sub>v</sub>	Kt <sub>1</sub>
T6	A.13	2,4019	0,0421	3,6029	0,2450

Η σύγκριση του προτεινόμενου μοντέλου με τα πειραματικά δεδομένα, για τα νέα ζεύγη τιμών, απεικονίζεται στο επόμενο διάγραμμα (Σχήμα 5.11).



**Σχήμα 5.11** Σύγκριση του συντελεστή μετάδοσης  $K_{u1}$  των πειραματικών μετρήσεων και του προτεινόμενου μοντέλου.

Από το παραπάνω διάγραμμα τελικά, προκύπτει ότι η πρόβλεψη του συντελεστή μετάδοσης από το προτεινόμενο μοντέλο και στις τρεις περιπτώσεις πλησιάζει αρκετά σωστά την πραγματοποιούμενη μέτρηση. Η μέγιστη απόκλιση μεταξύ της πραγματικής μέτρησης και του προτεινόμενου μοντέλου αντιστοιχεί σε 6,9%.

5.4.2 Σύγκριση TNA-  $K_{t2}$ 

Ο συντελεστής κυματικής μετάδοσης σε αυτή την περίπτωση προέκυψε από:  $K_{t2} = H_{\text{κατάντη}} / H_{\text{ανάντη}}$ , δηλαδή από τους μετρητές που βρίσκονται πλησίον του έργου. Η θεώρηση αυτή είναι όμοια με τη θεώρηση της εμπειρικής σχέσης Tsoukala *et al.* (2010), όπου προσπίπτων κυματισμός θεωρείται αυτός όπως καταγράφεται αμέσως ανάντη του αγωγού ανανέωσης. Οπότε σε αυτήν την περίπτωση, συγκρίνουμε τις προβλέψεις του προτεινόμενου μοντέλου και με τα αποτελέσματα όπως προκύπτουν από την εμπειρική σχέση.

Τα δεδομένα που δεν χρησιμοποιήθηκαν στην κατάστρωση αυτού του δικτύου (Πίνακας 5.6) καθώς και η επιπλέον μέτρηση η οποία συμπεριλήφθηκε στο δίκτυο (Πίνακας 5.7) αναγράφονται στους παρακάτω πίνακες:

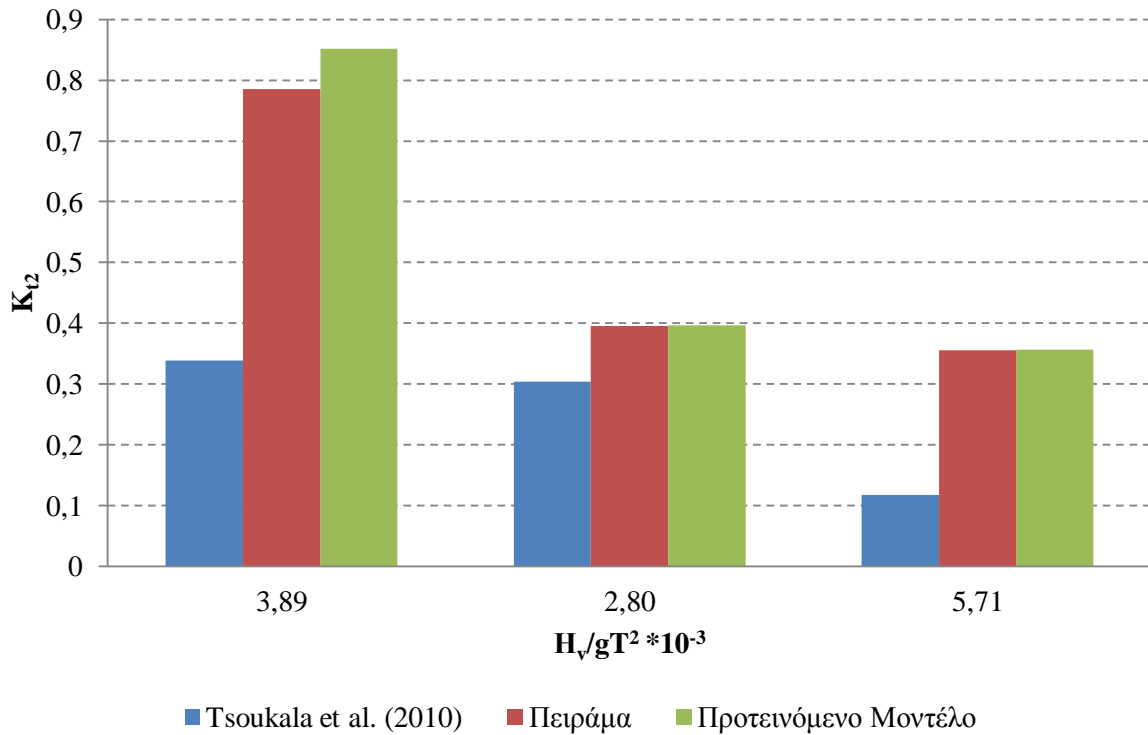
**Πίνακας 5.7** Καταγραφή δεδομένων που δεν χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του ΝΔ.

