

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΚΙΝΗΣΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΔΙΠΟΛΟΥ ΜΕ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΑΓΝΗΤΟΜΕΤΡΙΑΣ

Αικατερίνη Σκούτα¹, Ευάγγελος Χριστοφόρου¹

¹Εργαστήριο Μεταλλογνωσίας, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ζωγράφου, 15780, Αθήνα,

e-mail: skouta.katerina@gmail.com

Περίληψη

Σκοπός της εργασίας αυτής, είναι η επίλυση του προβλήματος που αφορά στον εντοπισμό της θέσης και του προσανατολισμού ενός ή περισσοτέρων διπόλων βάσει της έντασης του μαγνητικού πεδίου που δημιουργούν γύρω τους, με αφορμή την χρήση αισθητήρων πεδίου σε εφαρμογές εντοπισμού μαγνητικών μαζών. Θεωρώντας ένα πλοίο ως ένα μαγνητικό δίπολο, μετρήσεις της έντασης του μαγνητικού πεδίου σε κάποιο συγκεκριμένο σύνορο γύρω του, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της θέσης και του προσανατολισμού του, καθώς αυτό κινείται και μεταβάλλει το μαγνητικό πεδίο γύρω του. Επίσης εξετάζεται ο προσδιορισμός του κατάλληλου αριθμού αισθητήρων που απαιτούνται για να είναι δυνατός ο εντοπισμός των διπόλων.

Για την επίλυση του προβλήματος, αρχικά μελετάται η δημιουργία του μαγνητικού πεδίου γύρω από ένα δίπολο. Η μοντελοποίηση γίνεται με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων, και συγκεκριμένα του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων ANSYS και των εξισώσεων Maxwell. Τα αποτελέσματα της επίλυσης των μοντέλων, δηλαδή οι τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου σε διάφορα σημεία ενδιαφέροντος, τα οποία μπορούν να ταυτιστούν με τα σημεία στα οποία τοποθετούνται οι αισθητήρες πεδίου, χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου για την επίλυση του αντιστρόφου προβλήματος, με τη μέθοδο των νευρωνικών δικτύων. Αναπτύσσονται και μελετώνται, διάφορες αρχιτεκτονικές νευρωνικών δικτύων προστροφοδότησης, τα οποία χρησιμοποιούν ως δεδομένα εισόδου για την εκπαίδευσή τους, την επαλήθευσή τους και τον έλεγχο τους, τις τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου και ως δεδομένα εξόδου τις καρτεσιανές συντεταγμένες του κέντρου των διπόλων και τη γωνία προσανατολισμού τους. Τα νευρωνικά δίκτυα δημιουργούνται και εκπαιδεύονται στο MATLAB, με τη χρήση κατάλληλων αλγορίθμων και ελέγχονται ως προς την απόδοσή τους. Τελικά εξετάζεται, η αποτελεσματικότητα της επιλογής των νευρωνικών δικτύων ως μέθοδο για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος, με γνώμονα την ελαχιστοποίηση του αριθμού των αισθητήρων για τη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου.

Λέξεις κλειδιά: Νευρωνικά δίκτυα, μαγνητικό πεδίο, ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, μαγνητομετρία, εντοπισμός πλοίων.

Abstract

A ship, magnetized in the earth's magnetic field, creates a local magnetic perturbation that is its magnetic signature. As a result, a ship could be considered as a giant magnetic dipole that changes the magnetic field intensity of its surrounding area. Magnetometers that are

Σκούτα Αικατερίνη¹, Ευάγγελος Χριστοφόρου¹, ¹Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Μοντελοποίηση θέσης και κίνησης μαγνητικού διπόλου με τεχνικές μαγνητομετρίας

based on magnetic materials and magnetic effects, such as the magneto-resistance effect, the magneto-impedance effect and inductive techniques could be used as an alternative measurement technique for applications such as navigation and monitoring or detection of magnetic masses. A crucial issue, regarding this approach for naval vessel monitoring, is the difficulty in defining the appropriate number of magnetic sensors needed and their respective configuration, in order to predict accurately the position and the orientation of a magnetic mass through the measured magnetic field intensities on a specific boundary. Magnetic field intensities' measurements could be used as input in inverse engineering techniques in order to solve this problem.

