

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΣΕ ΑΓΩΓΟ ΑΝΑΝΕΩΣΗΣ

N. Μαρτζίκος*, M. Χονδρός, Θ. Πυρπιρή, Β.Κ. Τσουκαλά

Εργαστήριο Λιμενικών Έργων, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.,
Ηρώων Πολυτεχνείου 5, Ζωγράφου 157 80, Αθήνα.

*Στοιχεία επικοινωνίας: nmartzikos@central.ntua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

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). Χρησιμοποιώντας πειραματικές μετρήσεις του ύψους του κυματισμού ανάντη και κατόντη του κυματοθραύστη για διάφορες κυματικές συνθήκες και για μεταβαλλόμενες γεωμετρικές διαστάσεις του αγωγού ανανέωσης, τα ΤΝΔ εκπαιδεύονται προκειμένου να υπολογίζουν το συντελεστή κυματικής μετάδοσης, όταν τα πειράματα δε θα είναι διαθέσιμα. Με κύριο στόχο την αποδοτικότητα τους, τα προτεινόμενα ΤΝΔ επιλέγονται με κριτήριο το μέσο τετραγωνικό σφάλμα και το συντελεστή συσχέτισης. Κατά το στάδιο αξιολόγησης – επαλήθευσης προκύπτει ότι τα ΤΝΔ, εφόσον ενισχυθούν με καινούρια πειραματικά δεδομένα, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν με σχετική αξιοπιστία κατά τον αρχικό σχεδιασμό των αγωγών ανανέωσης στην κατασκευή λιμένων.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: αγωγοί ανανέωσης, νευρωνικά δίκτυα, κυματική μετάδοση

PREDICTION OF WAVE TRANSMISSION COEFFICIENT THROUGH FLUSSING CULVERTS USING NEURAL NETWORKS AND EXPERIMENTAL MEASUREMENTS

N. Martzikos*, M. Chondros, T. Pyrpiri, V.K. Tsoukala

Laboratory of Harbour Works, School of Civil Engineering, N.T.U.A.
5 Iroon Polytechniou St., Zografou 157 80 Athens, Greece.

*Corresponding author: nmartzikos@central.ntua.gr

ABSTRACT

In the present paper, an application of composite modeling is presented, for the estimation of wave transmission through flushing culverts. Specifically, Artificial Neural Network (ANN) are training with experimental measurements for the prediction of the transmission coefficient, when these will not be available in the future. Investigating the structure, the most appropriate ANN is choosing based on the mean squared error and the coefficient of variation. Despite the limited available experimental data, showed satisfactory behavior and may be used as an alternative tool for an estimation of the transmission coefficient through flushing culverts in harbour design in combination with proposed empirical equations or numerical models.

KEY WORDS: flushing culverts, artificial neural network, wave transmission

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού ενός λιμένα, εκτός από την εξασφάλιση της ευστάθειας των κατασκευών πρέπει να δίνεται έμφαση στη διατήρηση της ποιότητας του νερού εντός της λιμενολεκάνης. Για την εξασφάλιση της καλής ποιότητας του νερού, προτείνεται η περιοδική ανταλλαγή του νερού της λιμενολεκάνης με το θαλασσινό νερό (Dunham and Finn, 2002). Δημοφιλέστερη και πιο οικονομική μέθοδο αποτελεί η χρήση αγωγών ανανέωσης, οι οποίοι επιτρέπουν την είσοδο κυματισμών από την εξωτερική πλευρά του λιμένα εντός της λιμενολεκάνης, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται μείωση του απαιτούμενου χρόνου ανανέωσης των υδάτων, χωρίς την παρεμπόδιση του ασφαλούς ελλιμενισμού των σκαφών εντός της λιμενολεκάνης (Tsoukala et al., 2010). Οι αγωγοί ανανέωσης είναι ουσιαστικά, ανοίγματα (κυκλικής ή ορθογωνικής διατομής) τοποθετούμενα καθ' ύψος της διατομής. Στην Ελλάδα προτιμάται η τοποθέτηση του άξονά τους στην ελεύθερη επιφάνεια του νερού σε ηρεμία, αφού επικρατεί η ανεμογενής κυκλοφορία των κυματισμών (Tsoukala and Moutzouris, 2009).

Μέτρο αναφοράς της αποτελεσματικότητας του αγωγού ανανέωσης, αποτελεί ο συντελεστής κυματικής μετάδοσης K_t , ο οποίος και ορίζεται ως ο λόγος του μεταδιδόμενου ύψους κύματος μέσω του αγωγού ανανέωσης, H_t , προς το ύψος του προσπίπτοντος κυματισμού, H_i ($K_t=H_t/H_i$). Όπως έχει προκύψει από προγενέστερες ερευνητικές προσεγγίσεις (Tsoukala and Moutzouris, 2008, Tsoukala and Moutzouris, 2009, Tsoukala et al., 2014) ο συντελεστής, K_t σχετίζεται με τα χαρακτηριστικά των κυματισμών, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αγωγού ανανέωσης καθώς και το βάθος του νερού.

Για την κατανόηση την ανάλυση των μετασχηματισμών της διατομής του κύματος κατά τη μετάδοση του μέσα από τον αγωγό ανανέωσης και την εκτίμηση του συντελεστή K_t , έχει διεξαχθεί μέχρι σήμερα ένας σημαντικός αριθμός πειραματικών μετρήσεων που (Τσουκαλά κ. άλ., 2015). Δεδομένου όμως ότι τα εργαστηριακά πειράματα, ενώ αποτελούν αξιόπιστη προσέγγιση, απαιτούν δαπάνη χρόνου και χρήματος, συχνά επιλέγεται η χρησιμοποίηση ημι-εμπειρικών εξισώσεων, οι οποίες βασίζονται στα αποτελέσματα ήδη πραγματοποιούμενων πειραματικών μετρήσεων.

Ωστόσο, όταν δεν υπάρχει η δυνατότητα εκμετάλλευσης τέτοιων εξισώσεων, η χρήση εργαλείων όπως τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΤΝΔ) έχει αποδειχτεί ιδιαίτερα αποτελεσματική για διάφορες εφαρμογές στον τομέα γενικά της παράκτιας μηχανικής (Panizzo and Briganti, 2007, Garrido and Medina, 2012, Zanuttigh et al., 2013) αλλά και πιο συγκεκριμένα για την εκτίμηση του συντελεστή κυματικής μετάδοσης K_t (van den Boogaard et al., 2009, Chondros and Memos, 2012).

Ακολουθώντας μία παρόμοια προσέγγιση, στόχος της εργασίας είναι να υπολογιστεί με ακρίβεια ο συντελεστής κυματικής μετάδοσης μέσω αγωγού ανανέωσης, ο οποίος τοποθετείται σε κυματοθραύστη με κατακόρυφο μέτωπο. Η συμπεριφορά των ΤΝΔ, αν και η εκπαίδευση τους έγινε από ένα περιορισμένο αριθμό πειραματικών δεδομένων, αποδεικνύεται αρκετά ικανοποιητική ώστε να χρησιμοποιηθεί σε μία πρώτη εκτίμηση. Ο περιορισμένος αριθμός των δεδομένων δίνει στην εργασία τον χαρακτήρα της προκαταρκτικής έρευνας, ωστόσο σε συνδυασμό ενδεχομένως με εμπειρικές εξισώσεις ή/και με αριθμητικά μοντέλα στο μέλλον, η αποτελεσματικότητα των ΤΝΔ θα μπορούσε να βελτιωθεί ακόμα περισσότερο.