a/a	a/a	hs/H <sub>v</sub>	l/gT <sup>2</sup>	b/H <sub>v</sub>	Kt <sub>2</sub>
T16	B.23	3,8785	0,0629	7,77569	0,2712
V1	5	10,1112	0,2435	10,1112	0,7846

**Πίνακας 5.8** Τυχαία επιλογή δεδομένων, από τα ήδη χρησιμοποιούμενα, για την Επαλήθευση.

a/a	a/a	hs/H <sub>v</sub>	l/gT <sup>2</sup>	b/H <sub>v</sub>	Kt <sub>2</sub>
V18	30	3,1746	0,1559	2,6984	0,3556

Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 5.12) αποτυπώνεται η σύγκριση της σχέσης (5.1) που αφορά το συντελεστή κυματικής μετάδοσης  $K_t$  για έργο με κατακόρυφο μέτωπο, με το προτεινόμενο μοντέλο, σύμφωνα με τις πειραματικές μετρήσεις.



**Σχήμα 5.12** Σύγκριση του συντελεστή μετάδοσης  $K_{12}$  των πειραματικών μετρήσεων, του προτεινόμενου μοντέλου και της εμπειρικής σχέσης Tsoukala et al. (2010).

Στην περίπτωση αυτή, παρατηρείται ότι το προτεινόμενο μοντέλο είναι αρκετά πιο ακριβές από ότι η εμπειρική σχέση (5.1) αναφορικά με την πρόβλεψη του συντελεστή κυματικής μετάδοσης διαμέσου αγωγού ανανέωσης σε έργο με κατακόρυφο μέτωπο. Και στις τρεις περιπτώσεις το προτεινόμενο μοντέλο προσεγγίζει αρκετά την πειραματική μέτρηση. Πιο συγκεκριμένα η μέγιστη απόκλιση που προκύπτει από την πραγματοποιούμενη μέτρηση αντιστοιχεί σε 8,5% για το προτεινόμενο μοντέλο, όταν η ελάχιστη απόκλιση της εμπειρικής σχέσης από αυτήν αντιστοιχεί σε 23%.



## 6. Συμπεράσματα και Προτάσεις

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, μελετήθηκε η διάδοση των κυματισμών σε λιμενολεκάνη διαμέσου ενός αγωγού ανανέωσης, τοποθετημένου σε έργο με κατακόρυφο μέτωπο, προκειμένου να εξασφαλίζεται η επαρκής ανανέωση των υδάτων. Για το σκοπό αυτό, υπολογίστηκε ο συντελεστής κυματικής μετάδοσης  $K_t$ , με χρήση ΤΝΔ και πειραματικών μετρήσεων, που αφορούν στη διέλευση κυματισμών μέσω αγωγού ανανέωσης για διάφορες γεωμετρικές διατάξεις αγωγών. Κατασκευάστηκε λοιπόν, ένα μοντέλο το οποίο είναι ικανό να προβλέπει το συντελεστής κυματικής μετάδοσης  $K_t$ , σε κάθε νέα για αυτό περίπτωση, όταν εισάγονται δηλαδή σε αυτό καινούρια δεδομένα. Στο τέλος και προκειμένου να επαληθευτεί η αξιοπιστία του προτεινόμενου μοντέλου, συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα όπως προέκυψαν από αυτό, με τα πραγματικά πειραματικά δεδομένα, αλλά και με την υφιστάμενη εμπειρική σχέση.