Neural networks had been widely used in inverse problems solving. Data observed are transformed to model parameters, through a neural network that is trained with this kind of data. In the present thesis, the design and the evaluation of different types of neural networks, as an approach of detecting the position and orientation of a number of dipoles through the measured magnetic field intensities on a specific boundary, are analyzed. Different networks' architectures have been considered, mainly regarding the number of samples included in the datasets, the number of hidden layers, the number of neurons at each layer and the size of the input vector, which corresponds to the values of the magnetic field intensity measured by a number of sensors placed at the boundary. The input datasets needed, derive from the solution of the forward problem with ANSYS finite element software.

Keywords: Neural networks, magnetic field, finite element analysis, magnetometry, ship detection.

1. Εισαγωγή

Οι αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορες εφαρμογές ανίχνευσης [1 , 2] . Η κατασκευή των αισθητήρων βασίζεται σε πολύ σημαντικά μαγνητικά φαινόμενα. Βάσει του φαινομένου της μαγνητοσυστολής σχεδιάζονται και κατασκευάζονται αισθητήρες μαγνητικού πεδίου [3 - 5]. Ο σχεδιασμός μαγνητομέτρων ακριβείας, στηρίζεται σε φαινόμενα όπως η ανισοτροπική μαγνητοαντίσταση, η πυρήνωση και μετάδοση των τοιχωμάτων [6] και σε επαγωγικά φαινόμενα (fluxgates) [7]. Πολύ ενδιαφέρουσες και χρήσιμες εφαρμογές [8] που βασίζονται σε μεθόδους διέγερσης και ανίχνευσης, έχουν επίσης συμβάλει σημαντικά στη μαγνητομετρία [9 - 12]. Η μοντελοποίηση αυτών των μαγνητομέτρων είναι το βασικό στοιχείο για τη βελτιστοποίηση τους.

Βασική ιδέα αυτής της εργασίας, αποτελεί η ανάπτυξη ενός συστήματος παρακολούθησης μέσω της μέτρησης της μαγνητικής μάζας ενός κινούμενου πλοίου. Η μαγνητική κατανομή της μάζας ενός πλοίου, μπορεί να θεωρηθεί ως ένα ενιαίο γιγαντιαίο μαγνητικό δίπολο ή ως μια κατανομή μικρότερων μαγνητικών ροπών που συνεισφέρουν στη μαγνητική του υπογραφή [13 - 14], επιτρέποντας τη μέτρηση της μεταβολής που αυτή προκαλεί στο μαγνητικό πεδίο της γης. Τα συστήματα ραντάρ και τεχνολογίες που στηρίζονται σε GPS, αποτελούν μερικές από τις πιο χαρακτηριστικές περιπτώσεις συστημάτων παρακολούθησης. Μία εναλλακτική τεχνική μέτρησης για εφαρμογές πλοήγησης, παρακολούθησης ή ανίχνευσης μαγνητικών μαζών [15 - 16] είναι η χρήση μαγνητομέτρων.

Σκούτα Αικατερίνη¹, Ευάγγελος Χριστοφόρου¹, ¹Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Μοντελοποίηση θέσης και κίνησης μαγνητικού διπόλου με τεχνικές μαγνητομετρίας

Μαγνητόμετρα που βασίζονται σε μαγνητικά υλικά και σε μαγνητικά φαινόμενα, όπως το φαινόμενο της μαγνητοαντίστασης, της μαγνητοεμπέδησης και επαγωγικών τεχνικών μπορούν να μετρούν και να ανιχνεύουν μικρές μεταβολές του πεδίου. Οι μετρήσεις των μεταβολών του πεδίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως είσοδος σε τεχνικές επίλυσης αντιστρόφων προβλημάτων μηχανικής, για την εκτίμηση της θέσης μιας μαγνητικής μάζας. Τα νευρωνικά δίκτυα έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως στην επίλυση αντιστρόφων προβλημάτων. Τα δεδομένα των μετρήσεων μετασχηματίζονται σε παραμέτρους του μοντέλου, μέσω νευρωνικών δικτύων που εκπαιδεύονται με τα δεδομένα αυτά. Στην εργασία αυτή, το σύνολο δεδομένων εισόδου που απαιτούνται, προκύπτουν από την επίλυση του ορθού προβλήματος με το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ANSYS. Ο σχεδιασμός και η αξιολόγηση διαφόρων αρχιτεκτονικών νευρωνικών δικτύων [17 - 18] ως μέθοδος για τον προσδιορισμό της θέσης και του προσανατολισμού ενός μαγνητικού διπόλου, αναλύονται.