Η εργασία αποτελεί συνέχεια της εργασίας των Πυρπική κ. άλ. (2015), επεκτείνοντας την με τη διερεύνηση και ανάλυση περισσότερων ΤΝΔ ως προς τη δομή και την αποδοτικότητά τους. Η επεξεργασία και η ανάλυση των δεδομένων γίνεται με τη γλώσσα προγραμματισμού R (R Development CoreTeam, 2008), καθώς το μεγάλο πλήθος των διαθέσιμων βιβλιοθηκών – πακέτων της R την καθιστούν ιδιαίτερα αποτελεσματική και φιλική προς τον χρήστη.

Αρχικά, παρουσιάζεται η ημι-εμπειρική σχέση των Tsoukala et al., (2010) για τον υπολογισμό του συντελεστή κυματικής διάδοσης, περιγράφεται η διαδικασία των

πειραματικών μετρήσεων στη δισδιάστατη διώρυγα κυματισμών και στο τρισδιάστατο φυσικό ομοίωμα. Αναλύεται η λειτουργία των ΤΝΔ, όπου μετά τη σχεδίαση τους, την εκπαίδευση και την αξιολόγηση τους, γίνεται η εκτίμηση του συντελεστή κυματικής διάδοσης και η σύγκριση τους, τόσο με τα πειραματικά δεδομένα όσο και μεταξύ τους, ως προς την αποδοτικότητά τους.

2. ΗΜΙ-ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ

Οι Tsoukala et al., (2010), λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στη διώρυγα κυματισμών στο Ε.Λ.Ε, πρότειναν μία έκφραση για το συντελεστή κυματικής μετάδοσης K_t , μέσω των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της διατομής του αγωγού ανανέωσης και των χαρακτηριστικών του προσπίπτοντος κυματισμού. Η έκφραση η οποία προκύπτει μέσω της γραμμικής παλινδρόμησης έχει την ακόλουθη μορφή:

$$K_t = \frac{H_t}{H_i} = \left(0.135 \frac{b}{H_i} + 0.026 \frac{d}{H_i} + 0.030 \frac{h_f}{H_i} + 0.048 \frac{2h_s}{H_i} - 0.036 \frac{l}{H_i} \right) \cdot \mu^{-0.681} \quad (2.1)$$

όπου: b το πλάτος του αγωγού ανανέωσης, d το βάθος του νερού, h_f η απόσταση του πυθμένα του αγωγού ανανέωσης από τον πυθμένα της θάλασσας στα ανάντη, h_s το μισό του ύψους του αγωγού ανανέωσης, l το μήκος του αγωγού ανανέωσης και μ η αδιάστατη παράμετρος

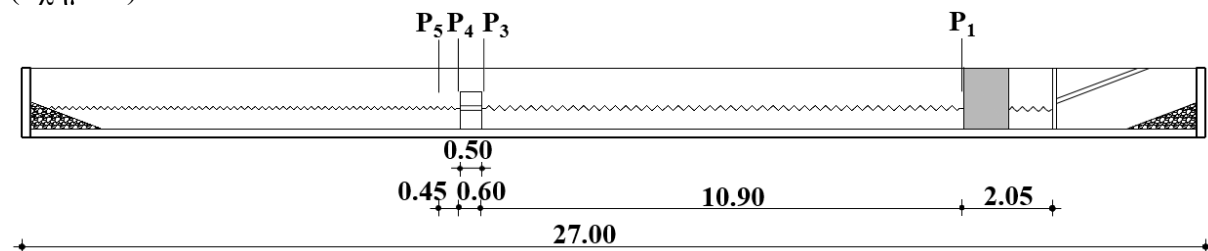
$\mu = \sin \varphi / \sqrt{\frac{2\pi H_i}{gT^2}}$ στην οποία φ είναι η γωνία της κλίσης του πρανούς και T η περίοδος του κύματος.

3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

3.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΗ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΔΙΩΡΥΓΑ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ

Πηγή των πειραματικών δεδομένων αποτέλεσαν μετρήσεις οι οποίες έγιναν στο Εργαστήριο Λιμενικών Έργων, στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Οι μετρήσεις προήλθαν από εργασίες των: Γιαννάκη, 2005, Tsoukala et al., 2010 και Chondros et al., 2014.

Στη διώρυγα κυματισμών τοποθετήθηκε φυσικό κατακόρυφο ομοίωμα, πάνω στο οποίο κατασκευάστηκε αγωγός ανανέωσης ορθογωνικής διατομής με μεταβαλλόμενα γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Η διώρυγα έχει σχήμα ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου με εσωτερικές διαστάσεις 27.00 m x 0.60 m x 1.53 m και είναι κατασκευασμένη από οπλισμένο σκυρόδεμα (Σχήμα 1).



Σχήμα 1. Πλάγια όψη της διώρυγας κυματισμών και αποτύπωση της θέσης των μετρητών.

Οι μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν, πραγματοποιήθηκαν για δύο διαφορετικές διαστάσεις αγωγού ανανέωσης (Πίνακας 1), για τρεις διαφορετικές περιόδους ($T_1=1.48$ s, $T_2=1.10$ s,

$T_3=0.90$ s) και για μέσα ύψη κύματος μεταξύ 2 έως 13 cm. Το βάθος του νερού ήταν για όλες τις μετρήσεις σταθερό και ίσο με 0.60 m.