### 6.1 Συμπεράσματα από την εφαρμογή της εμπειρικής σχέσης

Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της εμπειρικής σχέσης Tsoukala *et al.* (2010) (βλ. 2.4.2, Σχέση 2.5), η οποία μπορεί να εφαρμοστεί σε εξωτερικό λιμενικό έργο με κατακόρυφο μέτωπο, παρατηρούνται τα εξής:

- Ο συντελεστής  $K_2$  εμφανίζεται μειωμένος σε σχέση με τον αντίστοιχο των πειραματικών μετρήσεων και των αποτελεσμάτων του μοντέλου νευρωνικών δικτύων.

## 6.2 Συμπεράσματα από την εφαρμογή του προτεινόμενου μοντέλου

Αναφορικά με τη χρήση του προτεινόμενου μοντέλου τα κύρια συμπεράσματα συνοψίζονται ακολούθως:

- Η προσομοίωση με το προτεινόμενο μοντέλο ενδείκνυται για λόγους οικονομίας χρόνου και πόρων τα οποία απαιτούνται για την προσομοίωση μέσω πειραματικών διατάξεων στο εργαστήριο.
- Η απαίτηση του προτεινόμενου μοντέλου σε δεδομένα εισόδου είναι σχετικά μικρή γεγονός που καθιστά ευχερή τη χρήση του.
- Για το λόγο αυτό το προτεινόμενο μοντέλο ενδεχομένως να παράγει ακριβέστερα αποτελέσματα για το συντελεστή κυματικής μετάδοσης  $K_t$  σε μία νέα έρευνα, για διαφορετική γεωμετρία του αγωγού ανανέωσης και διαφορετικά ύψη κύματος, χωρίς την απαίτηση πρόσθετων πειραματικών μετρήσεων.

Αναφορικά με τα αποτελέσματα του προτεινόμενου μοντέλου:

- Η προσαρμογή των αποτελεσμάτων του προτεινόμενου μοντέλου στις πειραματικές μετρήσεις εμφανίζεται ακριβέστερη σε σχέση με την αντίστοιχη προσαρμογή των αποτελεσμάτων της εμπειρικής σχέσης.
- Για όλο το εύρος των χαρακτηριστικών του κυματισμού, τα αποτελέσματα του μοντέλου προσεγγίζουν με περισσότερη ακρίβεια τα πειραματικά.

Τέλος, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δύο μοντέλων:

- Η ακρίβεια των δύο μοντέλων εμφανίζεται να είναι σε αρκετά υψηλά επίπεδα γεγονός που είναι θετικό για την καταλληλότητά τους σε προσομοίωση ανάλογων περιπτώσεων.
- Το μοντέλο το οποίο βασίζεται στον εισερχόμενο κυματισμό όπως αυτός μετράται από τον πλησιέστερο στο έργο μετρητή, παρουσιάζει μεγαλύτερη ακρίβεια ( $R \approx 1$ ), συγκριτικά με το αντίστοιχο δίκτυο που βασίζεται στο μετρητή πλησίον του κυματιστήρα. Ο λόγος έγκειται στο ότι η απόσταση του μετρητή που τοποθετείται πλησίον του κυματιστήρα σε κάθε πείραμα και αφορά στον εισερχόμενο κυματισμό, μπορεί να διαφοροποιείται και να ποικίλει συγκριτικά με την απόσταση αυτών που χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα στο συγκεκριμένο δίκτυο. Για το λόγο αυτό η



πρόβλεψη του  $K_i$  πιθανόν να παρουσιάζει μεγαλύτερες αποκλίσεις για το δίκτυο που βασίζεται στο μετρητή πλησίον του κυματιστήρα.

### 6.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Από την παρούσα διπλωματική εργασία εξήχθησαν τα συμπεράσματα που αναφέρθηκαν σε προηγούμενο υποκεφάλαιο. Ωστόσο, αναφορικά με το προτεινόμενο μοντέλο, τη βελτίωση και τη διερεύνηση της λειτουργίας του, προτείνονται τα ακόλουθα:

- Η εισαγωγή νέου πλήθους πειραματικών δεδομένων θα είχε σαν αποτέλεσμα ενδεχομένως μεγαλύτερη ακρίβεια και αξιοπιστία των αποτελεσμάτων των μοντέλων.
- Εφαρμογή του μοντέλου σε πολλές διαφορετικές διατάξεις, έτσι ώστε να αποσαφηνιστεί η λειτουργία του.
- Επιπλέον, προτείνεται η ενσωμάτωση περισσότερων παραμέτρων στα δεδομένα εισόδου όπως η γωνία πρόσπτωσης των κυματισμών και η κλίση των πρανών στον κυματοθραύστη, ώστε να είναι δυνατή η πληρέστερη περιγραφή των εκάστοτε διατάξεων και κυματικών συνθηκών.
- Τέλος, επισημαίνεται η επιτακτικότητα στατιστικής μελέτης και προσδιορισμού των διαστημάτων εμπιστοσύνης του προτεινόμενου μοντέλου, έτσι ώστε να ενισχυθεί η εγκυρότητα των προβλέψεών του.



