



Πολυτεχνείο Κρήτης  
Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
Περιβαλλοντική Μηχανική - Υδατικοί Πόροι και Κλιματική Αλλαγή

Μεταπτυχιακή Διατριβή

Προσδιορισμός νιτρορύπανσης υπόγειων υδάτων στην ευρύτερη περιοχή του Ασωπού  
ποταμού με χρήση ANNs

Χριστίνα Στυλιανουδάκη

Εξεταστική Επιτροπή:

Καθηγητής Καρατζάς Γεώργιος (Επιβλέπων)

Καθηγητής Νικολαΐδης Νικόλαος

Αναπληρωτής Καθηγητής Παρανυχιανάκης Νικόλαος

Χανιά

Φεβρουάριος 2019

## Μεταπτυχιακή Διατριβή

Προσδιορισμός νιτρορύπανσης υπόγειων υδάτων στην ευρύτερη περιοχή του Ασωπού ποταμού με χρήση ANNs

Determination of groundwater nitrate pollution in the extended area of Asopos River using ANNs

Χριστίνα Στυλιανουδάκη

Εξεταστική Επιτροπή:

Καθηγητής Καρατζάς Γεώργιος (Επιβλέπων)

Καθηγητής Νικολαΐδης Νικόλαος

Αναπληρωτής Καθηγητής Παρανυχιανάκης Νικόλαος

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Γεώργιο Καρατζά για τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα, καθώς και για την καθοδήγηση του και για τη σημαντική βοήθεια του κατά τη διεκπεραίωση της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα άτομα του Εργαστηρίου Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής για το όμορφο κλίμα και ιδιαίτερα τον Δρ. Ιωάννη Τριχάκη για την άψογη συνεργασία, τις πολύτιμες συμβουλές του και κυρίως για την προθυμία του να βοηθήσει σε οποιοδήποτε πρόβλημα προέκυψε.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους φίλους μου και την οικογένεια μου για την αδιάκοπη στήριξη τους.

## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρείται η χρήση τεχνητού νευρωνικού δικτύου για την εκτίμηση των συγκεντρώσεων νιτρικών ιόντων ( $\text{NO}_3^-$ ) σε υπόγεια ύδατα.

Η νιτρορύπανση προκαλείται με την άμεση ή έμμεση απόρριψη στο υδάτινο περιβάλλον αζωτούχων ενώσεων και οδηγεί στην πρόκληση βλαβών στην ανθρώπινη υγεία και στην υποβάθμιση των υδατικών οικοσυστημάτων. Στα υπόγεια ύδατα, εμφανίζεται κυρίως με τη μορφή αθροιστικής συσσώρευσης νιτρικών, τα οποία σε ορισμένες περιπτώσεις φθάνουν σε επίπεδα που είναι απαγορευτικά για τη χρήση του νερού για σκοπούς ύδρευσης. Ως οριακή τιμή έχει καθορισθεί από την Ελληνική και Διεθνή νομοθεσία η συγκέντρωση των 50 mg/l, ωστόσο ακόμα και σε μικρότερες συγκεντρώσεις (μεγαλύτερες από 25 mg/l) δημιουργείται προβληματισμός για μακροχρόνια χρήση του νερού για πόση (γρεκα, 2018).

Η μοντελοποίηση της νιτρορύπανσης των υπόγειων υδάτων με τις κλασικές αριθμητικές μεθόδους μπορεί να καταστεί ιδιαίτερα δύσκολη διαδικασία και απαιτεί πολύ καλές γνώσεις της γεωμορφολογίας της περιοχής, η οποία εν γένει χαρακτηρίζεται από ετερογένεια (Tanty & Desmukh, 2015; Gutiérrez et al, 2018). Επιπλέον, οι τεχνικές ανίχνευσης και μέτρησης των συγκεντρώσεων των νιτρικών ιόντων στο νερό χαρακτηρίζονται από υψηλό κόστος και υψηλές απαιτήσεις σε χρόνο, ενώ οι φορητές συσκευές που χρησιμοποιούνται δεν είναι ικανοποιητικής ακρίβειας. Ακόμη, στις διάφορες μεθόδους που χρησιμοποιούνται για τη χημική ανάλυση του νερού, η ανίχνευση των νιτρικών επηρεάζεται από την ύπαρξη άλλων ιόντων, κυρίως των  $\text{Cl}^-$  (Alahi & Mukhopadhyay, 2018). Το γεγονός αυτό οδηγεί σε σημαντική υποβάθμιση του προβλήματος, ιδιαίτερα σε περιοχές με υψηλές συγκεντρώσεις αλάτων, όπως σε παράκτιους υδροφορείς. Με γνώμονα τα προαναφερθέντα ζητήματα, στην παρούσα εργασία εξετάζεται η δυνατότητα χρήσης νευρωνικών δικτύων για την εκτίμηση των συγκεντρώσεων των νιτρικών ιόντων σε υπόγειους υδροφορείς.

Το νευρωνικό δίκτυο δεν απαιτεί γνώση των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών της περιοχής, η οποία είναι δύσκολο να αποκτηθεί, ενώ ως παράμετροι εισόδου μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεταβλητές χωρίς να υπάρχει γνώση των σχέσεων που τις διέπουν στο σύστημα που μελετάται (Trichakis et al., 2011). Για το σκοπό της εργασίας, αναπτύχθηκαν συνολικά τρία νευρωνικά δίκτυα σε περιβάλλον Matlab. Για το πρώτο δίκτυο χρησιμοποιήθηκαν εύκολα μετρήσιμα δεδομένα πεδίου. Οι παράμετροι που μελετήθηκαν αρχικά ήταν το pH, η ηλεκτρική αγωγιμότητα, η θερμοκρασία του νερού και του αέρα και η στάθμη του υδροφορέα. Με αυτές τις παραμέτρους, το μοντέλο πέτυχε αρκετά καλή προσομοίωση ( $R=0.92259$ ,  $\text{NSE}=0.8406$ ). Κατόπιν, για την καλύτερη περιγραφή του συστήματος επιλέχθηκε να εισαχθεί στο μοντέλο και το ποσοστό χρήσεων γης σε ακτίνα 1000 m από το κάθε πηγάδι. Με την είσοδο αυτής της μεταβλητής, παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση της απόδοσης του μοντέλου ( $R=0.97412$ ,  $\text{NSE}=0.9481$ ). Στο τρίτο μοντέλο, η προσομοίωση βασίστηκε σε τυπικές μετρήσεις ποιότητας νερού. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν το pH, η ηλεκτρική αγωγιμότητα, τα ανθρακικά ιόντα ( $\text{HCO}_3^-$ ) και τα ιόντα  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ . Στο συγκεκριμένο μοντέλο

σημειώθηκε η καλύτερη προσομοίωση ( $R=0.96545$ ,  $NSE=0.987838$ ), το οποίο πιθανά οφείλεται στην ύπαρξη περισσότερων δεδομένων. Τέλος, χρησιμοποιώντας το δεύτερο μοντέλο, στο οποίο θεωρείται ότι έχουν συμπεριληφθεί παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά τη μεταφορά νιτρικών, εξετάστηκαν σενάρια κλιματικής αλλαγής και αλλαγών χρήσεων γης ώστε να εκτιμηθούν οι επιπτώσεις τους στα επίπεδα των συγκεντρώσεων  $NO_3^-$ . Τα αποτελέσματα των σεναρίων καταδεικνύουν τη σημαντική συμβολή των αγροτικών αλλά και των βιομηχανικών δραστηριοτήτων στα αυξημένα επίπεδα της νιτρορύπανσης.

Για την κατασκευή των μοντέλων αντλήθηκαν δεδομένα από μετρήσεις που έγιναν στο χρονικό διάστημα 2000-2008 σε γεωτρήσεις του Νομού Βοιωτίας, στο πλαίσιο υδρογεωλογικής και υδροχημικής έρευνας του ΙΓΜΕ (Γιαννουλόπουλος, 2008). Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από γεωτρήσεις που είναι τοποθετημένες στο Κωπαϊδικό Πεδίο και την ευρύτερη περιοχή της Λεκάνης Απορροής του Ασωπού ποταμού, όπου υπάρχει ιδιαίτερα υψηλή αγροτική, κτηνοτροφική και βιομηχανική δραστηριότητα. Για το λόγο αυτόν, στις υπό εξέταση περιοχές έχει παρουσιαστεί εκτεταμένη ρύπανση και σύμφωνα με τα κριτήρια της Οδηγίας 91/676/ΕΟΚ, καθορίστηκαν με τις ΚΥΑ 19652/1906/1999 (ΦΕΚ Β' 1575/05-08-1999) και ΚΥΑ 106253/08.11.10 ως ζώνες ευπρόσβλητες σε νιτρορύπανση γεωργικής προέλευσης.

Η καλή προσομοίωση που επετεύχθη στα μοντέλα, τα καθιστά ένα χρήσιμο εργαλείο για την πρόβλεψη των επιπέδων ρύπανσης, που θα αποτελεί τη βάση για την κατάστρωση σχεδίων από τις αρμόδιες αρχές, με σκοπό τη βέλτιστη διαχείριση των υπόγειων υδάτων και την πρόληψη της νιτρορύπανσης.

## Abstract

The scope of the present study is the estimation of groundwater pollution by nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ), using artificial neural networks (ANNs).

Nitrate pollution is caused through the introduction of excessive amounts of nitrogen to surface and groundwater, mainly as a result of agricultural practices because of the overuse of nitrogen based fertilizers. Other contributors to nitrate related pollution are the use of animal manure and seepage from wastewater and sewage.  $\text{NO}_3^-$  are particularly mobile through water and soil, so excess nitrates from sewage and agricultural fertilizers easily make their way into groundwater and surface waters. The guideline value for nitrate in drinking water is set by Greek and international legislation at a concentration of 50 mg/l, but even at lower concentrations (greater than 25 mg/l), concerns are being raised about long-term use of drinking water (ypeka, 2018).

Modeling of nitrate pollution with the commonly used mathematical methods can be a particularly difficult process and requires very good knowledge of the geomorphology of the study area, which in most cases is characterized by heterogeneity (Tanty & Desmukh, 2015; Gutiérrez et al, 2018). In addition, techniques for detecting and measuring nitrate concentrations in water are characterized by high cost and high demands of time, while portable devices used are not of sufficient accuracy. Furthermore, in the various methods used for chemical analysis of water, the detection of nitrates is affected by the presence of other ions, especially  $\text{Cl}^-$  (Alahi & Mukhopadhyay, 2018). This leads to a significant underestimation of the problem, especially in areas with high salt concentrations, such as in coastal aquifers. Based on the aforementioned issues, this thesis examines the possibility of using neural networks for the assessment of concentrations of nitrate in groundwater.

ANNs do not require the knowledge of the geomorphology characteristics of the area, which is hard to obtain, while it is possible to use variables as inputs parameters without knowing the relationships that condition them in the system being studied (Trichakis et al., 2011).

For the aforementioned purpose of this thesis, three neural networks were developed using Matlab toolbox. For the first network, easily measurable field data were used. The parameters initially studied were pH, electrical conductivity, water temperature, air temperature and aquifer level. This model achieved a fairly good simulation ( $R=0.92259$ ,  $\text{NSE}=0.8406$ ). Then, for the better description of the underground system, it was chosen to include in the model, the percentage of land uses in a radius of 1000 m from each well. The performance of the model increased significantly by the use of these variables ( $R=0.97412$ ,  $\text{NSE}=0.9481$ ). In the third model, the simulation was based on typical water quality measurements. In particular, pH, electrical conductivity,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , and  $\text{SO}_4^{2-}$  were used. This model achieved the best simulation ( $R=0.96545$ ,  $\text{NSE}=0.987838$ ), possibly due to the larger number of available data. Finally, scenarios of climate change and land use changes were examined, in order to assess their impact on  $\text{NO}_3^-$  levels, using the second model, which is considered to have included factors that significantly affect nitrate transport into the geoenvironment. The results of the scenarios

demonstrate the important contribution of agricultural and industrial activities to increased nitrate pollution.

For the development of the models, data from chemical and physical analyses of groundwater samples, for the period 2000-2008, were obtained. The wells are located in the Kopaidian Field and the wider area of the Asopos River Basin, in Voitia, Central Greece, Greece, where there is high agricultural, livestock and industrial activity. For this reason, extensive pollution has been reported and according to the requirements of the Directive 91/676/EEC, these areas were established as zones vulnerable with respect to nitrogen pollution from agricultural run-offs (ypeka, 2018).

The models achieved a good simulation, which indicates that they are a possible useful tool for the estimation of groundwater pollution by nitrates and so, they may constitute the basis for the development of groundwater management plans.

## Περιεχόμενα

<b>Περίληψη</b> .....	iv
<b>Abstract</b> .....	vi
Κατάλογος Εικόνων.....	xi
Κατάλογος Πινάκων.....	xiii
<b>1 Εισαγωγή</b> .....	1
<b>2 Νιτρορύπανση</b> .....	3
2.1 Γενικά στοιχεία.....	3
2.2 Νομοθετικό πλαίσιο.....	4
2.2.1 Οδηγία – Πλαίσιο 2000/60 .....	4
2.2.2 Οδηγία – Πλαίσιο 91/676 .....	5
2.3 Τύχη και μεταφορά $\text{NO}_3^-$ στο υπέδαφος και το υπόγειο νερό.....	8
2.3.1 Ο κύκλος του αζώτου.....	8
2.3.2 Μεταφορά $\text{NO}_3^-$ στο υπόγειο νερό.....	12
2.3.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τη μεταφορά $\text{NO}_3^-$ στο γεωπεριβάλλον .....	13
2.4 Πηγές $\text{NO}_3^-$ .....	15
2.5 Τοξικότητα $\text{NO}_3^-$ .....	17
2.6 Τεχνικές ανίχνευσης $\text{NO}_3^-$ στο υπόγειο νερό .....	19
<b>3 Περιοχή μελέτης</b> .....	20
3.1 Γενικά στοιχεία.....	20
3.1.1 Γεωλογικά και Υδρογεωλογικά στοιχεία .....	24
3.1.2 Κλιματολογικά στοιχεία.....	26
3.1.3 Έδαφος.....	28
3.1.4 Γεωργική δραστηριότητα .....	29
3.1.5 Φυσικό Περιβάλλον.....	29
3.2 Λεκάνη Ασωπού ποταμού.....	30
3.2.1 Γεωλογικά, Υδρολογικά και Μετεωρολογικά στοιχεία .....	30
3.2.2 Κλιματικές συνθήκες.....	31
3.2.3 Φυσικό Περιβάλλον.....	32
3.3 Γεωτρήσεις .....	33



<b>4</b>	<b>Νευρωνικά Δίκτυα</b>	35
4.1	Εισαγωγή	35
4.2	Ιστορική αναδρομή	36
4.3	Βιολογικά Νευρωνικά Δίκτυα	37
4.4	Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα	38
4.4.1	Γενικός τρόπος λειτουργίας τεχνητών νευρωνικών δικτύων	44
4.5	Συναρτήσεις ενεργοποίησης	44
4.6	Εκπαίδευση νευρωνικού δικτύου	47
4.7	Ικανότητα γενίκευσης	49
4.8	Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Νευρωνικών δικτύων	49
4.9	Εφαρμογές ΤΝΔ	51
<b>5</b>	<b>Τα ΤΝΔ στο Matlab</b>	54
5.1	Εισαγωγή στο Matlab	54
5.2	Εργαλειοθήκη του Matlab για τα ΤΝΔ	54
5.3	Βελτιστοποίηση της Ικανότητας Γενίκευσης	57
5.4	Αλγόριθμοι εκπαίδευσης Levenberg – Marquardt και Bayesian Regularization	57
5.5	Δημιουργία TNN	59
<b>6</b>	<b>Ανάπτυξη νευρωνικών δικτύων – Ανάλυση αποτελεσμάτων</b>	62
6.1	1 <sup>ο</sup> Νευρωνικό Δίκτυο	64
6.1.1	Δεδομένα εισόδου	64
6.1.2	Αρχιτεκτονική δικτύου	65
6.1.3	Αποτελέσματα 1 <sup>ου</sup> Νευρωνικού Δικτύου	67
6.2	2 <sup>ο</sup> Νευρωνικό Δίκτυο	71
6.2.1	Δεδομένα εισόδου	71
6.2.2	Αρχιτεκτονική δικτύου	72
6.2.3	Αποτελέσματα 2 <sup>ου</sup> Νευρωνικού Δικτύου	74
6.3	3 <sup>ο</sup> Νευρωνικό δίκτυο	78
6.3.1	Δεδομένα εισόδου	78
6.3.2	Αρχιτεκτονική δικτύου	79
6.3.3	Αποτελέσματα 3 <sup>ου</sup> Νευρωνικού Δικτύου	81
6.4	Σενάρια αλλαγών στο περιβάλλον	86

6.4.1	1° Σενάριο – Κλιματική αλλαγή.....	86
6.4.2	2° Σενάριο – Εκβιομηχάνιση.....	88
6.4.3	3° Σενάριο – Αστικοποίηση.....	89
6.4.4	4° Σενάριο – Αύξηση καλλιεργειών .....	90
<b>7</b>	<b>Συμπεράσματα.....</b>	<b>91</b>
<b>8</b>	<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>94</b>
	Παράρτημα Α.....	103
	Κώδικας ΤΝΔ1.....	103
	Κώδικας ΤΝΔ2.....	106
	Κώδικας ΤΝΔ3.....	110

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2.1: Διάγραμμα συχνότητας των ετήσιων μέσων συγκεντρώσεων νιτρικών ιόντων στα υπόγεια ύδατα σε χώρες τη Ε.Ε. Πηγή: Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2018 .....	4
Εικόνα 2.2: Χάρτης ευπρόσβλητων ζωνών.....	7
Εικόνα 2.3: Ο κύκλος του αζώτου μέσω των διάφορων οξειδοαναγωγικών μεταβολών, κάτω από οξικές (μπλε χρώμα) και ανοξικές (κόκκινο χρώμα) συνθήκες (Gutiérrez et al., 2018).....	11
Εικόνα 2.4: Ποσοστά συνεισφοράς των ανθρωπογενών πηγών στη νιτρορύπανση (Shukla & Saxena, 2018).....	17
Εικόνα 3.1: Περιοχή μελέτης (Google earth).....	20
Εικόνα 3.2: Μορφολογικός Χάρτης και λεκάνες απορροής ΥΔ 7 (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2017) .....	21
Εικόνα 3.3: Κατανομή των χρήσεων γης στο Υδατικό Διαμέρισμα Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2017) .....	22
Εικόνα 3.4: Ετήσιες φορτίσεις νιτρικών από σημειακές πηγές στην περιοχή ενδιαφέροντος (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2017) .....	23
Εικόνα 3.5: Ετήσια επιφανειακά φορτία νιτρικών από διάχυτες πηγές στην περιοχή ενδιαφέροντος (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2017).....	24
Εικόνα 3.6: Γεωτρήσεις περιοχής μελέτης .....	33
Εικόνα 4.1: Μικροσκοπική φωτογραφία φυσικών νευρώνων.....	38
Εικόνα 4.2: Συνάψεις φυσικών νευρώνων .....	38
Εικόνα 4.3: Τυπικός κόμβος νευρωνικού δικτύου .....	40
Εικόνα 4.4: Τυπικό νευρωνικό δίκτυο .....	41
Εικόνα 4.5: ΤΝΔ πρόσθιας τροφοδοσίας δύο κρυφών επιπέδων (Γεωργούλη Α., 2015).....	42
Εικόνα 4.6: Ανατροφοδοτούμενα δίκτυα α)αυτοσυσχετιζόμενης και β)ετεροσυσχετιζόμενης μνήμης (Γεωργούλη Α., 2015) .....	43
Εικόνα 4.7: Διάγραμμα ροής γενικής λειτουργίας ΤΝΔ .....	44
Εικόνα 4.8: Βηματική συνάρτηση (α) και συνάρτηση προσήμου (β) .....	45
Εικόνα 4.9: Γραμμική συνάρτηση ενεργοποίησης .....	46
Εικόνα 4.10: Λογιστική συνάρτηση .....	47
Εικόνα 5.1: Εργαλείο δημιουργίας νευρωνικού δικτύου στο Matlab. ....	60
Εικόνα 5.2: Επιλογή αρχιτεκτονικής του νευρωνικού δικτύου .....	61
Εικόνα 6.1: 1 <sup>ο</sup> Νευρωνικό δίκτυο.....	66
Εικόνα 6.2: Αποτελέσματα εκπαίδευσης ΤΝΔ1- Υπολογισμός δείκτη R.....	67
Εικόνα 6.3: Κύκλοι εκπαίδευσης μέχρι τη σύγκλιση του αλγόριθμου στο ελάχιστο mse (ΤΝΔ1).....	68
Εικόνα 6.4: Απόλυτο σφάλμα μεταξύ πραγματικών και προσομοιωμένων τιμών ΤΝΔ1.....	69
Εικόνα 6.5: Σύγκριση προσομοιωμένων – πραγματικών τιμών 1 <sup>ου</sup> νευρωνικού δικτύου .....	70
Εικόνα 6.6: 2 <sup>ο</sup> Νευρωνικό δίκτυο .....	73
Εικόνα 6.7: Αποτελέσματα εκπαίδευσης ΤΝΔ2 - Υπολογισμός δείκτη R.....	74
Εικόνα 6.8: Κύκλοι εκπαίδευσης μέχρι τη σύγκλιση του αλγόριθμου στο ελάχιστο mse (ΤΝΔ2).....	75
Εικόνα 6.9: Απόλυτο σφάλμα μεταξύ πραγματικών και προσομοιωμένων τιμών ΤΝΔ2.....	76

Εικόνα 6.10: Σύγκριση προσομοιωμένων – πραγματικών τιμών 2 <sup>ου</sup> νευρωνικού δικτύου .....	77
Εικόνα 6.11: 3 <sup>ο</sup> Νευρωνικό δίκτυο .....	80
Εικόνα 6.12: Αποτελέσματα εκπαίδευσης ΤΝΔ3 - Υπολογισμός δείκτη R.....	81
Εικόνα 6.13: Κύκλοι εκπαίδευσης μέχρι τη σύγκλιση του αλγόριθμου στο ελάχιστο mse (ΤΝΔ3) .....	82
Εικόνα 6.14: Απόλυτο σφάλμα μεταξύ πραγματικών και προσομοιωμένων τιμών ΤΝΔ3.....	83
Εικόνα 6.15: Σύγκριση προσομοιωμένων – πραγματικών τιμών 3 <sup>ου</sup> νευρωνικού δικτύου .....	84
Εικόνα 6.16: Πρόβλεψη συγκεντρώσεων NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> - Κλιματική αλλαγή .....	87
Εικόνα 6.17: Πρόβλεψη συγκεντρώσεων NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> - Εκβιομηχάνιση .....	88
Εικόνα 6.18: Πρόβλεψη συγκεντρώσεων NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> - Αστικοποίηση.....	89
Εικόνα 6.19: Πρόβλεψη συγκεντρώσεων NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> - Αύξηση Καλλιεργειών .....	90

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.1. Στοιχεία θερμοκρασίας σταθμού Αλιάρτου.....	27
Πίνακας 3.2. Μετεωρολογικά Στοιχεία ΜΣ Τανάγρας (1958 – 2010). Πηγή: ΕΜΥ .....	32
Πίνακας 3.3. Μέγιστες, ελάχιστες και μέσες τιμές συγκεντρώσεων $\text{NO}_3^-$ .....	34
Πίνακας 6.1. Συντελεστής συσχέτισης μεταβλητών (μετρήσεις πεδίου) .....	65
Πίνακας 6.2. Δείκτες αξιολόγησης $\text{TN}\Delta 1$ .....	70
Πίνακας 6.3. Εκτάσεις χρήσεων γης σε ακτίνα 1000 m από τις γεωτρήσεις .....	72
Πίνακας 6.4. Δείκτες αξιολόγησης $\text{TN}\Delta 2$ .....	77
Πίνακας 6.5. Μέγιστες, ελάχιστες και μέσες τιμές παραμέτρων $\text{TN}\Delta 3$ .....	78
Πίνακας 6.6. Συντελεστής συσχέτισης μεταβλητών (φυσικοχημικές παράμετροι) .....	78
Πίνακας 6.7. Δείκτες αξιολόγησης $\text{TN}\Delta 3$ .....	84
Πίνακας 6.8. Δείκτες αξιολόγησης όλων των $\text{TN}\Delta$ , για το σύνολο των δεδομένων .....	85
Πίνακας 6.9. Δείκτες αξιολόγησης όλων των $\text{TN}\Delta$ , για το σετ δεδομένων επαλήθευσης .....	85
Πίνακας 6.10. Τρέχουσα και εκτιμημένη μέση συγκέντρωση $\text{NO}_3^-$ λόγω κλιματικής αλλαγής ..	87
Πίνακας 6.11. Τρέχουσα και εκτιμημένη μέση συγκέντρωση $\text{NO}_3^-$ λόγω εκβιομηχάνισης .....	88
Πίνακας 6.12. Τρέχουσα και εκτιμημένη μέση συγκέντρωση $\text{NO}_3^-$ λόγω αστικοποίησης .....	89
Πίνακας 6.13. Τρέχουσα και εκτιμημένη μέση συγκέντρωση $\text{NO}_3^-$ λόγω αύξησης των σύνθετων καλλιεργειών .....	90

## 1 Εισαγωγή

Η ραγδαία αύξηση του πληθυσμού και της εκβιομηχάνισης, καθώς και η εντατικοποίηση των γεωργικών δραστηριοτήτων, έχουν οδηγήσει σε σημαντική ποσοτική και ποιοτική υποβάθμιση των υπόγειων υδατικών αποθεμάτων του πλανήτη (Kazakis & Voudouris, 2015). Την ήδη ανησυχητική κατάσταση έρχεται να επιβαρύνει η κλιματική αλλαγή, η οποία θα προκαλέσει μείωση στις βροχοπτώσεις και αύξηση στη μέση επιφανειακή θερμοκρασία, ιδιαίτερα στις περιοχές που ούτως ή άλλως χαρακτηρίζονται από ξηρασία (IPCC, 2014). Τα υπόγεια ύδατα παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευαισθησία σε πιθανή ρύπανση σε σχέση με τα επιφανειακά, λόγω κάποιων ιδιοτεροτήτων, όπως το ότι δε μπορούν να παρατηρηθούν άμεσα, συνεπώς μπορούν να ρυπανθούν χωρίς να γίνει αντιληπτό από το χρήστη ή το ρυπαίνοντα, δεν έχουν ιδιότητες αυτοκαθαρισμού κι εφόσον ρυπανθούν είναι δύσκολο να επιστρέψουν στην αρχική τους κατάσταση. Λόγω της δυσκολίας παρατήρησης τους, η ρύπανση των υπόγειων υδάτων αναπτύσσονταν βαθμιαία για πολλά χρόνια μέχρι να γίνει αντιληπτή.

Μέχρι στιγμής, τα νιτρικά ιόντα κατατάσσονται ανάμεσα στους κυριότερους ρυπαντές που έχουν ανιχνευθεί σε υπόγεια και επιφανειακά ύδατα σε παγκόσμια κλίμακα (Shukla & Saxena, 2018). Οι αυξημένες συγκεντρώσεις των υπόψιν ιόντων στο νερό έχουν συνδεθεί με ποικίλα προβλήματα υγείας στον άνθρωπο και επιφέρουν σοβαρές επιπτώσεις στα οικοσυστήματα (Gutiérrez et al, 2018). Τα νιτρικά ιόντα παράγονται από τη φυσική αποσύνθεση οργανικών αζωτούχων ενώσεων και στο υπόγειο νερό καταλήγουν με την απόθεση τους στο έδαφος ή με την τοποθέτηση αποβλήτων στην υπεδαφική ζώνη. Οι αζωτούχες ενώσεις προέρχονται κατά κύριο λόγο από λιπάσματα και ζωικά περιττώματα, τοποθετώντας τις αγροτικές δραστηριότητες στον κύριο υπεύθυνο για την σοβαρή νιτρορύπανση που έχει παρατηρηθεί (Rivett, 2008; Levy, et al., 2017). Επιπρόσθετα, διάφορες βιομηχανίες που χρησιμοποιούν ενώσεις πλούσιες σε άζωτο, η χρήση οικιακών λυμάτων και η αποστράγγιση αστικών βόθρων αποτελούν επιβαρυντικούς παράγοντες στην υποβάθμιση των υπόγειων υδάτων λόγω παρουσίας  $\text{NO}_3^-$  (Shukla & Saxena, 2018). Αφότου αναγνωρίστηκε η έκταση του προβλήματος της νιτρορύπανσης, καθορίστηκε από τη Διεθνή και Ελληνική νομοθεσία ως οριακή τιμή νιτρικών ιόντων η συγκέντρωση των 50 mg/l για τα νιτρικά ( $\text{NO}_3^-$ ), ή 11 mg/l για το νιτρικό άζωτο ( $\text{NO}_3\text{-N}$ )(WHO, 2011).

Για να διατηρείται η ποιότητα των υπόγειων υδάτων εντός των αποδεκτών - και βιώσιμων - ορίων, αλλά παράλληλα να ικανοποιούνται και οικονομικά ή κοινωνικά οφέλη, απαιτούνται στοχευμένες δράσεις που να διασφαλίζουν την ορθολογική διαχείριση τους. Για την επίτευξη αυτών των στόχων είναι απαραίτητη η κατανόηση της συμπεριφοράς του υπόγειου συστήματος και της διαδικασίας μεταφοράς των  $\text{NO}_3^-$  σε τέτοιο επίπεδο, που να δύναται να προβλεφθεί η ανταπόκριση τους σε διάφορες αλλαγές (αλλαγές στις χρήσεις γης, κλιματική αλλαγή ή προτεινόμενα έργα όπως π.χ. τεχνικές απορρύπανσης). Για το σκοπό αυτόν, αναπτύσσονται κατά κύριο λόγο αριθμητικά μοντέλα, τα οποία επιλύοντας τις βασικές εξισώσεις που περιγράφουν το υπόγειο υδατικό σύστημα και τη μεταφορά μάζας, προσομοιώνουν τις

αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα σε αυτό. Επειδή όμως τα συστήματα των υπόγειων υδροφορέων είναι πολύπλοκα, η περιγραφή τους με μαθηματικές εξισώσεις καθίσταται αρκετά δύσκολη και αναγκαστικά απαιτείται η θεώρηση πολλών παραδοχών και απλοποιήσεων (Govindaraju, 2000a).

Μιας διαφορετικής προσέγγισης μοντέλα, τα οποία μπορούν να παρακάμψουν τη δυσκολία αυτή, είναι τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα. Τα μοντέλα αυτά ακολουθούν μια προσέγγιση μαύρου κουτιού (black box) και έχουν την ικανότητα να συσχετίζουν μεγέθη, των οποίων η σχέση δεν είναι γνωστή ή είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη (Almahallawi, et al., 2011; Ghose et al., 2018). Θεωρούνται ισχυρό εργαλείο για τη μελέτη υδρολογικών και υδραυλικών φαινομένων και έχουν βρει εφαρμογή σε προβλήματα επιφανειακής και υπόγειας υδρολογίας (Govindaraju, 2000b; Tanty & Desmukh, 2015).

### Σκοπός

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων για τη δημιουργία μοντέλων, τα οποία θα λαμβάνουν ως εισόδους εύκολα μετρήσιμες στο πεδίο παραμέτρους και παραμέτρους ποιότητας νερού, για τη γρήγορη και εύκολη εκτίμηση των συγκεντρώσεων των νιτρικών ιόντων στα υπόγεια ύδατα. Για το σκοπό αυτόν συλλέχθηκαν δεδομένα από φυσικοχημικές αναλύσεις νερού που πραγματοποιήθηκαν σε γεωτρήσεις του Ν. Βοιωτίας (Γιαννουλόπουλος, 2008) και επιλέχθηκαν όσα ήταν πλήρη ως προς τις παραμέτρους που εξετάστηκαν ως είσοδοι στα μοντέλα. Οι τιμές των  $\text{NO}_3^-$  των δειγμάτων κυμαίνονταν στο εύρος 5-167 mg/l. Στο 16% των δειγμάτων η συγκέντρωση ήταν άνω των 50 mg/l και στο 30% άνω του επιθυμητού ορίου των 25 mg/l.

Παράλληλα, θα αξιολογηθούν οι παράγοντες που επηρεάζουν τα επίπεδα της νιτρορύπανσης, όπως η αστικοποίηση, η έντονη αγροτική δραστηριότητα, οι κλιματικές συνθήκες και η υδρογεωλογία της εξεταζόμενης περιοχής. Βάσει αυτών, θα μπορούν να εκτιμηθούν οι επιπτώσεις στα επίπεδα των συγκεντρώσεων που θα προκύψουν από τις αλλαγές στους παράγοντες αυτούς, όπως π.χ. η αύξηση της αστικοποίησης ή η κλιματική αλλαγή.

## 2 Νιτρορύπανση

### 2.1 Γενικά στοιχεία

Τα νιτρικά ιόντα αποτελούν τον πιο διαδεδομένο ρυπαντή, τόσο των υπόγειων όσο και των επιφανειακών υδάτων (Spalding & Exner, 1993; Palanaiappan et al., 2010). Παράγονται από τη φυσική αποσύνθεση οργανικών αζωτούχων ενώσεων, οι οποίες προέρχονται κυρίως από λιπάσματα, ζωικά περιττώματα και από ήδη χρησιμοποιημένο νερό σε ανθρώπινη δραστηριότητα (WHO, 2011). Τα νιτρικά ιόντα είναι δείκτες, ειδικά σε περιοχές με έντονη αγροτική δραστηριότητα, για τη ρύπανση των υπόγειων υδροφορέων από λιπάσματα. Τα κυριότερα λιπάσματα που εφαρμόζονται σε περιοχές με καλλιέργειες περιέχουν  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  και μεικτούς τύπους NPK (νιτρικό – φωσφορικό κάλιο). Με την απόθεση των λιπασμάτων στο έδαφος, οι αζωτούχες ενώσεις μετατρέπονται σε ευδιάλυτα νιτρικά ιόντα που αποτελούν την πιο σταθερή μορφή διαλυμένου αζώτου (Λάμπας, 2018). Οι ποσότητες των νιτρικών που δε μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τα φυτά, είτε γιατί οι ποσότητες που εναποτίθενται είναι μεγαλύτερες από αυτές που μπορούν να απορροφήσουν, είτε επειδή δεν βρίσκονται στο κατάλληλο στάδιο ανάπτυξης, παρασύρονται από το διηθούμενο νερό. Με τον τρόπο αυτό καταλήγουν στο υπόγειο νερό, όπου συσσωρεύονται αθροιστικά.