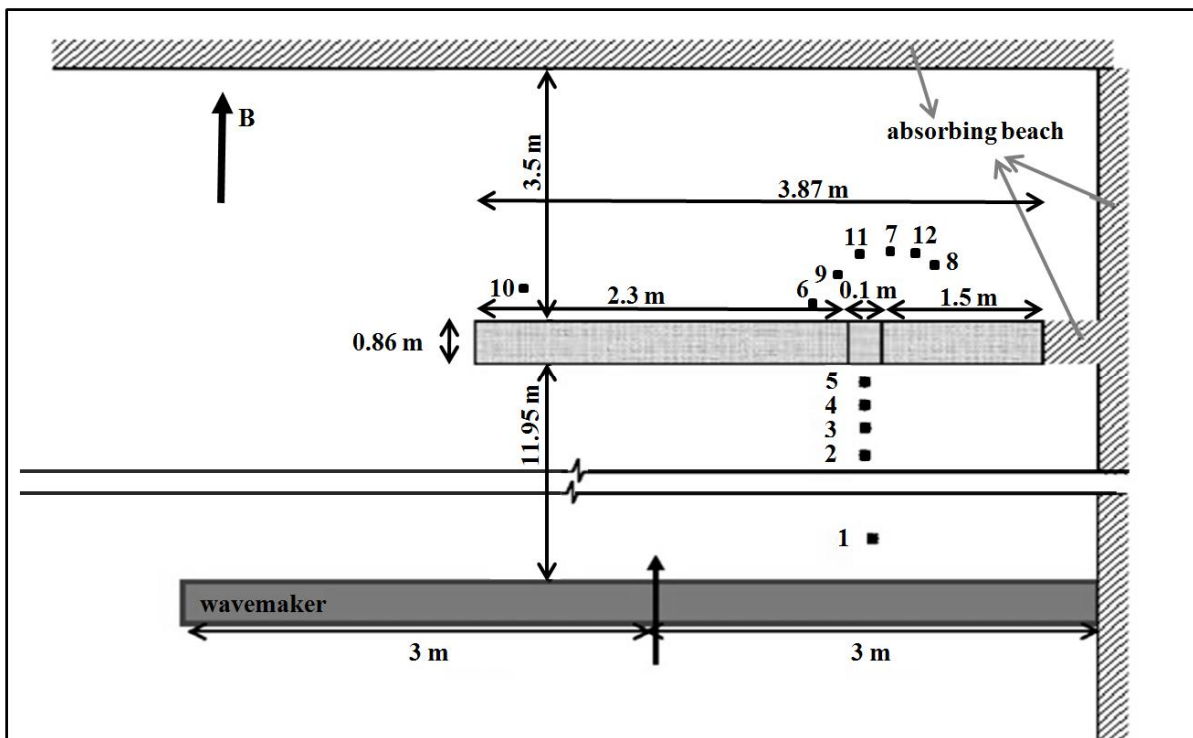
Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά των πειραματικών διατάξεων της δισδιάστατης διώρυγας

Κωδικός διάταξης	Διαστάσεις αγωγού ανανέωσης			
	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 αντίστασης. Όλες οι μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν από την εργασία της Γιαννάκη (2005) στη δισδιάστατη διώρυγα κυματισμών, επεξεργάστηκαν προσεκτικά εκ νέου, για τον προσδιορισμό των κυματικών χαρακτηριστικών (H_s και T_p).

3.2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΟΜΟΙΩΜΑ

Στη Δεξαμενή Δοκιμών του Εργαστηρίου Λιμενικών Έργων του ΕΜΠ, κατασκευάστηκε ένας τυπικός κυματοθραύστης με κατακόρυφο μέτωπο και διαστάσεις 0.86 (m) x 0.225 (m) x 3.87 (m) (πλάτος x ύψος x μήκος) (Σχήμα 2), στον οποίο ενσωματώθηκε αγωγός ανανέωσης. Η Δεξαμενή έχει εξωτερικές διαστάσεις 26.80 (m) x 24.30 (m) και βάθος 1.00 m.



Σχήμα 2. Κάτοψη της πειραματικής διάταξης των πειραματικών μετρήσεων στη δεξαμενή

Οι μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν πραγματοποιήθηκαν για δύο διαφορετικές διαστάσεις αγωγού ανανέωσης (Πίνακας 2), για δύο διαφορετικές περιόδους κυματισμού ($T_1=0.6$ s,

$T_2=0.75$ s) και ύψος κύματος με εύρος από 1.38 cm έως 6.19 cm. Η γωνία πρόσπτωσης των κυματισμών διατηρείται σταθερή και ίση με 90° . Για την καταγραφή των κυματικών χαρακτηριστικών χρησιμοποιήθηκαν 12 μετρητές κύματος τύπου αντιστάσεως.

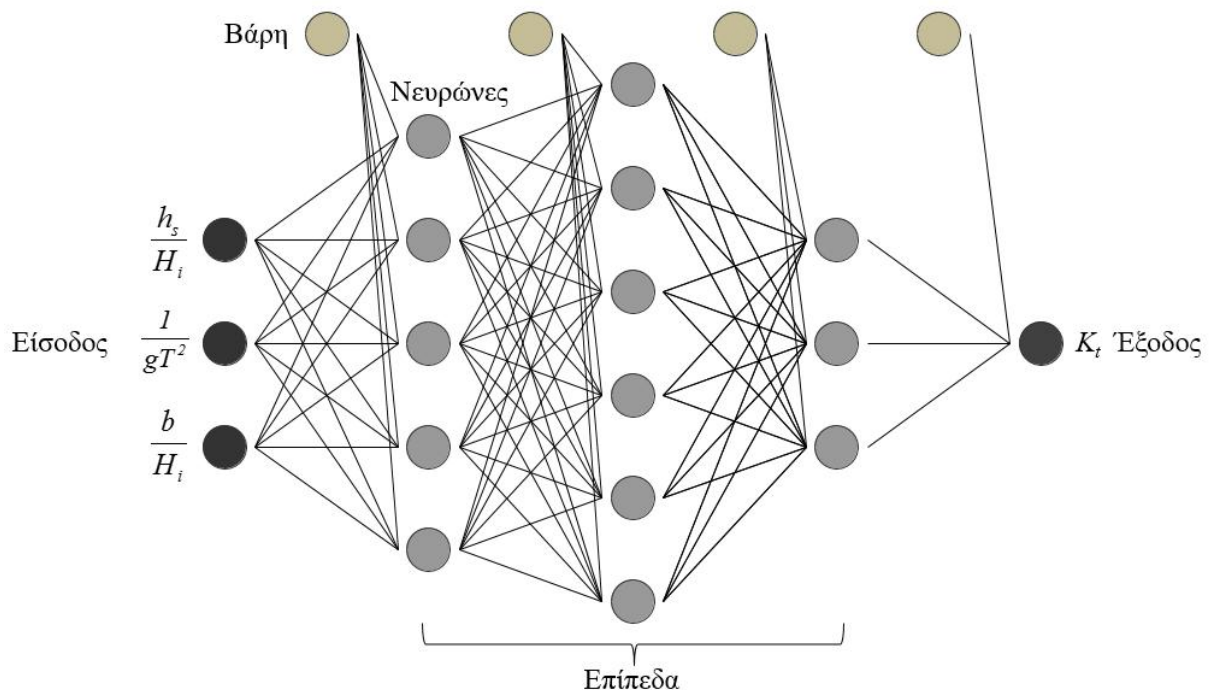
Πίνακας 2. Χαρακτηριστικά των πειραματικών διατάξεων της τρισδιάστατης δεξαμενής

Κωδικός διάταξης	Μήκος l (cm)	Πλάτος b (cm)	Ύψος h (cm)
1.1	86.0	10.0	10.0
2.1	86.0	8.5	10.0

4. ΤΕΧΝΗΤΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

4.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

Ένα Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο, μπορεί να παρομοιαστεί με ένα μαθηματικό μοντέλο που εκπαιδεύεται, αποθηκεύοντας εμπειρική γνώση ώστε να μπορεί να προσαρμόζεται σε παρόμοιες εφαρμογές. Τα ΤΝΔ προσομοιώνουν τον τρόπο λειτουργίας του ανθρώπινου εγκεφάλου, τον τρόπο δηλαδή που αυτός επεξεργάζεται και αποθηκεύει πληροφορίες. Στην παρούσα εργασία, κατασκευάζεται ένα μοντέλο ΤΝΔ ικανό να προβλέπει το συντελεστή κυματικής μετάδοσης K_t , διαμέσου αγωγού ανανέωσης. Ο τύπος των ΤΝΔ που χρησιμοποιήθηκε είναι πρόσθιας τροφοδότησης, καθώς τα σήματα που μεταφέρονται από τα επίπεδα εισόδου στην έξοδο είναι μίας κατεύθυνσης. Η βέλτιστη αρχιτεκτονική του δικτύου, ο αριθμός των νευρώνων, των κρυφών επιπέδων όπως και ο τρόπος με τον οποίο η πληροφορία θα μεταβιβάζεται στους νευρώνες (Σχήμα 3), ελέγχεται έπειτα από πολλές εφαρμογές των δικτύων. Η όλη διαδικασία πραγματοποιείται μέσω του υπολογιστικού πακέτου “neuralnet” (Fritsch et al., 2012).