2. Μεθοδολογία

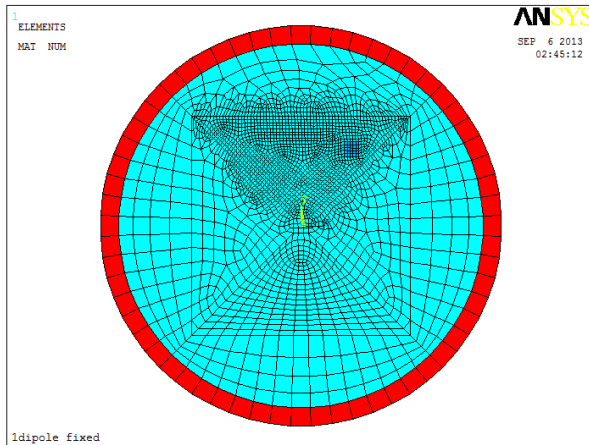
Για την επίλυση του αντιστρόφου προβλήματος, δηλαδή του προσδιορισμού της θέσης και του προσανατολισμού των διπόλων βάσει των τιμών της έντασης του μαγνητικού πεδίου γύρω τους, όπως αναφέρθηκε, επιλέγεται η μέθοδος των νευρωνικών δικτύων. Αναπτύσσονται και μελετώνται, διάφορες αρχιτεκτονικές νευρωνικών δικτύων, που διαφοροποιούνται ως προς τον αριθμό του πλήθους των αισθητήρων που περιλαμβάνονται στο σύνολο δεδομένων, το πλήθος των κρυφών επιπέδων κάθε ΝΔ, το πλήθος των νευρώνων κάθε επιπέδου και το μέγεθος του πίνακα εισόδου, που αντιστοιχεί στις μετρούμενες τιμές έντασης μαγνητικού πεδίου από ένα πλήθος αισθητήρων στην περιοχή γύρω από τα δίπολα. Τα δεδομένα εισόδου που απαιτούνται για τη δημιουργία και εκπαίδευση των ΝΔ προκύπτουν από την επίλυση του ορθού προβλήματος με το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ANSYS.

Αναπτύχθηκε για το σκοπό αυτό το πρόγραμμα Magnetic Generator, που δημιουργεί τον απαραίτητο αριθμό μοντέλων προσομοίωσης μαγνητικού πεδίου διπόλων, καλεί το λογισμικό ANSYS για την επίλυση των μοντέλων αυτών με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και τις εξισώσεις Maxwell και δημιουργεί τα αρχεία με τα αποτελέσματα της επίλυσης. Όσον αφορά την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων πραγματοποιείται Nodal MVP διατύπωση, για δισδιάστατη (2D) μαγνητοστατική ανάλυση. Επιλέγεται ο τύπος στοιχείου PLANE13, για τη μοντελοποίηση των διπόλων και της περιοχής του αέρα κοντά στα δίπολα και το INFIN110 για την μοντελοποίηση του περιβάλλοντα αέρα στο άπειρο [19]. Η γένεση του πλέγματος και η μορφή του μαγνητικού πεδίου γύρω από το δίπολο, παρουσιάζονται στις Εικόνες 1 και 2.

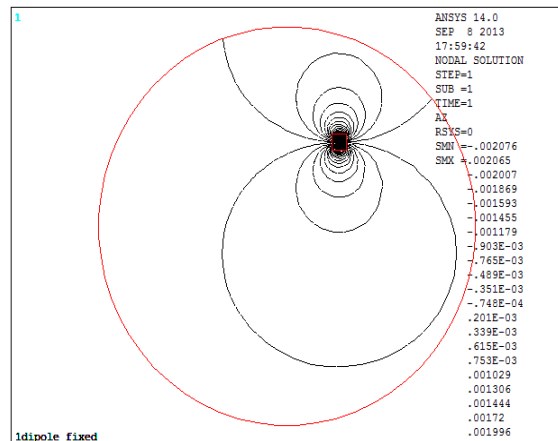
2.1. Δημιουργία δεδομένων εισόδου

Τα αποτελέσματα αυτά, επεξεργάζονται και μετατρέπονται, με χρήση κατάλληλου κώδικα που αναπτύχθηκε στο MATLAB R2013 toolbox [20] (συνάρτηση create_data.m), σε διανύσματα εισόδου - εξόδου που είναι απαραίτητα για την εκπαίδευση, τον έλεγχο και την επαλήθευση των νευρωνικών δικτύων. Συγκεκριμένα, από το αρχείο magnetic_intensities.txt, εξάγεται η πληροφορία που αφορά στις τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου σε συγκεκριμένους κόμβους, από το αρχείο locations.txt, οι καρτεσιανές συντεταγμένες των διπόλων και από το αρχείο angle.txt, ο προσανατολισμός των διπόλων.