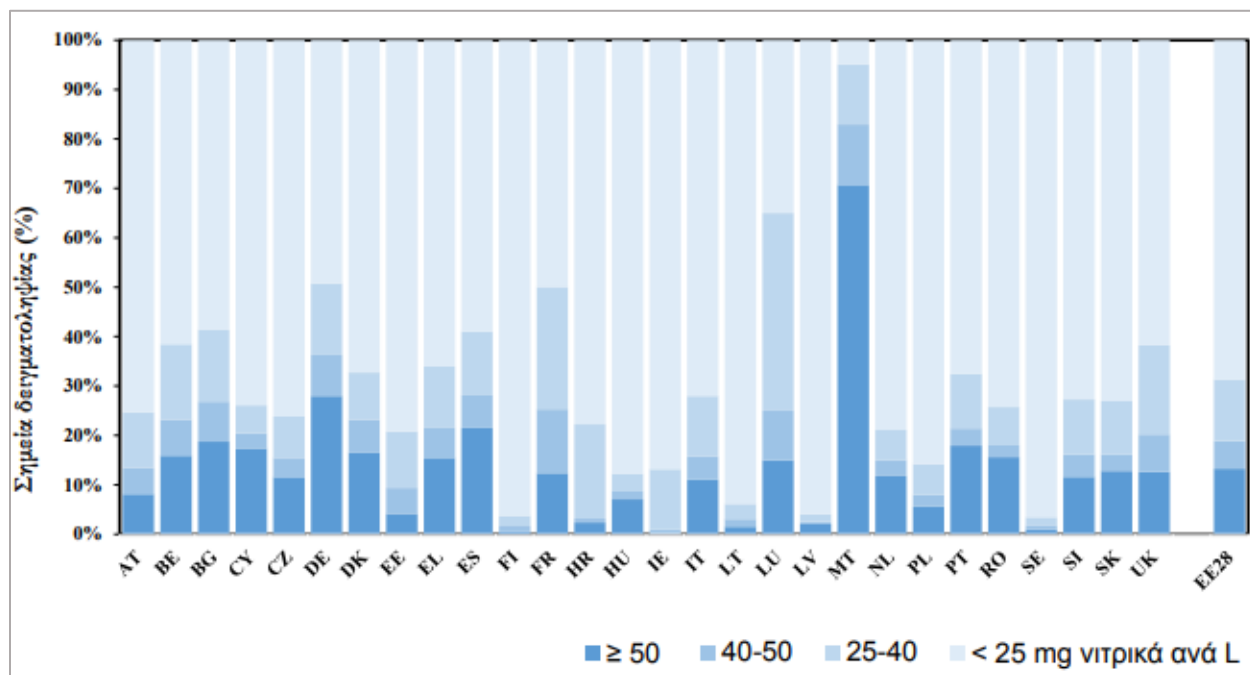
Εκτός από τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες, η περιεκτικότητα των υδροφορέων σε νιτρικά, εξαρτάται και από φυσικούς παράγοντες. Ο τύπος του υδροφορέα (ελεύθερος ή υπό πίεση), οι οξειδοαναγωγικές συνθήκες του εδάφους, οι ιδιότητες του πετρώματος και το πάχος της ακόρεστης ζώνης φαίνεται πως επηρεάζουν σημαντικά την ποσότητα των νιτρικών που καταλήγουν εντέλει στο υπόγειο νερό (Λαμπράκης, 1991; Mclay et al., 2001; Almasri & Kaluarachi, 2007; Λάμπας, 2018).

Ως οριακή τιμή νιτρικών ιόντων έχει καθορισθεί από την Ελληνική και Διεθνή νομοθεσία η συγκέντρωση των 50 mg/l για τα νιτρικά ( $\text{NO}_3^-$ ), ή 11 mg/l για το νιτρικό άζωτο ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) (WHO, 2011). Ωστόσο, το επιθυμητό όριο είναι τα 25 mg/l, καθώς ακόμα και σε μικρότερες συγκεντρώσεις δημιουργείται προβληματισμός για μακροχρόνια χρήση του νερού για πόση (γρεκα, 2018). Σε παγκόσμιο επίπεδο, οι συγκεντρώσεις των νιτρικών στο υπόγειο νερό ξεπερνούν τα όρια που έχουν θεσπιστεί, ενώ υπολογίζεται πως τις τελευταίες τρεις δεκαετίες τα ποσοστά νιτρορύπανσης έχουν αυξηθεί κατά 36%. Στην ανατολική Μεσόγειο και την Αφρική η κατάσταση είναι ακόμα πιο ανησυχητική, αφού τα ποσοστά φαίνεται να έχουν διπλασιαστεί (Shukla & Saxena, 2018). Εκτεταμένη ρύπανση έχει παρατηρηθεί και σε αναπτυσσόμενες χώρες, με ιδιαίτερα τεταμένη την κατάσταση στην Ινδία, όπου υπολογίζεται πως περίπου 108 εκατομμύρια κάτοικοι προμηθεύονται με νερό που περιέχει πάνω από 100 mg/l  $\text{NO}_3^-$  (Shukla & Saxena, 2018). Επίσης, στη λωρίδα της Γάζας το νερό είναι πολύ επιβαρυνμένο, καθώς σε μετρήσεις που έγιναν μεταξύ 2001 και 2007, στο 90% των πηγαδιών βρέθηκαν συγκεντρώσεις νιτρικών μέχρι και 8 φορές υψηλότερες από τις επιτρεπόμενες τιμές (Shomar et al., 2008).

Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζονται οι μέσες συγκεντρώσεις νιτρικών, όπως προέκυψαν από δειγματοληψίες σε χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης την περίοδο 2012-2015. Σε πολλές



περιπτώσεις τα ποσοστά των πηγαδιών που ξεπερνούν το όριο των 50 mg/l ή κυμαίνονται στο εύρος 40-50 mg/l είναι αρκετά υψηλό, με τη Μάλτα να κατατάσσεται στην πιο επιβαρυνμένη χώρα (70% των δειγμάτων ξεπερνούν το όριο). Στην Ελλάδα πάνω από 15% του συνόλου των δειγμάτων ξεπερνούσαν το όριο, ενώ περίπου στο 10%, οι τιμές των συγκεντρώσεων ήταν στο εύρος 40-50 mg/l.



Εικόνα 2.1: Διάγραμμα συχνότητας των ετήσιων μέσων συγκεντρώσεων νιτρικών ιόντων στα υπόγεια ύδατα σε χώρες τη Ε.Ε. Πηγή: Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2018

## 2.2 Νομοθετικό πλαίσιο

### 2.2.1 Οδηγία – Πλαίσιο 2000/60

Λαμβάνοντας υπόψιν τη σοβαρότητα της κατάστασης των υδατικών αποθεμάτων, η οποία είχε γίνει ήδη εμφανής από τη δεκαετία του 1980 και βάσει της οποίας προέκυψε επιτακτική η ανάγκη εφαρμογής βιώσιμων πρακτικών διαχείρισης των υδατικών πόρων, η ΕΕ έχει προχωρήσει στην εφαρμογή κατάλληλων περιβαλλοντικών πολιτικών, μέσω μιας σειράς Οδηγιών που έχουν εκδοθεί τα τελευταία χρόνια. Ένα από τα σημαντικότερα νομοθετικά εργαλεία της ΕΕ αποτελεί η καινοτόμα Οδηγία - Πλαίσιο 2000/60 για τα νερά, που ως στόχο θέτει την προστασία και αειφορική διαχείριση των εσωτερικών, επιφανειακών, μεταβατικών, υπόγειων και παράκτιων υδάτων, με επιδίωξη τη θέσπιση μέτρων και την ανάληψη δράσεων σε επίπεδο λεκάνης απορροής ποταμού. Η Οδηγία – Πλαίσιο παρέχει στις εθνικές και τοπικές αρχές του κάθε κράτους τη νομοθετική βάση για τη διατήρηση της καλής οικολογικής και χημικής κατάστασης των επιφανειακών υδάτων και της καλής χημικής κατάστασης των υπόγειων. Η εν λόγω Οδηγία θεωρείται αρκετά γενική ως προς το περιεχόμενο της, συγκεντρώνει όμως όλες τις

νομοθετικές ρυθμίσεις και διατάξεις των Κοινοτικών Οδηγιών που είναι σχετικές με τη διατήρηση επαρκούς ποσότητας και καλής ποιότητας των υδατικών πόρων.

Σημαντικό σημείο της Οδηγίας αποτελεί το άρθρο 3, στο οποίο αναφέρεται η αναγκαιότητα του καθορισμού των λεκανών απορροής που βρίσκονται στην επικράτεια του κάθε κράτους μέλους. Με την έκδοση του Νόμου 1739 ΦΕΚ 201<sup>Α</sup>/19-20.11.1987, η Ελλάδα έχει χωριστεί σε 14 Υδατικά Διαμερίσματα, βάσει της κατά το δυνατόν μεγαλύτερης υδρομετεωρολογικής και υδρολογικής ομοιογένειας, ενώ έχουν καθοριστεί και οι λεκάνες απορροής ποταμών που ανήκουν στο κάθε ένα από αυτά. Στο άρθρο 10 απαιτείται η συμμόρφωση των κρατών μελών με τα μέγιστα επιτρεπόμενα όρια ρύπων, καθώς και ο μέγιστος κατά το δυνατόν έλεγχος των εισροών από μη σημειακές πηγές ρύπανσης με την υιοθέτηση εναλλακτικών πρακτικών διαχείρισης σε επίπεδο λεκάνης απορροής. Στο πλαίσιο αυτό, γίνεται παραπομπή σε άλλες Οδηγίες, όπως στην Οδηγία για τα νιτρικά (91/676/ΕΟΚ), με πιο εξειδικευμένο περιεχόμενο και αναλυτικότερη έκθεση των, κατά περίπτωση, σχετικών νομοθετικών ρυθμίσεων. Στο πλαίσιο της Οδηγίας επίσης, προτείνεται η κατάρτιση λίστας με τις ουσίες προτεραιότητας, ως προς την ανάγκη αντιμετώπισης των εισροών τους στα υδάτινα σώματα (άρθρο 16). Στο Παράρτημα VIII, ως ουσίες προτεραιότητας χαρακτηρίζονται μεταξύ άλλων τα νιτρικά ιόντα.

### 2.2.2 Οδηγία – Πλαίσιο 91/676

Η Οδηγία 91/676/ΕΟΚ «για την προστασία των υδάτων από τη νιτρορύπανση γεωργικής προέλευσης», εκδόθηκε στις 12 Δεκεμβρίου 1991 και εναρμονίστηκε με την Εθνική Νομοθεσία με την ΚΥΑ 161690/1335/1997.

Στόχο της Οδηγίας αποτελεί η μείωση της ρύπανσης των υδάτων που προκαλείται από τη χρήση νιτρικών γεωργικής προελεύσεως, καθώς και η πρόληψη της νιτρορύπανσης και η αποφυγή της περαιτέρω επιδείνωσης τους, προκειμένου να προστατευθούν η ανθρώπινη υγεία και τα υδάτινα οικοσυστήματα και να εξασφαλισθούν οι χρήσεις νερού.

Για την έκδοση της Οδηγίας των νιτρικών λήφθηκαν υπόψιν α) το γεγονός πως η περιεκτικότητα των υδάτων σε  $\text{NO}_3^-$  σε ορισμένες περιοχές των κρατών μελών αυξάνεται επικίνδυνα, β) ότι η αναγκαία χρήση αζωτούχων λιπασμάτων και κοπριάς αποτελεί σοβαρό περιβαλλοντικό κίνδυνο και μάλιστα είναι η κύρια αιτία ρύπανσης των υδάτων από διάχυτες πηγές και τέλος γ) ότι εξ' αιτίας των υδρογεωλογικών συνθήκων σε ορισμένα κράτη μέλη, τα πιθανά μέτρα αποκατάστασης μπορούν να οδηγήσουν με μεγάλη χρονική καθυστέρηση σε βελτίωση της ποιότητας του νερού.

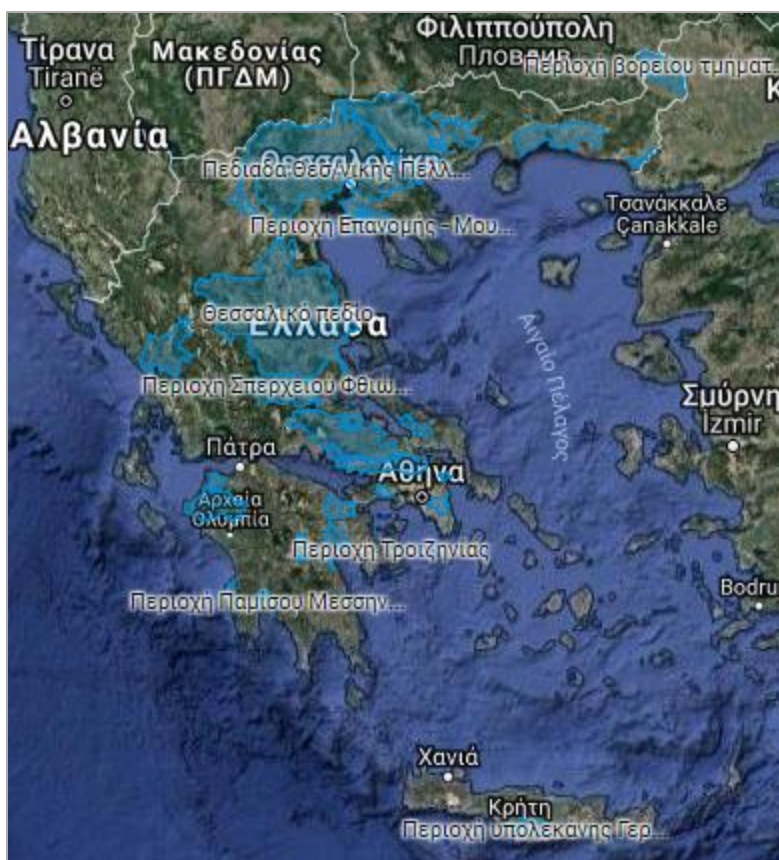
Στο πλαίσιο της Οδηγίας, τα κράτη θα πρέπει να εφαρμόσουν τα ακόλουθα μέτρα:

- παρακολούθηση των υδάτων και καταγραφή της συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων και της τροφικής κατάστασης
- προσδιορισμός των υδάτων που έχουν ρυπανθεί ή διατρέχουν κίνδυνο ρύπανσης
- χαρακτηρισμός ευπρόσβλητων περιοχών

- θέσπιση κωδικών ορθής γεωργικής πρακτικής και κατάρτιση προγραμμάτων δράσης
- επανεξέταση τουλάχιστον ανά τετραετία του χαρακτηρισμού ευπρόσβλητων ζωνών και των προγραμμάτων δράσης

Με την αξιοποίηση των στοιχείων της ποιότητας των επιφανειακών και υπόγειων νερών και σύμφωνα με τα κριτήρια της Οδηγίας 91/676/ΕΟΚ, καθορίστηκαν οι ευπρόσβλητες περιοχές λόγω νιτρορύπανσης γεωργικής προέλευσης με την ΚΥΑ 19652/1906/1999. Στις ζώνες αυτές ανήκουν οι περιοχές του Θεσσαλικού Πεδίου, του Κωπαϊδικού Πεδίου, του Αργολικού Πεδίου και της Λεκάνης του Πηνειού Ηλείας. Το 2001 επικαιροποιήθηκε ο κατάλογος των ευπρόσβλητων περιοχών και συμπληρώθηκε με τις περιοχές της Λεκάνης του Στρυμόνα του Κάμπου της Θεσσαλονίκης, Πέλλας, Ημαθίας και της Πεδιάδας Άρτας-Πρέβεζας με την ΚΥΑ 2041/2522/18-9-2001. Το 2010 στον κατάλογο συμπληρώθηκε και η λεκάνη απορροής του ποταμού Ασωπού Βοιωτίας σύμφωνα με την ΚΥΑ 106253/08.11.10.

Με τις ΚΥΑ 190126/17.04.2013 και ΚΥΑ 147070/02.12.2014, λαμβάνοντας υπόψιν τις προτεινόμενες από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή νέες ευπρόσβλητες ζώνες, την επεξεργασία των αποτελεσμάτων του Εθνικού Δικτύου Παρακολούθησης των επιφανειακών και των υπόγειων υδάτων καθώς και τα προσχέδια των Σχεδίων Διαχείρισης των λεκανών απορροής των Υδατικών Διαμερισμάτων της χώρας, εντάχθηκε στον κατάλογο μεγάλος αριθμός νέων ευπρόσβλητων περιοχών. Στον χάρτη που ακολουθεί εμφανίζονται όλες οι προσδιορισμένες ως ευπρόσβλητες από νιτρορύπανση περιοχές στην Ελλάδα (περιοχές με μπλε σκιαγράφηση) (γρεκα, 2018).



Εικόνα 2.2: Χάρτης ευπρόσβλητων ζωνών

Στο άρθρο 4 της εν λόγω Οδηγίας, όπου προβλέπεται η θέσπιση των Κωδίκων Ορθής Γεωργικής Πρακτικής (Κ.Ο.Γ.Π.) και του προγράμματος υλοποίησης τους, περιλαμβάνεται και η επιμόρφωση και η ενημέρωση τους σχετικά με τα μέτρα μείωσης της διασποράς των αζωτούχων λιπασμάτων στο έδαφος.

Οι κατευθυντήριες γραμμές των Κ.Ο.Γ.Π. είναι οι εξής (γρεκα, 2018):

- αποφυγή εφαρμογής λιπασμάτων σε περιόδους ακατάλληλες για λίπανση,
- αποφυγή ή μείωση λίπανσης σε εδάφη που γειτνιάζουν με υδάτινους αποδέκτες,
- προσεκτική λίπανση σε πλημμυρισμένα ή παγωμένα εδάφη,
- μειωμένη λίπανση σε εδάφη με μεγάλες κλίσεις,
- κατασκευή κατάλληλων αποθηκευτικών χώρων των περιττωμάτων που προέρχονται από κτηνοτροφική δραστηριότητα και διάθεση τους όταν οι απορροές είναι περιορισμένες,
- χρήση κατάλληλων λιπαντικών τεχνικών ως προς το ρυθμό και την ομοιομορφία εφαρμογής λιπάσματος στο έδαφος,
- διατήρηση ενός ελάχιστου ποσοστού φυτοκάλυψης κατά τις βροχερές περιόδους με σκοπό την κατά το δυνατόν μεγαλύτερη δέσμευση του αζώτου από το έδαφος και την αποτροπή της διαφυγής στους υδάτινους αποδέκτες,

- εναλλαγή καλλιεργειών και διατήρηση κατάλληλου ποσοστού συνύπαρξης μόνιμων και ετήσιων καλλιεργειών σε μία περιοχή,
- κατάρτιση σχεδίου λιπαντικής αγωγής σε επίπεδο αγροκτήματος,
- αποτροπή κατείσδυσης νιτρικών κάτω από τη ριζική ζώνη.

Για τις ΕΖ προτείνεται η εφαρμογή επιπλέον κανόνων, που να σχετίζονται με τον τύπο του εδάφους, τις κλιματικές συνθήκες και τις αρδευτικές ποσότητες. Στην Οδηγία αναφέρονται και κάποιοι κανόνες που εκφράζουν ανώτατα όρια πιέσεων που μπορεί να δέχεται μια αγροτική περιοχή (π.χ. μέγιστη επιτρεπόμενη ποσότητα εναπόθεσης N, με διασπορά κοπριάς κτηνοτροφικών ζώων (170 kg/ha/έτος).

Στο πλαίσιο της Οδηγίας, τα κράτη – μέλη πρέπει να εφαρμόζουν τα προαναφερθέντα μέτρα, καθώς επίσης και να παρακολουθούν συστηματικά τις συγκεντρώσεις των  $\text{NO}_3^-$ , σε επιφανειακά και υπόγεια ύδατα, σε επιλεγμένα σημεία δειγματοληψίας. Συγκεκριμένα, στο άρθρο 6 αναφέρεται η συχνότητα παρακολούθησης ή δειγματοληψίας, η οποία στις περιπτώσεις των ΕΖ ορίζεται σε μηνιαία.

### 2.3 Τύχη και μεταφορά $\text{NO}_3^-$ στο υπέδαφος και το υπόγειο νερό

Τα φυσικά επίπεδα των νιτρικών ιόντων στα υπόγεια νερά είναι γενικά αρκετά χαμηλά, χωρίς να υπερβαίνουν τα 10 mg/l. Υψηλότερα επίπεδα από αυτά οφείλονται σε ανθρωπινες δραστηριότητες οι οποίες αυξάνουν την έκλυση αζωτούχων ενώσεων στο περιβάλλον σε επικίνδυνο βαθμό. Η συμπεριφορά και η μεταφορά στο γεωπεριβάλλον των ενώσεων του αζώτου και των νιτρικών ιόντων, καθορίζονται από ιδιαίτερα πολύπλοκες διεργασίες και είναι σε άμεση εξάρτηση με τις συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον, το κλίμα, τις χρήσεις γης και τα χαρακτηριστικά του υπεδάφους.

Στα επόμενα κεφάλαια γίνεται μια προσπάθεια καταγραφής των πηγών των νιτρικών ιόντων στο περιβάλλον, των διεργασιών που καθορίζουν την τύχη τους και όλων των παραγόντων που συντελούν στην αύξηση των συγκεντρώσεων τους και στην μεταφορά τους προς τα υπόγεια νερά.

#### 2.3.1 Ο κύκλος του αζώτου

Το άζωτο συμμετέχει ως χημικό συστατικό σε μεγάλο αριθμό βιομορίων, πολύ σημαντικών για τη διατήρηση της ζωής, όπως πρωτεΐνες, νουκλεϊκά οξέα και κάποια συνένζυμα. Είναι το πιο άφθονο συστατικό της ατμόσφαιρας, καταλαμβάνοντας περίπου το 80% της σύστασης της (Alahi et al., 2018). Ο όρος 'κύκλος του αζώτου' χρησιμοποιείται για να περιγράψει την κυκλική βιογεωχημική μεταβολή του αζώτου και των ενώσεων του στο έδαφος, το νερό και την ατμόσφαιρα. Η κυκλική μετατροπή των ανόργανων ενώσεων του αζώτου, δηλαδή του μοριακού αζώτου ( $\text{N}_2$ ), της αμμωνίας ( $\text{NH}_3$ ), και των νιτρικών και νιτρωδών αλάτων ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ), διακρίνεται σε πέντε χαρακτηριστικά είδη οξειδοαναγωγικών μεταβολών. Την αζωτοδέσμευση, τη νιτροποίηση, την απονιτροποίηση, την αμμωνιοποίηση και την εξάχνωση (Gutiérrez et al.,

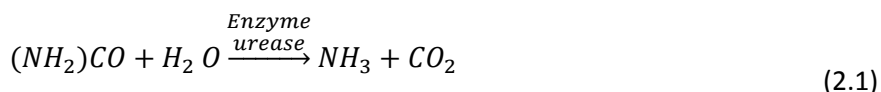
2018). Κάθε μία από αυτές τις μεταβολές υποβοηθείται από ένα πλήθος διαφορετικών μικροοργανισμών.

Η διαταραχή του κύκλου του αζώτου, κυρίως λόγω ανθρώπινων δραστηριοτήτων, έχει ως αποτέλεσμα ποικίλα και πολυδιάστατα προβλήματα στο περιβάλλον. Η έκλυση αμμωνίας στην ατμόσφαιρα οδηγεί σε όξινη βροχή, η παρουσία νιτρικών ιόντων στο νερό ύδρευσης είναι υπεύθυνη για πληθώρα προβλημάτων υγείας στον άνθρωπο, ενώ στα ποτάμια και στις λίμνες προκαλεί ευτροφισμό. Τέλος, η έκλυση υποξειδίου του αζώτου ( $N_2O$ ) στην ατμόσφαιρα συντελεί στη μείωση του όζοντος και κατ' επέκταση στην πρόκληση κλιματικών αλλαγών. Θεωρείται πως το  $N$  δύναται να προκαλέσει 21 φορές περισσότερη θέρμανση σε σχέση με το  $CO_2$  (Οδηγία 91/676/ΕΟΚ).

Στο έδαφος, σε βάθος 15 cm, το άζωτο συνήθως βρίσκεται σε ποσοστό περίπου 0.1% και 0.6% (Cameron et al., 2013). Η ποσότητα του αζώτου που θα είναι διαθέσιμο και θα μεταφερθεί στο υπέδαφος, όπου είτε θα προσληφθεί από το ριζικό σύστημα των φυτών, είτε θα κινηθεί κάθετα προς τον υπόγειο υδροφόρο, εξαρτάται από τις μεταβολές στις οποίες θα υποβληθεί στο σύστημα έδαφος - φυτά. Η ποσότητα που θα στραγγιστεί προς τον υδροφόρο ορίζοντα είναι ανάλογη της ποσότητας του νερού που διηθείται, της σύστασης του εδάφους και των οξειδοαναγωγικών διαδικασιών που θα λάβουν χώρα. Οι μεταβολές αυτές, καθώς και οι παράμετροι που τις επηρεάζουν, περιγράφονται ακολούθως.

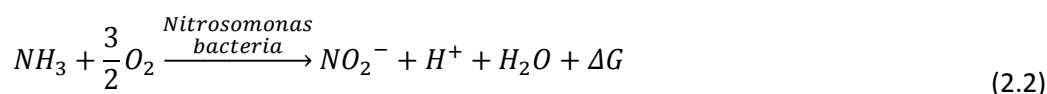
Η **αζωτοδέσμευση** (fixation) είναι η διαδικασία μετατροπής του μοριακού αζώτου σε αμμωνία και διακρίνεται σε ατμοσφαιρική και βιολογική. Στην ατμοσφαιρική αζωτοδέσμευση το μοριακό άζωτο, κατόπιν ηλεκτρικής εκκένωσης, αντιδρά είτε με υδρατμούς σχηματίζοντας αμμωνία, είτε με ατμοσφαιρικό οξυγόνο σχηματίζοντας νιτρικά ιόντα. Έπειτα, τα παράγωγα αυτά καταλήγουν στο έδαφος μέσω της κατακρήμνισης. Κατά τη βιολογική δέσμευση αζώτου, αζωτοδεσμευτικοί οργανισμοί που διαθέτουν το ενζυμικό σύστημα της νιτρογενάσης, μετατρέπουν το ατμοσφαιρικό άζωτο σε νιτρικά ιόντα. Η βιολογική αζωτοδέσμευση είναι υπεύθυνη για το 90% της συνολικής αζωτοδέσμευσης, ενώ η ατμοσφαιρική για το 10%. Σήμερα, η δέσμευση του αζώτου μπορεί να λάβει χώρα και μέσω της σύνθεσης αμμωνίας από  $H_2$  και  $N_2$  σε διάφορες βιομηχανικές δραστηριότητες (Ψαροπούλου, 2010).

Η **αμμωνιοποίηση** (ammonification) αναφέρεται στη μετατροπή του οργανικού αζώτου σε ανόργανη ένωση του. Παράδειγμα αμμωνιοποίησης είναι η υδρόλυση, κατά την οποία η ουρία μετατρέπεται σε αμμωνία ( $NH_3$ ).



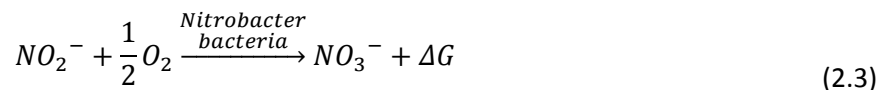
Η αμμωνιοποίηση πραγματοποιείται τόσο σε ανοξικές συνθήκες όσο και παρουσία οξυγόνου (Cameron et al., 2013).

Η **νιτροποίηση** (nitrification) είναι η διαδικασία βιολογικής οξείδωσης των αμμωνιακών ιόντων, όπου παράγονται νιτρικά άλατα. Η μετατροπή ολοκληρώνεται σε δύο στάδια, με τη συμβολή χημειοαυτότροφων βακτηρίων (Ψαροπούλου, 2010). Στο πρώτο στάδιο η αμμωνία οξειδώνεται σε νιτρώδη άλατα σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:



Όπου  $\Delta G = -271$  KJ/mole  $NH_3$

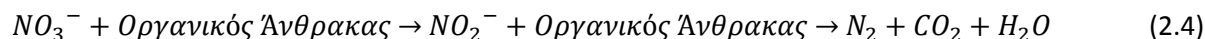
Στο δεύτερο στάδιο τα νιτρώδη ιόντα οξειδώνονται σε νιτρικά, σύμφωνα με την εξίσωση:



Όπου  $\Delta G = -78$  KJ/mole  $NO_2$

Οι δύο διαδικασίες προχωρούν γρήγορα και σχεδόν ταυτόχρονα. Για το λόγο αυτόν, οι συγκεντρώσεις των νιτρικών ιόντων είναι σταθερά μεγαλύτερες από αυτές των νιτρώδων. Ένας ακόμα παράγοντας που συντελεί σε αυτό, είναι η αναγωγή των νιτρώδων ιόντων σε αμμωνία σε συνθήκες έλλειψης οξυγόνου. Τα νιτρικά ιόντα που παράγονται είναι πολύ σταθερά και συνεπώς παραμένουν στον υδροφόρα για μεγάλα χρονικά διαστήματα (Gutiérrez et al., 2018). Ο ρυθμός της νιτροποίησης είναι συνάρτηση της υγρασίας του εδάφους, του pH, της θερμοκρασίας και της ύπαρξης άλλων θρεπτικών. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι το βέλτιστο pH κυμαίνεται μεταξύ 4.5 και 7.7 και η βέλτιστη θερμοκρασία μεταξύ 25 °C και 30 °C (Haynes et al., 1986). Επιπλέον, ο ρυθμός της νιτροποίησης επηρεάζεται από την ύπαρξη φωσφόρου, βαρέων μετάλλων και φυτοφαρμάκων (Purchase, 1974; Ruyters et al., 2010; Muñoz-Leoz et al., 2011; Griffiths & Philippot, 2012; Thavamani et al., 2012; Cameron et al., 2013).

Η **απονιτροποίηση** (denitrification) πραγματοποιείται μέσω ετερότροφων βακτηρίων που απαιτούν οργανικό άνθρακα για την παραγωγή ενέργειας, τα οποία ανάγουν τα νιτρικά ιόντα σε νιτρώδη και στη συνέχεια τα νιτρώδη σε αέριο άζωτο. Η διαδικασία περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση:

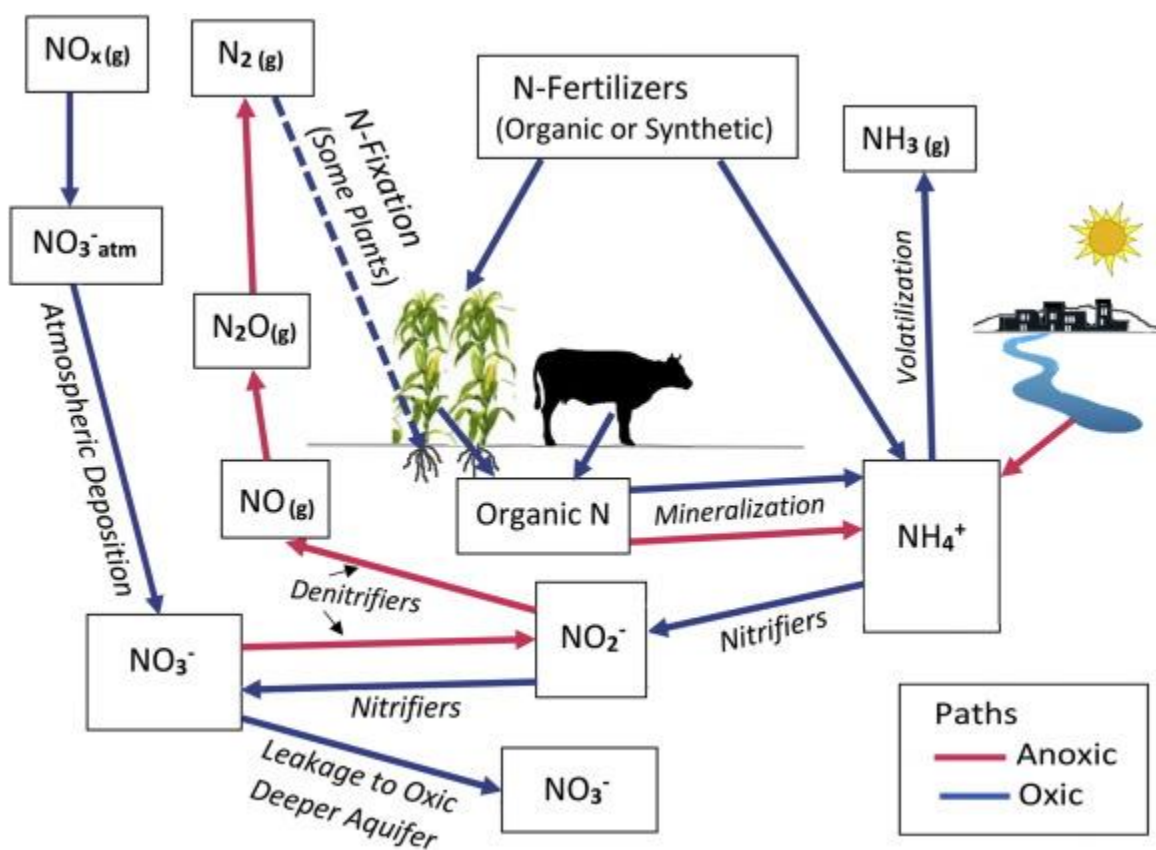




Η διαδικασία αυτή λειτουργεί ως φυσική αποκατάσταση καθώς συμβάλει στη μείωση των νιτρικών ιόντων. Για την ολοκλήρωση της απαιτείται συγκέντρωση οξυγόνου μικρότερη των 1-2 mg/l, ενώ ευνοϊκές συνθήκες θεωρούνται το θερμοκρασιακό εύρος 25-35 °C και οι τιμές pH μεταξύ 5.5 και 8.0 (Rivett et al., 2008; Gutiérrez et al., 2018). Στους υδροφορείς μεγάλου βάθους η θερμοκρασία του νερού είναι περίπου 10 °C, όπου ο ρυθμός απονιτροποίησης είναι αρκετά χαμηλός (Rivett et al., 2008).

Η **εξάχνωση** (volatilization) αναφέρεται στην απευθείας μετατροπή του αμμωνίου ( $\text{NH}_4^+$ ) σε αέρια αμμωνία ( $\text{NH}_3$ ), είτε αμέσως μετά την εφαρμογή λιπάσματος στο έδαφος, είτε αργότερα, κατά την αμμωνιοποίηση του οργανικού азώτου. Η εξάχνωση ευνοείται σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας εδάφους και υψηλού pH (Gutiérrez et al., 2018).

Η συνολική διαδικασία μετατροπής του азώτου, μέσω των διαδρομών που ακολουθούν οι ενώσεις του, αποτυπώνεται σχηματικά στην εικόνα 2.3.



Εικόνα 2.3: Ο κύκλος του азώτου μέσω των διάφορων οξειδοαναγωγικών μεταβολών, κάτω από οξικές (μπλε χρώμα) και ανοξικές (κόκκινο χρώμα) συνθήκες (Gutiérrez et al., 2018)



### 2.3.2 Μεταφορά $\text{NO}_3^-$ στο υπόγειο νερό

Η περίσσεια των νιτρικών ιόντων που δε θα υποστούν αναγωγή, θα συμπαρασυρθούν από το κατακρημνιζόμενο νερό -είτε πρόκειται για νερό βροχόπτωσης, είτε για νερό άρδευσης- που κινείται κάθετα προς τα γεωλογικά στρώματα. Από κει, εξ' αιτίας του αρνητικού φορτίου των περισσότερων εδαφών, δε συγκρατούνται εύκολα στους πόρους τους και συνεπώς κινούνται εύκολα προς τον υδροφόρο ορίζοντα (Lehmann & Schroth, 2003). Η ποσότητα των νιτρικών που θα καταλήξει στο υπόγειο νερό είναι ευθέως ανάλογη της ποσότητας του νερού που διηθείται και εξαρτάται από τη διηθητικότητα του εδάφους, το τύπο και τη σύσταση του και από το πάχος της ακόρεστης ζώνης. Η κίνηση που θα ακολουθήσουν τα νιτρικά μπορεί να περιγραφεί από τις εξισώσεις τριών κύριων μηχανισμών μεταφοράς μάζας, της συναγωγής, της μοριακής διάχυσης και της μηχανικής διασποράς (Δερματάς, 2009).

**Συναγωγή:** Η συναγωγή αφορά τη μεταφορά της μάζας μαζί με τη ροή του νερού. Η ποσότητα της μάζας που μεταφέρεται λόγω συναγωγής είναι συνάρτηση της συγκέντρωσης του ρύπου στο υπόγειο νερό και της γραμμικής ταχύτητας της ροής. Η εξίσωση που περιγράφει την κίνηση είναι τροποποίηση του νόμου του Darcy.

$$J_c = qc = -c(K \frac{dH}{dx}) \quad (2.5)$$

Όπου J είναι η ροή μάζας ανά μονάδα επιφάνειας (παροχή μάζας), C είναι η συγκέντρωση των νιτρικών, K η υδραυλική αγωγιμότητα και  $\frac{dH}{dx}$  η υδραυλική κλίση.