## Βιβλιογραφία

1. Dunham J.W., Finn A.A. (2002) – Small – Craft Harbors. Design. Construction and Operation, Fredonia Books
2. Fountoulis,G. and C. Memos (2005) – Optimization of openings for Water Renewal in a Harbor Basin – Journal of Marine Engineering
3. Golden, R, (1996) - Mathematical Methods for Neural Network Analysis and Design. MIT Press.
4. Grunnet N., Lohier S., Deigaard R. (2008) – Study of sediment by pass at coastal structures by composite modeling. Proceedings of the 31<sup>st</sup> International Conference of Coastal Engineering, Hamburg
5. Guiney D.C., Noye B.J., Tuck E.O. (1972) – Transmission of water waves through small apertures. J. Fluid Mech.
6. Katsardi V., Boundris I., Tsoukala V., Belibassakis K. (2012) – Study of wave transformation due to flushing culverts in coastal structures. Ocean Engineering
7. Losada I.J., Patterson M.D., Losada M.A. (1997) – Harmonic generation past a submerged porous step. Coastal Engineering
8. Michalis K. Chondros, Constantine D. Memos (2014) – Prediction of wave transmission coefficient by combining experimental measurements and numerical modeling
9. Ohyama T., Nadaoka K. (1994) – Transformation of a nonlinear wave train passing over a submerged shelf without breaking. Coastal Engineering
10. Oumeraci, H., 2009. Composite modeling. 11 August (2009) - Overtopping of Impermeable Breakwaters, CERC Coastal Engineering
11. Packham B.A., Williams W.E. (1972) – A note on the transmission of water waves through small apertures. Journal of the Institute of Mathematics and its Applications
12. Stamou A.I., Katsiris I.K., Moutzouris C.I., Tsoukala V.K. (2004) – Improvements of marina design technology models. Global Nest
13. State L., Vlamos P., (2000) - The POMDP modeling in the Analysis of Genetic Algorithms. The Annals of Bucharest University XLIX
14. Travelling salesman problem, Wikipedia

15. Tsoukala K.V., Gaitanis K.C., Stamou I.A. and Moutzouris I.C., (2010) – Wave and dissolved oxygen transmission analysis in harbors using flushing culverts: An Experimental Approach. *Global NEST: The International Journal*
16. Tsoukala K.V., Moutzouris I.C. (2009) – Wave transmission in harbors through flushing culverts. *Ocean Engineering*
17. Tuck E.O. (1971) – Matching problems involving flow through small holes. *Advances in applied mechanics, Vol.15*
18. Tuck E.O. (1971) – Transmission of water waves through small apertures. *Journal of Fluid Mechanics, Vol.49*
19. Van den Boogaard H.F.P., Gerritsen H., Caires S., van Gent M.R.A (2009) – Wave attack on sea defences – Potential benefits of a Composite Modeling approach. *Proceedings of the 33rd IAHR Congress, Vancouver*
20. Van der Meer, Van Gent, Pozueta, Verhaeghe, Steendam, Medina (2005) – Applications of a neural network to predict wave overtopping at coastal structures
21. Van Gent, M.R.A., van den Boogaard, H.F.P., Pozueta B., Medina J.R. (2007) – *Coastal Engineering*
22. Ακύλας Α. (2006) – Πειραματική διερεύνηση της εισερχόμενης κυματικής διαταραχής σε λιμενολεκάνη από αγωγό ανανέωσης υδάτων – μέρος Ι. Ε.Μ.Π.
23. Γιαννακάκης Α.Γ. (2003) – Ανάπτυξη συστήματος υποστήριξης διάγνωσης ψυχικών ασθενειών με χρήση προκλητών εγκεφαλικών δυναμικών
24. Γιαννάκη Τ. (2005) – Πειραματική διερεύνηση της επίδρασης των αγωγών ανανέωσης ύδατος στα κυματικά χαρακτηριστικά και την οξυγόνωση της εσωτερικής περιοχής των παράκτιων έργων. Ε.Μ.Π.
25. Δημητρακοπούλου Δ.(2005) – Πειραματική διερεύνηση κυματικής διείσδυσης σε λιμενολεκάνη από αγωγούς ανανέωσης ύδατος. Ε.Μ.Π.
26. Διαμαντάρας Κ. (2007) – Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα. Κλειδάριθμος
27. Καραμπάς Θ. (2004) – Στοιχεία Κυματομηχανικής. Πανεπιστήμιο Αιγαίου
28. Κερανού Ε., Αργυράκης Π., Λυκοθανάσης Σ., Νικηφορίδης Γ. (2001). *Τεχνητή Νοημοσύνη – Εφαρμογές. Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο*
29. Κουρής Ε. (2010) – Διερεύνηση κυματικής διείσδυσης, από αγωγό ανανέωσης υδάτων, σε λιμενολεκάνη. Πανεπιστήμιο Κρήτης
30. Κουτίτας Χ.Γ. (1994) – Εισαγωγή στην Παράκτια Τεχνική και τα Λιμενικά Έργα. Ζήτη