Σκούτα Αικατερίνη¹, Ευάγγελος Χριστοφόρου¹, ¹Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Μοντελοποίηση θέσης και κίνησης μαγνητικού διπόλου με τεχνικές μαγνητομετρίας



Εικόνα 1: Διακριτοποίηση του προβλήματος με ANSYS



Εικόνα 2: Μαγνητικές δυναμικές γραμμές

Η συνάρτηση `create_data.m` δέχεται ως ορίσματα τη διαδρομή (path) στην οποία βρίσκονται τα μοντέλα που έχει δημιουργήσει ο generator και τις παραμέτρους `numSamples` και `sensorStep`, που καθορίζουν τον αριθμό των δειγμάτων που θα χρησιμοποιηθούν για κάθε νευρωνικό δίκτυο και το βήμα (αριθμός αισθητήρων) για την επιλογή του μέγεθος του διανύσματος εισόδου (Inputs), αντίστοιχα, και επιστρέφει τους πίνακες:

- **inputs**, ένα πίνακα που περιέχει στις γραμμές του τις τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου κατά x , H_{x_1}, \dots, H_{x_n} και κατά y , H_{y_1}, \dots, H_{y_n} και στις στήλες τις τιμές αυτές για κάθε ένα μοντέλο
- **targets**, ένα πίνακα που κάθε του στήλη περιέχει για κάθε μοντέλο τις καρτεσιανές συντεταγμένες των κέντρων των διπόλων και τις γωνίες προσανατολισμού και τις παραμέτρους
- **numSensors**, που περιέχει τον αριθμό των κόμβων στους οποίους δίνεται η ένταση του μαγνητικού πεδίου (αριθμός αισθητήρων) και
- **numDipoles**, που περιέχει τον αριθμό των διπόλων που περιέχονται σε κάθε μοντέλο (μπορεί να είναι σταθερός για όλα τα μοντέλα ή μπορεί να μεταβάλλεται μέχρι ενός μέγιστου αριθμού)

Με τον παραπάνω τρόπο, ο χρήστης δημιουργεί διάφορα σετ δεδομένων για την εκπαίδευση διαφόρων ΝΔ, που επιτρέπουν τη μελέτη παραλλαγών του προβλήματος, ανάλογα με τον αριθμό των διπόλων και τον προσανατολισμό τους. Η μέθοδος εξετάζεται ως προς την ικανότητα εντοπισμού ενός μαγνητικού διπόλου με σταθερή γωνία προσανατολισμού (0°). Τα αποτελέσματα αναλύονται παρακάτω.

Αφού δημιουργηθούν τα δεδομένα εισόδου και εξόδου, χρησιμοποιούνται συναρτήσεις προ/μετα επεξεργασίας (Pre/Post - Processing Functions) για το μετασχηματισμό των δεδομένων αυτών σε μορφές που είναι πιο εύκολες και πιο αποδοτικές για το δίκτυο. Η `parminmax` μετασχηματίζει τα δεδομένα εισόδου, έτσι ώστε όλες οι τιμές να βρεθούν στο διάστημα $[-1, 1]$. Η `removeconstantrows` αφαιρεί τις γραμμές του διανύσματος εισόδου που αντιστοιχούν σε στοιχεία εισόδου που έχουν πάντα την ίδια τιμή, καθώς αυτά τα στοιχεία εισόδου δεν παρέχουν χρήσιμη πληροφορία στο δίκτυο. Αντίστοιχες συναρτήσεις χρησιμοποιούνται για το μετασχηματισμό των δεδομένων εξόδου. Η

Σκούτα Αικατερίνη¹, Ευάγγελος Χριστοφόρου¹, ¹Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Μοντελοποίηση θέσης και κίνησης μαγνητικού διπόλου με τεχνικές μαγνητομετρίας