Σχήμα 3. Αρχιτεκτονική ενός ΤΝΔ

4.2. ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΕΝΟΣ ΤΝΔ

Ένα ΤΝΔ προκειμένου να εξάγει συμπεράσματα από τα δεδομένα που εισάγονται πρέπει να περάσει από δύο στάδια: το στάδιο της εκπαίδευσης και το στάδιο της αξιολόγησης, επαληθεύοντας την αποτελεσματικότητα του έπειτα από κάποιες δοκιμές. Τα δεδομένα για μεγαλύτερη ευκολία κανονικοποιούνται (Sola and Sevilla, 1997) ώστε το εύρος τιμών τους να είναι μεταξύ 0 - 1, μέσω της σχέσης (4.1).

$$x_{new} = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \quad (4.1)$$

Κατά την εκπαίδευση του ΤΝΔ, πραγματοποιείται η βαθμονόμηση των βαρών που αφορούν στις συνάψεις, ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη σύνδεση μεταξύ των νευρώνων και τελικά μεταξύ εισόδου και εξόδου. Η επιλογή των βαρών καθορίζεται από το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (MSE). Κατά τη φάση της δοκιμής αξιολογείται η απόδοση του μοντέλου μέσω δοκιμών από δεδομένα που δεν χρησιμοποιήθηκαν κατά την είσοδο στην πρώτη φάση. Αφού λοιπόν έχουν καθοριστεί όλα αυτά, μπορούν να πραγματοποιηθούν εκτιμήσεις για ένα νέο σύνολο δεδομένων εισόδου.

5. ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

5.1. ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ ΚΑΙ ΕΞΟΔΟΥ

Για την πρόβλεψη του συντελεστή κυματικής μετάδοσης K_t , ως παράμετροι εισόδου επιλέχθηκαν οι αδιάστατοι λόγοι: h_s/H_i , $1/gT^2$, b/H_i . Σημειώνεται ότι κατασκευάστηκαν και παρουσιάζονται ΤΝΔ για τα αποτελέσματα από δύο διαφορετικές περιπτώσεις υπολογισμού του συντελεστή κυματικής μετάδοσης: α) για $K_{t1}=H_i/H_1$ – λαμβάνοντας υπόψη ως ύψος προσπίπτοντος κύματος (H_1) τη μέτρηση από μετρητή που βρίσκεται πλησιέστερα στην κυματογεννήτρια και β) για $K_{t2}=H_i/H_2$ – θεωρώντας ως εισερχόμενο ή προσπίπτοντα κυματισμό (H_2) αυτόν όπως μετράται από το μετρητή που βρίσκεται πλησίον του κυματοθραύστη.

Για την κατασκευή των προτεινόμενων ΤΝΔ χρησιμοποιήθηκαν 48 συνολικά πειραματικές μετρήσεις από τη διώρυγα κυματισμών και το τρισδιάστατο ομοίωμα. Προκειμένου να χωριστούν τα δεδομένα σε δυο μέρη για τις φάσεις της εκπαίδευσης και αξιολόγησης, έγινε ένας έλεγχος διάφορων αναλογιών, λόγω όμως του μικρού αριθμού δεδομένων η αναλογία (90% - 10%) κρίθηκε καταλληλότερη, μεγιστοποιώντας κατά αυτό τον τρόπο το πλήθος των δεδομένων στο στάδιο της εκπαίδευσης. Επομένως, 44 τυχαίες παρατηρήσεις χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση του μοντέλου (βλ §5.2) ενώ 4 παρατηρήσεις δεν συμμετείχαν στην εκπαίδευση του ΤΝΔ, ώστε να χρησιμοποιηθούν κατά το στάδιο της αξιολόγησης του (βλ §5.4 και βλ §5.5). Αποφεύγοντας την πολυπλοκότητα του δικτύου, ελέγχεται κάθε πιθανός συνδυασμός νευρώνων (1 - 10) και επιπέδων (1 - 3) με κριτήριο το συντελεστή συσχέτισης “Pearson” (σχέση 5.1) και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (σχέση 5.2) μεταξύ των αποτελεσμάτων του νευρωνικού δικτύου (y_i) και αυτά των πειραματικών μετρήσεων (x_i).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad n = \text{πλήθος δεδομένων} \quad (5.1)$$

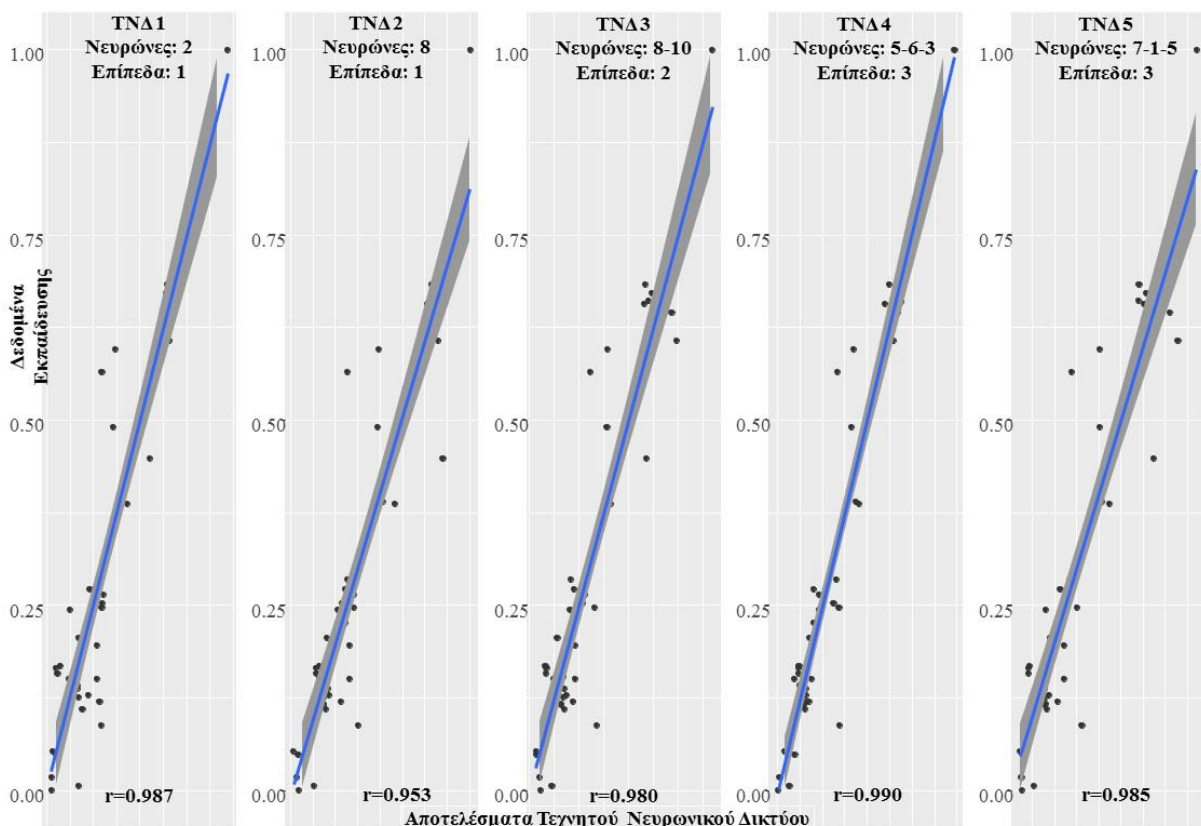
$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2, \quad (5.2)$$