**Διάχυση:** Η μοριακή διάχυση αφορά το φαινόμενο μεταφοράς μάζας το οποίο οφείλεται στην κινητική ενέργεια των μορίων, δηλαδή στην κίνηση Brown. Η κίνηση λόγω μοριακής διάχυσης περιγράφεται από το νόμο του Fick:

$$J_d = -D_s \frac{dC}{dx} \quad (2.6)$$

Όπου J παροχή μάζας, D είναι ο συντελεστής μοριακής διάχυσης, και C είναι η συγκέντρωση του διαλυμένου στο νερό ρύπου.

Λόγω της διάχυσης, είναι δυνατή η εξάπλωση ενός ρύπου σε ένα πορώδες μέσο, ακόμη και στην περίπτωση που δεν υπάρχει ροή υπογείου ύδατος. Η διάχυση λαμβάνει χώρα σε πολύ βραδύτερους ρυθμούς σε σύγκριση με τη συναγωγή και τη διασπορά. Όμως, σε εδάφη με πολύ χαμηλή υδραυλική αγωγιμότητα, όπως τα αργιλικά στρώματα, η διάχυση είναι ο κύριος μηχανισμός μεταφοράς μάζας νιτρικών.

**Μηχανική διασπορά:** Είναι μία διεργασία αναμίξεως η οποία οφείλεται στους εξής τρεις μηχανισμούς: α) η ταχύτητα του ρευστού δεν είναι ενιαία στη διατομή των πόρων (η ταχύτητα

στο μέσον του πόρου είναι μεγαλύτερη από αυτήν κοντά στα τοιχώματα), β) μερικά τμήματα του ρευστού διανύουν μεγαλύτερη απόσταση σε μερικές γραμμές ροής από ότι άλλα τμήματα σε άλλες γραμμές ροής, για να καλύψουν την ίδια ευθεία απόσταση, εξ' αιτίας της πολυπλοκότητας του πορώδους μέσου (tortuosity), γ) μερικοί πόροι έχουν μεγαλύτερη διάμετρο από άλλους, με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται διαφορετικές ταχύτητες στο μέσο (Δερματάς, Δ., 2009).

Η ενιαία εξίσωση που περιγράφει τη μεταφορά των νιτρικών στο υπόγειο νερό μέσω των τριών μηχανισμών είναι η εξής:

$$\frac{\theta C}{\theta t} = D_{\alpha} \frac{\theta^2 C}{\theta x^2} - U \frac{\theta C}{\theta x} \quad (2.7)$$

όπου  $D_{\alpha}$  είναι ο συντελεστής υδροδυναμικής διασποράς (συνδυασμός μοριακής διάχυσης και μηχανικής διασποράς) (Cameron et al., 2013).

### 2.3.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τη μεταφορά $\text{NO}_3^-$ στο γεωπεριβάλλον

Η ποσότητα των νιτρικών που θα εκπλυθεί εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του υπεδάφους και του υπόγειου υδροφορέα και από άλλους παράγοντες που σχετίζονται άμεσα με το κλίμα και τις χρήσεις γης.

#### Έδαφος

Τα χαρακτηριστικά του εδάφους επηρεάζουν τη κίνηση του νερού το οποίο μεταφέρει τα νιτρικά, ενώ παράλληλα μπορεί να δημιουργήσει τις αναγκαίες συνθήκες για την απονιτροποίηση, που είναι ο κύριος μηχανισμός μετατροπής που λαμβάνει χώρα κάτω από το υπέδαφος. Τα βακτήρια που είναι υπεύθυνα για την απονιτροποίηση βρίσκονται εκτός από το υπέδαφος και σε μεγάλα βάθη στους υδροφορείς. Έχουν εντοπιστεί σε αργιλώδεις άμμους σε βάθος έως 289 m (Francis et al., 1989), σε ασβεστολιθικά εδάφη σε 185 m (Morris et al., 1988), ενώ σε γρανίτη σε βάθος 450 m (Neilsen et al., 2006). Η απονιτροποίηση ευνοείται σε συνθήκες χαμηλού δυναμικού οξειδοαναγωγής και σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις οξυγόνου. Σε φρεάτιους υδροφορείς με πολύ υδροπερατά ιζήματα ή ρηγματωμένα πετρώματα, η παρουσία του διαλυμένου  $\text{O}_2$  είναι πολύ σημαντική, οπότε δεν ευνοείται η διαδικασία της απονιτροποίησης. Στους πόρους των αμμωδών εδαφών υπάρχουν μεγαλύτερα ποσά αέρα, οπότε δεν αναπτύσσονται αναερόβιες ζώνες. Αντιθέτως, σε αργιλικά και ιλυώδη εδάφη, δημιουργούνται ανοξικές συνθήκες που οδηγούν σε απονιτροποίηση.

Επιπρόσθετα, η έκπλυση παίζει σημαντικότερο ρόλο στα αμμώδη απ' ότι στα αργιλικά εδάφη (Ψαροπούλου, 2010). Χαρακτηριστικό είναι πως οι Pratt et al. (1980) υπολόγισαν πως ο ρυθμός έκπλυσης νιτρικών είναι πέντε φορές μεγαλύτερος σε ιλυοπηλώδες, απ' ότι σε αργιλοπηλώδες έδαφος. Επιπλέον, άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν τη μεταφορά των νιτρικών είναι το ριζικό σύστημα των φυτών, οι γαιοσκώληκες, και η διαβροχή και απότομη ξήρανση του εδάφους. Οι

παράγοντες αυτοί μπορούν να δημιουργήσουν πόρους μεγάλης διαμέτρου, διαμέσου των οποίων η κίνηση του νερού διευκολύνεται (Silva et al., 1999).

### Κλίμα

Το κλίμα παίζει κυρίαρχο ρόλο στον κύκλο του αζώτου στο περιβάλλον, καθώς οι βροχοπτώσεις και η θερμοκρασία επηρεάζουν άμεσα την ανάπτυξη των φυτών, την πρόσληψη του αζώτου και τη διήθηση του νερού. Έχει παρατηρηθεί ότι κατά τη διάρκεια του χειμώνα και νωρίς την άνοιξη, οι ποσότητες των νιτρικών που καταλήγουν στο υπέδαφος είναι μεγαλύτερες καθώς η πρόσληψη των νιτρικών από τα φυτά είναι χαμηλή. Επιπρόσθετα, ο ρυθμός των βροχοπτώσεων που σημειώνονται αυτή την περίοδο είναι εντονότερος από αυτόν της εξατμισοδιαπνοής, με αποτέλεσμα τη διαφυγή μεγάλων ποσοτήτων νερού προς τον υδροφόρο ορίζοντα, οι οποίες παρασύρουν τα νιτρικά που βρίσκονται στο έδαφος και το υπέδαφος. Επιπλέον, σε ξηρά καλοκαίρια παρατηρείται συσσώρευση νιτρικών στο έδαφος, λόγω της χαμηλής ανάπτυξης φυτών και της συνεπακόλουθης μειωμένης πρόσληψης νιτρικών (Cameron et al., 2013). Στο χειμώνα που θα ακολουθήσει, οι ποσότητες που θα κινηθούν προς το υπόγειο νερό, θα είναι αυξημένες. Τέλος, η εποχή που θα χρησιμοποιηθούν τα λιπάσματα, παίζει σημαντικό ρόλο στην ποσότητα των νιτρικών που θα είναι διαθέσιμα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως η εφαρμογή λιπάσματος είναι πιο αποτελεσματική την άνοιξη, σε σχέση με το φθινόπωρο (Jenkinson, 2001), ενώ είναι και πιθανότερη η περίπτωση βροχόπτωσης σε σύντομο χρονικό διάστημα μετά την εφαρμογή, όπου θα υπάρξει μεγαλύτερη διαφυγή νιτρικών στο περιβάλλον.

### Εφαρμογή λιπάσματος

Ο τρόπος, η ποσότητα και ο χρόνος εφαρμογής των λιπασμάτων καθορίζουν σε σημαντικό βαθμό την ποσότητα των νιτρικών που θα παραμείνουν στο έδαφος. Η χρήση των λιπασμάτων γίνεται χωρίς προγραμματισμό, με αποτέλεσμα τη διαφυγή ιδιαίτερα αυξημένων συγκεντρώσεων  $\text{NO}_3^-$ . Για παράδειγμα, σε δείγματα από 800 καλλιέργειες δημητριακών έχειδειχθεί πως μόνο το 51% του λιπάσματος που εφαρμόζεται, ανακτάται από τα φυτά (Chien et al., 2009), ενώ σε περιοχές με κτηνοτροφική δραστηριότητα, η ανάκτηση του αζώτου είναι κατά μέσο όρο 25 – 30% χαμηλότερη από αυτή σε καλλιεργούμενες εκτάσεις (Goulding et al., 2008; Cameron et al., 2013). Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός πως, όταν η λίπανση στο έδαφος ξεπεράσει μια βέλτιστη τιμή, που σχετίζεται με τις απαιτήσεις της καλλιέργειας, παρατηρείται μεγάλη αύξηση της ποσότητας των νιτρικών που εκπλύεται στο περιβάλλον (Goulding et al., 2008). Επιπλέον, ο τρόπος εφαρμογής των λιπασμάτων επηρεάζει τις απώλειες νιτρικών. Τα λιπάσματα θα πρέπει να κατανέμονται ομοιόμορφα στην εκάστοτε καλλιέργεια, με στόχο τη μικρότερη απώλεια νιτρικών προς το περιβάλλον. Τέλος, η διαδικασία της λίπανσης θα πρέπει να πραγματοποιείται την εποχή που το εκάστοτε φυτό βρίσκεται στο κατάλληλο στάδιο της ανάπτυξης του, ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη πρόσληψη αζώτου (Cameron et al., 2013).

### Χρήσεις γης

Ο τρόπος με τον οποίο σχετίζονται οι χρήσεις γης με τις απώλειες νιτρικών προς το υπέδαφος, είναι δύσκολο να προσδιοριστεί. Εντούτοις, από τη βιβλιογραφία προκύπτει η ακόλουθη κατάταξη, σύμφωνα με το βαθμό συμβολής τους (Cameron et al., 2013):

Δάση< χαμηλής βλάστησης λιβάδια< βοσκότοποι< αροτραίες καλλιέργειες< όργανα βοσκότοπων< κηπευτικές καλλιέργειες

Σε δασικές εκτάσεις γενικώς δεν παρατηρούνται αυξημένες συγκεντρώσεις νιτρικών, καθώς δεν γίνεται χρήση λιπασμάτων, ενώ η πρόσληψη του αζώτου είναι μεγάλη λόγω της πυκνής φυτοκάλυψης. Ωστόσο, η κατάσταση αλλάζει σε περίπτωση αποψίλωσης ή πυρκαγιάς, όπου παρατηρείται μεγάλη έκλυση αζώτου.

Σε λιβάδια, η διαρροή νιτρικών είναι αρκετά χαμηλή. Σε περίπτωση όμως που χρησιμοποιούνται ως βοσκότοποι, παρατηρείται μεγάλη αύξηση των νιτρικών, ιδιαίτερα αν πρόκειται για βόσκηση αγελάδων (Di & Cameron, 2002a).

Οι απώλειες νιτρικών από καλλιέργειες κηπευτικών θεωρούνται μεγαλύτερες από αυτές των αροτραίων και από αυτές στους βοσκοτόπους, λόγω της εντατικής χρήσης λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων και εξ' αίτιας του ρηχού ριζικού συστήματος των κηπευτικών. Σημαντικές απώλειες σημειώνονται σε βοσκοτόπους που μετά τη χρήση τους για λίγα χρόνια, οργώνονται. Μελέτες που διεξήχθησαν στην Αγγλία, κατέληξαν στο συμπέρασμα πως το όργανο των βοσκοτόπων ήταν υπεύθυνο για την απελευθέρωση των μέγιστων συγκεντρώσεων νιτρικών στους υπόγειους υδροφορείς (Young et al., 1976; Cameron et al., 2013).

Οι εντατικές καλλιέργειες φυτοκομικών προϊόντων, που χαρακτηρίζονται από υψηλές απαιτήσεις λιπάσματος, συχνή καλλιέργεια, χαμηλό ριζικό σύστημα, χαμηλή απόδοση των θρεπτικών και σύντομη περίοδο ανάπτυξης των φυτών, συμβάλλουν πιθανότατα κατά το μεγαλύτερο ποσοστό στη διαρροή ποσοτήτων νιτρικών ιόντων (Cameron et al., 2013).

## 2.4 Πηγές $\text{NO}_3^-$

Οι πηγές των νιτρικών ιόντων στο περιβάλλον μπορούν να διακριθούν σε φυσικές, αν προέρχονται από οποιαδήποτε φυσική διεργασία και σε ανθρωπογενείς, όπου προέρχονται από βιομηχανικές, αγροτικές ή αστικές δραστηριότητες. Επίσης, οι πηγές ρύπανσης των υπόγειων υδροφορέων διαχωρίζονται σε σημειακές και μη σημειακές. Στην κατηγορία των σημειακών πηγών εντάσσονται οι χώροι ανεξέλεγκτης ταφής απορριμμάτων, οι σταθμοί επεξεργασίας λυμάτων, οι βιομηχανίες, οι κτηνοτροφικές μονάδες, τα αστικά λύματα κλπ. Οι μη σημειακές πηγές προέρχονται κυρίως από τη γεωργία και είναι πιο δύσκολο να αντιμετωπιστούν οι επιπτώσεις τους (Δερματάς, 2009), καθώς παρατηρούνται μεγάλες χωροχρονικές μεταβολές στη συγκέντρωση του ρύπου, σε όλη την έκταση του υδροφορέα. Σε διάφορες μελέτες έχουν καταγραφεί μεταβολές στις συγκεντρώσεις των νιτρικών, μέσα στον ίδιο υδροφορέα (Brindha and Elango, 2014; Zhang et al., 2014; Re et al., 2017). Από την άλλη μεριά, στις σημειακές πηγές μπορεί να εισάγεται άζωτο σε μεγάλο βάθος, κάτω από το ριζικό σύστημα. Συνεπώς δε γίνεται πρόσληψη από τα φυτά και η νιτροποίηση πραγματοποιείται σε μεγάλους ρυθμούς, λόγω της παρουσίας αυτότροφων βακτηρίων και της μεγάλης συγκέντρωσης οξυγόνου.

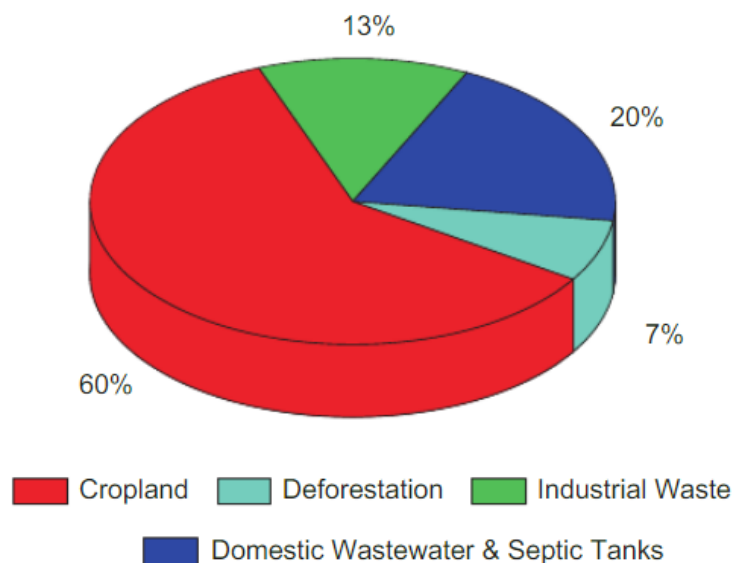
Στις φυσικές πηγές νιτρορύπανσης περιλαμβάνονται η συμβίωση κάποιων κυανοβακτηρίων και κάποιων ετερότροφων με συγκεκριμένα φυτά, όπου παρατηρείται αυξημένη παραγωγή

νιτρικών, και η ατμοσφαιρική (υγρή) εναπόθεση (Vitousek et al., 2002; Gutiérrez et al., 2018). Η υγρή εναπόθεση είναι αποτέλεσμα της ατμοσφαιρικής αζωτοδέσμευσης.

Όσον αφορά στις ανθρωπογενείς πηγές, η εκτεταμένη ρύπανση που έχει προκληθεί από τις εντατικοποιημένες αγροτικές δραστηριότητες αποτελεί την κυριότερη πηγή νιτρορύπανσης των υπόγειων υδάτων. Η ρύπανση από τις αγροτικές δραστηριότητες προέρχεται από τα ζωικά λύματα και από την εφαρμογή αζωτούχων λιπασμάτων. Καθώς το άζωτο είναι απαραίτητο θρεπτικό συστατικό για τις καλλιέργειες, γίνεται αλόγιστη χρήση αζωτούχων λιπασμάτων, οργανικών και συνθετικών, με στόχο την αύξηση της παραγωγικότητας. Η απρογραμματιστή χρήση των αζωτούχων λιπασμάτων, χωρίς να λαμβάνονται υπόψιν οι απαιτήσεις των φυτών, το στάδιο ανάπτυξης τους, η σύσταση του εδάφους και οι αρδευτικές δραστηριότητες, οδηγούν σε περίσσεια νιτρικών, τα οποία είναι αδύνατον να ανακτηθούν και καταλήγουν στο υπόγειο νερό μέσω της διήθησης. Χαρακτηριστικό είναι πως ο τομέας της γεωργίας θεωρείται υπεύθυνος για το 50-80% της επιβάρυνσης των υδάτινων πόρων από  $\text{NO}_3^-$ .

Στις αστικές πηγές περιλαμβάνονται οι σηπτικές δεξαμενές, οι διαρροές αστικών λυμάτων και η εφαρμογή λιπασμάτων σε κήπους. Η αποστράγγιση των αστικών βόθρων μπορεί να συνεισφέρει σημαντικές ποσότητες αζώτου στο υπόγειο νερό, καθώς τα οικιακά λύματα περιέχουν συγκεντρώσεις αζώτου 20-85 mg/l. Οι Wakida and Lerner, 2005 υπολόγισαν πως για τη ρύπανση στο υπόγειο νερό του Νότινγχαμ, οι διαρροές των αποχετευτικών συστημάτων ευθύνονται για το 37%, ενώ η έκπλυση από ρυπασμένες περιοχές (αστικές καλλιεργούμενες εκτάσεις και χημικές διαρροές) συνεισφέρει σε ποσοστό 38%. Άλλες αστικές πηγές ρύπανσης, μη σημειακές, θεωρούνται οι κινητήρες εσωτερικής καύσης και η εφαρμογή ιλύος στα χωράφια, η οποία έχει προέλθει από αστικά ή βιομηχανικά λύματα. Τέλος, σημαντική πηγή ρύπανσης από νιτρικά θεωρούνται και τα νεκροταφεία.

Στην εικόνα 2.3 παρουσιάζονται συνοπτικά τα ποσοστά συνεισφοράς στη νιτρορύπανση των υπόγειων υδάτων, των ανθρωπογενών πηγών.



Εικόνα 2.4: Ποσοστά συνεισφοράς των ανθρωπογενών πηγών στη νιτρορύπανση (Shukla & Saxena, 2018)

## 2.5 Τοξικότητα $\text{NO}_3^-$

Τα νιτρικά ιόντα έχουν τοξική δράση με αποδεδειγμένες επιπτώσεις στην υγεία του ανθρώπου και έχουν συνδεθεί στατιστικά με διάφορες μορφές καρκίνου. Η πρόσληψη των νιτρικών γίνεται μέσω της κατανάλωσης των γεωργικών προϊόντων και μέσω της πόσης ρυπασμένου νερού. Μέχρι στιγμής, το πρόβλημα υγείας που έχει συσχετιστεί περισσότερο με την αυξημένη συγκέντρωση νιτρικών ιόντων στο αίμα, είναι η μεθαιμοσφαιριναιμία ή κυάνωση. Τα μέγιστα επιτρεπτά όρια  $\text{NO}_3^-$  στο νερό, έχουν καθοριστεί βάσει των κρουσμάτων της ασθένειας αυτής, όμως πολλές πρόσφατες μελέτες υποδεικνύουν αυξημένο κίνδυνο για εμφάνιση διαφόρων προβλημάτων υγείας ακόμα και σε περίπτωση πρόσληψης αρκετά χαμηλότερων συγκεντρώσεων.

Τα νιτρικά ιόντα, όταν εισέλθουν στον ανθρώπινο οργανισμό, υπό τη δράση των βακτηρίων που βρίσκονται στη στοματική κοιλότητα και στο γαστρεντερικό σύστημα, ανάγονται σε νιτρώδη. Στο όξινο περιβάλλον που επικρατεί στο στομάχι, τα νιτρώδη μπορούν να μετατραπούν σε νιτρώδες οξύ ( $\text{HNO}_2$ ), σε τριοξείδιο του αζώτου ( $\text{N}_2\text{O}_3$ ), σε οξείδιο του αζώτου ( $\text{NO}$ ) και σε διοξείδιο του αζώτου ( $\text{NO}_2$ ). Τα παράγωγα αυτά είναι ισχυροί παράγοντες νιτροποίησης και οδηγούν στο σχηματισμό NOC, ενώσεων που περιλαμβάνουν τις N-νιτροζαμίνες και τις N-νιτροσαμίδες, που έχουν χαρακτηριστεί ως γενοτοξικές και καρκινογόνες. Η διαδικασία νιτροποίησης εξαρτάται από τους μηχανισμούς αντίδρασης, τη συγκέντρωση των εμπλεκόμενων ενώσεων, το pH του περιβάλλοντος και άλλους τροποποιητικούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένης της παρουσίας καταλυτών ή αναστολέων της διαδικασίας της νιτροποίησης (Ward et al., 2018). Ακόμα και σε ουδέτερο pH, τα νιτρώδη μπορούν να αναχθούν σε μονοξείδιο του αζώτου, το οποίο αντιδρώντας με το οξυγόνο μπορεί να μετατραπεί στις νιτροζαμίνες  $\text{N}_2\text{O}_3$  και  $\text{N}_2\text{O}_4$  (Parvizishad M et al., 2017). Κάθε ένα από τα παράγωγα που είναι πιθανό να βρεθούν στον ανθρώπινο οργανισμό, ανάλογα με ποικίλους καταλυτικούς ή

ανασταλτικούς παράγοντες έχουν επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, όπως βλάβες στο νευρικό σύστημα, καρκινογένεσεις, γενετικά ελαττώματα και την πρόκληση κυάνωσης.

Η περίσσεια των νιτρωδών ιόντων που έχουν προέλθει από την αναγωγή των νιτρικών, περνά στο αίμα μετατρέποντας την αιμοσφαιρίνη σε μεθαιμοσφαιρίνη, η οποία παρεμποδίζει τη μεταφορά οξυγόνου στο αίμα. Όταν τα επίπεδα της μεθαιμοσφαιρίνης υπερβαίνουν το 10% μπορεί να προκαλέσουν μπλε χρώμα στο δέρμα και στα χείλη, ενώ μεγαλύτερα επίπεδα θεωρούνται απειλητικά για τη ζωή (Greer et al., 2005). Η αναγωγή των νιτρικών σε νιτρικά ευνοείται σε σχετικά υψηλές τιμές pH ( $> 5$ ), τιμές που συνήθως απαντώνται στο γαστρικό περιβάλλον των νηπίων (Ψαροπούλου, 2010). Για το λόγο αυτόν, η ασθένεια αυτή απειλεί κυρίως βρέφη ηλικίας κάτω των 6 μηνών και της έχει αποδοθεί ο όρος 'blue baby syndrome'. Στους παράγοντες κινδύνου για τη κυάνωση των βρεφών περιλαμβάνονται η παρασκευή γαλακτούχων τροφών με νερό που περιέχει υψηλά επίπεδα νιτρικών (Comly, 1945) και τα τρόφιμα και τα φάρμακα που είναι επιβαρυμένα με νιτρικά.

Όσον αφορά τις καρκινογένεσεις, ο καρκίνος του στομάχου είναι αυτός που έχει συνδεθεί πιο έντονα με την αυξημένη πρόσληψη νιτρικών. Οι μελέτες που έχουν διεξαχθεί όμως, δεν έχουν καταλήξει σε κοινά συμπεράσματα, καθώς σε άλλες περιπτώσεις έχει βρεθεί υψηλή συσχέτιση μεταξύ έκθεσης σε νιτρικά και εμφάνισης καρκίνου, και σε άλλες ασήμαντη (WHO, 2011). Ασθενείς έως μέτριες συσχετίσεις ανάμεσα στην κατανάλωση νερού επιβαρυμένου με  $\text{NO}_3^-$  και εμφάνισης διαφόρων μορφών καρκίνου (στομάχου, προστάτη, παχέος εντέρου και ουροδόχου κύστης), έχουν βρεθεί σε μελέτες στην Ιταλία, την Ισπανία και τη Δανία (Jensen, 1982; Morales et al., 1995; Palli et al., 2001). Επιπλέον, ενδείξεις υπάρχουν και για αυξημένη πιθανότητα εμφάνισης λεμφώματος Hodgkin's και γλοιώματος του εγκεφαλικού στελέχους (Parvizishad M. et al., 2017).

Τα νιτρώδη άλατα ενδεχομένως έχουν αρνητικές επιπτώσεις στη λειτουργία του θυροειδούς αδένα. Μελέτες που έχουν διεξαχθεί σε ζώα, έχουν καταλήξει στο συμπέρασμα ότι η κατάποση νιτρικών αλάτων σε υψηλές δόσεις μπορεί να αναστείλει την πρόσληψη ιωδίου και να προκαλέσει υπερτροφία του θυροειδούς αδένα. Επίσης, αυξημένα περιστατικά υποθυρεοειδισμού σε παιδιά και ενήλικες έχουν καταγραφεί σε περιοχές με πόσιμο νερό που περιέχει ψηλές ποσότητες  $\text{NO}_3^-$  (Ward et al., 2018). Ενδείξεις υπάρχουν και για αύξηση της πιθανότητας εμφάνισης καρκίνου του θυροειδούς σε περίπτωση αυξημένης πρόσληψης νιτρικών με ταυτόχρονη έκθεση σε ακτινοβολία (Drozd et al., 2018).

Τέλος, η ύπαρξη  $\text{NO}_3^-$  στο νερό έχει συνδεθεί με ελαττώματα στο νευρικό σύστημα, πρόωρες γέννες, χαμηλό βάρος εμβρύων και αποβολές σε περίπτωση κατανάλωσης κατά την περίοδο της εγκυμοσύνης (Ward et al., 2018).

## 2.6 Τεχνικές ανίχνευσης $\text{NO}_3^-$ στο υπόγειο νερό

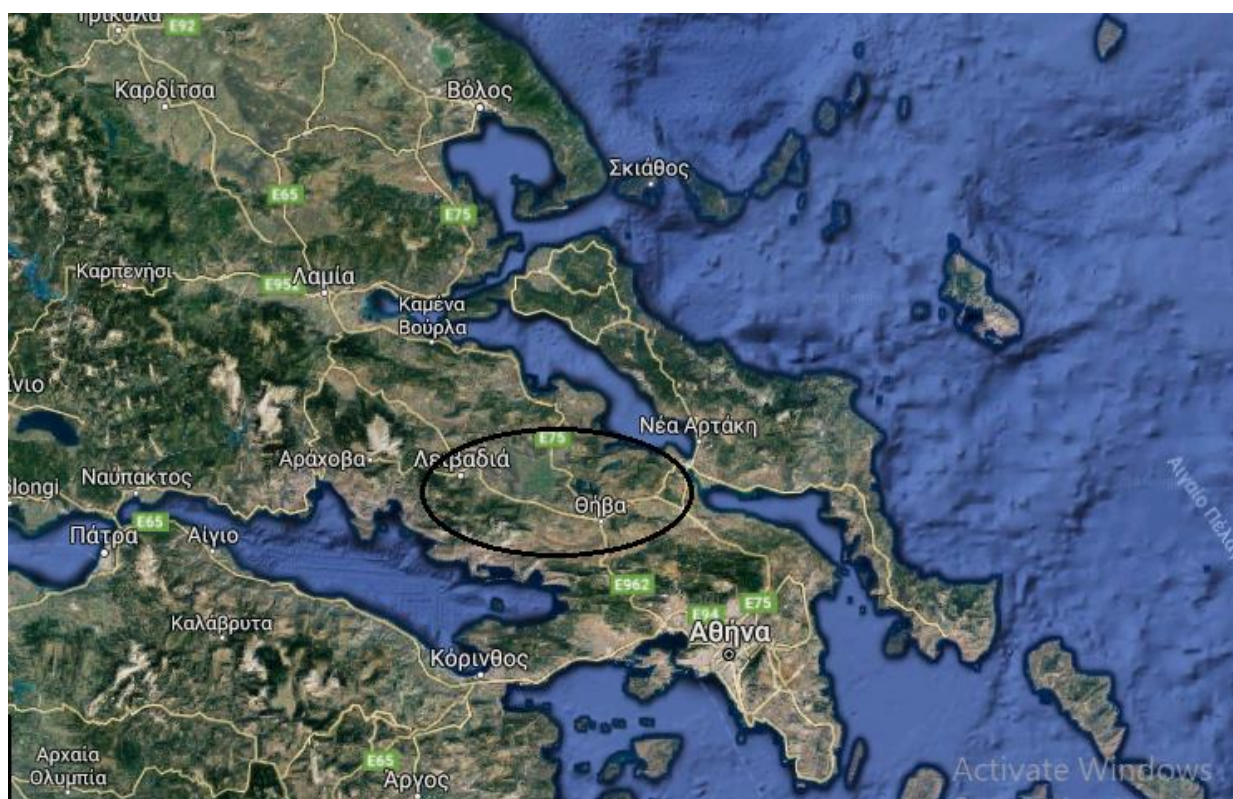
Οι τεχνικές ανίχνευσης  $\text{NO}_3^-$  μπορούν να διακριθούν σε άμεσες και έμμεσες. Στις έμμεσες περιλαμβάνονται μεταξύ άλλων η φασματοσκοπία, ο προσδιορισμός του αμμωνίου έπειτα από αναγωγή των νιτρικών ιόντων και ο προσδιορισμός των νιτρικών μέσω του τριχλωρίδιου του βαναδίου ( $\text{VCl}_3$ ). Οι έμμεσες μέθοδοι είναι αρκετά ακριβές και πολύπλοκες, ενώ σε κάθε περίπτωση η ύπαρξη άλλων ουσιών στα δείγματα οδηγεί σε σφάλμα στις μετρήσεις (Azmi et al., 2017). Επιπλέον, στις έμμεσες μεθόδους παράγονται μεγάλες ποσότητες χημικών αποβλήτων (Alahi et al. 2018). Οι άμεσες μέθοδοι περιλαμβάνουν τη χρωματογραφία, την ποτενσιομετρία και τους βιοαισθητήρες, και είναι αυτές που χρησιμοποιούνται συνηθέστερα, καθώς είναι αρκετά πιο οικονομικές. Εντούτοις, η ιοντική χρωματογραφία, που χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο για τη μέτρηση  $\text{NO}_3^-$  λόγω της ακρίβειάς της, χαρακτηρίζεται από υψηλότερο κόστος. Το σημαντικότερο μειονέκτημα που παρουσιάζουν οι άμεσες μέθοδοι υπολογισμού των  $\text{NO}_3^-$  είναι η ευαισθησία τους στην ύπαρξη παρεμβαλλόμενων χημικών ουσιών, κυρίως των χλωριόντων και των θειικών ιόντων, τα οποία είναι παρόντα στα περισσότερα δείγματα, ενώ στους παράκτιους υδροφορείς οι συγκεντρώσεις των  $\text{Cl}^-$  είναι ιδιαίτερα αυξημένες. Μια εναλλακτική μέθοδο, αρκετά οικονομική, αποτελεί η ανάλυση με έγχυση του δείγματος σε συνεχή ροή - flow injection analysis (FIA). Η FIA παρουσιάζει χαμηλό όριο ανίχνευσης, υψηλή ευαισθησία, και παράλληλα απαιτεί χαμηλές ποσότητες δειγμάτων και αντιδραστηρίων. Σημείο που χρήζει προσοχής όμως είναι η επιλογή του κατάλληλου αντιδραστηρίου ώστε να ολοκληρωθεί η διαδικασία σε σύντομο χρονικό διάστημα, ενώ έχουν καταγραφεί και περιπτώσεις που συγκεκριμένα αντιδραστήρια, παρήγαγαν επικίνδυνα παραπροϊόντα (Alahi et al. 2018).



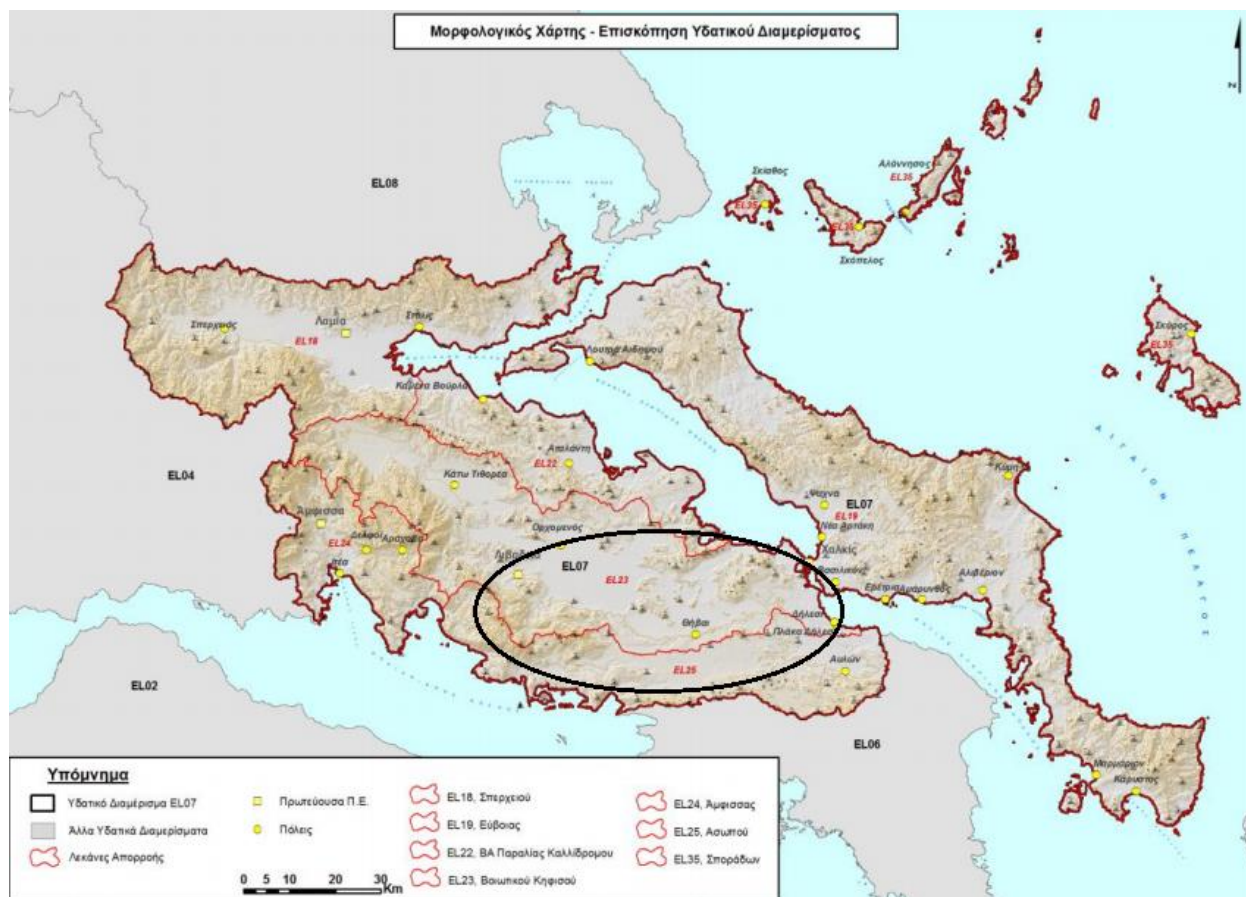
### 3 Περιοχή μελέτης

#### 3.1 Γενικά στοιχεία

Οι γεωτρήσεις από τις οποίες αντλήθηκαν τα δεδομένα ποιότητας των υδάτων, βρίσκονται στις δύο χαρακτηρισμένες ευπρόσβλητες από νιτρορύπανση περιοχές του Νομού Βοιωτίας, στο Κωπαϊδικό Πεδίο που καταλαμβάνει μεγάλο μέρος της λεκάνης απορροής του Βοιωτικού Κηφισού, και στην ευρύτερη περιοχή της λεκάνης απορροής του ποταμού Ασωπού. Οι περιοχές ανήκουν στο Υδατικό Διαμέρισμα Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας (GR07), όπως αυτό ορίστηκε στο Άρθρο 3 του Προεδρικού Διατάγματος 51/2007. Στην εικόνα 3.1 εμφανίζεται η περιοχή μελέτης και στην εικόνα 3.2 αποτυπώνονται οι λεκάνες απορροής του Υδατικού Διαμερίσματος.