συνάρτηση που χρησιμοποιείται για τον διαχωρισμό των δεδομένων εισόδου [20] στα σύνολα εκπαίδευσης (train set), επαλήθευσης (validation set) και ελέγχου (test set) είναι η `dividerand`. Επιλέγεται ο διαχωρισμός των δεδομένων με τυχαίο τρόπο, σε ποσοστό 70% δεδομένα εκπαίδευσης, 15% δεδομένα επαλήθευσης και 15% δεδομένα ελέγχου. Τα δεδομένα επαλήθευσης, χρησιμοποιούνται ως κριτήριο για την παύση της εκπαίδευσης, ώστε να αποφευχθεί το φαινόμενο του `overfitting`. Αν η απόδοση του δικτύου σε αυτό το σετ δεδομένων αποτύχει να βελτιωθεί ή παραμένει ίδια για έναν μέγιστο αριθμό εποχών, η εκπαίδευση σταματά. Τα δεδομένα ελέγχου, χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο του δικτύου σε δεδομένα που δεν έχουν προηγουμένως παρουσιαστεί στο δίκτυο και αποτελεί ένα εντελώς ανεξάρτητο σύνολο για τη γενίκευση του δικτύου. Επίσης, για την αρχικοποίηση του δικτύου, χρησιμοποιείται η συνάρτηση `initFcn = 'initlay'`, σύμφωνα με την οποία τα βάρη και οι `biases` κάθε επιπέδου αρχικοποιούνται βάσει του αλγορίθμου Nguyen-Widrow (`net.layers{i}.initFcn = 'initnw'`). Αυτός ο αλγόριθμος επιλέγει τιμές για τα βάρη και τις `biases`, με τέτοιο τρόπο ώστε να καταναμηθούν ομοιόμορφα οι ενεργές περιοχές των νευρώνων, σε κάθε επίπεδο. Οι τιμές αυτές, περιέχουν ένα βαθμό τυχαιότητας και δεν είναι ίδιες κάθε φορά που καλείται η συνάρτηση.

2.2. Εκπαίδευση δικτύου

Ο τύπος νευρωνικών δικτύων που χρησιμοποιείται για την επίλυση του προβλήματος είναι νευρωνικά δίκτυα προστροφοδότησης (Feedforward), τα οποία εκπαιδεύονται με τον Αλγόριθμο Ανάστροφης Διάδοσης (Back Propagation), για πλήθος εποχών εκπαίδευσης που κυμαίνεται από 0 έως 1000. Συγκεκριμένα, γίνεται χρήση της συνάρτησης `newff`, για τη δημιουργία του ΝΔ και της συνάρτησης `trainlm` (Levenberg-Marquardt backpropagation) για την εκπαίδευση του. Η συνάρτηση μάθησης που χρησιμοποιείται, ως κανόνας για τη διόρθωση σφάλματος, είναι η `learnsgdm` και η συνάρτηση απόδοσης, η `mse` (mean squared normalized error performance function), που μετρά την απόδοση του δικτύου βάσει του μέσου τετραγωνικού σφάλματος. Όλα τα δίκτυα αποτελούνται από τουλάχιστον 2 επίπεδα, ένα εισόδου και ένα εξόδου και από ένα έως τρία κρυφά επίπεδα. Το πλήθος των νευρώνων ανά επίπεδο δεν είναι σταθερό, αλλά μεταβάλλεται ανάλογα με τις ανάγκες βελτίωσης της απόδοσης του δικτύου σε κάθε παραλλαγή.

Όσον αφορά στο επίπεδο εισόδου, το πλήθος των νευρώνων κυμαίνεται από 4 (2 αισθητήρες) έως 120 (60 αισθητήρες) ανάλογα με το πλήθος των τιμών μαγνητικής έντασης που τροφοδοτούνται στο δίκτυο. Πρόκειται για τις τιμές έντασης του πεδίου H_x και H_y , στα 60 σημεία ενδιαφέροντος (πιθανές θέσεις αισθητήρων) στη μορφή του πίνακα **inputs**, οι οποίες μειώνονται σύμφωνα με την μεταβλητή **sensorStep**. Στο επίπεδο εξόδου, ο αριθμός των νευρώνων είναι 3, δύο για τις συντεταγμένες της θέσης κάθε διπόλου (x_i , y_i) και μία για τη γωνία προσανατολισμού του, στη μορφή του πίνακα **targets**. Το πλήθος των νευρώνων των κρυφών επιπέδων κυμαίνεται από 10 έως 30. Όσον αφορά στις συναρτήσεις μεταφοράς των νευρώνων (transfer function), χρησιμοποιήθηκαν για τους νευρώνες των κρυφών επιπέδων, η λογαριθμική (`logsig`) και για το επίπεδο εξόδου η γραμμική (`purelin`).