31. Λιανός Ν. (2011) – Εκτίμηση κυματισμών, αξιοποίηση διαθέσιμων δεδομένων και αξιολόγηση διαδικασιών πρόβλεψης. Ε.Μ.Π
32. Μουγιακάκου Γ. (2003) – Ανάπτυξη Συστημάτων Υποστήριξης Κλινικών Αποφάσεων με Χρήση Μεθόδων Τεχνητής Νοημοσύνης. Ε.Μ.Π.
33. Μπαλάσκα Δ. (2005) – Πειραματική διερεύνηση κυματικής διείδυσης από αγωγούς ανανέωσης ύδατος σε δύο λιμενολεκάνες (Αγ. Κήρυκος, Ν. Ικαρίας – Κολυμβάρι, Ν. Κρήτης). Πανεπιστήμιο Πατρών
34. Μπουνδρης Ι. (2012) – Αριθμητικές μέθοδοι προσομοίωσης κυματικής διαταραχής από την παρουσία αγωγών ανανέωσης. Ε.Μ.Π
35. Μπρέμπος Ε., Ντεβές Δ. (2007) – Πειραματική διερεύνηση κυματικής διείδυσης από αγωγό ανανέωσης υδάτων σε λιμενολεκάνη. Ε.Μ.Π.
36. Παπαϊωάννου Α.Ι., Αζοράκος Σ., Μουτζούρης Κ.Ι. (1999) – Πειραματική διερεύνηση κυματικής ενέργειας σε λιμενολεκάνη από διάκενο στον προσήνεμο μόλο. Πρακτικά 1<sup>ου</sup> Συνεδρίου Διαχείρισης και Βελτίωσης Παράκτιων Ζωνών, Ε.Μ.Π.
37. Πλέρου Α. (2012) – Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα προσομοίωσης του ανθρωπίνου εγκεφάλου. Ιόνιο Πανεπιστήμιο
38. Ρίζος Σ. (2012) – Προσομοίωση κυματικής διείδυσης από αγωγό ανανέωσης υδάτων σε λιμενολεκάνη μέσω αριθμητικού μοντέλου συζευγμένου ιδιομορφών. Ε.Μ.Π.
39. Σιγαλός Λ. (2006) – Πειραματική διερεύνηση κυματικής διείδυσης από αγωγούς ανανέωσης ύδατος στη λιμενολεκάνη του Κολυμβαρίου Ν. Κρήτης. Ε.Μ.Π
40. Στάμου Α.Ι., Τσουκαλά Β.Κ., Δούκα Ε., Μιχαλακοπούλου Π., Γαϊτάνης Χ. (2008) – Κυματογενής μεταφορά οξυγόνου σε παράκτια έργα μέσω αγωγών ανανέωσης. Ερευνητικό Πρόγραμμα Ενίσχυσης Βασικής Έρευνας, ΛΕΥΚΙΠΠΟΣ
41. Τσουκαλά Β., Μπελιμπασάκης Κ., Κατσαρδή Β. (2013) – Διερεύνηση διάδοσης κυματικής διαταραχής σε παράκτια έργα μέσω αγωγών ανανέωσης. ΠΕΒΕ2010
42. Φουντούλης Γ.Δ. (2004) – Βελτιστοποίηση Διάταξης Στομίων Ανανέωσης Υδάτων σε Λιμενολεκάνη. Ε.Μ.Π