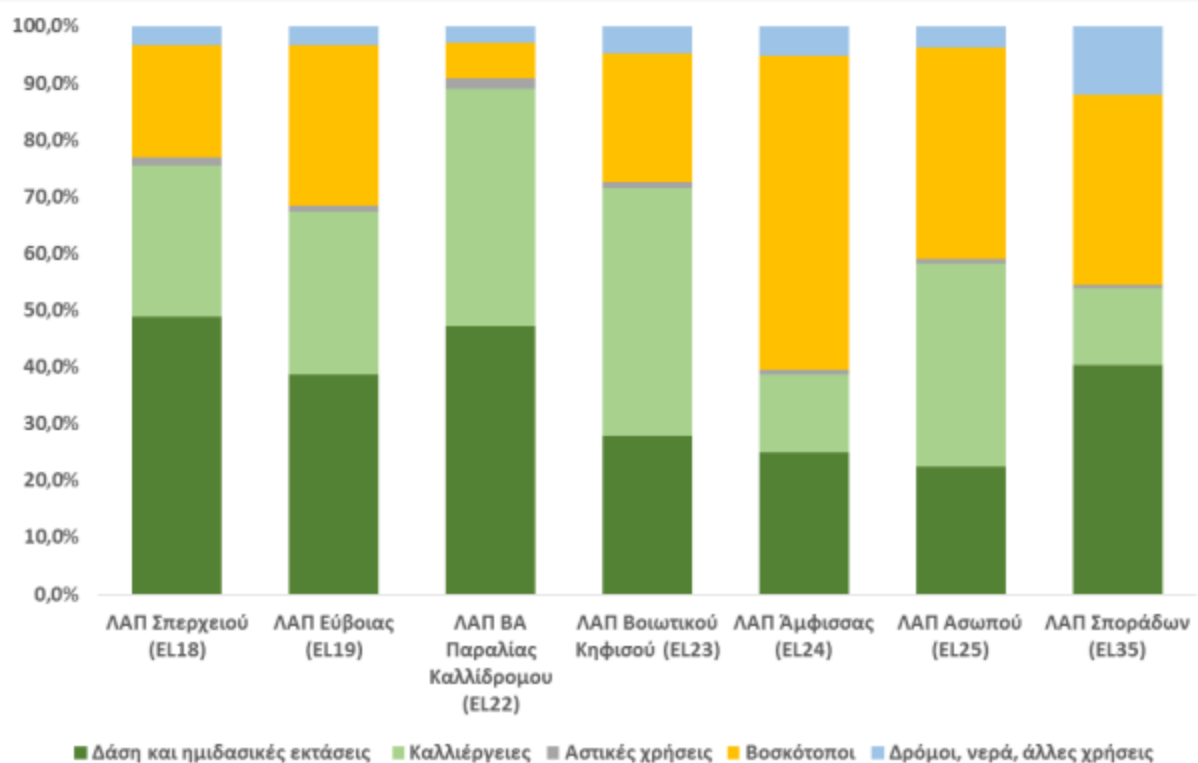
Εικόνα 3.1: Περιοχή μελέτης (Google earth)



Εικόνα 3.2: Μορφολογικός Χάρτης και λεκάνες απορροής ΥΔ 7 (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2017)

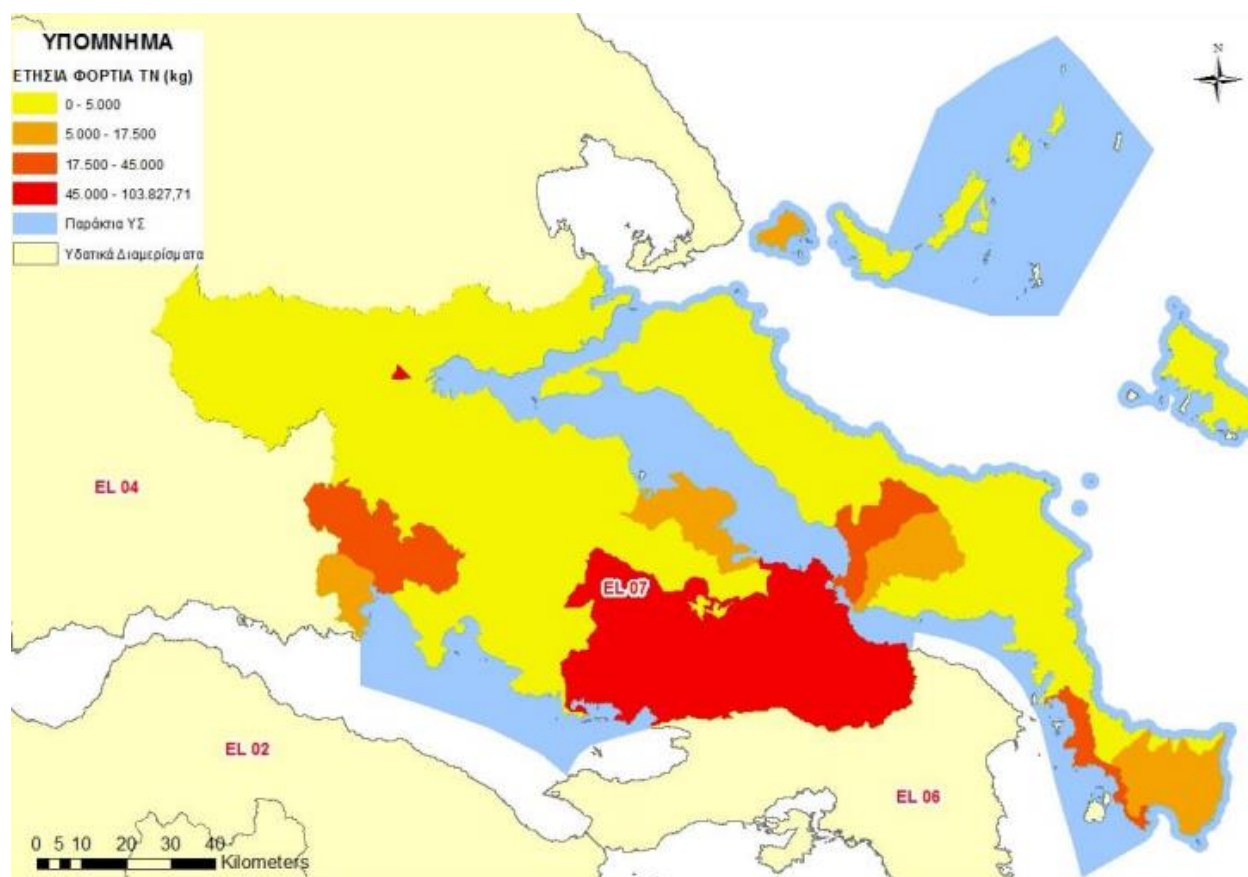
Το Υδατικό Διαμέρισμα της Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας χαρακτηρίζεται μορφολογικά ορεινό έως ημιορεινό. Παρόλο που δέχεται λιγότερες βροχές από Δυτική Στερεά Ελλάδα παρουσιάζει έντονη υδρογεωλογία και υδρολογία, η οποία οφείλεται σε σημαντικό βαθμό στην αξιόλογη διαπερατότητα του γεωλογικού της υποβάθρου, όπου κυριαρχούν ασβεστόλιθοι. Το γεγονός αυτό, παράλληλα με το έντονο ανάγλυφο και με τους μεγάλους ασβεστολιθικούς ορεινούς όγκους που κυριαρχούν στην περιοχή, συντελεί στην ύπαρξη πλούσιων υδροφορέων και πολλών αναβλύσεων.

Το Υδατικό Διαμέρισμα Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας καλύπτεται σε μεγάλο ποσοστό από δασικές εκτάσεις (36% της συνολικής έκτασης) και σε σημαντικό ποσοστό από καλλιέργειες (κατά 31%) και βοσκοτόπους (27%) (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2017). Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η κατανομή των χρήσεων γης ανά λεκάνη απορροής του Διαμερίσματος. Παρατηρείται πως η μεγαλύτερη κάλυψη από καλλιέργειες παρουσιάζεται στη λεκάνη απορροής του Βοιωτικού Κηφισού, με ποσοστό 44% της συνολικής έκτασης, ενώ η λεκάνη απορροής του Ασωπού καλύπτεται από καλλιέργειες σε ποσοστό 36%.



Εικόνα 3.3: Κατανομή των χρήσεων γης στο Υδατικό Διαμέρισμα Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2017)

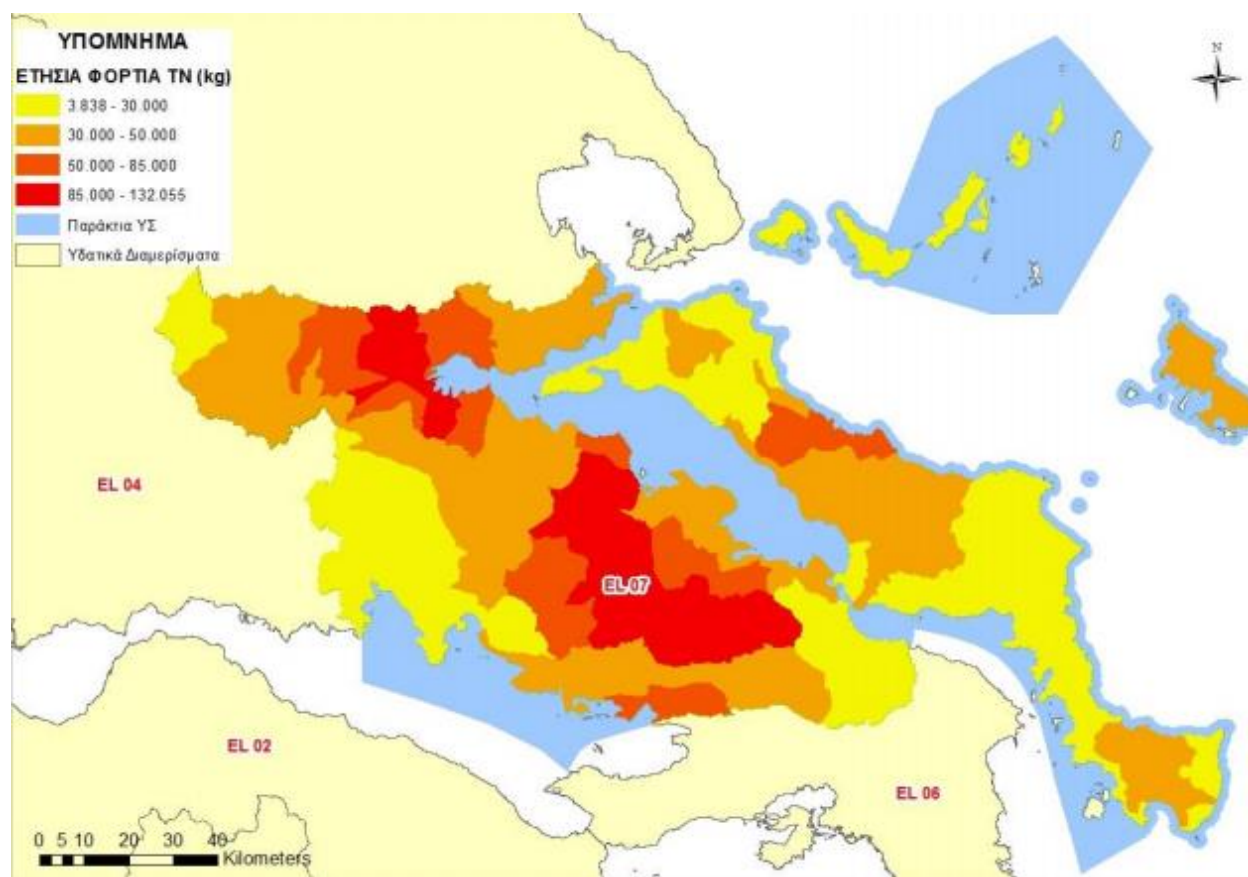
Λόγω της κυρίαρχης αγροτικής δραστηριότητας αλλά και της έντονης βιομηχανικής, το ΥΔ 07 είναι από τα πιο επιβαρυνμένα από άποψη ρύπανσης και πίεσης στα υδατικά αποθέματα. Στο χάρτη που ακολουθεί απεικονίζονται οι ετήσιες φορτίσεις νιτρικών που δέχεται κάθε λεκάνη απορροής του Υδατικού Διαμερίσματος, από σημειακές πηγές ρύπανσης (κτηνοτροφικές και βιομηχανικές μονάδες, εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων κ.α.). Με κόκκινο χρώμα, υποδηλώνονται οι μέγιστες φορτίσεις, με τιμές που κυμαίνονται μεταξύ 45.000 και περίπου 104.000 kg ανά έτος. Στο χάρτη φαίνεται πως η περιοχή μελέτης δέχεται τις μεγαλύτερες φορτίσεις νιτρικών ιόντων.



Εικόνα 3.4: Ετήσιες φορτίσεις νιτρικών από σημειακές πηγές στην περιοχή ενδιαφέροντος (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2017)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, εντονότερες πιέσεις στο περιβάλλον δημιουργούν οι διάχυτες πηγές ρύπανσης, όπως είναι η λίπανση καλλιεργούμενων εκτάσεων και τα αστικά λύματα που δεν καταλήγουν σε ΕΕΛ. Στον επόμενο χάρτη απεικονίζονται οι ετήσιες ποσότητες επιφανειακών φορτίσεων Ν που παράγονται στο ΥΔ 07, όπου και πάλι παρατηρείται πως η εξεταζόμενη περιοχή είναι από τις πιο επιβαρυνμένες του Διαμερίσματος.





Εικόνα 3.5: Ετήσια επιφανειακά φορτία νιτρικών από διάχυτες πηγές στην περιοχή ενδιαφέροντος (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2017)

Η πεδιάδα της Κωπαΐδας βρίσκεται σε απόσταση περίπου 100km βορειοδυτικά της Αθήνας και διοικητικά ανήκει στο Νομό Βοιωτίας. Βρίσκεται σε γεωγραφικό πλάτος 38,38° και γεωγραφικό μήκος 23,10°, με μέσο υπερθαλάσσιο ύψος 95 μέτρων. Η Κωπαΐδα αποτελεί συνέχεια των πεδιάδων της Χαιρώνειας και του Ορχομενού, ενώ έχει μήκος 24 περίπου χιλιόμετρα και πλάτος 13 χιλιόμετρα. Η συνολική έκταση της περιοχής εκτιμάται περίπου σε 415.900 στρέμματα.

Από υδρολογικής απόψεως, η εξεταζόμενη περιοχή καταλαμβάνει το μεγαλύτερο τμήμα της λεκάνης απορροής του Βοιωτικού Κηφισού, μαζί με τμήμα της λεκάνης απορροής του Ασωπού.

Σε ολόκληρη την υπό εξέταση περιοχή υπάρχει πλήθος από τεχνικά έργα, όπως αρδευτικά κανάλια, γεωτρήσεις για άρδευση, γεωτρήσεις για άλλη χρήση, καθώς και αντλιοστάσια καταιονισμού. Ως προς τις χρήσεις γης, σχεδόν το σύνολο της εξεταζόμενης περιοχής καλύπτεται από μόνιμα αρδευόμενες εκτάσεις (Κατσαμάγκα, 2014).

### 3.1.1 Γεωλογικά και Υδρογεωλογικά στοιχεία

#### Μορφολογία της περιοχής μελέτης

Η λεκάνη της Κωπαΐδας αποτελεί εκτεταμένη πεδιάδα με χαλαρές προσχώσεις, σχεδόν οριζόντιες, με την εξαίρεση ορισμένων τμημάτων λίγο ψηλότερα. Το κύριο τμήμα της πεδιάδας

παρουσιάζει υψόμετρο 92-100 m. Η επίπεδη επιφάνεια της λεκάνης έχει περίπου την μορφή ορθογωνίου τριγώνου, η υποτείνουσα της οποίας έχει μήκος 19-20 km με ΒΔ-ΝΑ διεύθυνση. Περιβάλλεται από ορεινές και ημιορεινές ζώνες. Έτσι στα ΒΔ όρια της λεκάνης βρίσκεται η ασβεστολιθική σειρά του υψώματος Ακοντίου, ενώ στα ΒΑ, στα υψώματα Καρδίτσας. Δυτικά βρίσκεται το Κερατοβούνι και τα υψώματα Λοφιστίου, ενώ νότια τα υψώματα Κορωνείας και ΝΔ τα στρώματα Θηβών, τα οποία φθάνουν το ύψος των 360 μέτρων.

Το ανάγλυφο της περιμετρικής ζώνης της λεκάνης Κωπαΐδας έχει εξαρτηθεί από τα παρουσιαζόμενα πετρώματα, ασβεστόλιθου ή φλύσχη. Οι περιοχές με ασβεστόλιθο έχουν υποστεί εντονότερα την επίδραση της διάβρωσης σε άφθονες κοιλάδες, βαθιές και απότομες, ενώ στις σχιστολιθικές περιοχές οι κοιλάδες είναι λιγότερες αλλά περισσότερο ανοικτές (Κατσαμάγκα, 2014).

#### Γεωλογικές συνθήκες

Η λεκάνη της Κωπαΐδας είναι μια καρστική μορφή, η οποία αποτελεί τη μεγαλύτερη πόλη της Ελλάδας. Η δημιουργία της οφείλεται αφενός στη διαβρωτική ενέργεια των υδάτων και αφετέρου στις τεκτονικές διαταράξεις (μεταπτώσεις, κατακρημνίσεις κ.α.). Η Κωπαϊδική λεκάνη ήταν αρχικά μια διαβρωσιγενής κοιλάδα, η οποία διαρρέονταν από το Βοιωτικό Κηφισό και τους παραπόταμούς του. Βραδύτερα ρήγματα διέρρηξαν την κοιλάδα σε κομμάτια, μερικά από τα οποία κατακρημνίστηκαν και απέκλεισαν την έξοδο του ποταμού προς την θάλασσα, με αποτέλεσμα να σχηματισθεί λίμνη. Γεωλογικώς, η εξεταζόμενη περιοχή ανήκει στη λεγόμενη Ανατολική ορεινή Ζώνη της Ελλάδας.

Στη γεωλογική κατασκευή των ορεινών της λεκάνης απορροής λαμβάνουν μέρος πετρώματα σε δύο ορεινές ζώνες, στην ζώνη Παρνασσού - Γκιώνας και της Ανατολικής Ελλάδος.

Το μητρικό υλικό του Λεκανοπεδίου της Κωπαΐδας διαμορφώθηκε από τις εναποθέσεις των προϊόντων διάβρωσης των γύρω ορεινών όγκων, οι οποίοι είναι κατά το πλείστο ασβεστολιθικής συστάσεως. Τα προϊόντα της καταστροφής των ασβεστολιθικών πετρωμάτων, εναποτέθηκαν στον πυθμένα της με αρχική καθίζηση των βαρύτερων υλικών και έπειτα των ελαφρότερων. Έτσι, το έδαφος της λίμνης στο μεγαλύτερο ποσοστό της αποτελείται από λεπτά υλικά με μεγάλα ποσά αργίλου και ιλύος. Οι συνεχείς προσχώσεις και η εξάτμιση περιόρισαν τα νερά της λίμνης και το βάθος της, καθώς δημιουργήθηκαν ευνοϊκές συνθήκες για την ανάπτυξη πλούσιας υδροχαρούς βλάστησης, η οποία μετά την αποσύνθεσή της και σε συνδυασμό με την υπολειμματική υγρασία της λίμνης, οδήγησαν στη δημιουργία τύρφης και γεωτύρφης (Κοψιαύτη, 2009).

#### Υδρογεωλογικά δεδομένα

Λόγω της ιδιόμορφης γεωλογικής και υδρογεωλογικής της δομής (κυριαρχία ασβεστολιθικών πετρωμάτων), η λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού διαθέτει πολύ αξιόλογο υπόγειο και πηγαίο υδατικό δυναμικό. Το σύστημα αυτό αποτελείται από πέντε υδρογεωλογικές ενότητες, οι οποίες είναι τοποθετημένες κλιμακωτά κατά μήκος της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού και παρουσιάζονται ακολούθως:

- **Υδρογεωλογικές Ενότητες Άνω Ρου:** Οι σημαντικότερες πηγές του άνω ρου είναι γνωστές με την ονομασία πηγές Λιλαίας ή Σουβάλας.
- **Υδρογεωλογικές Ενότητες Μέσου Ρου:** Πρόκειται για δύο μεγάλες ενότητες, συνολικής έκτασης 690 km<sup>2</sup>. Οι ενότητες του κεντρικού βορειοανατολικού Παρνασσού και του ανατολικού Καλλιδρόμου, επικοινωνούν μεταξύ τους λόγω τεκτονικής δομής και δημιουργούν ενιαίο υδροφόρο ορίζοντα μεγάλης υδροδυναμικότητας.
- **Υδρογεωλογικές Ενότητες Κάτω Ρου:** Περιλαμβάνουν τους υδροφορείς του βόρειου Ελικώνα και του Κάστρου, οι οποίοι είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους.
- **Υδρογεωλογικές Ενότητες Υλίκης – Παραλίμνης:** Περιλαμβάνουν τους Ιουρασικούς – Τριαδικούς ασβεστόλιθους νοτιοδυτικά της Υλίκης, από τους κρητιδικούς ασβεστόλιθους στην μεταξύ των λιμνών περιοχή, από τους Ιουρασικούς ασβεστόλιθους βόρεια και νότια της Παραλίμνης και από ασβεστόλιθους που βρίσκονται στην περιοχή των λιμνών Υλίκης και Παραλίμνης.
- **Υδρογεωλογικές Ενότητες Κλαστικών Σχηματισμών:** Σχηματίζονται στις ποτάμιες και λιμναίες αποθέσεις των πεδινών τμημάτων του Βοιωτικού Κηφισού και της πεδιάδας Θηβών-Βαγίων από στρώματα άμμων και κροκάλων τα οποία διαχωρίζονται με παρεμβολές αργιλοϋλιωδών (Κατσαμάγκα, 2014).

### 3.1.2 Κλιματολογικά στοιχεία

Στο Κωπαϊδικό πεδίο, λόγω της ιδιαίτερης μορφολογίας του, όπου περικλείεται βόρεια από το όρος Χλωμού, ανατολικά από το όρος Πτώου και νότια από το όρος Ελικώνας, αποκλείονται κατά κάποιο τρόπο οι μεσογειακές επιδράσεις στο κλίμα. Έτσι, το κλίμα της περιοχής χαρακτηρίζεται ως ηπειρωτικού τύπου, μεσογειακό, της κατηγορίας των εύκρατων. Ακολουθως, παρουσιάζονται συνοπτικά πληροφορίες για τα κλιματικά στοιχεία της περιοχής (Κατσαμάγκα, 2014).

#### Θερμοκρασία

Στον πίνακα 3.1 δίνονται στοιχεία για τις μέσες θερμοκρασίες της περιοχής, όπως προκύπτουν από μετρήσεις του μετεωρολογικού σταθμού Αλιάρτου, κατά την χρονική περίοδο 1967-2001. Από τα στοιχεία του πίνακα παρατηρείται ότι ο θερμότερος μήνας είναι ο Ιούλιος με μέση θερμοκρασία ίση με 27,32 °C και ψυχρότερος ο Ιανουάριος με μέση θερμοκρασία 7,12 °C. Η χαμηλότερη απολύτως ελάχιστη που έχει καταγραφεί είναι -13,80 °C, το μήνα Ιανουάριο και η υψηλότερη απολύτως μέγιστη 44,60 °C τον Ιούλιο.

Πίνακας 3.1. Στοιχεία θερμοκρασίας σταθμού Αλιάρτου

Μήνας	Μέση Θερμοκρασία (°C)	Μέση Μέγιστη (°C)	Μέση Ελάχιστη (°C)	Απολύτως Μέγιστη (°C)	Απολύτως Ελάχιστη (°C)	Μέση Απολύτως Μέγιστη (°C)	Μέση Απολύτως Ελάχιστη (°C)
Ιανουάριος	7.12	11.52	2.88	24.8	-13.8	19.03	-4.78
Φεβρουάριος	8.29	12.85	3.59	26.8	-11.6	20.63	-3.27
Μάρτιος	10.69	15.55	4.97	29.1	-9.8	23.52	-1.78
Απρίλιος	15.28	20.36	8.07	33.4	-1	27.44	2.25
Μάιος	20.68	25.8	12.24	38.5	3	32.97	6.66
Ιούνιος	25.73	30.86	15.96	42.6	7.2	37.82	10.94
Ιούλιος	27.32	32.41	17.93	44.6	10.9	39.78	13.9
Αύγουστος	26.35	31.88	17.39	43.6	11	38.35	13.26
Σεπτέμβριος	22.64	28.55	14.52	39	5.8	35.32	9.42
Οκτώβριος	17	22.46	11	38	0	30.52	4.66
Νοέμβριος	12.17	17.21	7.24	31.2	-5	24.05	0.15
Δεκέμβριος	8.7	13.05	4.4	26.8	-7	20.19	-2.39
Έτος	16.83	21.87	10.01	44.6	-13.8	29.14	4.08

#### Βροχοπτώσεις

Το ετήσιο ύψος βροχής στην υπό εξέταση περιοχή ανέρχεται στα 575 mm. Κατά τους χειμερινούς μήνες σημειώνεται το μεγαλύτερο ύψος βροχόπτωσης, 247.87 mm, το οποίο αποτελεί το 43.1% της ετήσιας βροχόπτωσης. Κατά τους ανοιξιάτικους μήνες πέφτει το 23% της ετήσιας βροχόπτωσης, κατά τους θερινούς το 6% και κατά τους φθινοπωρινούς το 27.9%. Τα μέσα μηνιαία ύψη βροχής παρουσιάζουν μέγιστο το μήνα Δεκέμβριο, 97.73 mm και ελάχιστο το μήνα Ιούλιο, 6.06 mm.

#### Υγρασία Αέρος

Η μέση σχετική υγρασία του αέρα κυμαίνεται μεταξύ 47 και 76 βαθμών της υγρομετρικής κλίμακας. Το ετήσιο υγρομετρικό εύρος, ύψους 29% περίπου, αποκλίνει από το εύρος των καθαρά ηπειρωτικών κλιμάτων. Τους μήνες από Νοέμβριο έως Φεβρουάριο παρατηρείται μέση σχετική υγρασία περίπου 74%. Κατά τους μήνες Οκτώβριο, Μάρτιο και Απρίλιο, παρατηρείται μέση σχετική υγρασία με μέσο μέγεθος 65%. Τέλος, τους μήνες Μάιο, Ιούνιο, Ιούλιο, Αύγουστο και Σεπτέμβριο η μέση σχετική υγρασία είναι περίπου 52%.



### Νέφωση – Ηλιοφάνεια

Η νέφωση προσδιορίζεται με βάση μια κλίμακα που έχει 9 βαθμίδες, από 0 έως 8 και υπολογίζεται βάσει της έκτασης του ουράνιου θόλου που καλύπτεται από νέφη. Ο αριθμός ημερών με ελαφριά νέφωση (0/8-1,5/8) είναι μεγαλύτερος από τον Ιούνιο έως το Σεπτέμβριο, ενώ με μέγιστη νέφωση (6,5/8-8/8) από Δεκέμβριο έως και Μάρτιο. Η νέφωση έχει υψηλή σχέση με την ηλιοφάνεια, δηλαδή το χρονικό διάστημα κατά τη διάρκεια της ημέρας που ο ήλιος είναι ορατός ανεμπόδιστα από την επιφάνεια της γης. Οι μεγαλύτερες μέσες μηνιαίες τιμές της ηλιοφάνειας, μετρημένες σε ώρες ανά μήνα, σημειώνονται στη διάρκεια των θερινών μηνών και κυμαίνονται μεταξύ 327-351 h/month, ενώ οι μικρότερες σημειώνονται κατά τους χειμερινούς μήνες (96-113 h/month).

### 3.1.3 Έδαφος

Οι εδαφολογικές συνθήκες που περιγράφονται παρακάτω προέρχονται από την εδαφολογική μελέτη του Εθνικού Ιδρύματος Αγροτικής Έρευνας περί Εδαφολογικής Μελέτης Νομού Βοιωτίας 1992 (Κατσαμάγκα, 2014). Η ταξινόμηση των εδαφών έγινε σύμφωνα με το Soil Taxonomy (1975). Έτσι, βρέθηκαν τα εδάφη Entisols (Orthents, Aquents), Inceptisols (Ochrepts) και Vertisols (Xerents).

#### Κατάταξη εδαφών:

- **Εδαφοσειρά I:** καταλαμβάνει το 5% της ευρύτερης περιοχής. Ο συγκεκριμένος τύπος εδάφους παρουσιάζει άριστη αποστράγγιση και μεγάλη διάβρωση.
- **Εδαφοσειρά II:** Εδάφη που απαντώνται στο 9% της περιοχής. Πρόκειται για ιλυώδη (Si), ιλοοπηλώδη (SiL) μέσης σύστασης, με υπέδαφος αργιλοπηλώδες (CL), αμμοαργιλοπηλώδες (SCL) ή ιλοαργιλοπηλώδες (SiCL) μετρίως λεπτόκοκκα, μετρίως αποστραγγιζόμενα και με ισχυρή αντίδραση στο HCL εδάφη.
- **Εδαφοσειρά III:** Τύπος εδάφους που κυριαρχεί στο 52% της έκτασης της περιοχής. Εδάφη αμμοαργιλώδη (SC), αργιλώδη (C), αργιλοπηλώδη (CL) μετρίως λεπτόκοκκα ως λεπτόκοκκα, με υπέδαφος αργιλοπηλώδες (CL), αμμοαργιλοπηλώδες (SCL) ή ιλοαργιλοπηλώδες (SiCL), μετρίως αποστραγγιζόμενα, χωρίς διάβρωση και με ισχυρή αντίδραση HCL.
- **Εδαφοσειρά IV:** 10% της συνολικής έκτασης. Εδάφη αμμοαργιλώδη (SC), αργιλώδη (C), αργιλοπηλώδη (CL), μετρίως λεπτόκοκκα έως λεπτόκοκκα, με υπέδαφος αργιλοπηλώδες (CL), αμμοαργιλοπηλώδες (SCL) ή ιλοαργιλοπηλώδες (SiCL), μετρίως λεπτόκοκκα με ισχυρή αντίδραση HCL και καλώς αποστραγγιζόμενα, που δεν παρουσιάζουν διάβρωση.
- **Εδαφοσειρά V:** Εδάφη αμμοπηλώδη (SL), μετρίως χονδρόκοκκα, με υπέδαφος πηλώδες (L), ιλοοπηλώδες (SiL) μέσης σύστασης, καλώς αποστραγγιζόμενα, με ισχυρή αντίδραση HCL και μέτρια έως καθόλου διάβρωση. Καταλαμβάνουν το 23% της συνολικής έκτασης της ευρύτερης περιοχής.
- **Εδαφοσειρά VI:** Εδάφη αμμώδη (S), πηλοαμμώδη (LS), χονδρόκοκκα, με υπέδαφος αμμώδες (S), αμμοπηλώδες (SL), πηλοαμμώδες (LS), μετρίως χονδρόκοκκα, μετρίως

αποστραγγιζόμενα, με μέτρια προς ισχυρή αντίδραση στο HCL και χωρίς διάβρωση.

Αυτά τα εδάφη αντιπροσωπεύουν το 1% της συνολικής έκτασης της ευρύτερης περιοχής. Παρατηρείται πως το 62% της συνολικής επιφάνειας αποτελείται από μετρίως αποστραγγιζόμενα εδάφη.

**Διηθητικότητα:** Οι τιμές της κυμαίνονται μεταξύ 1 και 12.5 cm/h. Το 40-50% των εδαφών παρουσιάζουν βραδεία έως μετρίως βραδεία διηθητικότητα ( $\approx 2\text{cm/h}$ ), το 30%-40% μέτρια (2-6.5 cm/h) και το 10-20% μετρίως ταχεία (6.5-12.5 cm/h) (Κατσαμάγκα, 2014).

#### 3.1.4 Γεωργική δραστηριότητα

Η κύρια απασχόληση των κατοίκων της περιοχής είναι η γεωργία. Γενικά, ο νομός Βοιωτίας είναι από τα σπουδαιότερα γεωργικά κέντρα σε επίπεδο χώρας και με σημαντική συμβολή τόσο σε αροτραίες καλλιέργειες (σιτηρά, βαμβάκι, κηπευτικά), όσο και σε δενδρώδεις καλλιέργειες (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2017).

#### 3.1.5 Φυσικό Περιβάλλον

Ο Ν. Βοιωτίας, από πλευράς χλωρίδας, ανήκει στην Ευμεσογειακή ζώνη βλάστησης (*Quercetalia ilicis*). Η παραπάνω ζώνη διακρίνεται σε δύο υποζώνες. Η κατώτερη προς τα παράλια υποζώνη και η ξηρότερη ονομάζεται *Oleo – ceratonion* και η ανώτερη ονομάζεται *Quercion ilicis*. Η ευρύτερη περιοχή ανήκει στην πρώτη υποζώνη. Εδώ οι φυσικές φυτοκοινωνίες έχουν από παλιά υποβαθμιστεί και έχουν αντικατασταθεί δευτερογενώς από πυρόφιλα και ανθεκτικά είδη όπως είναι η *Pinus halepensis* (Χαλέπιος Πεύκη).

Το οικοσύστημα στην ευρύτερη περιοχή είναι χαρακτηριστικό ξηροφυτικό – σκληρόφυλλο και αείφυλλο μεσογειακό και έχει υποστεί κακή διαχείριση και έντονη ανθρωπογενή επέμβαση. Στη δομή της διάπλασης αυτής μετέχουν τα είδη *Olea europaea* και *Pinus halepensis*, *Quercus coccifera* (Πουρνάρι), *Arbutus unedo* (Κουμαριά) *Pistacia lentiscus* (σχίνος) σε πολλή και αραιή διασπορά. Στην ημιθαμνώδη ζώνη βλάστησης της περιοχής συναντάται κατά κόρον η αφάνα (*Poterium Spinosum*), η ξυλαφάνα (*genista acanthoclada*) το θυμάρι (*Thymus capitatus*), η κουκουλοφάνα (*Euphorbia acanthothamnus*) κ.α.

Η καλλιεργητική δραστηριότητα προκαλεί ζημιά στη φυσική βλάστηση της περιοχής, αφού η εντατικής μορφής γεωργία είναι ασυμβίβαστη με τη διατήρηση της άγριας ζωής. Οι δραστηριότητες που επιδρούν αρνητικά στη φυσική χλωρίδα του οικοσυστήματος της περιοχής μελέτης, είναι κατά κύριο λόγο η εντατική καλλιέργεια γεωργικών φυτών (κατά κύριο λόγο αροτραίες καλλιέργειες, βαμβακιού, πατάτας, κρεμμυδιών και κηπευτικών), η ανεξέλεγκτη βόσκηση και η διάθεση των αστικών και κτηνοτροφικών αποβλήτων στα επιφανειακά νερά. Επίσης, η δραστηριότητα των μηχανημάτων που χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση των γεωργικών εργασιών προκαλούν οχλήσεις στην πανίδα της περιοχής. Τέλος, η χρήση φυτοφάρμακων καταπολεμά όχι μόνο τους οργανισμούς που αποτελούν τροφή για τα πουλιά (σκουλήκια, έντομα κ.α.) αλλά ασκεί τοξική δράση και στα ίδια.