Σε κάθε περίπτωση, για την εκτίμηση των συντελεστών K_{t1} και K_{t2} , παρουσιάζονται και αναλύονται πέντε προτεινόμενα ΤΝΔ, που εμφάνισαν το μικρότερο μέσο τετραγωνικό σφάλμα αλλά και το συντελεστή συσχέτισης πολύ κοντά στη μονάδα, εκ των οποίων το ΤΝΔ 1 (Νευρώνες: 2, Επίπεδα:1) είναι αυτό που είχε προταθεί από τους Πυρπρή κ. άλ. (2015).

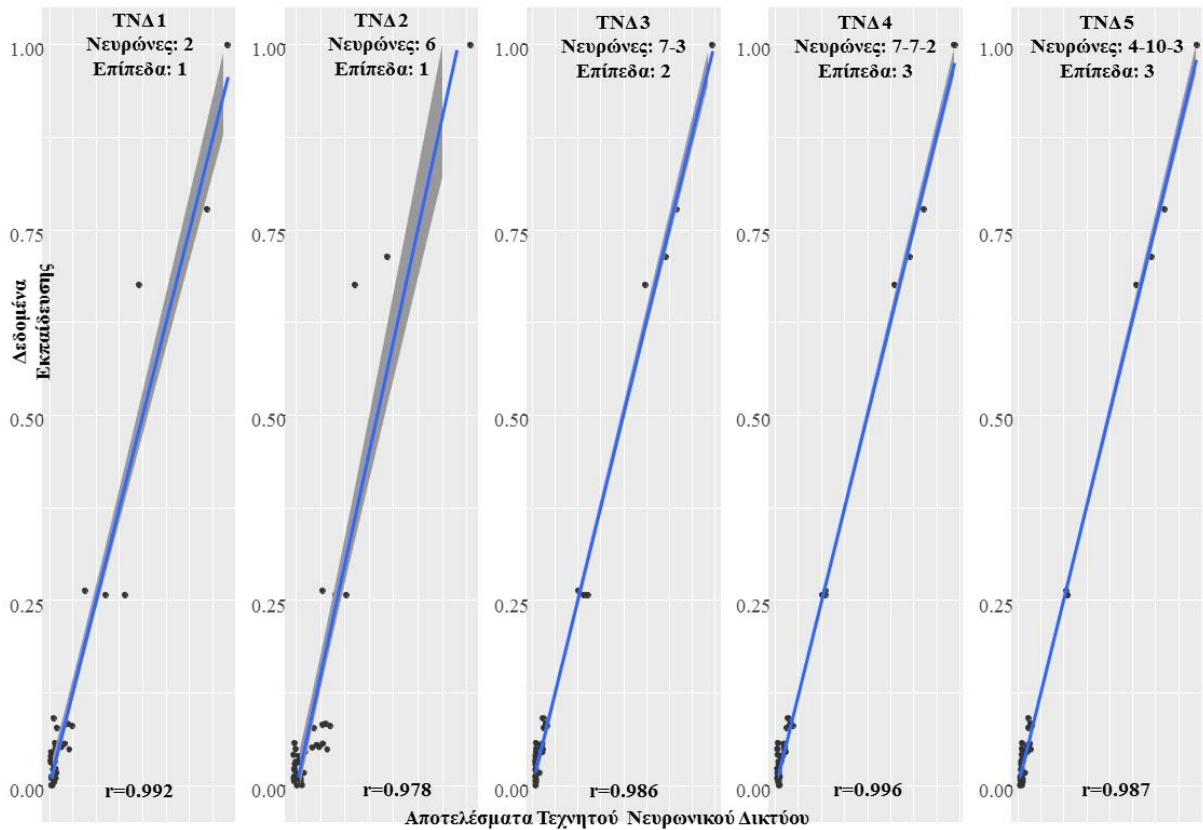
5.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΤΝΔ

Στα Σχήματα 4, 5 πραγματοποιείται η σύγκριση των αποτελεσμάτων των ΤΝΔ που αφορά στο συντελεστή κυματικής διάδοσης και των πειραματικών μετρήσεων, κατά το στάδιο εκπαίδευσης. Σε κάθε μοντέλο υπάρχει θετική συσχέτιση μεταξύ των αποτελεσμάτων των ΤΝΔ και των πειραμάτων, ωστόσο στα διαγράμματα όπου τα σημεία συγκλίνουν στην ευθεία της γραμμικής παλινδρόμησης η συσχέτιση είναι ισχυρότερη, όπως στο μοντέλο του ΤΝΔ 4 για το συντελεστή K_{t1} . Η περιοχή με το γκρι χρώμα, που πλαισιώνει την ευθεία γραμμικής παλινδρόμησης, δηλώνει το εύρος των διαστημάτων εμπιστοσύνης των αποτελεσμάτων κάθε ΤΝΔ και θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη. Αντίστοιχα στο κάτω μέρος των διαγραμμάτων αναγράφεται ο συντελεστής συσχέτισης κάθε ΤΝΔ κατά το στάδιο της εκπαίδευσης

Το Σχήμα 5 αφορά στο συντελεστή κυματικής μετάδοσης K_{t2} . Όμοια με προηγουμένως τα διαγράμματα των ΤΝΔ 3, 4, 5 δείχνουν ισχυρότερη συσχέτιση μεταξύ των αποτελεσμάτων των ΤΝΔ και των πειραματικών μετρήσεων κατά το στάδιο της εκπαίδευσης.



Σχήμα 4. Συντελεστής συσχέτισης των αποτελεσμάτων του ΤΝΔ με τα δεδομένα εκπαίδευσης, για τον υπολογισμό του K_{t1} .