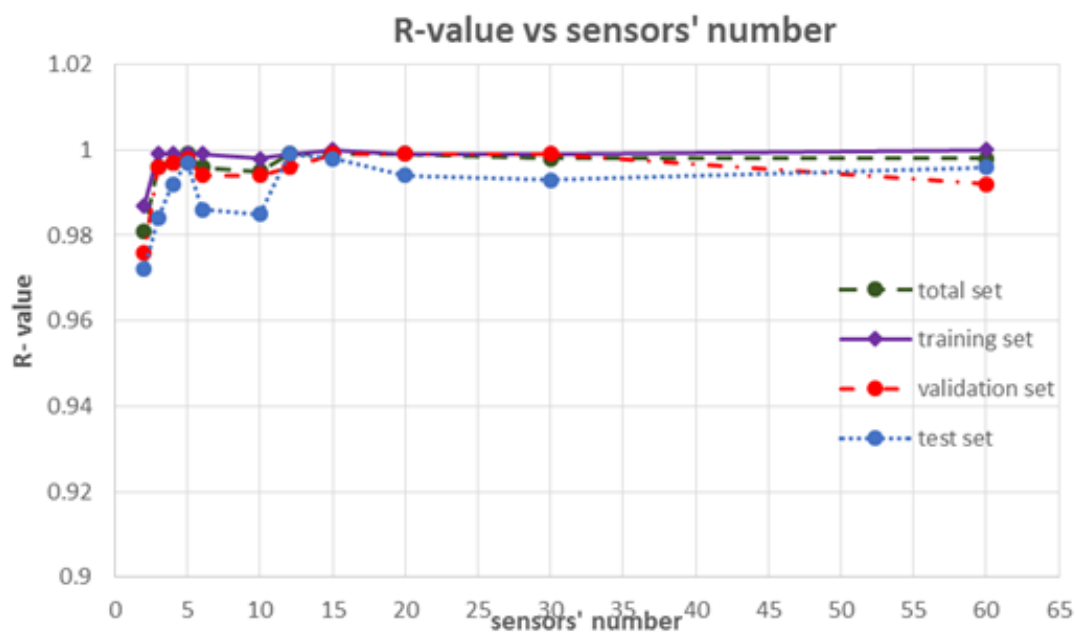
3. Αποτελέσματα

3.1. Προσομοίωση και αξιολόγηση των νευρωνικών Δικτύων

Σκούτα Αικατερίνη¹, Ευάγγελος Χριστοφόρου¹, ¹Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Μοντελοποίηση θέσης και κίνησης μαγνητικού διπόλου με τεχνικές μαγνητομετρίας

Τα νευρωνικά δίκτυα που δημιουργούνται και προσομοιώνουν τα δεδομένα εισόδου, εξετάζονται ως προς την απόδοσή τους. Συγκεκριμένα, η διερεύνηση της απόκρισης του δικτύου πραγματοποιείται με ανάλυση παλινδρόμησης μεταξύ των αποκρίσεων της προσομοίωσης του δικτύου και των επιθυμητών εξόδων. Η ανάλυση παλινδρόμησης, επιστρέφει τρεις παραμέτρους. Οι δύο πρώτες, m και b , αντιστοιχούν στην κλίση και στο σημείο τομής με τον άξονα y της ιδανικής γραμμικής παλινδρόμησης των εξόδων του δικτύου ως προς τις επιθυμητές εξόδους του δικτύου. Η τρίτη μεταβλητή, που επιστρέφεται από την ανάλυση παλινδρόμησης, είναι ο *συντελεστής συσχέτισης* (R) μεταξύ των εξόδων του δικτύου και των επιθυμητών εξόδων. Η μεταβλητή αυτή, αποτελεί μέτρο της σχέσης μεταξύ των outputs και targets. Αν η τιμή του είναι ίση με 1, τότε υπάρχει ακριβώς γραμμική σχέση μεταξύ των εξόδων του δικτύου και των επιθυμητών εξόδων. Αν η τιμή του είναι κοντά στο 0, δεν υπάρχει καμία απολύτως γραμμική σχέση μεταξύ τους.