Αντίστοιχα με τη χλωρίδα και η πανίδα της περιοχής έχει επηρεασθεί και διαταραχθεί από τις αγροτικές δραστηριότητες, με κυριότερη τη χρήση όλο και μεγαλύτερων ποσοτήτων γεωργικών φαρμάκων και λιπασμάτων, καθώς επίσης και από το κυνήγι και τη λαθροθηρία (Κατσαμάγκα, 2014).

#### Ευαίσθητες και Προστατευόμενες Περιοχές

Το Δίκτυο Natura 2000 αποτελεί ένα Ευρωπαϊκό Οικολογικό Δίκτυο περιοχών, οι οποίες φιλοξενούν φυσικούς τύπους οικοτόπων και οικοτόπους ειδών που είναι σημαντικοί σε ευρωπαϊκό επίπεδο. Αποτελείται από δύο κατηγορίες περιοχών: τις «Ζώνες Ειδικής Προστασίας (ΖΕΠ)» (Special Protection Areas -SPA) για την Ορνιθοπανίδα, όπως ορίζονται στην Οδηγία 79/409/ΕΚ και τους «Τόπους Κοινοτικής Σημασίας (ΤΚΣ)» (Sites of Community Importance -SCI) όπως ορίζονται στην Οδηγία 92/43/ΕΚ (γρεκα.gr). Οι περιοχές του Ν. Βοιωτίας που εντάχθηκαν στο δίκτυο Natura 2000 είναι οι Λίμνες Υλίκη και Παραλίμνη – Σύστημα Βοιωτικού Κηφισού (GR2410001) και ο Εθνικός Δρυμός Παρνασσού (GR2410002). Η εξεταζόμενη περιοχή περιλαμβάνει τις λίμνες Υλίκη & Παραλίμνη και τις πηγές των Χαρήτων που ενώνονται με τον Βοιωτικό Κηφισό, ο οποίος εκβάλλει στην Υλίκη.

### 3.2 Λεκάνη Ασωπού ποταμού

Η λεκάνη του Ασωπού ποταμού έχει έκταση περίπου 721 km<sup>2</sup> και περίμετρο 170 km. Ο κύριος άξονας στη λεκάνη συμπίπτει με τη διεύθυνση των κύριων συστημάτων ρηγμάτων της περιοχής. Ορίζεται από τα ανατολικά προς τα δυτικά από τους δήμους Ωρωπού, Αχαρνών, Φυλής, Τανάγρας, Μάνδρας – Ειδυλλίας, Θηβαίων, Αλιάρτου, Λεβαδέων και Δίστομου – Αράχοβας – Αντίκυρας. Βόρεια οριοθετείται από τις πόλεις Οινόη, Θήβα και Δίστομο, νότια από τις Ερυθρές και τη Στεφάνη, δυτικά από τον Κορινθιακό κόλπο και ανατολικά από τις πόλεις του Ωρωπού και της Μαλακάσας (Νίκα, 2014).

#### 3.2.1 Γεωλογικά, Υδρολογικά και Μετεωρολογικά στοιχεία

##### Μορφολογία της περιοχής μελέτης

Στο νότιο τμήμα της περιοχής βρίσκεται η οροσειρά της βορειοανατολικής Πάρνηθας. Το τμήμα αυτό χαρακτηρίζεται από έντονο γεωμορφολογικό ανάγλυφο, όπου κυριαρχούν απότομες πλαγιές, υψηλές κορυφές βουνών και βαθιές κοιλάδες. Τους πρόποδες της οροσειράς από δυτικά προς τα ανατολικά ακολουθούν οι περιοχές Οινόφυτα και Μαλακάσα. Το τμήμα αυτό παρουσιάζει ομαλότερο γεωμορφολογικό ανάγλυφο, με ύψη μεταξύ 130 m και 345 m. Βορειοανατολικά των περιοχών αυτών, συναντάται η οροσειρά Ωρωπού – Καλάμου, με μεγαλύτερο υψόμετρο τα 500 m. Τέλος, στο βορειοδυτικό κομμάτι βρίσκεται ο Ελικώνας, με πλήθος κορυφών, πολλές εκ των οποίων ξεπερνούν τα 1000 m (Νίκα, 2014).

##### Γεωλογικές συνθήκες

Από γεωλογικής άποψης, η λεκάνη του Ασωπού στα πρώτα 400 m βάθους απαρτίζεται από ιζήματα της τριτογενούς και τεταρτογενούς γεωλογικής περιόδου και καλύπτει μια έκταση περίπου 700 km<sup>2</sup>. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που συναντώνται ανήκουν σε δύο μεγάλες

γεωτεκτονικές ενότητες, της Αττικοκυκλαδικής και τη Υποπελαγονικής. Στην πρώτη ενότητα κυριαρχούν τα μάρμαρα, τα μεταμορφωμένα πετρώματα και οι κρυσταλλικοί σχιστόλιθοι. Η δεύτερη ενότητα αποτελείται κυρίως από ασβεστόλιθους, φλύσχεις και σχιστοψαμμιτικά στρώματα του Παλαιοζωικού, ημιμεταμορφωμένα. Και στις δύο ενότητες απαντώνται ιζήματα νεότερης ηλικίας, δηλαδή νεογενή και τεταρτογενή. Οι κυριότεροι σχηματισμοί που βρίσκονται στην περιοχή είναι οι ασβεστόλιθοι, αποθέσεις οι οποίες κατατάσσονται στα Μετατεκτονικά και Βραδυτεκτονικά ιζήματα και τέλος, υπερβασικά πετρώματα, κυρίως οφιολιθικοί σχηματισμοί. Η συνολική έκταση των υπερβασικών πετρωμάτων στην περιοχή φτάνει τα 20 km<sup>2</sup> (Χυσένι, 2014).

#### Υδρογεωλογικά δεδομένα

Η διαμόρφωση των υπόγειων υδροφόρων και η κίνηση του νερού μέσα σε αυτούς εξαρτάται άμεσα από τη διαπερατότητα των γεωλογικών σχηματισμών και την απόστασή τους από τη θάλασσα. Στην περιοχή ενδιαφέροντος, η έντονη παρουσία των ασβεστόλιθων είναι πολύ σημαντική, καθώς χαρακτηρίζονται από μεγάλη υδροπερατότητα, το οποίο συνεπάγεται αυξημένη κατείσδυση νερού προς τους υδροφόρους ορίζοντες. Ο υδροφορές του Ασωπού χαρακτηρίζεται ως ημιπερατός (Χυσένι, 2014).

Στη λεκάνη απορροής του Ασωπού αναπτύσσονται δυο κύριοι υδροφόροι ορίζοντες:

- ο ανώτερος κοκκώδης υδροφόρος, εντός των Νεογενών και Τεταρτογενών αποθέσεων, και
- ο βαθύτερος καρστικός, εντός των ανθρακικών σχηματισμών των Τριαδικό – Ιουρασικών ασβεστόλιθων, ο οποίος στο πεδινό τμήμα Αυλώνα – Σχηματαρίου – Οινοφύτων καλύπτεται από Νεογενή και Τεταρτογενή ιζήματα.

Επίσης, προσχωματικοί ελεύθεροι υδροφόροι, αναπτύσσονται σε αποθέσεις εκατέρωθεν της κοίτης του Ασωπού, και στα παράκτια προσχωματικά πεδία του Ωρωπού και στην Αυλίδα (ΤΕΕ, 2009).

#### 3.2.2 Κλιματικές συνθήκες

##### Θερμοκρασία

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται τα μετεωρολογικά στοιχεία της περιοχής ενδιαφέροντος όπως αυτά προκύπτουν από το μετεωρολογικό σταθμό της Τανάγρας. Συγκεκριμένα, δίνονται στοιχεία μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας, μέσης μηνιαίας μέγιστης και ελάχιστης, το συνολικό ύψος βροχής για κάθε μήνα και η σχετική υγρασία. Από τα στοιχεία του πίνακα προκύπτει ότι ο θερμότερος μήνας είναι ο Ιούλιος με μέση θερμοκρασία ίση με 32 °C και ψυχρότεροι ο Ιανουάριος και ο Φεβρουάριος με μέση θερμοκρασία 3,3 °C.

Πίνακας 3.2. Μετεωρολογικά Στοιχεία ΜΣ Τανάγρας (1958 – 2010). Πηγή: ΕΜΥ

Μήνας	Μέση Θερμοκρασία (°C)	Μέση Μέγιστη (°C)	Μέση Ελάχιστη (°C)	Σχετική υγρασία (%)	Συνολικό ύψος βροχής (mm)
Ιανουάριος	7.4	11.7	3.3	77	67.3
Φεβρουάριος	8.1	12.6	3.3	73.8	48.6
Μάρτιος	10.2	14.8	4.6	71.8	53.5
Απρίλιος	14.4	19.2	7.3	65.9	27.9
Μάιος	20	24.9	11.4	58.2	23.1
Ιούνιος	25.3	30	15.8	48.2	10.5
Ιούλιος	27.5	32	18.4	47.6	8.9
Αύγουστος	26.7	31.6	18.3	49.3	10
Σεπτέμβριος	22.3	27.8	15.2	54.4	19
Οκτώβριος	17.3	22.4	11.6	68.2	46.6
Νοέμβριος	12.8	17.5	8	75.5	65.1
Δεκέμβριος	9.3	13.3	5.1	77.6	81.3

#### Βροχοπτώσεις

Ο μήνας με το μεγαλύτερο ύψος βροχής είναι ο Δεκέμβριος (74,9 mm), ενώ το καλοκαίρι παρατηρούνται τα μικρότερα ύψη βροχής (Ιούνιος 12,8 mm, Ιούλιος 6,9 mm, Αύγουστος 10,3 mm).

#### Υγρασία Αέρος

Ο μήνας κατά τον οποίο παρουσιάζεται το μεγαλύτερο ποσοστό σχετικής υγρασίας είναι ο Δεκέμβριος με τιμή 77,6%. Από εκεί παρατηρείται πτωτική τάση στα ποσοστά της υγρασίας, μέχρι το μήνα Ιούλιο, οπότε παρουσιάζεται η χαμηλότερη σχετική υγρασία με τιμή 46,7%.

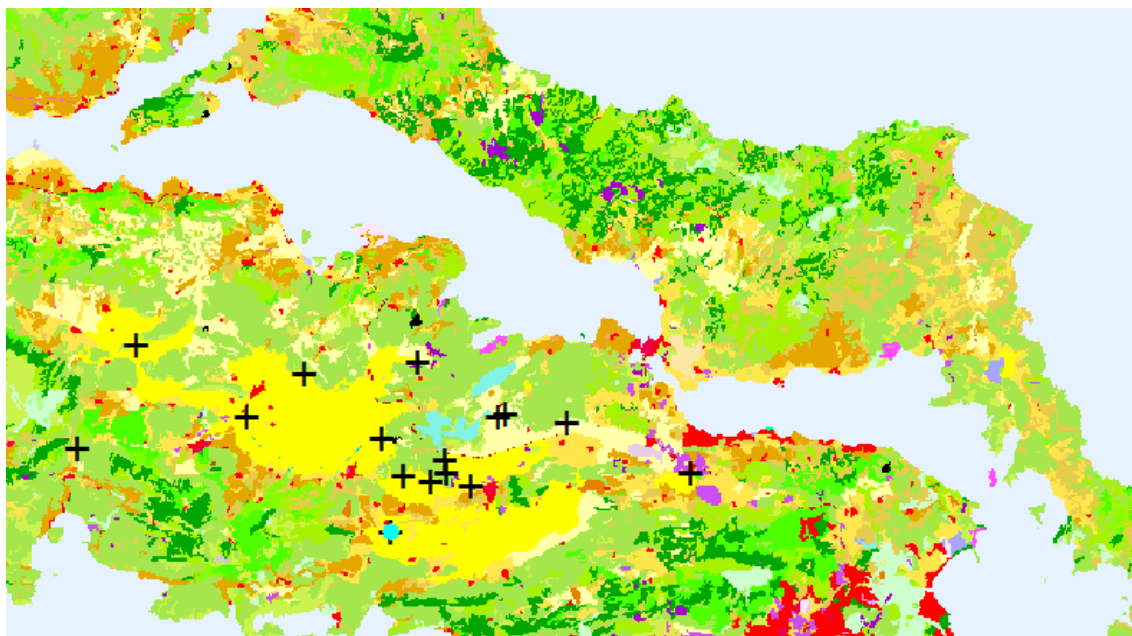
#### 3.2.3 Φυσικό Περιβάλλον

Η ευρύτερη περιοχή κατατάσσεται φυτοκοινωνικά στις μέσο-μεσογειακές διαπλάσεις της αριάς *Quercion ilicis*, με προδασική βλάστηση *Pistacio Rhamnion*, με αείφυλλα σκληρόφυλλα και θερμόφιλα κωνοφόρα. Μεγάλο τμήμα της καταλαμβάνεται από αγροτικά οικοσυστήματα, τα οποία κυρίως απαντώνται στις περιοχές γύρω από τα Οινόφυτα, το Συκάμινο και τον Ορωπό. Επίσης συναντώνται εκτάσεις με δάση Χαλεπίου πεύκης, θαμνώνες αείφυλλων πλατύφυλλων

και φυτοκοινωνίες φρυγάνων. Τέλος, στην περιοχή καταγράφονται και παόχθιες συστάδες από ιτιές και πλατάνια ελοφυτικής βλάστησης (Θέος 2008).

### 3.3 Γεωτρήσεις

Στον χάρτη που ακολουθεί αποτυπώνονται οι γεωτρήσεις της περιοχής μελέτης, από τις οποίες αντλήθηκαν τα δεδομένα μετρήσεων πεδίου και συγκεντρώσεων  $\text{NO}_3^-$ . Συνολικά συλλέχθηκαν 112 καταγραφές με πλήρη δεδομένα που προέρχονται από 16 γεωτρήσεις.



Εικόνα 3.6: Γεωτρήσεις περιοχής μελέτης

Στον επόμενο πίνακα καταγράφονται οι μέγιστες, οι ελάχιστες και οι μέσες τιμές συγκεντρώσεων  $\text{NO}_3^-$ , για κάθε γεώτρηση, όπως προέκυψαν από την ανάλυση των μετρήσεων.

Πίνακας 3.3. Μέγιστες, ελάχιστες και μέσες τιμές συγκεντρώσεων  $\text{NO}_3^-$

Γεώτρηση	Min Concentration $\text{NO}_3^-$ (mg/l)	Max Concentration $\text{NO}_3^-$ (mg/l)	Mean Concentration $\text{NO}_3^-$ (mg/l)
Γ/1	5	55.8	23.39
Γ/43	5	15.5	9.93
ΥΜ3	5	49.6	17.68
ΧVI/31	5	43.4	11.98
07/Γ1	37.2	124	88.49
07/Γ2	5	18.1	12.87
07/Γ3	5	99.2	20.56
Θ39	55.8	<b>126</b>	89.50
Θ477	37.2	37.2	37.20
Θ600	41.8	55.8	48.80
VIII/87	5	12.4	7.00
ΧVI/28	5	62	24.00
ΧVII/27	18.6	20.5	19.23
ΧVII/30	5	12.4	6.85
B116	12.4	12.4	12.40
ΧVI/590	18.6	32.6	26.10

Η μέγιστη τιμή που παρατηρείται, στο σύνολο των γεωτρήσεων, είναι 126 mg/l.



## 4 Νευρωνικά Δίκτυα

### 4.1 Εισαγωγή

Τις τελευταίες δεκαετίες οι αλγόριθμοι υπολογιστικής νοημοσύνης (Υ.Ν) έχουν βρει ευρεία εφαρμογή σε πρακτικά προβλήματα που εφάπτονται σε διαφορετικούς επιστημονικούς τομείς. Η Υπολογιστική Νοημοσύνη περιλαμβάνει εξελιγμένους αλγόριθμους, των οποίων η λειτουργία προσομοιώνει είτε τον τρόπο λειτουργίας κάποιου βιολογικού οργάνου, είτε κάποια βιολογική διεργασία. Παραδείγματα τέτοιων αλγορίθμων αποτελούν τα ασαφή σύστημα που προσομοιώνουν τη λειτουργία της ομιλούμενης γλώσσας, ο εξελικτικός προγραμματισμός και οι γενετικοί αλγόριθμοι, οι οποίοι είναι εμπνευσμένοι από τη διαδικασία της φυσικής επιλογής (Θεωρία του Δαρβίνου) και τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΤΝΔ).

Ο όρος Νευρωνικά Δίκτυα (Neural Networks) χρησιμοποιείται για να περιγράψει έναν αριθμό από μαθηματικά μοντέλα, τα οποία είναι εμπνευσμένα από αντίστοιχα βιολογικά. Πρόκειται δηλαδή για μοντέλα που προσπαθούν να μιμηθούν το τρόπο λειτουργίας των νευρώνων του ανθρώπινου εγκεφάλου.

Το ΤΝΔ αποτελείται από έναν αριθμό απλών συνδεδεμένων μονάδων επεξεργασίας που παρουσιάζουν πολύπλοκη και παράλληλη συμπεριφορά και από αλγόριθμους που τροποποιούν συνεχώς την ισχύ των μεταξύ τους συνδέσεων μέχρι την επίτευξη ενός επιθυμητού αποτελέσματος.

Τα νευρωνικά δίκτυα συνιστούν εργαλεία υψηλής αξίας αλλά χαμηλού κόστους, για τη μοντελοποίηση και την προσομοίωση ενός φαινομένου ή μίας διαδικασίας, όπως επίσης και για την εντόπιση σφαλμάτων σε διάφορα συστήματα. Τα ΤΝΔ μπορούν να επιλύσουν πληθώρα προβλημάτων στη βελτιστοποίηση, την αναγνώριση προτύπων, την προσέγγιση των λειτουργιών, την ανάλυση των χρονικών σειρών και την πρόβλεψη.

Τα βασικά σημεία στα οποία διαφέρουν τα ΤΝΔ σε σχέση με τις κλασσικές μεθόδους μοντελοποίησης είναι τα εξής:

- Έχουν την ικανότητα να μοντελοποιούν πολύπλοκες, μη γραμμικές διαδικασίες χωρίς την παραδοχή ή την γνώση των σχέσεων που διέπουν τις μεταβλητές του συστήματος. Το χαρακτηριστικό τους αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε περιπτώσεις όπου το φυσικό μοντέλο δεν είναι ρητά καθορισμένο ή είναι δύσκολο να περιγραφεί επακριβώς. Ακόμα, ένα νευρωνικό δίκτυο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις έλλειψης δεδομένων, όπου καθίσταται αδύνατη η εκτέλεση ενός λεπτομερούς μοντέλου (Trichakis et al., 2011).
- Εκπαιδεύονται από τα δεδομένα που τους παρέχονται και όχι από ένα συγκεκριμένο πρόγραμμα, έχουν δηλαδή κατά κάποιον τρόπο την ικανότητα 'αυτοπρογραμματισμού'.
- Δε χρησιμοποιούν σύμβολα για την αναπαράσταση εννοιών του μοντέλου.



## 4.2 Ιστορική αναδρομή

Η ανάπτυξη των ΤΝΔ προέκυψε από την ανάγκη κατανόησης της δομής και της λειτουργίας του ανθρώπινου εγκεφάλου. Το πρώτο μοντέλο Νευρωνικού Δικτύου παρουσιάστηκε το 1943 στην εργασία των McCulloch και Pitts, σύμφωνα με τους οποίους ένα ΝΔ αποτελείται από ένα σύνολο νευρώνων, των βασικών δομικών στοιχείων του εγκεφάλου, οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους. Η πρωτοπόρα εργασία τους αποτέλεσε το κλειδί για την ανάπτυξη των τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Σε επόμενη εργασία τους το 1947, παρουσίασαν ένα πιο εξελιγμένο μοντέλο. Στο συγκεκριμένο μοντέλο, κάθε δομικό στοιχείο (νευρώνας) μπορεί να δέχεται πολλές εισόδους αλλά να δίνει μόνο μία έξοδο, ενώ μπορεί να βρίσκεται είτε σε κατάσταση ηρεμίας, είτε σε κατάσταση πυροδότησης- ενεργοποίησης. Επιπλέον έδειξαν πως οι έξοδοι των νευρώνων δεν ενώνονται αλλά οδηγούν σε άλλο νευρώνα και οι απολήξεις τους μπορούν να είναι διεγερτικές ή ανασταλτικές.

Το επόμενο σημαντικό βήμα για τη κατανόηση της λειτουργίας του ανθρώπινου εγκεφάλου και της ανάπτυξης των νευρωνικών δικτύων αποτέλεσε η εργασία του D. Hebb το 1949, ο οποίος εισήγαγε τον κανόνα μάθησης Hebb. Ο Hebb υποστήριξε πως κάθε φορά που το δίκτυο χρησιμοποιεί συγκεκριμένες νευρωνικές συνδέσεις, αυτές ενισχύονται οδηγώντας έτσι στη μάθηση του προτύπου που παρουσιάζεται.

Το 1958 ο Rosenblatt παρουσίασε το πρώτο νευρωνικό δίκτυο σε υλικό hardware, ικανό να λύσει απλά προβλήματα, το δίκτυο Perceptron. Πρόκειται για ένα απλό δίκτυο ενός επιπέδου (αποτελείται μόνο από την είσοδο και την έξοδο), στο οποίο η πληροφορία προχωρά μονοδρομικά προς την έξοδο.

Κατόπιν, το ενδιαφέρον για τα νευρωνικά δίκτυα μειώθηκε, με τη δημοσίευση της εργασίας των Minsky και Papert το 1969, στην οποία απέδειξαν ότι τα νευρωνικά δίκτυα ενός επιπέδου, δεν είναι ικανά για την εύρεση λύσης σε προβλήματα μη γραμμικά διαχωρίσιμων συναρτήσεων.

Το 1986 η εργασία των Rumelhart et al., εισήγαγε την ιδέα πως ένα ΤΝΔ μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως παράλληλος επεξεργαστής, επιτρέποντας έτσι την ύπαρξη πολλών επιπέδων στο δίκτυο. Το δίκτυο αυτό είναι ικανό να λύνει πλέον ένα μεγάλο αριθμό προβλημάτων και παράλληλα προτείνουν τον αλγόριθμο εκπαίδευσης οπισθοδιάδοσης σφάλματος (back propagation), ο οποίος είναι ο βασικός αλγόριθμος που χρησιμοποιείται στα δίκτυα perceptron πολλών επιπέδων. Η εργασία αυτή μαζί με την παράλληλη πρόοδο των λογισμικών των Υ/Η, συνέβαλαν στην ευρεία ανάπτυξη και εφαρμογή των ΤΝΔ πολλών επιπέδων.

Ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια, έχει παρατηρηθεί σημαντική αύξηση στις εφαρμογές των ΤΝΔ σε ετερόκλητους επιστημονικούς κλάδους, όπως η Ιατρική, η Φυσική, η Επιστήμη των Υπολογιστών, η Συνδυαστική Βελτιστοποίηση, οι Οικονομικές Επιστήμες, όπως επίσης και σε θέματα Υδραυλικής και Υδρολογίας.

### 4.3 Βιολογικά Νευρωνικά Δίκτυα

Οι επιστήμονες ήδη από τον 19<sup>ο</sup> αιώνα αναγνωρίζουν ότι ο εγκέφαλος αποτελείται από πολλά διακριτά στοιχεία, τους νευρώνες (neurons), τα οποία επικοινωνούν μεταξύ τους. Οι νευρώνες συνιστούν το βασικό δομικό στοιχείο του ανθρώπινου εγκεφάλου. Αποτελούν την πιο μικρή ανεξάρτητη μονάδα τους συστήματος, η οποία συνεχώς δέχεται, επεξεργάζεται και στέλνει πληροφορίες σε άλλους νευρώνες μέσω ηλεκτρικού σήματος. Υπολογίζεται πως ο ανθρώπινος εγκέφαλος περιέχει περίπου 10 δισεκατομμύρια νευρώνες, οργανωμένους σε ομάδες, κάθε μία από τις οποίες αποτελεί ένα φυσικό νευρωνικό δίκτυο. Κάθε φυσικό νευρωνικό δίκτυο αποτελείται από χιλιάδες, διασυνδεδεμένους μέσω συνάψεων, νευρώνες, ο αριθμός των οποίων κυμαίνεται μεταξύ 1000 και 10.000 (Γεωργούλη Α., 2015).

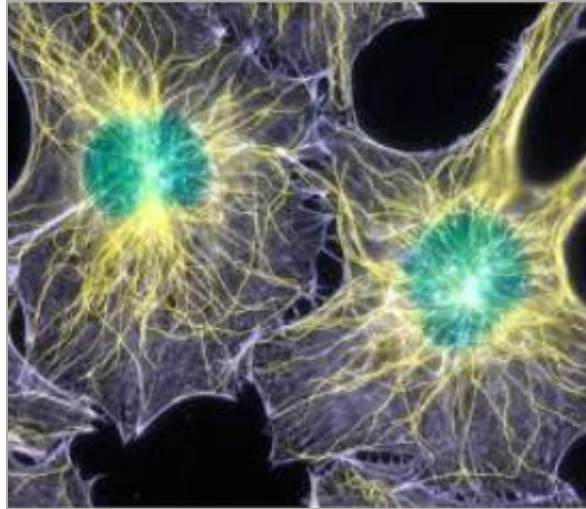
Ο φυσικός νευρώνας αποτελείται από τρία κύρια τμήματα:

- τους δενδρίτες (dendrites), που αποτελούν τα κανάλια εισόδου για το νευρώνα,
- το κυρίως κυτταρικό σώμα (cell body) και
- τον άξονα του κυττάρου, τον νευροάξονα (axon), που συνδέει τους νευρώνες μεταξύ τους.

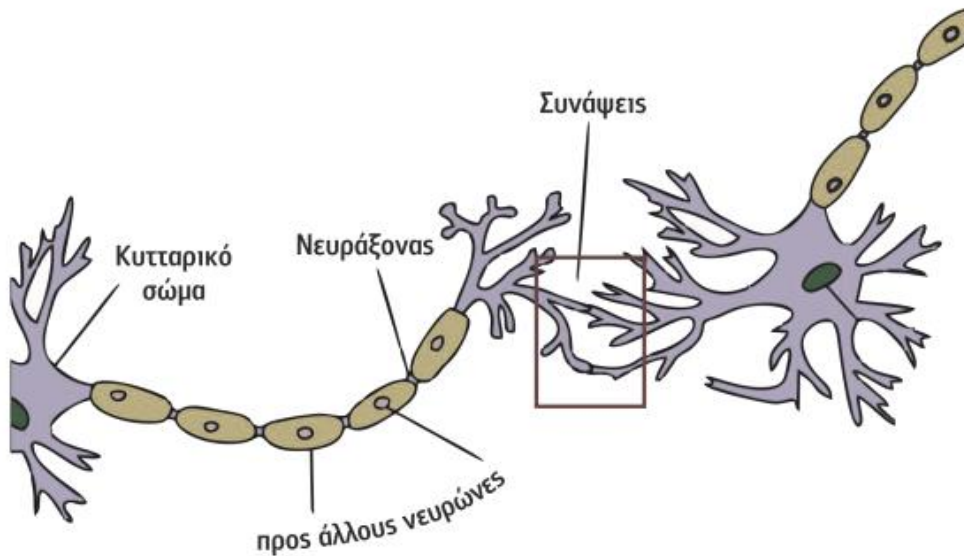
Κάθε νευροάξονας μεταφέρει σήματα στους δενδρίτες γειτονικών νευρώνων μέσω του σημείου ένωσης τους, που ονομάζεται νευροαξονική απόληξη ή σύναψη (synapse). Τα σήματα που δέχεται κάθε νευρώνας μέσω των δενδριτών, 'ζυγίζονται' και κατόπιν αθροίζονται. Εάν το άθροισμα ξεπεράσει ένα συγκεκριμένο όριο (τιμή κατωφλίου), δημιουργείται έξοδος η οποία θα μεταφερθεί στη συνέχεια σε επόμενο νευρώνα με τη μορφή νευρικής ώσης ή ηλεκτρικού σήματος.

Τα σήματα εισόδου που δέχεται ο νευρώνας, επιδρούν στο δυναμικό του, αυξομειώνοντας το. Όταν το δυναμικό ξεπεράσει αθροιστικά κάποια τιμή, η οποία ανάλογα με το κύτταρο κυμαίνεται μεταξύ 40 mV και 75 mV, ο νευρώνας διεγείρεται και παράγεται ηλεκτρικό σήμα. Το ηλεκτρικό σήμα μεταφέρεται πάντα προς μία σταθερή κατεύθυνση. Υπάρχουν δύο διακριτές καταστάσεις σημάτων, το δυναμικό ηρεμίας και το δυναμικό ενέργειας (Γεωργούλη Α., 2015).

Στις εικόνες 4.1 και 4.2 παρουσιάζονται φυσικοί νευρώνες από μικροσκόπιο και ο τρόπος σύνδεσής τους (Γεωργούλη Α., 2015).



Εικόνα 4.1: Μικροσκοπική φωτογραφία φυσικών νευρώνων



Εικόνα 4.2: Συνάψεις φυσικών νευρώνων

#### 4.4 Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα

Σε πλήρη αναλογία με το βιολογικό νευρώνα του εγκεφάλου, τα μαθηματικά μοντέλα των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (Artificial Neural Networks), αποτελούνται από έναν αριθμό απλών επεξεργαστικών μονάδων, οι οποίες είναι πλήρως διασυνδεδεμένες και είναι οργανωμένες σε στρώματα. Κάθε νευρώνας λαμβάνει πληροφορία, την επεξεργάζεται με τρόπο παρόμοιο με τον βιολογικό και αναλόγως με την τιμή που αθροίζεται, μεταδίδει την πληροφορία ή μένει σε 'ηρεμία'. Μπορεί να δέχεται πολλές εισόδους  $x_i$ , αλλά αποδίδει μόνο μία έξοδο. Κάθε ξεχωριστή είσοδος  $x_i$  ζυγίζεται από ένα βάρος  $w_i$ , και τα αποτελέσματα αθροίζονται.

$$F = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (4.1)$$

Το άθροισμα που υπολογίζεται θα πρέπει να ξεπεράσει μια ορισμένη τιμή κατωφλίου (threshold value),  $\theta$ , προκειμένου ο τεχνητός νευρώνας να δώσει έξοδο, μέσω της συνάρτησης ενεργοποίησης (activation function).

$$F = \sum_{i=1}^n w_i x_i > \theta \quad (4.2)$$

Το μοντέλο του νευρώνα περιλαμβάνει επίσης και έναν ακόμα όρο, τον όρο πόλωσης, που συμβολίζεται με  $b_k$ , ο οποίος χρησιμοποιείται είτε για τη μετατόπιση της συνάρτησης ενεργοποίησης, είτε για να ξεκινάει ο νευρώνας από ένα βασικό επίπεδο δραστηριότητας (Haykin, 1999). Έτσι, συνολικά ο τρόπος λειτουργίας του κάθε κόμβου (νευρώνα) περιγράφεται από τις εξισώσεις:

$$u_k = \sum_{i=1}^n w_{ki} x_i \quad (4.3)$$

$$y_k = F(u_k + b_k) \quad (4.4)$$

Όπου:

$x_i$ : οι τιμές εισόδου για το νευρώνα  $k$

$w_{ki}$ : τα συναπτικά βάρη που συνδέουν τον κόμβο  $k$  με τον κόμβο  $i$

$b_k$ : η πόλωση του κόμβου  $k$

$F$ : η συνάρτηση ενεργοποίησης του κόμβου  $k$

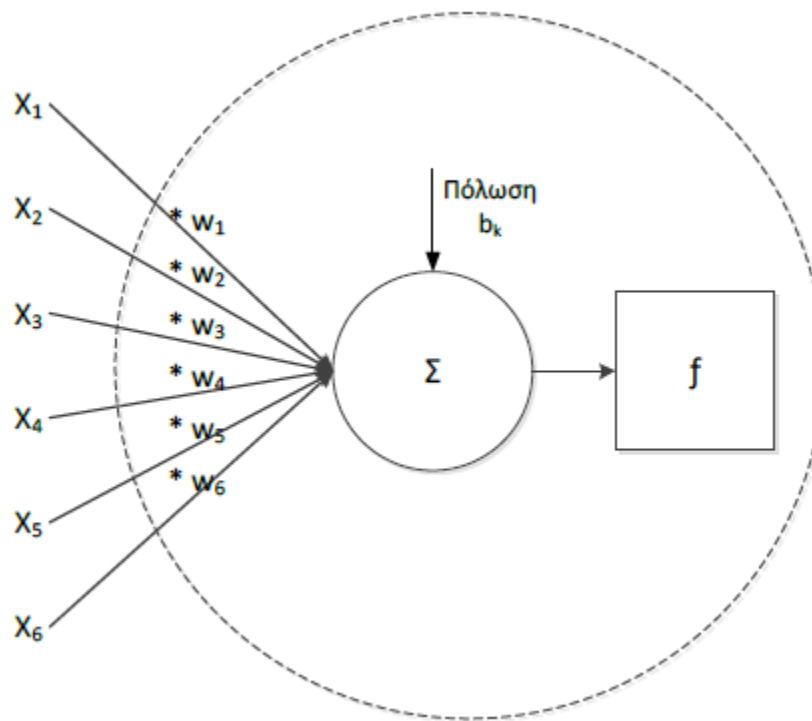
$u_k$ : η έξοδος του κόμβου  $k$ , όπως προκύπτει από τις εισόδους  $x_i$

$y_k$ : η συνολική τιμή εξόδου για τον κόμβο  $k$

Επομένως, η δομή του τεχνητού νευρώνα χαρακτηρίζεται από τα εξής τρία βασικά στοιχεία (Haykin, 1999):

- Το σύνολο από συνάψεις. Κάθε συνάψη του νευρώνα  $k$ , συνδέεται με συγκεκριμένο συναπτικό βάρος  $w_{ki}$ . Το συναπτικό βάρος δύναται να λάβει θετική τιμή, όπου η συνάψη χαρακτηρίζεται διεγερτική, ή αρνητική, όπου η συνάψη χαρακτηρίζεται ως αποτρεπτική.
- Τον αθροιστικό κόμβο  $\Sigma$ , όπου αθροίζονται οι σταθμισμένες εισόδους και παράγεται ο γραμμικός συνδυασμός τους.
- Τη συνάρτηση ενεργοποίησης  $F$  (activation function), η οποία ανάλογα με την τιμή  $u_k$  δίνει την έξοδο  $y_k$ . Συνήθως το κανονικοποιημένο εύρος της εξόδου είναι το κλειστό σύνολο  $[-1,1]$  ή το  $[0,1]$ .

Στην εικόνα 4.3 απεικονίζεται ένας τυπικός τεχνητός νευρώνας (Haykin, 1999) .