Σχήμα 5. Συντελεστής συσχέτισης των αποτελεσμάτων του ΤΝΔ με τα δεδομένα εκπαίδευσης, για τον υπολογισμό του K_{t2}

5.3 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

Για την αξιολόγηση και επαλήθευση του μοντέλου των ΤΝΔ, χρησιμοποιήθηκαν όπως προαναφέρθηκε τέσσερις τυχαίες πειραματικές μετρήσεις, που δεν συμμετείχαν στην κατασκευή του ΤΝΔ κατά τη φάση της εκπαίδευσης και οι οποίες αναγράφονται στους Πίνακες 3 και 4, για τις περιπτώσεις των συντελεστών K_{t1} και K_{t2} αντίστοιχα.

Πίνακας 3. Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την επαλήθευση των ΤΝΔ του K_{t1}

Δεδομένα	h_s/H_i	l/gT^2	b/H_i	K_{t1}
1	5.284	0.063	10.570	0.538
2	2.625	0.156	2.230	0.294
3	2.402	0.042	3.600	0.245
4	1.513	0.063	3.020	0.309

Πίνακας 4. Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την επαλήθευση των ΤΝΔ του K_{t2}

Δεδομένα	h_s/H_i	l/gT^2	b/H_i	K_{t2}
1	3.879	0.063	7.776	0.395
2	10.111	0.244	10.111	0.785
3	3.175	0.156	2.698	0.356
4	2.688	0.156	2.688	0.288

Χρησιμοποιώντας τις νέες παρατηρήσεις (στήλες 1 - 3) των παραπάνω πινάκων (Πίνακες 3, 4), τα εκπαιδευμένα πλέον ΤΝΔ υπολογίζουν το συντελεστή κυματικής διάδοσης και στη συνέχεια τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αυτά των πειραμάτων της 4^{ης} στήλης. Η αποδοτικότητα των ΤΝΔ βελτιώνεται όταν μεταξύ των αποτελεσμάτων των ΤΝΔ με αυτά των πειραμάτων υπάρχει ισχυρή συσχέτιση (r), με τις τιμές της να προσεγγίζουν τη μονάδα, όπως επίσης και όταν το μέσο τετραγωνικό σφάλμα έχει τιμές πολύ κοντά στο 0, στοιχεία που αναγράφονται στους Πίνακες 5 και 6.

Πίνακας 5. Χαρακτηριστικά των ΤΝΔ για την εκτίμηση του K_{t1} , το μέσο τετραγωνικό

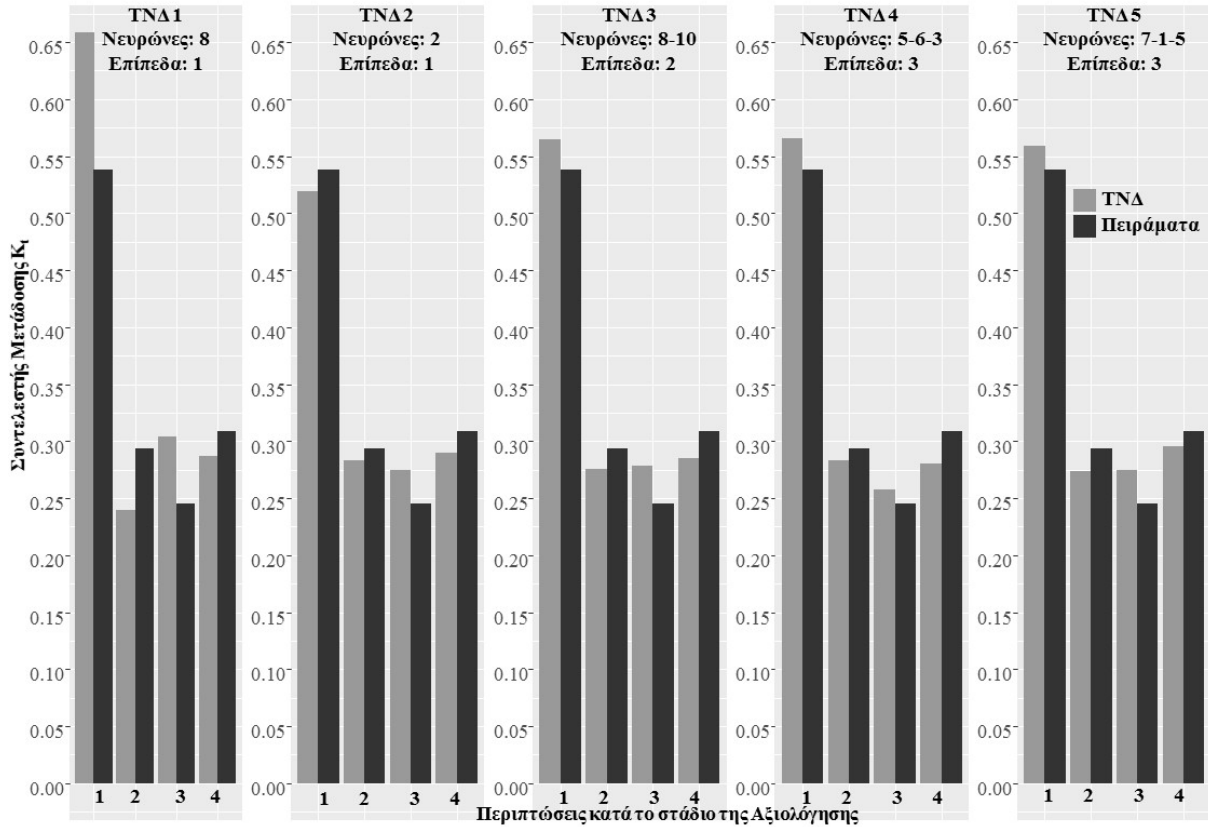
	ΤΝΔ 1	ΤΝΔ 2	ΤΝΔ 3	ΤΝΔ 4	ΤΝΔ 5
Επίπεδα	1	1	2	3	3
Νευρώνες ανά επίπεδο	2	8	8-10	5-6-3	7-1-5
MSE	0.0270	0.0021	0.0035	0.0023	0.0024
r	0.9529	0.9874	0.9798	0.9904	0.9850
Μέση απόκλιση %	17.915	6.3290	8.1887	5.8269	6.8414

σφάλμα (MSE) και ο συντελεστής συσχέτισης (r).