Οι τιμές του συντελεστή συσχέτισης R , ως μέτρο της απόδοσης της χρήσης νευρωνικών δικτύων για τον προσδιορισμό της θέσης ενός διπόλου με σταθερή γωνία προσανατολισμού 0° , καθώς οι εισοδοί μειώνονται από την τιμή των 120, σταδιακά σε 4, δηλαδή από την τιμή των 60 αισθητήρων στην τιμή των 2, και για σύνολο δεδομένων 60 δειγμάτων και νευρωνικού δικτύου ενός κρυφού επιπέδου με 10 νευρώνες, εμφανίζονται στην Εικόνα 3. Στον πίνακα 1, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της απόδοσης των νευρωνικών δικτύων, καθώς αυξάνεται ο αριθμός των νευρώνων από 10 σε 30 και ο αριθμός των κρυφών επιπέδων του δικτύου από 1 έως 3, στις περιπτώσεις συνόλου δεδομένων 40 και 60 δειγμάτων.



Εικόνα 3: Συντελεστής συσχέτισης R vs αριθμό αισθητήρων για ΝΔ δίκτυο 1 κρυφού επιπέδου με 10 νευρώνες

Πίνακας 1: Συντελεστής συσχέτισης R και σφάλματα χρησιμοποιώντας 60 δείγματα στο σύνολο δεδομένων

| Samples | sensors | layers | neuron | Συντελεστής συσχέτισης R | | | | error |
|---------|---------|--------|--------|--------------------------|------------|-------|-------|-----------|
| | | | | Train | validation | Test | total | |
| 60 | 2 | 1 | 10 | 0.999 | 0.999 | 0.999 | 0.999 | 1.47E-04 |
| 60 | 2 | 1 | 30 | 0.999 | 0.969 | 0.984 | 0.992 | -9.30E-05 |
| 60 | 2 | 2 | 1010 | 0.998 | 0.992 | 0.996 | 0.997 | 8.71E-05 |
| 60 | 2 | 2 | 3030 | 0.999 | 0.917 | 0.999 | 0.984 | 5.86E-04 |
| 60 | 2 | 3 | 101010 | 0.998 | 0.996 | 0.995 | 0.998 | 1.58E-05 |
| 60 | 2 | 3 | 103010 | 0.992 | 0.973 | 0.985 | 0.988 | 3.33E-04 |
| 60 | 2 | 3 | 303030 | 1 | 0.994 | 0.999 | 0.999 | 1.48E-04 |

Πίνακας 2: Συντελεστής συσχέτισης R και σφάλματα χρησιμοποιώντας 40 δείγματα στο σύνολο δεδομένων

| Samples | sensors | layers | neuron | Συντελεστής συσχέτισης R | | | | error |
|---------|---------|--------|--------|--------------------------|------------|-------|-------|-----------|
| | | | | Train | validation | Test | total | |
| 40 | 2 | 1 | 10 | 0.991 | 0.997 | 0.983 | 0.991 | 1.74E-04 |
| 40 | 2 | 1 | 30 | 0.999 | 0.986 | 0.980 | 0.995 | 1.90E-04 |
| 40 | 2 | 2 | 1010 | 0.999 | 0.996 | 0.994 | 0.999 | 2.59E-05 |
| 40 | 2 | 2 | 3030 | 0.999 | 0.925 | 0.971 | 0.982 | 4.96E-04 |
| 40 | 2 | 3 | 101010 | 0.999 | 0.995 | 0.991 | 0.998 | 2.26E-05 |
| 40 | 2 | 3 | 103010 | 0.999 | 0.993 | 0.995 | 0.998 | -8.30E-06 |
| 40 | 2 | 3 | 303030 | 0.998 | 0.979 | 0.991 | 0.993 | 2.43E-04 |

4. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία, εξετάστηκε η εφαρμογή των νευρωνικών δικτύων ως μέθοδος για την επίλυση του αντιστρόφου προβλήματος του προσδιορισμού της θέσης και του προσανατολισμού ενός αριθμού διπόλων, βάσει των μετρήσεων της έντασης του μαγνητικού πεδίου σε ένα συγκεκριμένο όριο. Επειδή, κρίσιμο ζήτημα αποτελεί και ο προσδιορισμός του κατάλληλου αριθμού αισθητήρων που απαιτούνται για το σκοπό αυτό, η χρήση των νευρωνικών δικτύων εξετάζεται και ως προς αυτή την παράμετρο, αφού ο αριθμός των αισθητήρων επηρεάζει το διάνυσμα εισόδου των ΝΔ. Τα αποτελέσματα στην περίπτωση του ενός διπόλου με σταθερή γωνία προσανατολισμού, έδειξαν ότι ακόμα και δύο αισθητήρες είναι αρκετοί για τον εντοπισμό της θέσης του με βεβαιότητα 99%, σχεδόν για όλες τις αρχιτεκτονικές δικτύου που εξετάστηκαν.