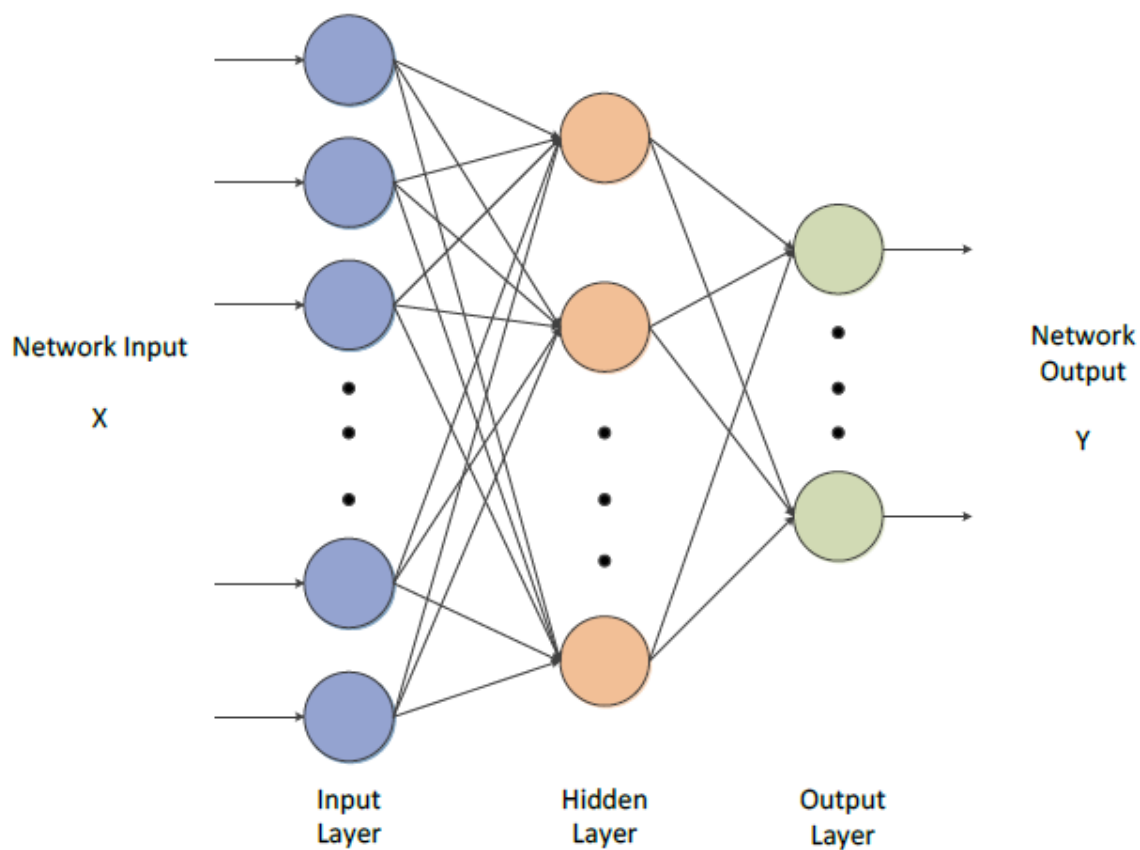
Εικόνα 4.3: Τυπικός κόμβος νευρωνικού δικτύου

Η δομή των νευρωνικών δικτύων χαρακτηρίζεται συνοπτικά από:

- Τα επίπεδα (layers) ή στρώματα στα οποία οργανώνονται. Κάθε δίκτυο αποτελείται υποχρεωτικά από τις εισόδους και το επίπεδο εξόδου. Ανάμεσα τους μπορεί να παρεμβάλλεται ένα ή περισσότερα επίπεδα, που καλούνται κρυμμένα επίπεδα.
- Τον αριθμό των κόμβων σε κάθε επίπεδο

- Τον αριθμό των κρυμμένων επιπέδων
- Τον τρόπο σύνδεσης των κόμβων
- Την τιμή κατωφλίου του κάθε κόμβου
- Τη συνάρτηση ενεργοποίησης
- Τη συνάρτηση μεταφοράς
- Τις τιμές των αρχικών βαρών των συνάψεων των κόμβων
- Τους αλγόριθμους εκπαίδευσης που χρησιμοποιούνται για την ενημέρωση των βαρών των συνάψεων.

Ένα τυπικό νευρωνικό δίκτυο φαίνεται στην εικόνα 4.4 (Tasoglou et al., 2014).



Εικόνα 4.4: Τυπικό νευρωνικό δίκτυο

Τα ΤΝΔ ανάλογα με τον αριθμό των επιπέδων που τα απαρτίζουν διακρίνονται σε:

- **Μονοστρωματικά ΤΝΔ** (Single-layer ANN), που αποτελούνται από ένα στρώμα νευρώνων ή ακόμα και μόνο από έναν νευρώνα.

- **Πολυστρωματικά ΤΝΔ (Multi-layer ANN)**, τα οποία περιέχουν ένα ή περισσότερα κρυφά επίπεδα. Στα πολυστρωματικά ΤΝΔ τα στοιχεία εξόδου κάθε προηγούμενου επιπέδου νευρώνων αποτελούν στοιχεία εισόδου για το επόμενο επίπεδο, με εξαίρεση το πρώτο στρώμα αφού τα αρχικά δεδομένα είναι οι γνωστές τιμές εισόδου στο μοντέλο. Προσθέτοντας κρυφά επίπεδα σε ένα Νευρωνικό Δίκτυο, του παρέχεται η δυνατότητα να καταλήξει σε πιο περίπλοκες σχέσεις, λόγω των περισσότερων συνάψεων που διαθέτει. Η προσθήκη περισσότερων κρυφών επιπέδων είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε ΤΝΔ με μεγάλο επίπεδο εισόδου (Haykin, 1999).

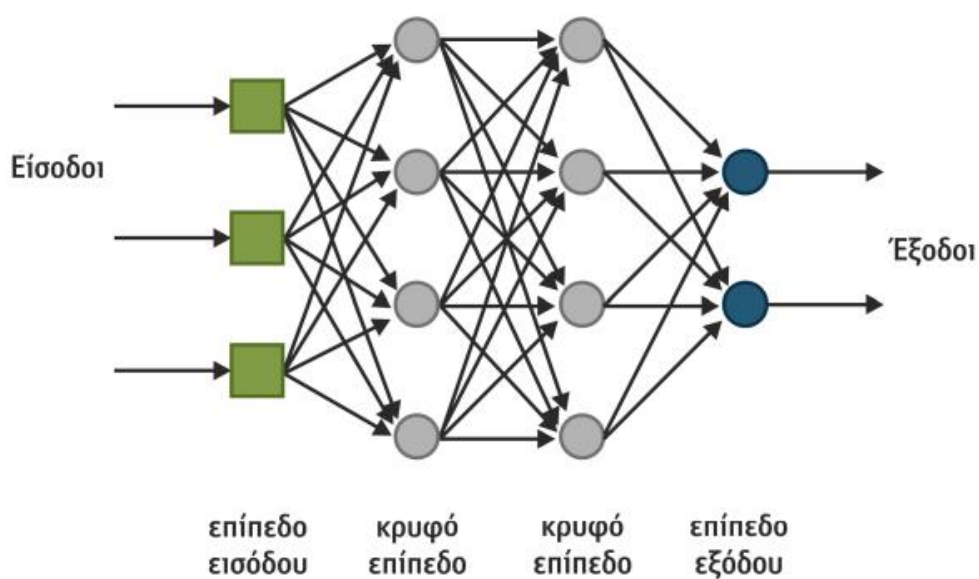
Ένα ΤΝΔ μπορεί να είναι πλήρως συνδεδεμένο (fully connected) όταν κάθε νευρώνας ενός επιπέδου συνδέεται με κάθε νευρώνα του επόμενου επιπέδου, ή μερικώς συνδεδεμένο όταν υπάρχουν νευρώνες σε ένα επίπεδο που δε συνδέονται με όλους τους νευρώνες του επόμενου.

Ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης των νευρώνων, τα ΤΝΔ διακρίνονται σε (Govindaraju, 2000a):

- **Πρόσθιας τροφοδοσίας (feed-forward ANN)** και
- **Οπίσθιας τροφοδοσίας ή ανατροφοδοτούμενα (feed-backward ή recurrent ANN)**

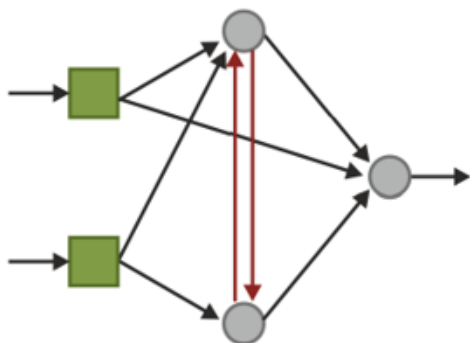
Στα δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης δεν υπάρχουν συνδέσεις μεταξύ νευρώνων ενός επιπέδου και του προηγούμενου του ή του ίδιου. Η πληροφορία μεταφέρεται αποκλειστικά προς μια κατεύθυνση χωρίς να σχηματίζεται κύκλος. Στα δίκτυα οπίσθιας τροφοδότησης, οι νευρώνες ενός επιπέδου δύνανται να τροφοδοτούν άλλους του ίδιου (αυτοσυσχετιζόμενες μνήμες), ή προηγούμενου επιπέδου (ετεροσυσχετιζόμενες μνήμες) (Γεωργούλη Α., 2015).

Στην εικόνα 4.5 φαίνεται ένα πλήρως συνδεδεμένο ΤΝΔ δύο κρυφών επιπέδων, πρόσθιας τροφοδοσίας. Στην εικόνα 4.6 παρουσιάζονται δύο ανατροφοδοτούμενα δίκτυα αυτοσυσχετιζόμενης (α) και ετεροσυσχετιζόμενης μνήμης (β).

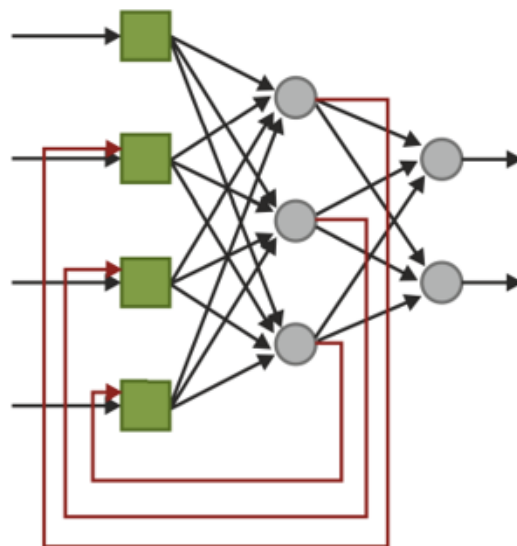


Εικόνα 4.5: ΤΝΔ πρόσθιας τροφοδοσίας δύο κρυφών επιπέδων (Γεωργούλη Α., 2015)

α



β

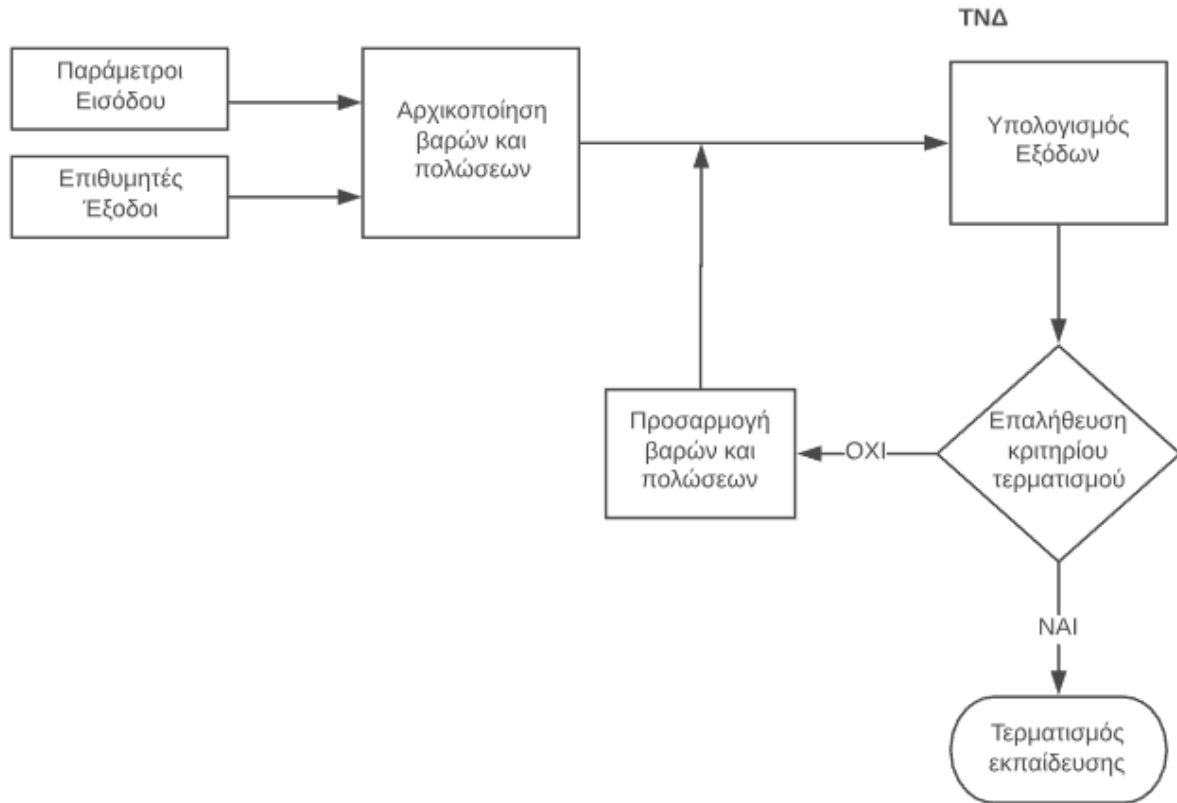


Εικόνα 4.6: Ανατροφοδοτούμενα δίκτυα α)αυτοσυσχετιζόμενης και β)ετεροσυσχετιζόμενης μνήμης (Γεωργούλη Α., 2015)



#### 4.4.1 Γενικός τρόπος λειτουργίας τεχνητών νευρωνικών δικτύων.

Στο επόμενο διάγραμμα αναπαρίσταται σχηματικά ο γενικός τρόπος λειτουργίας των ΤΝΔ, ανεξαρτήτου δομής.



Εικόνα 4.7: Διάγραμμα ροής γενικής λειτουργίας ΤΝΔ

#### 4.5 Συναρτήσεις ενεργοποίησης

Η συνάρτηση ενεργοποίησης  $F(u)$  καθορίζει την έξοδο του νευρώνα συναρτήσει της εισόδου  $u$ . Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι ενεργοποίησης.

##### 1. Βηματική ή Δυαδική συνάρτηση ενεργοποίησης

Η συγκεκριμένη συνάρτηση περιγράφεται μαθηματικά από την παρακάτω εξίσωση:

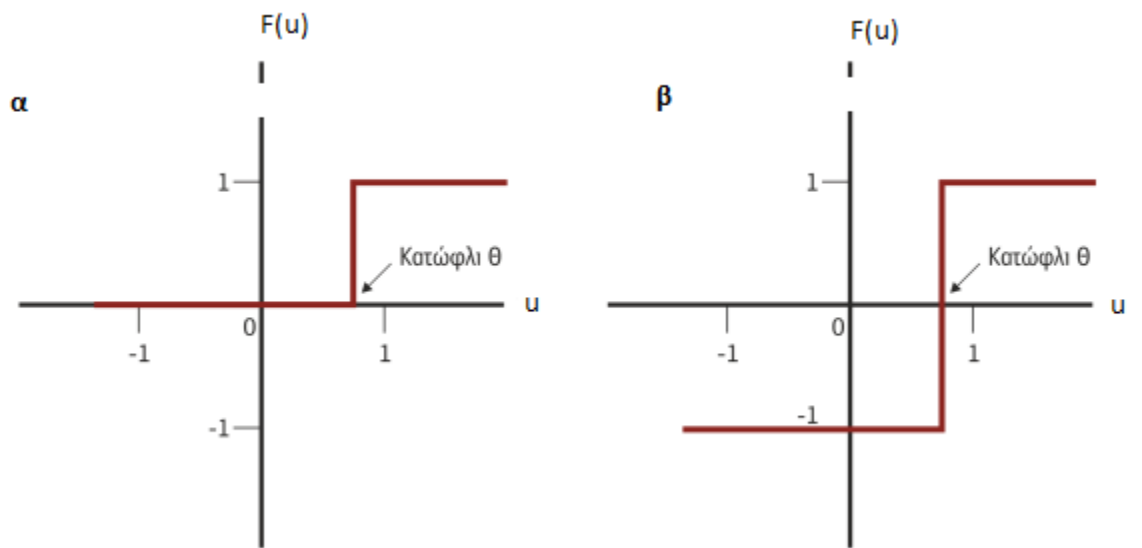
$$F(u) = \begin{cases} 1, & u \geq \theta \\ 0, & u < \theta \end{cases} \quad (4.5)$$

Συνεπώς, αν το αποτέλεσμα  $u$  είναι μικρότερο μιας τιμής κατώφλιου  $\theta$ , τότε η τιμή της συνάρτησης ενεργοποίησης  $F$  θα λάβει την τιμή 0, και ο νευρώνας θα παραμείνει αδρανής. Σε αντίθετη περίπτωση, θα λάβει την τιμή 1 και ο νευρώνας θα ενεργοποιηθεί.

Το μοντέλο του νευρώνα που χρησιμοποιεί τη βηματική συνάρτηση αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως McCulloch – Pitts.

Αντίστοιχη συμπεριφορά έχει και η συνάρτηση προσήμου, όπου οι τιμές της συνάρτησης  $F$ , παίρνουν τις τιμές -1 και 1.

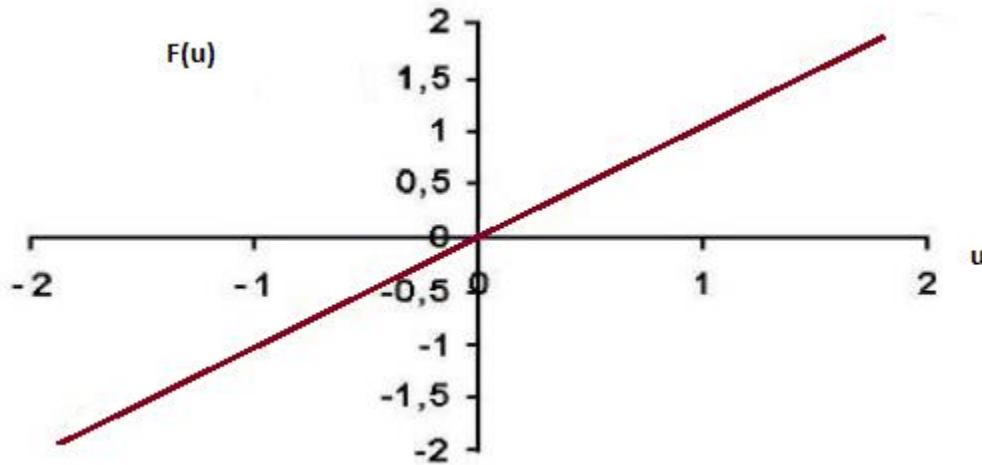
Οι γραφικές παραστάσεις των εν λόγω συναρτήσεων φαίνονται στην επόμενη εικόνα (Γεωργούλη Α., 2015).



Εικόνα 4.8: Βηματική συνάρτηση (α) και συνάρτηση προσήμου (β)

## 2. Γραμμική συνάρτηση ενεργοποίησης

Η γραμμική συνάρτηση περιγράφεται μαθηματικά από την εξίσωση  $F(u)=u$ . Η γραφική της παράσταση φαίνεται στην εικόνα 4.9 (Γεωργούλη Α., 2015):



Εικόνα 4.9: Γραμμική συνάρτηση ενεργοποίησης

## 3. Σιγμοειδής συνάρτηση ενεργοποίησης

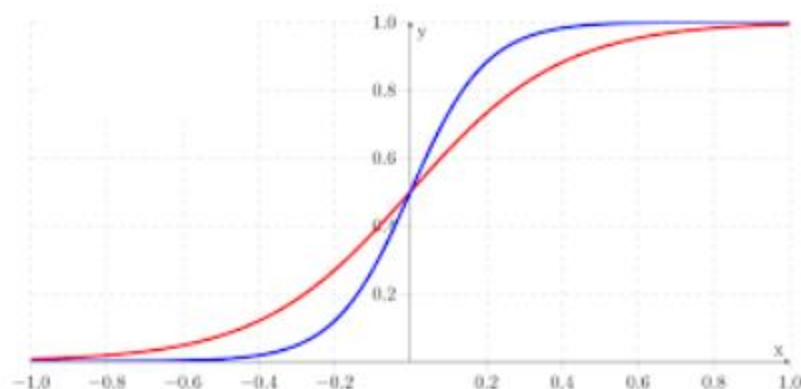
Στην πλειονότητα των μοντέλων που χρησιμοποιούνται σήμερα, η συνάρτηση ενεργοποίησης είναι σιγμοειδούς μορφής. Οι σιγμοειδείς συναρτήσεις είναι συνεχείς, γνησίως αύξουσες και ασυμπτωτικές συναρτήσεις, των οποίων η παράγωγος είναι θετική (Govindaraju, 2000a). Θεωρητικά, το πεδίο ορισμού τους μπορεί να είναι το σύνολο των πραγματικών αριθμών, όμως πρακτικά αυτό μπορεί να περιοριστεί στις τιμές των συναπτικών βαρών του δικτύου.

Ένα τυπικό παράδειγμα σιγμοειδούς συνάρτησης είναι η λογιστική συνάρτηση (logistic function), η οποία περιγράφεται μαθηματικά ως εξής:

$$F(u) = \frac{1}{1 + e^{-au}} \quad (4.6)$$

όπου  $a$ , η κλίση της καμπύλης (Krose & Smagt, 1996).

Με μεταβολές στην τιμή του  $a$  προκύπτουν διαφορετικές συναρτήσεις. Μικρές τιμές του  $a$  συνδέονται με ομαλή κλίση στην καμπύλη, όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.10, ενώ όσο η κλίση τείνει στο άπειρο, η συνάρτηση τείνει προς τη βηματική.



Εικόνα 4.10: Λογιστική συνάρτηση

#### 4.6 Εκπαίδευση νευρωνικού δικτύου

Η ικανότητα των νευρωνικών δικτύων να μαθαίνουν από το περιβάλλον τους είναι το σημαντικότερο χαρακτηριστικό τους. Πρόκειται για τη διαδικασία συνεχούς προσαρμογής των συναπτικών βαρών μέχρι την ικανοποίηση ενός προκαθορισμένου κριτηρίου, η οποία μπορεί να γίνει με εποπτεία (επιβλεπόμενη μάθηση) ή χωρίς εποπτεία (μη επιβλεπόμενη μάθηση). Στη μη επιβλεπόμενη μάθηση, το ΤΝΔ τροφοδοτείται μόνο με δεδομένα εισόδου και καλείται να αναγνωρίσει τάσεις και μοτίβα με σκοπό την ομαδοποίηση τους. Το σύστημα πρέπει να εντοπίσει στατιστικά χαρακτηριστικά του δείγματος που του παρουσιάζεται. Έτσι, βάσει της συσχέτισης, ο κανόνας μάθησης αλλάζει τα βάρη με σκοπό την ομαδοποίηση τμημάτων του δείγματος (Krose & Smagt, 1996). Στην επιβλεπόμενη μάθηση το ΤΝΔ τροφοδοτείται με ένα σύνολο συγκεκριμένων ζευγών εισόδων – εξόδων και ενεργοποιείται ένας αλγόριθμος εκμάθησης. Σύμφωνα με ένα σύνολο προκαθορισμένων βημάτων, μεταβάλλονται συνεχώς τα βάρη των συνάψεων μέχρι την επίτευξη καλής προσομοίωσης των τιμών που του έχουν παρουσιασθεί. Στόχος είναι η γενίκευση της προσομοίωσης για τον υπολογισμό και την πρόβλεψη τιμών, με την εισαγωγή παρεμφερών δεδομένων. Η επιλογή του κατάλληλου αλγόριθμου εκπαίδευσης εξαρτάται από το πρόβλημα που μελετάται, καθώς επίσης και από τη δομή του δικτύου. Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται συνηθέστερα είναι ο γενικευμένος κανόνας δ και ο αλγόριθμος οπισθοδιάδοσης σφάλματος.

##### Γενικευμένος κανόνας δέλτα

Στον κανόνα δ τα βάρη προσαρμόζονται με σκοπό την ελαχιστοποίηση του σφάλματος που σχετίζεται με τη διαφορά μεταξύ της επιθυμητής εξόδου και αυτής που έχει υπολογίσει το δίκτυο.

Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί τη βηματική συνάρτηση ενεργοποίησης και μεταβάλλει το συναπτικό βάρος του κόμβου  $i$  σύμφωνα με την εξίσωση:

$$w_i = w_{iold} - d(a_j - a_i) \quad (4.7)$$

Όπου:

- $a_i$ : η τρέχουσα έξοδος του νευρώνα  $i$
- $a_j$ : η επιθυμητή έξοδος του νευρώνα  $i$
- $d$ : ο ρυθμός εκμάθησης ( $d < 0$ )
- $w_i$ : το νέο βάρος εισόδου από το νευρώνα  $i$
- $w_{iold}$ : το παλιό εισόδου από το νευρώνα  $i$

Ο ρυθμός εκμάθησης  $d$  καθορίζει την ταχύτητα σύγκλισης της μάθησης. Μεγάλες τιμές  $d$  οδηγούν σε ταχύτερη σύγκλιση και ταλάντωση στην περιοχή του ολικού βέλτιστου, ενώ χαμηλός ρυθμός εκμάθησης μπορεί να εγκλωβίσει τον αλγόριθμο σε τοπικό ακρότατο (Γεωργούλη Α., 2015).

#### Αλγόριθμος οπισθοδιάδοσης σφάλματος

Ο βασικότερος αλγόριθμος εκπαίδευσης που χρησιμοποιείται στα πολυεπίπεδα ΤΝΔ είναι αυτός της οπισθοδιάδοσης σφάλματος (error back propagation). Σκοπός της μεθόδου είναι η μείωση του σφάλματος της εξόδου του δικτύου βάσει των επιθυμητών αποκρίσεων που του έχουν οριστεί. Κατά τη διαδικασία της εκπαίδευσης υπολογίζονται οι διαφορές μεταξύ υπολογισμένης και ορισμένης εξόδου σε κάθε κόμβο και κατόπιν διαδίδονται προς τα πίσω, στους κόμβους των κρυφών επιπέδων, όπου προσαρμόζονται οι τιμές των βαρών. Τα βασικά βήματα που ακολουθεί ο αλγόριθμος είναι τα εξής:

- Αρχικοποίηση των συναπτικών βαρών μεταξύ των κόμβων
- Εισαγωγή διανύσματος εισόδου – εξόδου
- Υπολογισμός εξόδου του δικτύου βάσει των αρχικών βαρών
- Σύγκριση επιθυμητής και υπολογισμένης εξόδου
- Υπολογισμός του σφάλματος και διάδοση του προς τα πίσω επίπεδα για την προσαρμογή των βαρών, σύμφωνα με την εξίσωση 4.7
- Ελαχιστοποίηση του συνολικού σφάλματος για το δείγμα εκπαίδευσης

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι την μείωση του σφάλματος κάτω από συγκεκριμένο όριο ή μέχρι να ολοκληρωθεί προκαθορισμένος κύκλος βημάτων. Ως συνθήκη τερματισμού μπορεί να οριστεί επίσης και η πάροδος ορισμένου χρονικού διαστήματος.

#### 4.7 Ικανότητα γενίκευσης

Ο όρος γενίκευση χρησιμοποιείται για να περιγράψει την ικανότητα του ΤΝΔ να αποδίδει εξίσου καλά και σε σετ δεδομένων στα οποία δεν έχει εκπαιδευτεί. Μετά τον κύκλο εκπαίδευσης του, το νευρωνικό δίκτυο θα πρέπει να επιτύχει συγκεκριμένους στόχους και σε πρότυπα που δεν είχαν χρησιμοποιηθεί ως δεδομένα.

Η ικανότητα γενίκευσης ενός δικτύου εξαρτάται από το μέγεθος των δειγμάτων εκπαίδευσης και από το κατά πόσο αυτά είναι αντιπροσωπευτικά του υπερχώρου από τον οποίο προέρχονται. Γενικώς, μεγάλο δείγμα μπορεί να οδηγήσει σε πολύ ικανοποιητική εκπαίδευση και γενίκευση. Θα πρέπει όμως να αποφευχθεί το φαινόμενο της υπερεκπαίδευσης, όπου το δίκτυο αναπαράγει πολύ καλά τις τιμές που του έχουν δοθεί, όμως αδυνατεί να προβλέψει νέα στοιχεία. Το ΤΝΔ στην ουσία ‘απομνημονεύει’ τα παραδείγματα εκπαίδευσης και παρουσιάζει μικρή ικανότητα γενίκευσης, διότι λόγω της μεγάλης του ευελιξίας, δημιουργεί σχέσεις περισσότερο πολύπλοκες απ’ ότι χρειάζεται για την προσομοίωση του φαινομένου ή του συστήματος που μελετάται.

Η εκπαίδευση και η γενίκευση είναι τα στοιχεία που διαφοροποιούν τόσο έντονα τα ΤΝΔ από τις κλασσικές μεθόδους μοντελοποίησης. Στην κλασική μοντελοποίηση, αρχικά σχεδιάζεται ένα μαθηματικό μοντέλο το οποίο βασίζεται στις σχέσεις που διέπουν το σύστημα που μελετάται και σε περιβαλλοντικές παρατηρήσεις. Το μοντέλο επαληθεύεται με την εισαγωγή πραγματικών δεδομένων, όπου αναμένονται συγκεκριμένες αποκρίσεις. Η δημιουργία όμως ενός ΤΝΔ βασίζεται απευθείας και αποκλειστικά σε πραγματικά δεδομένα. Κατά αντιστοιχία με τη διαδικασία της επαλήθευσης, στο ΤΝΔ εισάγονται δεδομένα ελέγχου για να κριθεί η ικανότητα γενίκευσης του.

#### 4.8 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Νευρωνικών δικτύων

Η παράλληλα κατανομημένη δομή των νευρωνικών δικτύων καθώς και η ικανότητα τους να εκπαιδεύονται και να αλληλοεπιδρούν με το περιβάλλον, τα καθιστά ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο στη μοντελοποίηση και τη βελτιστοποίηση πολύπλοκων προβλημάτων. Εντούτοις, λόγω του ιδιαίτερου τρόπου λειτουργίας τους, παρουσιάζουν κάποιες δυσκολίες.

##### Πλεονεκτήματα ΤΝΔ

Τα βασικά πλεονεκτήματα που χαρακτηρίζουν τη λειτουργία τους παρατίθενται παρακάτω (Γεωργούλη Α., 2015):

- **Μη γραμμικότητα.** Η ιδιότητα αυτή οφείλεται στο γεγονός πως ένα ΤΝΔ δομείται από τη σύνδεση των νευρώνων, οι οποίοι αποτελούν μη γραμμικές μονάδες επεξεργασίας.
- **Σχεδιασμός εισόδου - εξόδου.** Σε ένα τυπικό παράδειγμα μάθησης, στην επιβλεπόμενη μάθηση, περιέχεται η μεταβολή των συναπτικών βαρών ακολουθώντας ένα σύνολο παραδειγμάτων. Τα παραδείγματα αποτελούνται από μοναδικά σήματα εισόδου - αντίστοιχης επιθυμητής εξόδου. Η εκπαίδευση του δικτύου επαναλαμβάνεται για πολλά

παραδείγματα, μέχρι να επιτευχθεί σταθερή κατάσταση, όπου πλέον τα βάρη δε μεταβάλλονται.

- **Προσαρμοστικότητα.** Τα Νευρωνικά Δίκτυα έχουν τη δυνατότητα να προσαρμόζουν τα βάρη τους στις αλλαγές του περιβάλλοντός τους, επαναλαμβάνοντας απλώς την εκπαίδευσή τους με νέο σύνολο παραδειγμάτων που τους δίδεται από το μεταβαλλόμενο περιβάλλον.
- **Ικανότητα γενίκευσης.** Ένα Νευρωνικό Δίκτυο σχεδιάζεται για να παρέχει πληροφορίες όχι μόνο για το συγκεκριμένο υπόδειγμα που επιλέγεται αλλά και για οποιοδήποτε νέο σύνολο του παρουσιαστεί.
- **Συναφής Πληροφορία.** Η γνώση αναπαρίσταται από την πολύ καλά δομημένη και ενεργή κατάσταση του δικτύου.
- **Ανοχή σε σφάλματα.** Ένα ΤΝΔ υλοποιημένο σε hardware έχει τη σημαντική ιδιότητα να είναι “ανεκτικό σε σφάλματα”. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως αν μια σύνδεση ενδιάμεσου επιπέδου διαγραφεί ή ένα βάρος αλλοιωθεί, η λειτουργία το δικτύου δε θα επηρεαστεί γιατί το συνολικό μέσο σφάλμα δε θα μεταβληθεί σημαντικά.
- **Υλοποιησιμότητα σε VLSI.** Λόγω της συμπαγούς παράλληλης φύσης του ΤΝΔ, είναι δυνατή η υλοποίηση του σε VLSI (Very-Large-Scale Integration), τεχνολογία που το καθιστά κατάλληλο για να συμπεριληφθεί σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου.
- **Αναλογία με Νευροβιολογία.** Τα νευρωνικά δίκτυα αποτελούν αντικείμενο έρευνας για τους Νευροβιολόγους, με σκοπό την εξήγηση νευροβιολογικών φαινομένων. Η προσομοίωση αυτών των φαινομένων αποτελεί έμπνευση για τους μηχανικούς, οι οποίοι τη χρησιμοποιούν για την επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων.

#### Μειονεκτήματα ΤΝΔ

- Ο τρόπος της εσωτερικής λειτουργίας τους δε μπορεί να ερμηνευτεί καθώς συμπεριφέρονται σαν ‘μαύρα κουτιά’.
- Είναι ευαίσθητα στην υπερεκπαίδευση.
- Δεν υπάρχουν κανόνες που να υπαγορεύουν ποια είναι η κατάλληλη αρχιτεκτονική δικτύου για κάθε πρόβλημα, συνεπώς η διαδικασία δημιουργίας τους μπορεί να αποδειχθεί ιδιαίτερα δύσκολη και χρονοβόρα. Σημείο που χρήζει προσοχής είναι ο σωστός σχεδιασμός της αρχιτεκτονικής του δικτύου, προκειμένου να είναι κατάλληλο για το εκάστοτε πρόβλημα που εξετάζεται. Το μεγάλο πλεονέκτημα των ΤΝΔ, η ικανότητά τους να μοντελοποιούν πολύπλοκες μη γραμμικές διεργασίες χωρίς την παραδοχή ή τη γνώση των σχέσεων μεταξύ των μεταβλητών εισόδου και εξόδου, συνεπάγεται και απαίτηση για ενδελεχή αναζήτηση των παραμέτρων εκείνων που θα καταστήσουν το ΤΝΔ ικανό για την εύρεση λύσης στο πρόβλημα που του παρουσιάζεται.

#### 4.9 Εφαρμογές ΤΝΔ

Λόγω της ευκολίας υλοποίησης τους και της αξιόπιστης λειτουργίας τους, τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα, έχουν εφαρμοστεί σε ποικίλους τομείς. Οι εφαρμογές αυτές περιλαμβάνουν την αναγνώριση προτύπων, την επεξεργασία φωνής, τον υπολογισμό συναρτήσεων, την πρόβλεψη τιμών, την βελτιστοποίηση, τα συστήματα αυτόματου ελέγχου, την επεξεργασία σημάτων κ.α.

Στην Ιατρική έχουν χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή ακουστικών βοηθημάτων, για την ανάγνωση ακτινογραφιών, για την πρόβλεψη αντιδράσεων ασθενών σε φαρμακευτική αγωγή, για την ανάλυση καρκινικών κυττάρων και για τη διάγνωση ασθενειών, όπως η καρδιακή ανεπάρκεια και ο διαβήτης, βάσει χαρακτηριστικής συμπτωματολογίας. Στη Βιομηχανία, χρησιμοποιούνται για την αυτοματοποίηση των συστημάτων ελέγχου, για τον έλεγχο χημικών διεργασιών, για τον έλεγχο ποιότητας και τη ρύθμιση του ηλεκτρικού φορτίου. Στην Αεροπορία έχουν χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία αυτόματων πιλότων και προγραμμάτων προσομοίωσης πτήσης και στην ανίχνευση βλαβών σε τμήματα των αεροπλάνων. Οι Χρηματιστηριακές εφαρμογές περιλαμβάνουν την ανάλυση της αγοράς και την πρόβλεψη της τιμής των μετοχών, ενώ στις τράπεζες εφαρμόζονται για την αξιολόγηση αιτήσεων δανειοδότησης και την ανάγνωση επιταγών και διάφορων παραστατικών (Case 1993; Murphy et al., 1994; Καμπουρλάζος και Παπακώστας, 2015).