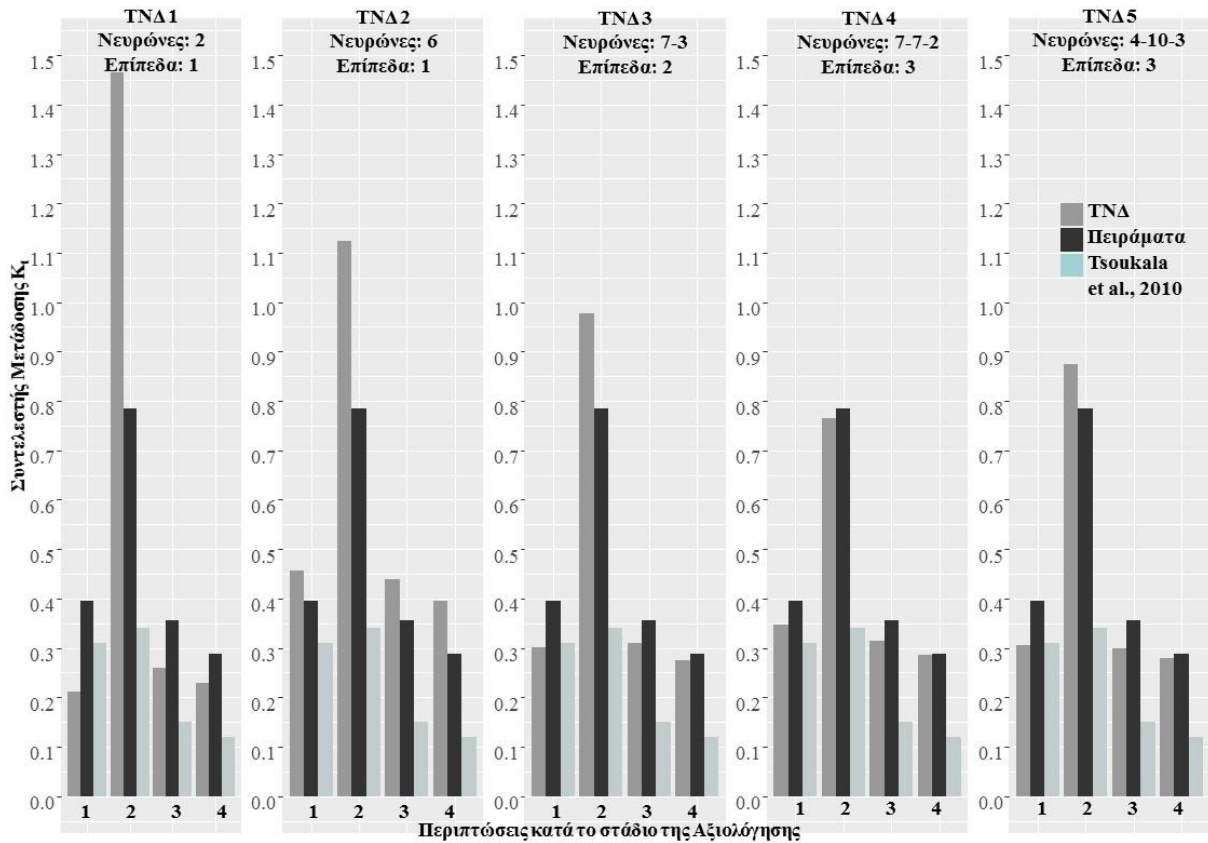
Πίνακας 6. Χαρακτηριστικά των ΤΝΔ για την εκτίμηση του K_{t2} , το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (MSE) και ο συντελεστής συσχέτισης (r).

	ΤΝΔ 1	ΤΝΔ 2	ΤΝΔ 3	ΤΝΔ 4	ΤΝΔ 5
Επίπεδα	1	1	2	3	3
Νευρώνες ανά επίπεδο	2	6	7-3	7-7-2	4-10-3
MSE	0.0183	0.0049	0.0017	0.0001	0.0007
r	0.9784	0.9921	0.9863	0.9959	0.9871
Μέση απόκλιση %	45.1342	29.9292	16.1659	6.7254	13.0674

Για κάθε περίπτωση (1 - 4) των δεδομένων αξιολόγησης (Πίνακες 3, 4), οι εκτιμήσεις των ΤΝΔ και η σύγκριση τους με τα πειραματικά δεδομένα παρουσιάζονται στα Σχήματα 6 και 7. Αναφορικά με το συντελεστή K_{t2} , τα αποτελέσματα των ΤΝΔ συγκρίνονται με τα πειραματικά δεδομένα αλλά και με την ημι-εμπειρική σχέση των Tsoukala et al., 2010 (Σχήμα 7). Η ημι-εμπειρική σχέση (Tsoukala et al., 2010) αποκλίνει σημαντικά από τα αποτελέσματα του προτεινόμενου ΤΝΔ, γεγονός σχετικά αναμενόμενο, δεδομένου ότι η εξίσωση αυτή έχει προκύψει από πειραματικές μετρήσεις οι οποίες είχαν διεξαχθεί με αγωγούς ανανέωσης τοποθετημένους σε κυματοθραύστη με κεκλιμένο πρηνές, ενώ στην παρούσα εργασία οι πειραματικές μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν, ήταν σε κυματοθραύστες με κατακόρυφο μέτωπο.



Σχήμα 6. Σύγκριση του συντελεστή μετάδοσης K_{t1} όπως προέκυψε από τα ΤΝΔ και τις πειραματικές μετρήσεις



Σχήμα 7. Σύγκριση του συντελεστή μετάδοσης K_{t2} όπως προέκυψε από τα ΤΝΔ και τις πειραματικές μετρήσεις

6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Επειτα από την αξιολόγηση των ΤΝΔ, σύμφωνα με το συντελεστή συσχέτισης και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα, είναι φανερό ότι για το συντελεστή K_{t1} (Πίνακας 5), το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο που θεωρείται βέλτιστο είναι το ΤΝΔ 4, με 3 κρυφά επίπεδα και πλήθος νευρώνων 5, 6 και 3 αντίστοιχα σε κάθε επίπεδο. Ενώ για την περίπτωση του K_{t2} , από τον Πίνακα 6, βέλτιστο θεωρείται το ΤΝΔ 4, με 3 κρυφά επίπεδα και πλήθος νευρώνων 7, 7 και 2 αντίστοιχα σε κάθε επίπεδο.

Οι εκτιμήσεις του K_t και για τις τέσσερις νέες περιπτώσεις δεδομένων, όπως φαίνεται στα Σχήματα 6 και 7, είναι αρκετά κοντά στα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων, με μια μεγαλύτερη απόκλιση στη δεύτερη περίπτωση των δεδομένων αξιολόγησης του K_{t2} όπου οι τιμές τους είναι κατά πολύ μεγαλύτερες του μέσου όρου του συνολικού δείγματος, με αποτέλεσμα τα ΤΝΔ 1 και ΤΝΔ 2 να μην είναι τόσο αποτελεσματικά όσο τα ΤΝΔ 3 και 4.

Τα δυο βέλτιστα ΤΝΔ παρουσιάζουν μικρή απόκλιση μεταξύ του εκτιμώμενου συντελεστή κυματικής μετάδοσης και του πραγματικού, με τη μέση τιμή της απόκλισης τους και για τις τέσσερις νέες περιπτώσεις δεδομένων να είναι 5.8269% για τον K_{t1} και 6.7254% για τον K_{t2} . Η διαφορά στην απόκλιση μεταξύ K_{t1} και K_{t2} , ίσως έγκειται και πάλι στη μεγαλύτερη διασπορά και στις υψηλότερες τιμές των δεδομένων εισόδου για το συντελεστή K_{t2} .

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σύμφωνα με τα παραπάνω, αποδεικνύεται ότι τα ΤΝΔ είναι αρκετά αξιόπιστα, παρά το σημαντικό περιορισμένο αριθμό των πειραματικών δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στην προκαταρκτική αυτή έρευνα. Τα ΤΝΔ που προτείνονται δίνουν τη δυνατότητα υπολογισμού του συντελεστή κυματικής μετάδοσης για 4 νέες περιπτώσεις δεδομένων, χωρίς να απαιτούνται επιπλέον πειράματα.