5. Βιβλιογραφία

- [1] DS Vlachos, DK Fragoulis, JN Avaritsiotis An adaptive neural network topology for degradation compensation of thin film tin oxide gas sensors, Sensors and Actuators B: Chemical, 45, 3, p. 223–228, 1997

- [2] CA Papadopoulos, DS Vlachos, Effect of surface catalysts on the long-term performance of reactively sputtered tin and indium oxide gas sensors, *Sensors and Actuators B: Chemical* 42, 2, p. 95–101, 1997
- [3] I. Giouroudi, A. Ktena and E. Hristoforou, Microstructural characterization of cylindrical Fe_{1-x}Ni_x thin films, *J. Opt. Adv. Mat.*, 6, p. 45-50, 2004
- [4] E. Hristoforou, “Magnetostrictive Delay Lines: Engineering Theory and Sensing Applications”, *Meas. Sci. & Technol.*, 14, p. R15-R47, 2003
- [5] E. Hristoforou, Magnetic Effects in Physical Sensor Design, *J. Opt. Adv. Mat.*, 4, p.245-260, 2002
- [6] E. Hristoforou and D. Niarchos, Mechanical Sensors Based on Re-Entrant Flux Reversal, *IEEE Trans. Mag.*, 28, p. 2190-2192, 1992
- [7] C. Petridis, I Petrou, PD Dimitropoulos, E Hristoforou, Determining appropriate magnetic core properties for a new type of flux-gate like sensor, *Sensor Letters*, 5, p. 98-101, 2007
- [8] I. Petrou, P. Skafidas, E. Hristoforou, Electronic toll and road traffic monitoring system using 3-D field AMR sensors, *Sensor Letters*, 11, p. 91-95, 2013
- [9] E. Hristoforou, New monolithic three dimensional field sensors with high sensitivity, *J. Opt. Adv. Mat.*, 8, p. 1691-1697, 2006
- [10] C. Petridis, A. Ktena, E. Laskaris, PD Dimitropoulos, E Hristoforou, Ni-Fe thin film coated Cu wires for field sensing applications, *Sensor Letters*, 5, p. 93-97, 2007
- [11] C. Petridis, P. D. Dimitropoulos, E. Hristoforou, New Magnetic Field Sensor Based on Combined Flux-Gate/Hall-Effect Arrangement, *IEEE Sensors Journal*, 9, p. 128-134, 2009
- [12] E. Hristoforou, H. Hauser and PD Dimitropoulos, On a New Principle of Smart Multi-Sensor Based on Magnetic Effects, *IEEE Sensors*, 6, p. 372-379, 2006
- [13] Holmes, J. J., Reduction of a ship's magnetic field signatures *Synthesis Lectures on Computational Electromagnetics*, 3(1), pages 68, 2008
- [14] Information on <http://www.emcos.com/Naval-EMC-Simulations>
- [15] E. Hristoforou, New Position Sensor Based on the Magnetostrictive Delay Line Principle, *Sensor Letters*, 7, p. 303-309, 2009
- [16] Petrou, J., Skafidas, P., & Hristoforou, E. (2013). Electronic toll and road traffic monitoring system using 3-D field AMR sensors, *Sensor Letters*, 11(1), p. 91 – 95
- [17] Haykin, S. *Neural networks: A Comprehensive Foundation*, 2nd ed, Prentice-Hall, 1999
- [18] Messai, N., Thomas, P., Lefebvre, D., & Moudni, A. E. Neural networks for local monitoring of traffic magnetic sensors. *Control Engineering Practice*, 13(1), p. 67-80, 2005
- [19] Fateh, B., Modeling, simulation and optimization of a microcoil for MRI. *Computational Engineering*, University of Rostock, Germany, 2006
- [20] Demuth, H. *Neural network toolbox for use with MATLAB R2013a: User's guide*, MathWorks, 2013