Νευρωνικά δίκτυα έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως και σε τομείς περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος, όπως είναι τα ανανεώσιμα ενεργειακά συστήματα, για παράδειγμα στον προγραμματισμό οικιακών ηλιακών θερμοσίφωνων, στον υπολογισμό της κατανάλωσης ενέργειας σε παθητικά ηλιακά συστήματα, για βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας σε διάφορες εγκαταστάσεις, όπως επίσης και σε φωτοβολταϊκά συστήματα για τον υπολογισμό του χρόνου της μέγιστης απόδοσης τους (Kalogirou, 2001). Επίσης, έχουν εφαρμοστεί σε πολλές περιπτώσεις για την πρόβλεψη της ηλιακής ακτινοβολίας σε περιοχές όπου δεν είναι δυνατή η διεξαγωγή μετρήσεων στους μετεωρολογικούς σταθμούς (Yadav et al., 2014). Πληθώρα εφαρμογών υπάρχουν και στον τομέα των συστημάτων αιολικής ενέργειας, όπου νευρωνικά δίκτυα έχουν χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη, την εύρεση του βέλτιστου σχεδιασμού και τον εντοπισμό σφαλμάτων (Marugán et. al., 2018). Στον τομέα της Γεωλογίας, ΤΝΔ έχουν αναπτυχθεί για τον εντοπισμό κοιτασμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου και για την ανάλυση πετρωμάτων. Επιπλέον, έχουν δώσει πολύ καλά αποτελέσματα και στην πρόβλεψη μετεωρολογικών δεδομένων, όπως η θερμοκρασία, η βροχόπτωση, η υγρασία και η πίεση του αέρα (Lin et al., 2018).

Τα νευρωνικά δίκτυα έχουν επίσης βρει ευρεία εφαρμογή και σε προβλήματα υδρολογίας τόσο επιφανειακών, όσο και υπόγειων υδάτων. Τα ΤΝΔ έχουν κριθεί ως πολύ αποτελεσματικά στην προσομοίωση της απορροής σε σχέση με την βροχόπτωση (Lin & Chen, 2008; Lin et al., 2009a; Lin et al., 2009b; Lin & Wu, 2009). Όσον αφορά τα υπόγεια ύδατα, παρουσιάζουν το πλεονέκτημα πως μπορούν να προσδιορίσουν την υδραυλική στάθμη χωρίς την ακριβή γνώση του συστήματος που μελετάται. Μπορούν να κάνουν χρήση μόνο των υδρολογικών δεδομένων χωρίς να είναι απαραίτητη η εισαγωγή των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών της περιοχής,



τα οποία είναι δύσκολο να προσδιοριστούν. Σε διάφορες εργασίες έχουν χρησιμοποιηθεί ως μεταβλητές εισόδου η θερμοκρασία, η βροχόπτωση και η στάθμη σε γειτονικά πηγάδια με σκοπό την πρόβλεψη της στάθμης σε συγκεκριμένα πηγάδια (Nayak et al., 2006, Corrola et al., 2005a, Lallahem et al., 2005, Taroglou et al., 2014a). Οι Ghose et al., 2018 ανέπτυξαν ένα ανατροφοδοτούμενο δίκτυο για τον υπολογισμό τους ύψους του υδροφορέα συναρτήσει μεταβλητών του υδατικού ισοζυγίου, δηλαδή της θερμοκρασίας, της εξατμισοδιαπνοής, της επιφανειακής απορροής, της βροχόπτωσης και τη υγρασίας. Επιπλέον, τα TND έχουν συνδυαστεί με γεωστατιστικές μεθόδους για τη χώρο-χρονική προσομοίωση της υδραυλικής στάθμης (Taroglou et al., 2014b). Ιδιαίτερα σε περιοχές με περίπλοκες υδρογεωλογικές συνθήκες, όπως οι καρστικοί υδροφορείς, όπου η μοντελοποίηση με μαθηματικά μοντέλα είναι δύσκολη, τα TND μπορούν να αποτελέσουν ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο (Trichakis et al., 2009; Trichakis et al., 2011). Τα TND έχουν χρησιμοποιηθεί και για τον προσδιορισμό του κατάλληλου ρυθμού άντλησης με σκοπό την αποφυγή της υπαλμύρισης υπόγειου υδροφορέα. Μάλιστα, σε εργασία των Banerjee et al., 2011, σε σύγκριση με το ευρέως χρησιμοποιούμενο μοντέλο SUTRA, το οποίο απαιτεί την είσοδο αρκετά περισσότερων μεταβλητών, το νευρωνικό δίκτυο πέτυχε πιο ικανοποιητική προσομοίωση.

Η μοντελοποίηση της ρύπανσης και της μεταφοράς μάζας σε υπόγειο νερό με χρήση TND, έχει μελετηθεί λιγότερο εκτενώς. Ωστόσο, έχει υπάρξει ένας αριθμός δημοσιευμένων εργασιών που ως στόχο είχαν την μοντελοποίηση της ρύπανσης σε υπόγειους υδροφορείς. Οι Tabach et al., 2007 ανέπτυξαν ένα TND για να μελετήσουν την εισροή DNAPL σε υπόγειο υδροφορέα, μετά από ατύχημα διαρροής σε οδικό άξονα. Ένα βελτιστοποιημένο μοντέλο TND παρουσιάστηκε για την πρόβλεψη της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου σε υπόγειο νερό (DO) από τους Wu et al., 2018. Οι Cho et al., 2011 σύγκριναν την απόδοση τεσσάρων διαφορετικών μοντέλων για την πρόβλεψη της συγκέντρωσης αρσενικού σε υπόγειο νερό τριών χωρών (Καμπότζη, Ταϊλάνδη και Λάος), όπου ως είσοδοι χρησιμοποιήθηκαν φυσικοχημικές παράμετροι του νερού, όπως το pH, η θερμοκρασία, το δυναμικό οξειδοαναγωγής, η ηλεκτρική αγωγιμότητα και τα ολικά διαλυμένα στερεά. Συμπέραναν πως ο συνδυασμός TND με τη μέθοδο ανάλυσης κυρίων συνιστωσών (PCA –principle component analysis) είναι ένα πολύ δυνατό εργαλείο για τη μοντελοποίηση της ρύπανσης σε υπόγειους υδροφορείς.

Όσον αφορά τη μοντελοποίηση της νιτρορύπανσης, διάφορες μελέτες έχουν παρουσιάσει νευρωνικά δίκτυα που χρησιμοποιούν ως μεταβλητές εισόδου, παραμέτρους ποιότητας του νερού ή μεταβλητές του υδατικού ισοζυγίου. Οι Wagh et al., 2018 ανέπτυξαν ένα απλό πολυστρωματικό back-propagation δίκτυο, στο οποίο εισήγαγαν το pH, τα ολικά διαλυμένα στερεά, την σκληρότητα, την ηλεκτρική αγωγιμότητα και απλές χημικές παραμέτρους ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  κ.α.) για την προσομοίωση του επιπέδου της νιτρορύπανσης. Σε άλλη μελέτη, στο μοντέλο εισήχθησαν οι τυπικές φυσικοχημικές παράμετροι ποιότητας του νερού, μαζί με το ρυθμό απορρόφησης νατρίου (Ostad-Ali-Askari et al., 2017). Πιο απλά μοντέλα, με παραμέτρους εισόδου το pH, τη θερμοκρασία, την ηλ. αγωγιμότητα και τη στάθμη του υδροφορέα, έχουν παρουσιάσει οι Yesilnacar et al., 2008 και οι Foddis et al., 2019. Μια διαφορετική προσέγγιση ακολούθησαν οι Al-Mahallawi et al., 2011, οι οποίοι χρησιμοποίησαν ως μεταβλητές εισόδου, τη

φόρτιση από νιτρικά σε αστικές και αγροτικές περιοχές, το βάθος και το μήκος του φίλτρου των πηγαδιών, το ρυθμό διήθησης, το ρυθμό άντλησης και το ποσοστό αστικής κάλυψης. Σε περίπτωση που είναι διαθέσιμες μεγάλες χρονοσειρές, τα νευρωνικά δίκτυα μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για μακροπρόθεσμη πρόβλεψη των συγκεντρώσεων νιτρικών σε υπόγεια νερά (Benzer et al., 2018). Ως είσοδοι στο μοντέλο έχουν επίσης προταθεί και τα χαρακτηριστικά του εδάφους (περιεχόμενο οργανικού άνθρακα, αργίλου και αζώτου) για τον υπολογισμό της χωρικής κατανομής της νιτρορύπανσης (Huang et al., 2011).

Τέλος, νευρωνικά δίκτυα έχουν αναπτυχθεί για τον εντοπισμό πιθανών πηγών ρύπανσης (Bashi-Azghadi et al., 2010; Foddiss et al., 2012), και έχουν αποδειχτεί ικανά ακόμα και σε περιπτώσεις έλλειψης δεδομένων (Singh & Datta 2007).

## 5 Τα ΤΝΔ στο Matlab

### 5.1 Εισαγωγή στο Matlab

Το MATLAB (Matrix Laboratory) αποτελεί μια γλώσσα προγραμματισμού υψηλού επιπέδου και ταυτόχρονα ένα διαδραστικό και εύχρηστο περιβάλλον για αριθμητικούς υπολογισμούς, ανάπτυξη αλγορίθμων, ανάλυση δεδομένων και γραφική παρουσίαση. Διαθέτει επίσης ένα σύνολο πρόσθετων εξειδικευμένων προγραμματιστικών λύσεων, τις εργαλειοθήκες (toolboxes), οι οποίες προορίζονται για την ανάπτυξη ειδικών εφαρμογών, όπως συμβολικοί υπολογισμοί (symbolic computation), επεξεργασία εικόνων (image processing), στατιστική (statistics), σχεδιασμός ελέγχου συστημάτων (control system design), ασαφή λογική (fuzzy logic) και βελτιστοποίηση (global optimization).

Βασική δομική μονάδα του MATLAB αποτελούν οι πίνακες, καθώς όλα τα δεδομένα αποθηκεύονται σε πίνακες, χωρίς αρχικές διαστάσεις. Ακόμα, το MATLAB παρέχει δυνατότητες προγραμματισμού στη δική του γλώσσα προγραμματισμού.

Τα βασικά χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος MATLAB είναι:

- Η επίλυση αριθμητικών προβλημάτων μικρού και μεσαίου μεγέθους, χωρίς προγραμματισμό στις κλασσικές γλώσσες προγραμματισμού
- Η γρήγορη ανάπτυξη αλγορίθμων ή οποία βασίζεται στο μεγάλο πλήθος έτοιμων συναρτήσεων και στην απλουστευμένη αλγοριθμική γλώσσα
- Η παρουσίαση αποτελεσμάτων σε γραφικό περιβάλλον

Όπως προαναφέρθηκε, το περιβάλλον του MATLAB υποστηρίζει ένα μεγάλο αριθμό εργαλειοθηκών, ανάμεσα στις οποίες διακρίνεται αυτή των νευρωνικών δικτύων. Η συγκεκριμένη βιβλιοθήκη αποτελεί ένα πολύ εύχρηστο εργαλείο, καθώς επιτρέπει τη χρήση γραφικών εργαλείων για την εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων και παρέχει έτοιμες δομές για το σχεδιασμό τους, απλοποιώντας κατά πολύ τη διαδικασία των πολύπλοκων υπολογισμών. Παράλληλα, υπάρχει η δυνατότητα προσαρμογής του toolbox για τη δημιουργία ενός εξειδικευμένου ΤΝΔ, κατάλληλου για το εκάστοτε πρόβλημα που εξετάζεται, διατηρώντας όμως τη λειτουργικότητα της έτοιμης εργαλειοθήκης.

Για τη δημιουργία ενός νευρωνικού δικτύου, ο χρήστης έχει επίσης τη δυνατότητα επίσης να γράψει ένα δικό του κώδικα στο παράθυρο εντολών του MATLAB (script), χρησιμοποιώντας έτοιμες εντολές της.

### 5.2 Εργαλειοθήκη του Matlab για τα ΤΝΔ

Το εργαλείο των νευρωνικών δικτύων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση προβλημάτων προσαρμογής καμπυλών (function fitting), την αναγνώριση προτύπων (pattern recognition), την ομαδοποίηση δεδομένων (data clusterring) και την ανάλυση χρονοσειρών (time series analysis).

Σύμφωνα με τη μέθοδο που χρησιμοποιείται για την εκπαίδευση τους, τα ΤΝΔ διακρίνονται, όπως έχει προαναφερθεί, σε δύο βασικές κατηγορίες. Στα επιβλεπόμενα Νευρωνικά Δίκτυα και στα μη Επιβλεπόμενα. Η εργαλειοθήκη της Matlab υποστηρίζει και τις δύο μεθόδους και τις διάφορες αρχιτεκτονικές δικτύων που αντιστοιχούν στην καθεμία.

Όσον αφορά τα επιβλεπόμενα νευρωνικά δίκτυα, που είναι και το δίκτυο που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία, οι αρχιτεκτονικές που υποστηρίζονται είναι οι εξής:

- **Δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης (feed-forward networks).** Τα δεδομένα στα συγκεκριμένα δίκτυα ρέουν αυστηρά από τις μονάδες εισόδου προς τις μονάδες εξόδου. Συνήθως χρησιμοποιούνται για προβλέψεις μελλοντικών καταστάσεων, αναγνώριση προτύπων και την προσαρμογή μη γραμμικών συναρτήσεων. Διάφορα είδη δικτύων προώθησης που υποστηρίζονται από την εργαλειοθήκη της Matlab είναι τα δίκτυα προώθησης με ανάδραση (back-propagation), τα σειριακά δίκτυα προώθησης με ανάδραση (cascade-forward), τα δίκτυα προώθησης με ανάδραση και επιβράδυνση εισόδου (feedforward input-delay), τα γραμμικά δίκτυα (linear) και τα δίκτυα perceptron.
- **Δίκτυα ακτινικής συνάρτησης βάσης (radial basis networks).** Τα δίκτυα αυτά παρέχουν μία εναλλακτική και γρήγορη μέθοδο για το σχεδιασμό feedforward δικτύων. Περιλαμβάνουν τις αρχιτεκτονικές των δικτύων γενικευμένης παλινδρόμησης (generalized regression) και στοχαστικών Νευρωνικών Δικτύων (probabilistic neural networks).
- **Δίκτυα ανατροφοδότησης (recurrent networks).** Χρησιμοποιούν την ανάδραση για να αναγνωρίζουν χωρικά και χρονικά μεταβαλλόμενα πρότυπα. Δίκτυα τέτοιου τύπου που υποστηρίζει το Matlab είναι τα δίκτυα Elman και Hopfield.
- **Δίκτυα κβαντοποίησης των δεδομένων κατά την εκμάθηση (Learning vector quantization (LVQ)).** Αποτελεί μια μέθοδο για την κατηγοριοποίηση προτύπων που δεν είναι δυνατόν να αναλυθούν με γραμμικές μεθόδους.

Οι αρχιτεκτονικές που υποστηρίζονται για μη επιβλεπόμενα νευρωνικά δίκτυα είναι οι εξής:

- **Δίκτυα ανταγωνιστικών στρωμάτων (competitive layers).** Τα δίκτυα αυτά αναγνωρίζουν και ομαδοποιούν τα παρεμφερή διανύσματα εισόδου των δεδομένων. Χρησιμοποιώντας τις ομάδες αυτές το δίκτυο αυτόματα ταξινομεί τις εισόδους του σε κατηγορίες.
- **Δίκτυα αυτορυθμιζόμενων «χαρτών» (self-organizing maps).** Τα διανύσματα εισόδου του δικτύου ταξινομούνται βάσει της ομοιότητάς τους. Αντίθετα με τον τύπο των ανταγωνιστικών στρωμάτων, μπορεί να διατηρεί την διαμόρφωση των διανυσμάτων εισόδου του δικτύου, εκχωρώντας τα παρόμοια διανύσματα εισόδου σε αντίστοιχες κατηγορίες τους.

Οι υποστηριζόμενες από τη Matlab συναρτήσεις για εκπαίδευση (training) και εκμάθηση (learning) των Νευρωνικών Δικτύων είναι μαθηματικές διαδικασίες που χρησιμοποιούνται για να ρυθμίζουν αυτόματα τα συναπτικά βάρη και τις πολώσεις του δικτύου, χρησιμοποιώντας

έναν γενικό αλγόριθμο. Οι συναρτήσεις εκμάθησης μπορούν να εφαρμοστούν και σε ξεχωριστά συναπτικά βάρη και πολώσεις μέσα σε ένα δίκτυο.

Οι υποστηριζόμενες **συναρτήσεις εκπαίδευσης (training functions)** είναι οι παρακάτω (Matlab users' guide):

- **traincgb** – Powell-Beale με σύζευξη συντελεστή και ανάδραση
- **trainb** – Εκπαίδευση σε δεσμίδες δεδομένων με κανόνες εκμάθησης των συναπτικών βαρών και πολώσεων (batch training with weight and bias learning rules)
- **trainbfg** – BFGS quasi-Newton συνάρτηση εκπαίδευσης με ανάδραση (backpropagation)
- **trainbr** – Μπαεσιανή ομαλοποίηση (Bayesian regularization)
- **trainc** – Κυκλικής διαδοχής αυξητική ενημέρωση (cyclical order incremental update)
- **traincgbf** – Fletcher-Powell με σύζευξη συντελεστή και ανάδραση
- **traincgp** – Polak-Ribiere με σύζευξη συντελεστή και ανάδραση
- **traingd** – Ελαττούμενος συντελεστής και ανάδραση
- **traingda** – Ελαττούμενος συντελεστής με προσαρμόσιμο ρυθμό εκμάθησης και ανάδραση
- **traingdm** – Ελαττούμενος συντελεστής με ορμή και ανάδραση
- **traingdx** – Ελαττούμενος συντελεστής με ορμή & προσαρμόσιμη γραμμική ανάδραση
- **trainlm** – Levenberg-Marquardt ανάδραση
- **trainoss** – Αντίστροφου συνημίτονου με μοναδιαίο βήμα ανάδραση
- **trainr** – Τυχαίας σειράς αυξητική ενημέρωση
- **trainrnp** – Ελαστική ανάδραση (resilient backpropagation (Rprop))
- **train** – Σειριακή αυξητική ενημέρωση
- **trainscg** – Κλιμακωτή σύζευξη συντελεστή και ανάδραση

Οι υποστηριζόμενες **συναρτήσεις εκμάθησης (training functions)** είναι οι:

- **learncon** – Συνάρτηση εκμάθησης των πολώσεων με «συνείδηση»
- **learnngd** – Ελαττούμενου συντελεστή βάρους/πόλωσης συνάρτηση εκμάθησης
- **learnngdm** – Ελαττούμενου συντελεστή με ορμή βάρους/πόλωσης συνάρτηση εκμάθησης
- **learnh** – Συνάρτηση εκμάθησης Hebb
- **learnhhd** – Hebb με εξασθένιση των βαρών κανόνας εκμάθησης
- **learnis** – Συνάρτηση εκμάθησης των βαρών με ενδιάμεσες φάσεις
- **learnk** – Kohonen συνάρτηση εκμάθησης των βαρών
- **learnlv1** – LVQ1 συνάρτηση εκμάθησης των βαρών
- **learnlv2** – LVQ2 συνάρτηση εκμάθησης των βαρών
- **learnos** – Outstar συνάρτηση εκμάθησης των βαρών
- **learnp** – Perceptron συνάρτηση εκμάθησης των βαρών και των πολώσεων
- **learnpn** – Κανονικοποιημένη perceptron συνάρτηση εκμάθησης των βαρών και των πολώσεων
- **learnsom** – Συνάρτηση εκμάθησης αυτορυθμιζόμενων «χαρτών»

- **learnwh** – Widrow-Hoff κανόνας εκμάθησης των βαρών και των πολώσεων

### 5.3 Βελτιστοποίηση της Ικανότητας Γενίκευσης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, μετά την εκπαίδευση ακολουθεί η φάση της γενίκευσης (generalization), κατά την οποία το δίκτυο δίνει αποτελέσματα για νέα διανύσματα εισόδου, με τα οποία δεν έχει εκπαιδευτεί. Το Matlab παρέχει τη δυνατότητα της αποφυγής της υπερεκπαίδευσης (overfitting) με την βελτιστοποίηση της γενίκευσης χρησιμοποιώντας λύσεις, οι οποίες βασίζονται σε διαφορετικούς αλγόριθμους εκπαίδευσης. Αυτές που χρησιμοποιούνται συνηθέστερα και έχουν αποδειχθεί αρκετά ικανές σε διάφορα προβλήματα είναι οι ακόλουθες (Kaygi, 2016):

- Η λύση μέσω της **κανονικοποίησης (regularization)**, κατά την οποία ως συνάρτηση σφάλματος του δικτύου ενεργοποιείται η msereg. Στη συγκεκριμένη αντικειμενική συνάρτηση, που πρέπει να ελαχιστοποιηθεί η τιμή της, λαμβάνεται υπόψιν και το μέγεθος των αλλαγών στα συναπτικά βάρη (weights), εκτός από το σφάλμα των ελαχίστων τετραγώνων (mse) και προστίθεται επίσης ένας όρος 'πέναλτι' σε περίπτωση μεγάλης αλλαγής στα βάρη του δικτύου. Με τον τρόπο αυτόν επιτυγχάνονται ταυτόχρονα ελαχιστοποίηση του σφάλματος μεταξύ προσομοιωμένης τιμής και επιθυμητής εξόδου, και κανονικοποιημένες αλλαγές στα βάρη, για την αποφυγή της υπερεκπαίδευσης.
- Η λύση μέσω του «**ξαφνικού τέλους**» (**early stopping**), κατά την οποία χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικές ομάδες δεδομένων για την εκπαίδευση του δικτύου. Η μία ομάδα χρησιμοποιείται για την εκπαίδευση του δικτύου (training set), όπου αλλάζουν τα συναπτικά βάρη και οι πολώσεις του δικτύου, και η άλλη χρησιμοποιείται για να διακόπτεται η διαδικασία της εκπαίδευσης, όταν στο δίκτυο ξεκινά να παρουσιάζεται υπερεκπαίδευση. Η επίδοση του δικτύου αξιολογείται, βάσει του mse της δεύτερης ομάδας (validation set).

### 5.4 Αλγόριθμοι εκπαίδευσης Levenberg – Marquardt και Bayesian Regularization

Οι δύο αλγόριθμοι εκπαίδευσης που μελετήθηκαν για την κατασκευή του νευρωνικού δικτύου ήταν ο Levenberg-Marquardt και ο Bayesian Regularization.

#### Levenberg – Marquardt

Ο αλγόριθμος αυτός είναι από τους γρηγορότερους που προσφέρεται στο Toolbox, απαιτεί όμως περισσότερη μνήμη σε σχέση με τους υπόλοιπους. Συνδυάζει 2 διαφορετικούς αλγορίθμους βελτιστοποίησης, τον αλγόριθμο gradient descent (που είναι γνωστός και ως error backpropagation (EBP), αφού χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο στο συγκεκριμένο δίκτυο) και τον αλγόριθμο Gauss-Newton. Ο EBP είναι ιδιαίτερα δημοφιλής, λόγω της σταθερότητας που παρουσιάζει. Ωστόσο, έχει το μειονέκτημα ότι συγκλίνει σε ακρότατο της συνάρτησης που εξετάζει, με αρκετά χαμηλή ταχύτητα. Αντιθέτως, ο αλγόριθμος Gauss-Newton, ενώ συγκλίνει γρήγορα, χαρακτηρίζεται από αστάθεια. Ο αλγόριθμος Levenberg-Marquardt με τον κατάλληλο

συνδυασμό αυτών των δύο αλγορίθμων, παρουσιάζει σταθερότητα με γρήγορη ταχύτητα σύγκλισης (Haykin, 1999). Ο αλγόριθμος Levenberg-Marquardt προσεγγίζει μια περιοχή καμπυλότητας βάσει του αλγόριθμου EBP και μετά από ορισμένα βήματα σύγκλισης, όπου η καμπυλότητα είναι σε θέση τετραγωνικής προσέγγισης, λειτουργεί σύμφωνα με τον αλγόριθμο Gauss-Newton, επιταχύνοντας τη διαδικασία της σύγκλισης. Η συνάρτηση υπολογισμού των βαρών σύμφωνα με την εκπαίδευση Levenberg-Marquardt αναπαρίσταται από την σχέση 5.1:

$$w_{i+1} = w_i - [J^T J + \mu I]^{-1} J^T e \quad (5.1)$$

Όπου:

**J**: ο ιακωβιανός πίνακας που περιέχει τις πρώτες παραγώγους των σφαλμάτων του δικτύου ως προς τα βάρη και τις πολώσεις. Ο ιακωβιανός πίνακας υπολογίζεται πιο γρήγορα από τον εσσιανό (Hess) που χρησιμοποιείται σε άλλους αλγόριθμους βελτιστοποίησης, όμως έχει υψηλές απαιτήσεις σε μνήμη.

**e**: το διάνυσμα των σφαλμάτων του δικτύου

**μ**: μια θετική παράμετρος, που λαμβάνει τιμές σύμφωνα με την αύξηση ή τη μείωση των σφαλμάτων της εκπαίδευσης

**w**: το διάνυσμα των βαρών

**I**: ο μοναδιαίος πίνακας

Για  $\mu=0$  ο αλγόριθμός είναι ο Gauss-Newton, ενώ για μεγάλη τιμή  $\mu$ , ακολουθείται η διαδικασία της gradient descent με μικρό βήμα. Έτσι, σε περίπτωση που το σφάλμα σε μία επανάληψη μειωθεί, μειώνεται ο συντελεστής  $\mu$  και συνεπώς η επίδραση του EBP είναι μικρότερη και ξεκινάει η τετραγωνική προσέγγιση (Matlab users' guide, 2004). Κατά την εκπαίδευση με τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

1. Αρχικοποίηση των βαρών και εκτίμηση του σφάλματος.
2. Ενημέρωση των βαρών σύμφωνα με την σχέση 5.1.
3. Εκτίμηση του σφάλματος βάσει των νέων βαρών.
4. Στην περίπτωση που το νέο σφάλμα αυξηθεί λόγω της ενημέρωσης των βαρών, τότε η ενημέρωση των βαρών ακυρώνεται και ο συντελεστής  $\mu$  πολλαπλασιάζεται με κάποιον παράγοντα που σχετίζεται με το μέγεθος των σφαλμάτων. Στην περίπτωση που το νέο σφάλμα μειωθεί, τότε η τελευταία ενημέρωση των βαρών επικυρώνεται και ο συντελεστής  $\mu$  διαιρείται με τον ίδιο παράγοντα που χρησιμοποιείται και στην περίπτωση αύξησης του σφάλματος. Επιστροφή στο βήμα 2.



Η διαδικασία τερματίζεται αν το σφάλμα γίνει μικρότερο από ορισμένη τιμή ή αν ολοκληρωθεί ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων που έχει ορισθεί (ή το μέγιστο χρονικό διάστημα). Επιπλέον, η διαδικασία μπορεί να τελειώσει σε περίπτωση που ο παράγοντας  $\mu$ , ξεπεράσει κάποιο όριο, γεγονός που θα δείχνει πως η ενημέρωση των βαρών δεν βελτιώνει τα σφάλματα του δικτύου, και συνεπώς δε γίνεται να επιτευχθεί σύγκλιση.

Ο αλγόριθμος `trainlm` στο Matlab χρησιμοποιεί τη μέθοδο «early stopping» για τη βελτιστοποίηση της γενίκευσης του δικτύου, αξιοποιώντας ένα ποσοστό από τα δείγματα της εκπαίδευσης.

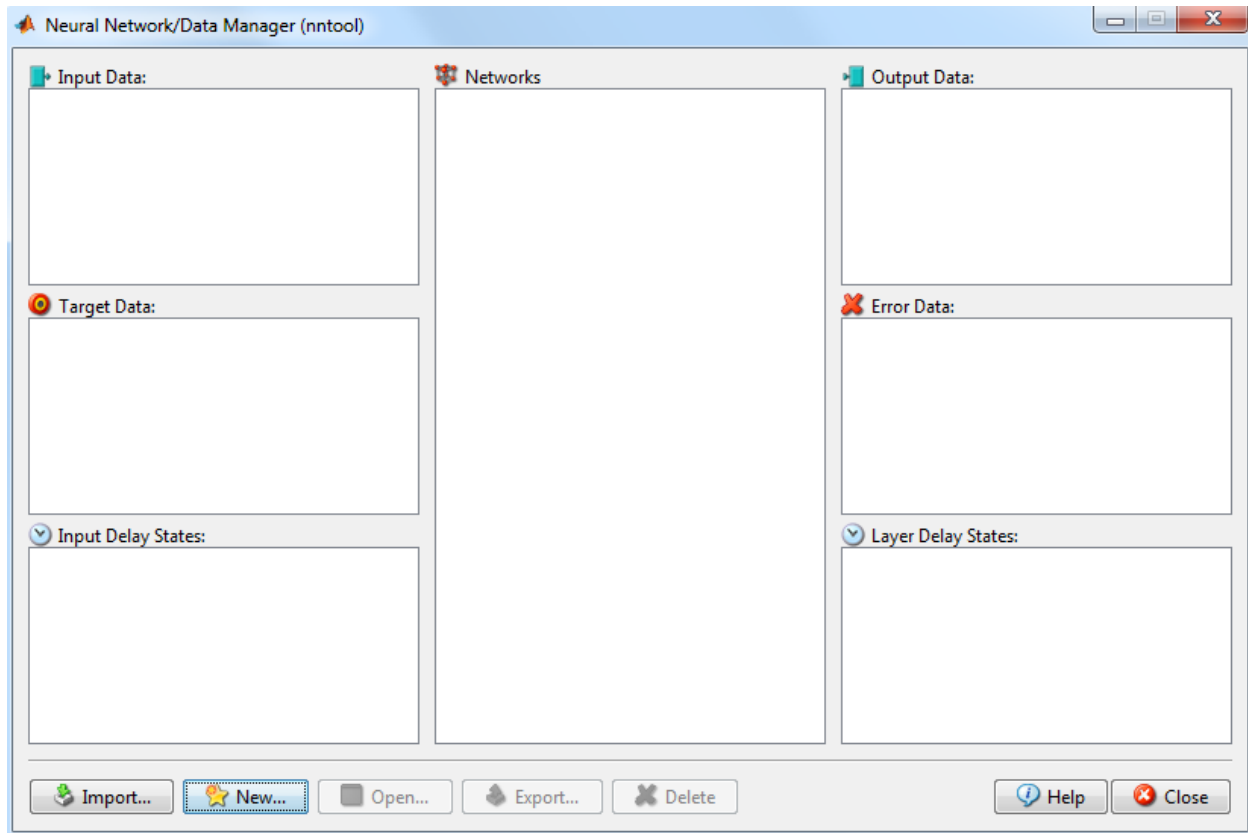
#### Bayesian Regularization

Κατά την εκπαίδευση μέσω του της Bayesian Regularization, ενεργοποιείται και πάλι ο αλγόριθμος Levenberg-Marquardt. Σε αυτήν την περίπτωση όμως ελαχιστοποιείται ένας γραμμικός συνδυασμός των τετραγωνικών σφαλμάτων και των συναπτικών βαρών του δικτύου (Kaygi, 2016). Όπως έχει προαναφερθεί, στη συνάρτηση προστίθεται ένας όρος που λαμβάνει υψηλή τιμή, όταν παρουσιάζεται μεγάλη αλλαγή στα βάρη. Με τον τρόπο αυτό, αν παρατηρηθεί απότομη αλλαγή στα συναπτικά βάρη, η αντικειμενική συνάρτηση θα λάβει υψηλή τιμή και θα κριθεί ως ακατάλληλη. Στο τέλος, επιλέγεται ένας κατάλληλος συνδυασμός, έτσι ώστε να παράγεται ένα δίκτυο που έχει παρουσιάσει καλά αποτελέσματα κατά την εκπαίδευση, αλλά παράλληλα και καλή ικανότητα γενίκευσης. Επειδή η Bayesian regularization δεν απαιτεί τη χρήση μέρους των δεδομένων ως validation set, έχει δειχθεί ως κατάλληλη μέθοδος εκπαίδευσης σε περίπτωση μικρού μεγέθους δεδομένων εισόδου (Matlab users' guide, 2004).

Κριτήρια τερματισμού σε αυτήν την περίπτωση είναι η ολοκλήρωση του μέγιστου αριθμού επαναλήψεων που έχει ορισθεί, το μέγιστο χρονικό διάστημα ή η μεγάλη αύξηση του παράγοντα  $\mu$ .

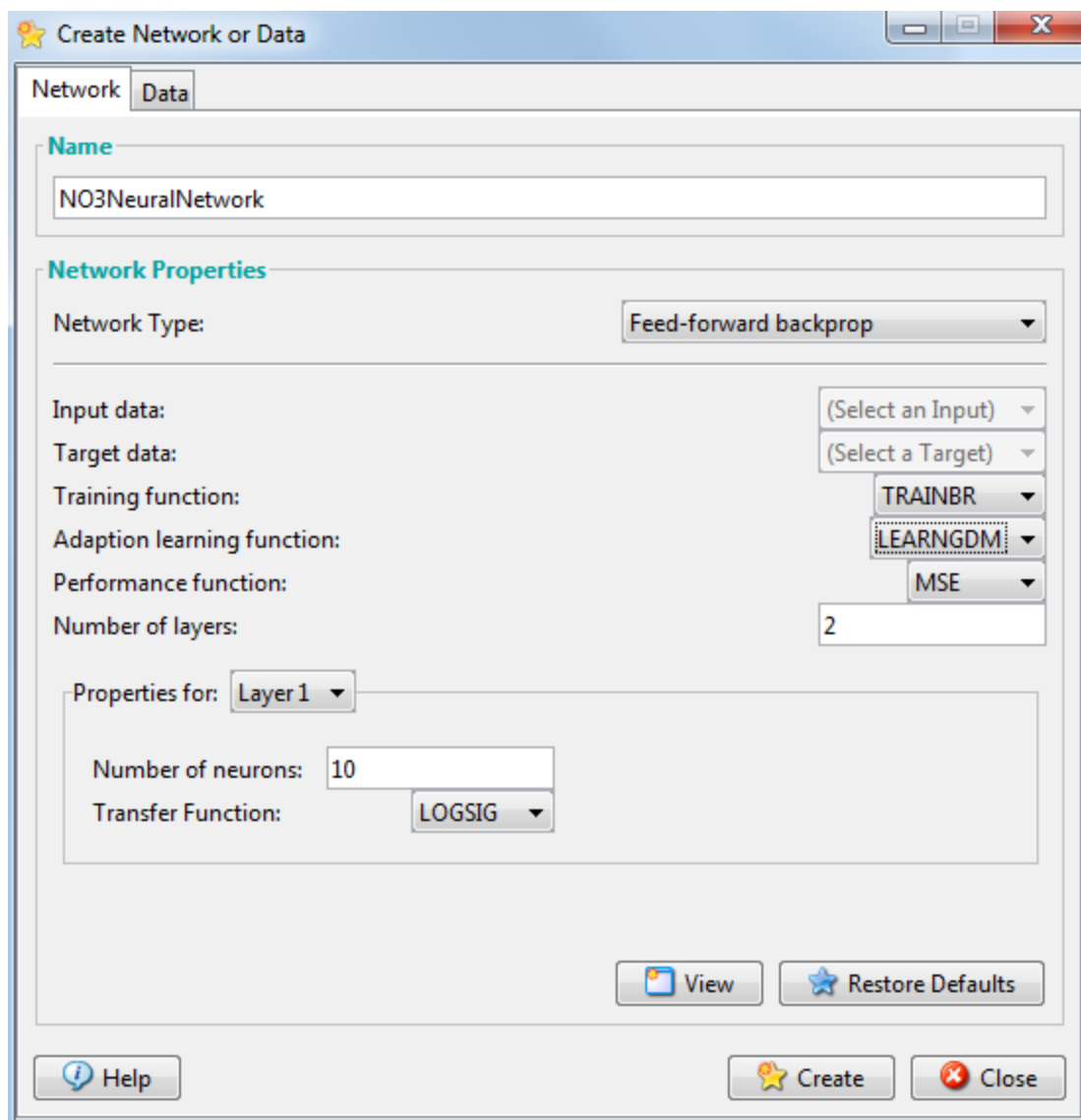
#### 5.5 Δημιουργία TNN

Από το command window (παράθυρο εντολών) του Matlab, μπορεί να καλεστεί οποιαδήποτε υπολογιστική μέθοδος, γράφοντας τη σύντμηση του ονόματος της. Έτσι, στη συγκεκριμένη περίπτωση που το επιθυμητό εργαλείο είναι τα νευρωνικά δίκτυα, μέσω της εντολής «`nntool`» ανοίγει το παρακάτω παράθυρο διαλόγου:



Εικόνα 5.1: Εργαλείο δημιουργίας νευρωνικού δικτύου στο Matlab.