Ωστόσο, η αρχιτεκτονική δομή των ΤΝΔ, ο αριθμός των νευρώνων και των επιπέδων τους δεν μπορεί να είναι δεδομένος, αλλά θα πρέπει πάντα να ελέγχεται με κριτήριο το συντελεστή συσχέτισης και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα κατά το στάδιο της εκπαίδευσης όσο και στο στάδιο της αξιολόγησης. Επίσης, η πολυπλοκότητα της δομής του ΤΝΔ αν και δε συνάδει πάντα με καλύτερα αποτελέσματα, στην παρούσα εργασία τα ΤΝΔ με τρία κρυφά επίπεδα και μεγαλύτερο αριθμό νευρώνων αποδείχτηκαν πιο αποτελεσματικά έναντι των απλοποιημένων δομών, το οποίο πιθανόν σχετίζεται με το μικρό δείγμα μετρήσεων που ήταν αρχικά διαθέσιμο. Ακόμη σύμφωνα με τα τελικά αποτελέσματα, η επιλογή του βέλτιστου ΤΝΔ γίνεται κυρίως με κριτήριο το μέσο τετραγωνικό σφάλμα και όχι τόσο το συντελεστή συσχέτισης, ο οποίος φυσικά σε όλες τις περιπτώσεις είναι πολύ κοντά στη μονάδα, αλλά οι μικρές διαβαθμίσεις του δεν ταυτίζονται με την αποδοτικότητα του ΤΝΔ.

Συμπερασματικά λοιπόν, η εφαρμογή των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων κρίνεται εύχρηστη και απαραίτητη στον τομέα της ακτομηχανικής και το σχεδιασμό λιμένων. Καθώς με ένα αξιόλογο αριθμό πειραματικών μετρήσεων είναι δυνατόν να εκπαιδευτεί ένα ΤΝΔ, που θα μπορεί να παράγει αξιόπιστα αποτελέσματα στο μέλλον για μια επιθυμητή παράμετρο σχεδιασμού, τροφοδοτώντας το απλά με κάποια νέα δεδομένα εισόδου. Μελλοντικές έρευνες θα πρέπει να επικεντρωθούν στη χρήση επιπλέον πειραματικών δεδομένων, αυξάνοντας την επάρκεια και την αξιοπιστία του ΤΝΔ, στην επέκταση της περιοχής εφαρμογής τους, όπως επίσης και στη βελτίωση της ακρίβειάς τους, με μικρότερα σφάλματα εκτιμήσεως.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Γιαννάκη, Τ. 2005. *Πειραματική διερεύνηση της επίδρασης των αγωγών ανανέωσης ύδατος στα κυματικά χαρακτηριστικά και την οξυγόνωση της εσωτερικής περιοχής των παράκτιων*

- έργων. Διπλωματική Εργασία, Εργαστήριο Λιμενικών Έργων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα.
- Πυρπιρή Θ., Χονδρός Μ., Κατσαρδή Β., Τσουκαλά Β.Κ., 2015. *Υπολογισμός Κυματικής Μετάδοσης με χρήση Νευρωνικών Δικτύων και Πειραματικών Μετρήσεων*, 3ο Κοινό Συνέδριο: 13ο Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης (ΕΥΕ), 9ο Ελληνικής Επιτροπής Διαχείρισης Υδατικών Πόρων (ΕΕΔΥΠ), 1ο Ελληνικού Υδατικού Συνδέσμου, «Ολοκληρωμένη διαχείριση υδατικών πόρων στη νέα εποχή» Αθήνα.
- Τσουκαλά, Β.Κ., Στάμου, Α.Ι., Κατσαρδή, Β. Γιαντσή, Θ., Μπελιμπασάκης, Κ.Α., Μουτζούρης, Κ.Ι. 2015. *Πειραματική και υπολογιστική προσομοίωση αγωγών ανανέωσης υδάτων για τον περιβαλλοντικό σχεδιασμό Μαρίνας*, Πρώτο Πανελλήνιο Συνέδριο Τουριστικοί Λιμένες, Μαρίνες, Αθήνα, 12-14 Οκτωβρίου 2015, 77-88.
- Chondros, M., Memos, C. 2012. *Prediction of wave transmission coefficient by combining experimental measurements and numerical model*, Proceedings of the 4th CoastLab International Conference on the Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection, Ghent, Belgium, September 17-20, e-proceedings.
- Chondros, M., Katsardi, V., Tsoukala, V.K., Belibassakis, K. 2014. *Experimental verification of a new 3D numerical model involving wave transformation through flushing culverts*, Proceedings of the 3rd European Congress of the International Association for Hydro-Environment Engineering and Research, IAHR, Porto, Portugal, April 14-16, 2014, e-proceedings .
- Dunham, J.W., Finn, A.A. 2002. *Small – Craft Harbors. Design. Construction and Operation*. Fredonia Books.
- Fritsch, S., Guenther, F., Suling, M. 2012. *neuralnet: Training of neural networks. R package version 1.32*. <https://CRAN.R-project.org/package=neuralnet>
- Garrido, J.M., Medina, J.R., 2012. *New neural network-derived empirical formulas for estimating wave reflection on Jarlan-type breakwaters*. Coastal Engineering 62, 9–18.
- Katsardi, V., Tsoukala, V.K., Belibassakis, K.A. 2013. *3D wave transformation through openings in coastal structures*, Proceedings 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, American Society of Mechanical Engineers, Nantes, France, June 9-14, 2013, V005T06A048 - V005T06A048.
- Panizzo, A., Briganti, R. 2007. *Analysis of wave transmission behind low-crested break waters using neural networks*. Coastal Engineering 54, 643–656.
- R Development Core Team, 2008. R: *A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.
- Sola, J., Sevilla, J. 1997. *Importance of input data normalization for the application of neural networks to complex industrial problems*. IEEE Transactions on Nuclear Science 44 (3), 1464 - 1468.
- Tsoukala, V.K., Moutzouris, C.I. 2008. *A 3-D experimental study on the beneficial role of flushing culverts in sea water quality*, Proceedings of the 31st International Conference Coastal Engineering 2008, (Editor: J. McKee Smith), Hamburg, Germany, August 31 - September 5, 2008, 5, 4414-4422.
- Tsoukala, V.K., Moutzouris, C.I. 2009. *Wave transmission in harbors through flushing culverts*, Journal of Ocean Engineering, 36, 434-445.
- Tsoukala V.K., Gaitanis C.K., Stamou A.I., Moutzouris C.I. 2010. *Global NEST Journal*, 12, 152-160. <http://journal.gnest.org/journal-paper/wave-and-dissolved-oxygen-transmission-analysis-harbors-using-flushing-culverts>
- Tsoukala V.K., Katsardi V., Belibassakis K.A. 2014. *Wave transformation through flushing culverts operating at seawater level in coastal structures*, Journal of Ocean Engineering, 89, 211-229.

-
- 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, British Columbia, Canada, August 9-14, 2009, 989-996.
- Zanutigh, B., Formentin, S.M., Briganti, R. 2013. *A neural network for the prediction of wave reflection from coastal and harbor structures*. Coastal Engineering 80, 49–67.