Από την επιλογή New, ο χρήστης μπορεί να καθορίσει την αρχιτεκτονική του δικτύου που θέλει να δημιουργήσει, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.2.



Εικόνα 5.2: Επιλογή αρχιτεκτονικής του νευρωνικού δικτύου

Στο συγκεκριμένο παράθυρο, δηλώνονται τα δεδομένα εισόδου (input data), οι επιθυμητές έξοδοι (target data) και ο τύπος του δικτύου (network type). Επιπλέον καθορίζονται οι συναρτήσεις εκμάθησης και εκπαίδευσης (adaption learning και training function) και το κριτήριο τερματισμού της διαδικασίας (performance function). Τέλος, εισάγονται ο αριθμός των κρυφών επιπέδων και ο αριθμός των κόμβων και οι συναρτήσεις μεταφοράς ανά επίπεδο.

## 6 Ανάπτυξη νευρωνικών δικτύων – Ανάλυση αποτελεσμάτων

Όπως έχει προαναφερθεί κατασκευάστηκαν τρία νευρωνικά δίκτυα. Για κάθε δίκτυο έγιναν δοκιμές για την εύρεση της κατάλληλης αρχιτεκτονικής, με σκοπό την απόδοση των βέλτιστων αποτελεσμάτων. Κριτήρια για την επιλογή της αρχιτεκτονικής του δικτύου αρχικά ήταν η επίτευξη ικανοποιητικής προσομοίωσης, βάσει του δείκτη R, και ο χρόνος εκτέλεσης του κάθε αλγόριθμου. Καθώς όμως ο χρόνος που απαιτούνταν ήταν σύντομος για όλα τα δίκτυα, η επιλογή βασίστηκε μόνο στο δείκτη R. Για κάθε μοντέλο που έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα, υπολογίστηκαν επιπλέον δείκτες για την περαιτέρω αξιολόγηση της απόδοσης τους. Οι δείκτες αυτοί χρησιμοποιούνται στη στατιστική ανάλυση για την εκτίμηση της ικανότητας ενός μοντέλου να αναπαράγει τις επιθυμητές τιμές. Οι δείκτες που λήφθηκαν υπόψιν είναι οι κάτωθι (Matiatos et al., 2014):

- **R:** Ο συντελεστής συσχέτισης Pearson υπολογίζεται από τη σχέση 6.1:

$$R = \frac{S_{simobs}}{S_{sim} \cdot S_{obs}} = \frac{\sum_{i=1}^n (sim_i - \overline{sim}) \cdot (obs_i - \overline{obs})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (sim_i - \overline{sim})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (obs_i - \overline{obs})^2}} \quad (6.1)$$

Ο δείκτης R χρησιμοποιείται για τη διερεύνηση της σχέσης μεταξύ δύο παραμέτρων. Για τιμή  $R = \pm 1$  οι πραγματικές με τις εκτιμημένες τιμές έχουν τέλεια γραμμική σχέση, ενώ για τιμή R στο διάστημα  $(-0.3, 0.3)$ , δεν υπάρχει γραμμική σχέση.

- **MAE (MEAN ABSOLUTE ERROR):** Το μέσο απόλυτο σφάλμα μεταξύ προσομοιωμένης και πραγματικής τιμής.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |sim_i - obs_i| \quad (6.2)$$

- **RMSE (ROOT MEAN SQUARE ERROR):** Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα, που δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (sim_i - obs_i)^2} \quad (6.3)$$

Ο δείκτης RMSE σε σχέση με τον MAE δίνει πληροφορία για την ύπαρξη ακραίων τιμών σφαλμάτων στο δείγμα.

- **Bias:** Η μέση απόκλιση μεταξύ πραγματικής και προσομοιωμένης τιμής. Ο συγκεκριμένος δείκτης μπορεί να πάρει αρνητικές ή θετικές τιμές, δίνοντας έτσι πληροφορίες για την τάση του μοντέλου να υπερεκτιμάει ή να υποεκτιμάει τα πραγματικά δεδομένα.

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (sim_i - obs_i) \quad (6.4)$$

- **NSE** (Nash-Sutcliffe Model Efficiency): Ο συγκεκριμένος δείκτης αποτελεί μέτρο της σχέσης μεταξύ των σφαλμάτων του μοντέλου και της μεταβλητότητας των πραγματικών τιμών και εφαρμόζεται πολύ συχνά στην υδρολογία. Ο δείκτης NSE λαμβάνει τιμές στο εύρος  $(-\infty, 1]$ . Τιμές κοντά στη τιμή 1 υποδεικνύουν υψηλή ακρίβεια του μοντέλου, ενώ τιμές κοντά στο 0 υποδεικνύουν πως το μοντέλο δεν παράγει καλύτερα αποτελέσματα από το να λαμβάνονταν υπόψιν απλά η μέση τιμή του δείγματος. Συγκεκριμένα για τιμές:
  - $NSE = 1$ : υπάρχει τέλεια συσχέτιση μεταξύ προσομοιωμένων και πραγματικών τιμών
  - $NSE = 0$ : το μοντέλο έχει την ίδια ακρίβεια με τη χρήση της μέσης τιμής των πραγματικών τιμών
  - $-\infty < NSE < 0$ : είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί η μέση τιμή του δείγματος σε σχέση με τις προβλέψεις του μοντέλου

Υπολογίζεται από τη σχέση 6.5:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (obs_i - sim_i)^2}{\sum_{i=1}^n (obs_i - \overline{obs})^2} \quad (6.5)$$

Για όλους τους παραπάνω δείκτες ισχύει:

**n:** ο αριθμός των δειγμάτων,

**obs:** οι παρατηρημένες τιμές,

**sim:** οι προσομοιωμένες από το μοντέλο τιμές,

$\overline{obs}$ : η μέση τιμή των πραγματικών δεδομένων,

$\overline{sim}$ : η μέση τιμή των προσομοιωμένων τιμών.

Ανάλογα με το μέγεθος των δειγμάτων για τον υπολογισμό του δείκτη NSE και το μοντέλο που μελετάται, έχουν προταθεί τιμές πάνω από τις οποίες η ακρίβεια του μοντέλου θεωρείται ικανοποιητική. Θετικές τιμές, ακόμα και χαμηλές θεωρούνται αποδεκτές, ενώ για τιμές  $>0.5$  ή  $>0.65$  το μοντέλο θεωρείται καλής ακρίβειας (Moriasi et al., 2007).

Και για τα τρία νευρωνικά δίκτυα οι δείκτες υπολογίστηκαν για το σύνολο των δεδομένων και για τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την επαλήθευση χωριστά, με σκοπό την καλύτερη αξιολόγηση των μοντέλων.

Σε όλα τα δίκτυα παρατηρήθηκε πως σε κάποιες περιπτώσεις χαμηλών συγκεντρώσεων (5 mg/l), κατά την προσομοίωση το μοντέλο δίνει αρνητικές τιμές. Κατά την κατασκευή του μοντέλου το φαινόμενο αυτό δε μπορεί να αποφευχθεί. Παρόλο που οι τιμές αυτές δεν έχουν φυσική σημασία, η απόκλιση από την πραγματική τιμή είναι μικρή και το φαινόμενο παρατηρείται στις χαμηλές συγκεντρώσεις, όπου το μοντέλο έχει μία τάση να υποεκτιμά τις τιμές, οπότε δεν αξιολογείται ως πρόβλημα. Για το λόγο αυτόν, ο κώδικας που δημιουργήθηκε τροποποιήθηκε, ώστε στην περίπτωση που το δίκτυο υπολογίζει αρνητική τιμή, αυτή να αντικαθίσταται από την τιμή 0.

Οι κώδικες του κάθε μοντέλου παρατίθενται στο παράρτημα Α.

## 6.1 1<sup>ο</sup> Νευρωνικό Δίκτυο

### 6.1.1 Δεδομένα εισόδου

Από μελέτη του ΙΓΜΕ του 2008 για το Νομό Βοιωτίας συλλέχθηκαν δεδομένα που αφορούσαν σε μετρήσεις πεδίου, όπως θερμοκρασία νερού και αέρα, pH, ηλεκτρική αγωγιμότητα και ύψος νερού, και εργαστηριακές μετρήσεις χημικών παραμέτρων, όπως κύρια ιόντα και ιχνοστοιχεία. Από τα διαθέσιμα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν μόνο αυτά που ήταν πλήρη ως προς τις παραμέτρους που επιλέχθηκαν για την κατασκευή του μοντέλου, δηλαδή τα εύκολα μετρήσιμα στο πεδίο. Αυτά είναι το pH, η ηλεκτρική αγωγιμότητα, η θερμοκρασία του νερού, η θερμοκρασία του αέρα, το ύψος του υδροφορέα στη συγκεκριμένη γεώτρηση καθώς επίσης και οι συντεταγμένες της εκάστοτε γεώτρησης. Με τον τρόπο αυτό στο μοντέλο εισάγονται παράμετροι που πιστεύεται ότι επηρεάζουν, σε διαφορετικό βαθμό η καθεμία, τα επίπεδα της νιτρορύπανσης, όπως αναλύθηκε στο υποκεφάλαιο 2.3 (κλίμα, υδρογεωλογικό καθεστώς κτλ).

Με την εισαγωγή των συντεταγμένων της κάθε γεώτρησης, πιθανότατα ενσωματώνεται η πληροφορία για τα σταθερά χαρακτηριστικά του εδάφους, τα οποία είναι δύσκολο να προσδιοριστούν. Η θερμοκρασία του αέρα σχετίζεται με τις κλιματικές συνθήκες, το pH, η

ηλεκτρική αγωγιμότητα και η θερμοκρασία του νερού εκφράζουν τις συνθήκες του υπόγειου υδροφορέα, οι οποίες επηρεάζουν τις διαδικασίες μετατροπής των νιτρικών. Τέλος, το ύψος του υδροφορέα σχετίζεται με τις κλιματικές συνθήκες και τη διαδικασία μεταφοράς των  $\text{NO}_3^-$ .

Για τις μεταβλητές εισόδου υπολογίστηκε ο συντελεστής συσχέτισης Pearson, σε σχέση με τη συγκέντρωση των νιτρικών. Όπως προαναφέρθηκε ο εν λόγω συντελεστής χρησιμοποιείται σε στατιστικές αναλύσεις με σκοπό τον υπολογισμό της γραμμικής συσχέτισης μεταξύ δύο μεταβλητών.

Πίνακας 6.1. Συντελεστής συσχέτισης μεταβλητών (μετρήσεις πεδίου)

Μεταβλητή εισόδου	pH	Ηλεκτρική Αγωγιμότητα	Θερμοκρασία νερού	Θερμοκρασία Αέρα	Στάθμη νερού
R	-0.02	0.182313	0.160094	0.077361	0.120475

Παρατηρείται πως μεταξύ όλων των μεταβλητών και των συγκεντρώσεων των νιτρικών δεν υπάρχει γραμμική συσχέτιση, γεγονός που υποδηλώνει πως οι σχέσεις που διέπουν το φυσικό σύστημα είναι ιδιαίτερα περίπλοκες. Το γεγονός πως οι συσχετίσεις δεν είναι υψηλές είναι σημαντικό, καθώς το δίκτυο τείνει να δίνει βαρύτητα σε παραμέτρους με υψηλή συσχέτιση, υποτιμώντας τις υπόλοιπες. Λόγω των χαμηλών συσχετίσεων το δίκτυο οδηγείται στην αναζήτηση των βαθύτερων σχέσεων των μεταβλητών, περιγράφοντας έτσι καλύτερα το πρόβλημα που μελετάται. Για το λόγο αυτό το μοντέλο πιθανά οδηγεί σε μικρότερη απόκλιση μεταξύ παρατηρούμενης και προσομοιωμένης τιμής (Trichakis et al., 2009).

Για κάθε γεώτρηση, εισάγονται στο Matlab τα διανύσματα με τα επιλεγμένα δεδομένα μαζί με τις αντίστοιχες επιθυμητές εξόδους (target output vector), δηλαδή τη συγκέντρωση των νιτρικών. Τα διανύσματα εισόδου χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευση του δικτύου μέχρις ότου το δίκτυο να μπορέσει να εντοπίσει την συνάρτηση που αντιστοιχεί στα δεδομένα εκπαίδευσης. Κατά τη διαδικασία της εκπαίδευσης, τα βάρη και οι πολώσεις του δικτύου μεταβάλλονται συνεχώς σε κάθε επανάληψη με σκοπό τη μείωση της συνάρτησης σφάλματος (performance function). Η προκαθορισμένη συνάρτηση υπολογισμού του σφάλματος των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων Προώθησης με ανάδραση είναι το **μέσο τετραγωνικό σφάλμα** (mean square error – *mse*) της διαφοράς μεταξύ των διανυσμάτων εισόδου και των αντίστοιχων διανυσμάτων εξόδου.

### 6.1.2 Αρχιτεκτονική δικτύου

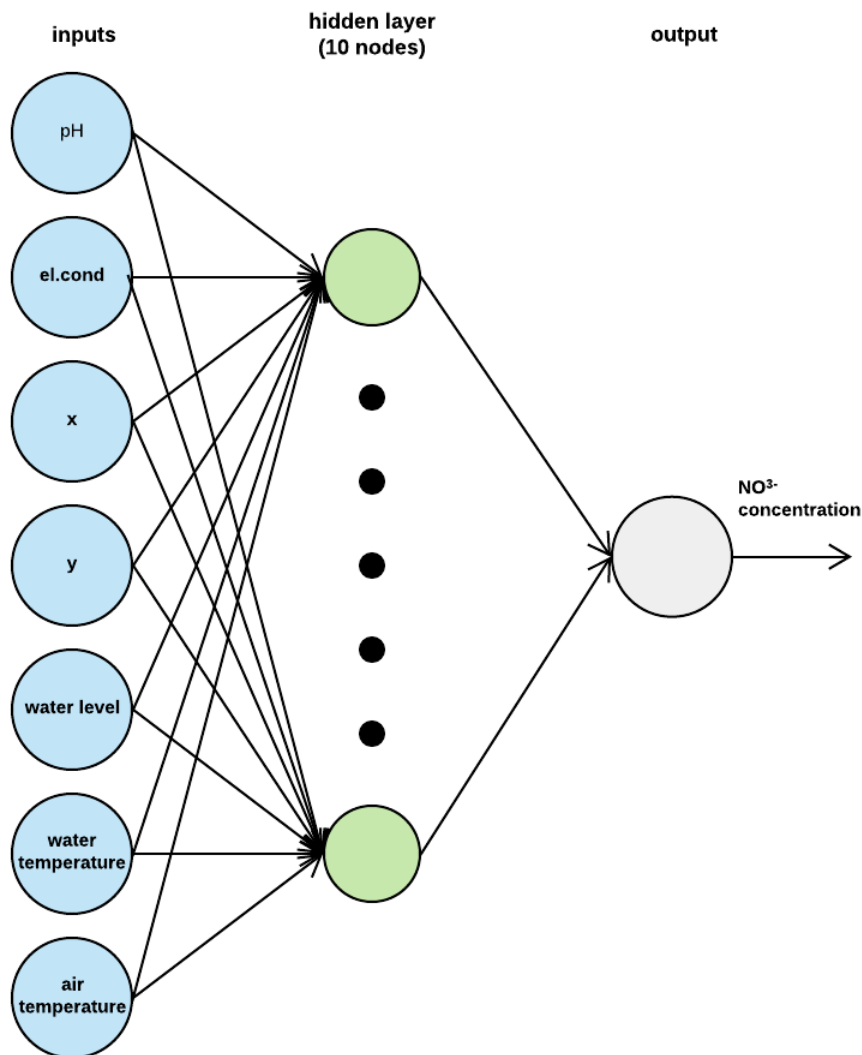
Μετά την επιλογή των κατάλληλων μεταβλητών το επόμενο βήμα ήταν η επιλογή της βέλτιστης αρχιτεκτονικής του δικτύου, η οποία προσδιορίστηκε βάσει δοκιμών. Κριτήριο επιλογής ήταν ο συντελεστής συσχέτισης R, μεταξύ πραγματικής και παραχθείσας από το δίκτυο τιμής.

Εντέλει η αρχιτεκτονική του δικτύου έχει ως εξής:



- Δίκτυο πρόσθιας τροφοδότησης με ανάδραση (feed-forward neural network with Back propagation)
- Ένα κρυφό επίπεδο
- Συνάρτηση μεταφοράς στο πρώτο επίπεδο: σιγμοειδής
- Συνάρτηση μεταφοράς στο νευρώνα εξόδου: γραμμική
- Για την εκπαίδευση του δικτύου χρησιμοποιήθηκε το 80% των δεδομένων και το 20% για την επαλήθευση του.
- Αριθμός νευρώνων στο κρυφό επίπεδο: 10
- Συνάρτηση εκπαίδευσης: Bayesian Regularization.
- Τυχαία αρχικοποίηση βαρών και πολώσεων

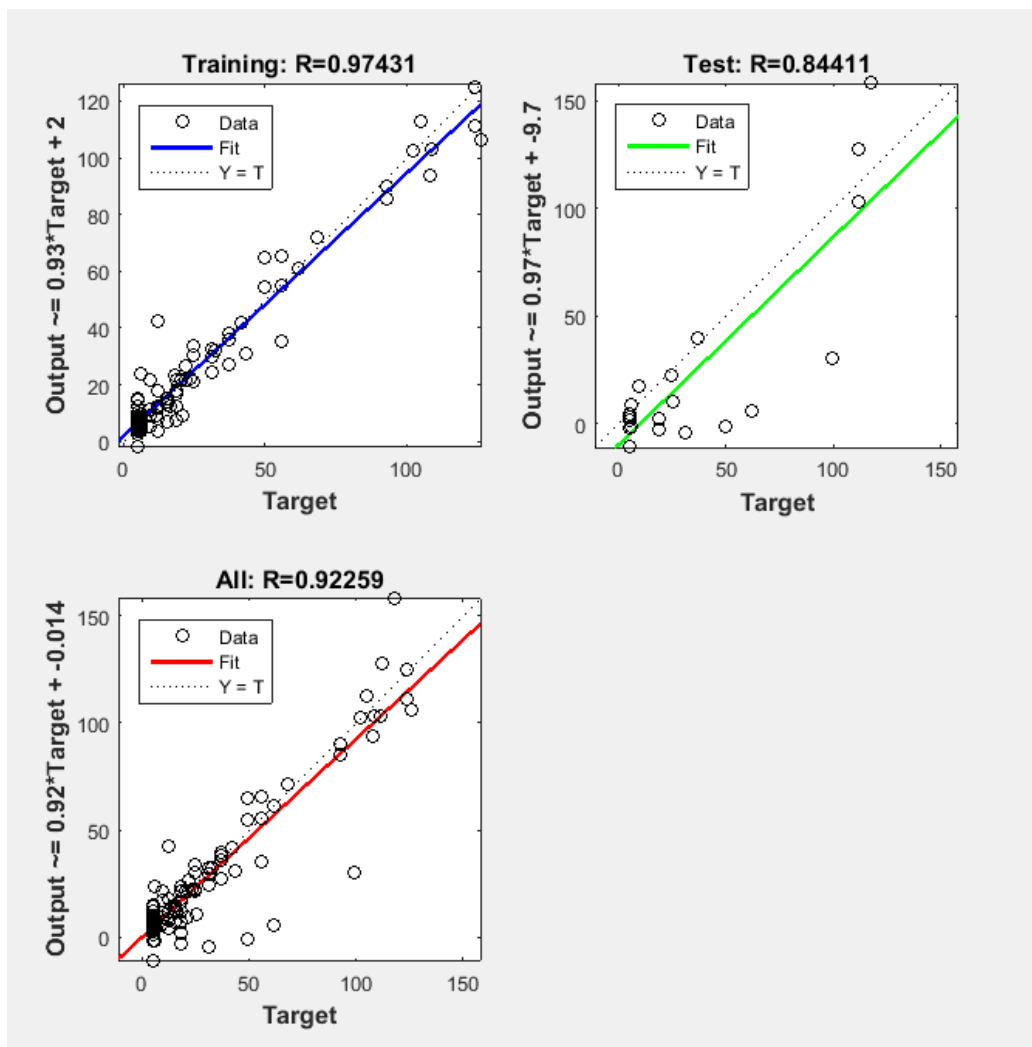
Η αρχιτεκτονική του δικτύου απεικονίζεται στην επόμενη εικόνα:



Εικόνα 6.1: 1<sup>ο</sup> Νευρωνικό δίκτυο

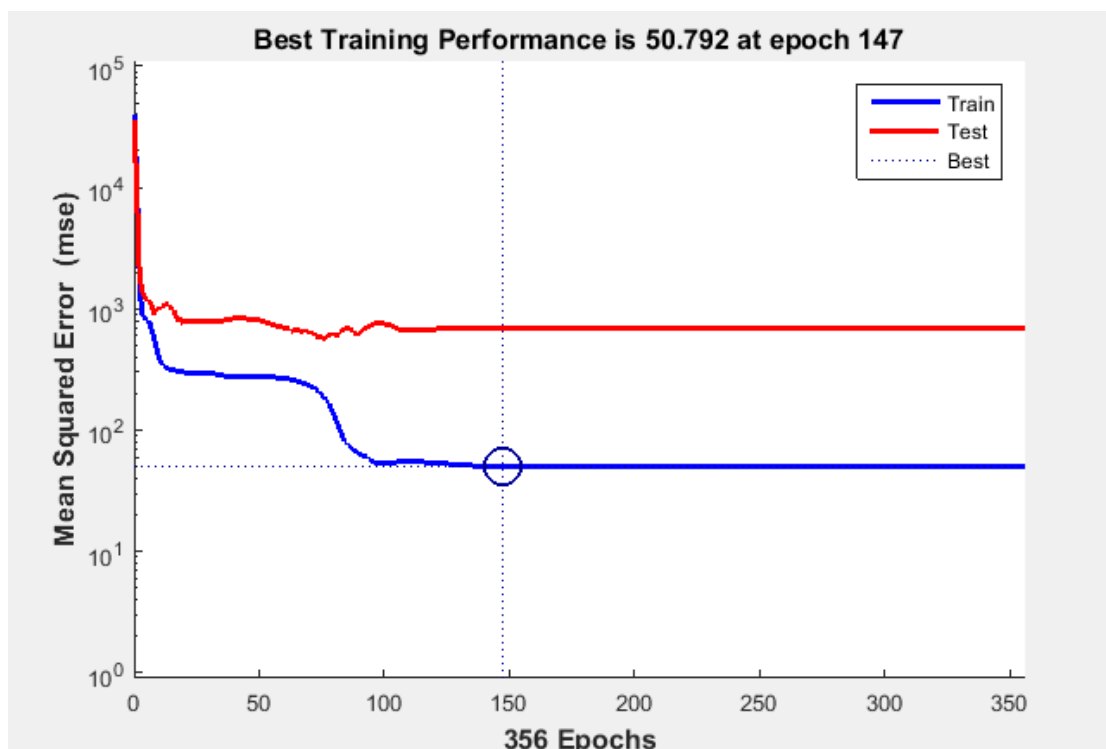
### 6.1.3 Αποτελέσματα 1<sup>ου</sup> Νευρωνικού Δικτύου

Τα αποτελέσματα της εκπαίδευσης παρουσιάζονται και αναλύονται ακολούθως.



Εικόνα 6.2: Αποτελέσματα εκπαίδευσης TNΔ1- Υπολογισμός δείκτη R

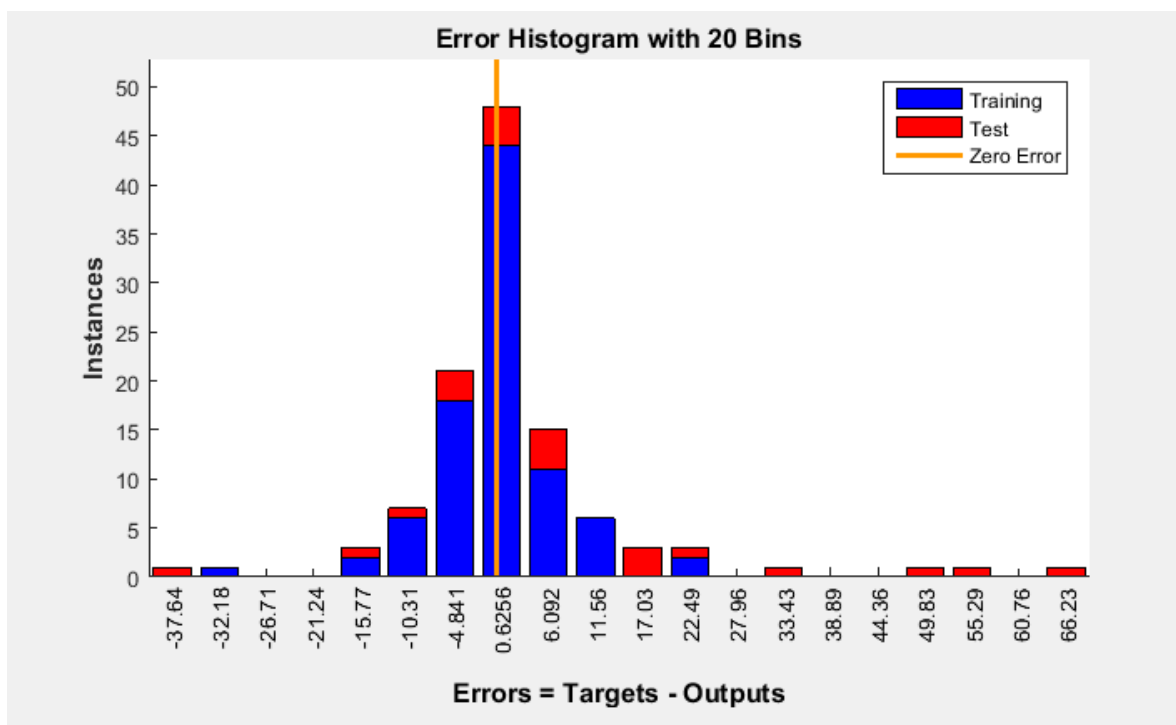
Στην εικόνα 6.2 εμφανίζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Έχει υπολογιστεί ο δείκτης R για τα δεδομένα της εκπαίδευσης (πάνω αριστερά), για το σετ της επαλήθευσης (πάνω δεξιά) και για το σύνολο των δεδομένων (κάτω αριστερά). Όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα επετεύχθη αρκετά καλή προσομοίωση. Μεταξύ προσομοιωμένων και πραγματικών τιμών, η συσχέτιση είναι υψηλή, τόσο στο σετ της εκπαίδευσης ( $R=0.97431$ ), όσο και στο σετ επαλήθευσης ( $R=0.84411$ ), με συνολικό δείκτη συσχέτισης 0.92259.



Εικόνα 6.3: Κύκλοι εκπαίδευσης μέχρι τη σύγκλιση του αλγόριθμου στο ελάχιστο mse (TNΔ1)

Ο αλγόριθμος εκπαίδευσης ολοκληρώθηκε στις 356 εποχές (κύκλοι επανάληψης της διαδικασίας της εκπαίδευσης), με τιμή mse= 50.792. Η τιμή αυτή είχε επιτευχθεί ήδη από την 147<sup>η</sup> επανάληψη.

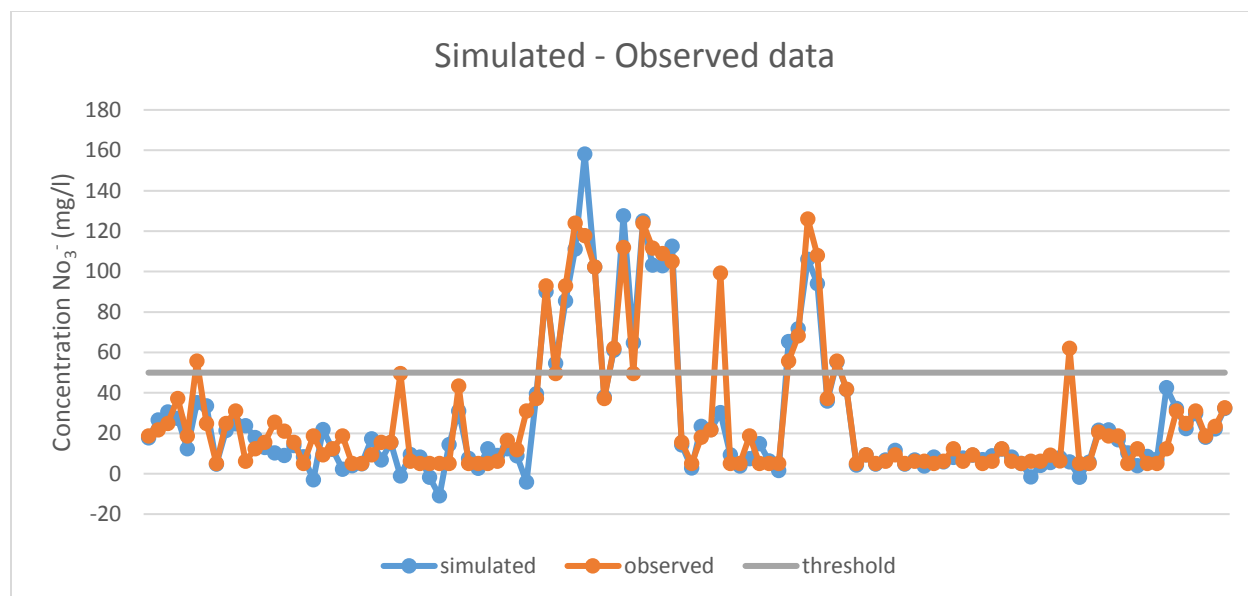
Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζονται τα απόλυτα σφάλματα μεταξύ εκτιμημένης και πραγματικής τιμής. Το μπλε χρώμα αφορά στα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση του δικτύου και το κόκκινο σε αυτά που χρησιμοποιήθηκαν για την επαλήθευση του.



Εικόνα 6.4: Απόλυτο σφάλμα μεταξύ πραγματικών και προσομοιωμένων τιμών TNΔ1

Στο Error Histogram, γίνεται κατάταξη σύμφωνα με τις αποκλίσεις που έχουν παρατηρηθεί μεταξύ παρατηρημένων και προσομοιωμένων τιμών και υπολογίζεται ο αριθμός των εξόδων που έχουν δώσει τις συγκεκριμένες αποκλίσεις. Από το ιστόγραμμα παρατηρείται πως στις περισσότερες περιπτώσεις, η απόκλιση είναι κοντά στο 0 ( $\approx -0.6256$ ), ιδιαίτερα κατά τη διαδικασία της εκπαίδευσης. Κατά τη διαδικασία της επαλήθευσης παρατηρούνται μόνο δύο ακραίες περιπτώσεις όπου έχει υπάρξει υψηλό σφάλμα (-37.64 και 66.23).

Για την επισκόπηση του συνόλου των δειγμάτων, στο επόμενο διάγραμμα απεικονίζονται οι προσομοιωμένες από το μοντέλο τιμές σε σχέση με τις πραγματικές, καθώς και η οριακή τιμή των 50 mg/l.



Εικόνα 6.5: Σύγκριση προσομοιωμένων – πραγματικών τιμών 1<sup>ου</sup> νευρωνικού δικτύου

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται οι υπολογισμένοι δείκτες για την αξιολόγηση του μοντέλου.

Πίνακας 6.2. Δείκτες αξιολόγησης TNΔ1

Index	All	Test
RMSE (mg/l)	13.24733	26.18449
MAE (mg/l)	7.174992	17.45723
Bias (mg/l)	-2.14435	-10.9297
NSE	0.8406	0.5432
St. Deviation	33.32997	39.65161

Για το σύνολο των δεδομένων ο NSE είναι ίσος με **0.8406**, ενώ για το σετ της επαλήθευσης **NSE<sub>test</sub> = 0.5432**. Όπως προκύπτει από τους δείκτες, το μοντέλο έχει δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Όσον αφορά τους δείκτες RMSE και MSE σύμφωνα με τους Singh et al., (2004), τιμή μικρότερη από το μισό της τυπικής απόκλισης των πραγματικών τιμών θεωρείται χαμηλός και δείχνει καλή απόδοση του μοντέλου. Συνεπώς, λαμβάνοντας υπόψιν το δείκτη MSE το μοντέλο έχει καλή επίδοση. Για το σετ δεδομένων της επαλήθευσης όμως ο δείκτης RMSE έχει σχετικά υψηλή τιμή (RMSE<sub>test</sub> > 39.65/2). Τέλος, σύμφωνα με το δείκτη Bias, το μοντέλο έχει την τάση να υποεκτιμά τις παρατηρημένες τιμές.

## 6.2 2<sup>ο</sup> Νευρωνικό Δίκτυο

### 6.2.1 Δεδομένα εισόδου

Για την καλύτερη περιγραφή του προβλήματος επιλέχθηκαν να εισαχθούν στο μοντέλο και οι χρήσεις γης που εντοπίζονται σε ακτίνα 1000m γύρω από κάθε πηγάδι. Οι πληροφορίες για τις χρήσεις γης ελήφθησαν από τη βάση δεδομένων Corine Land Cover 2006 (CLC2006). Το σύστημα Corine παρέχει χάρτες με τα είδη κάλυψης της γης, που διαχωρίζονται σε 44 κατηγορίες. Ο χάρτης για την κάλυψη του εδάφους 2006 εισήχθη στο λογισμικό ArcGis 10.5, όπου υπολογίστηκαν τα ποσοστά κάλυψης της έκτασης γύρω από κάθε γεώτρηση, για κάθε κατηγορία. Οι χρήσεις γης που εντοπίστηκαν στην ακτίνα που ορίστηκε ανήκουν σε 8 κατηγορίες, οι οποίες αναλύονται ακολούθως:

#### 1. Τεχνητές επιφάνειες

- Ασυνεχής αστικός ιστός (1.1.2): Το μεγαλύτερο μέρος καταλαμβάνεται από δομές, το οποίο όμως διακόπτεται από γυμνά εδάφη ή περιοχές με βλάστηση
- Βιομηχανικές ή εμπορικές μονάδες (1.2.1)
- Εγκαταστάσεις εξόρυξης ορυκτών (1.3.1)
- Οδικά και σιδηροδρομικά δίκτυα (1.2.2)

#### 2. Γεωργικές περιοχές

- Μη αρδευόμενη αρόσιμη γη (δημητριακά, όσπρια, κτηνοτροφικές καλλιέργειες, καλλιέργειες φυτώριων κ.α.) (2.1.1)
- Μόνιμα αρδευόμενη γη (2.1.2)
- Σύνθετες καλλιέργειες (μικρά αγροτεμάχια διαφορετικών ετήσιων καλλιεργειών, βοσκότοποι, μόνιμες καλλιέργειες) (2.4.2)

#### 3. Δάση και ημι-φυσικές εκτάσεις

- Χορτολιβαδικές εκτάσεις (3.2.1)
- Σκληρόφυλλη βλάστηση (3.2.3)

Από τις χρήσεις γης που αναφέρθηκαν, οι μόνιμα αρδευόμενες εκτάσεις καταλαμβάνουν τη μεγαλύτερη συνολικά έκταση, 21.937.5 km<sup>2</sup>, και εντοπίζονται σε 12 από τα 16 πηγάδια.

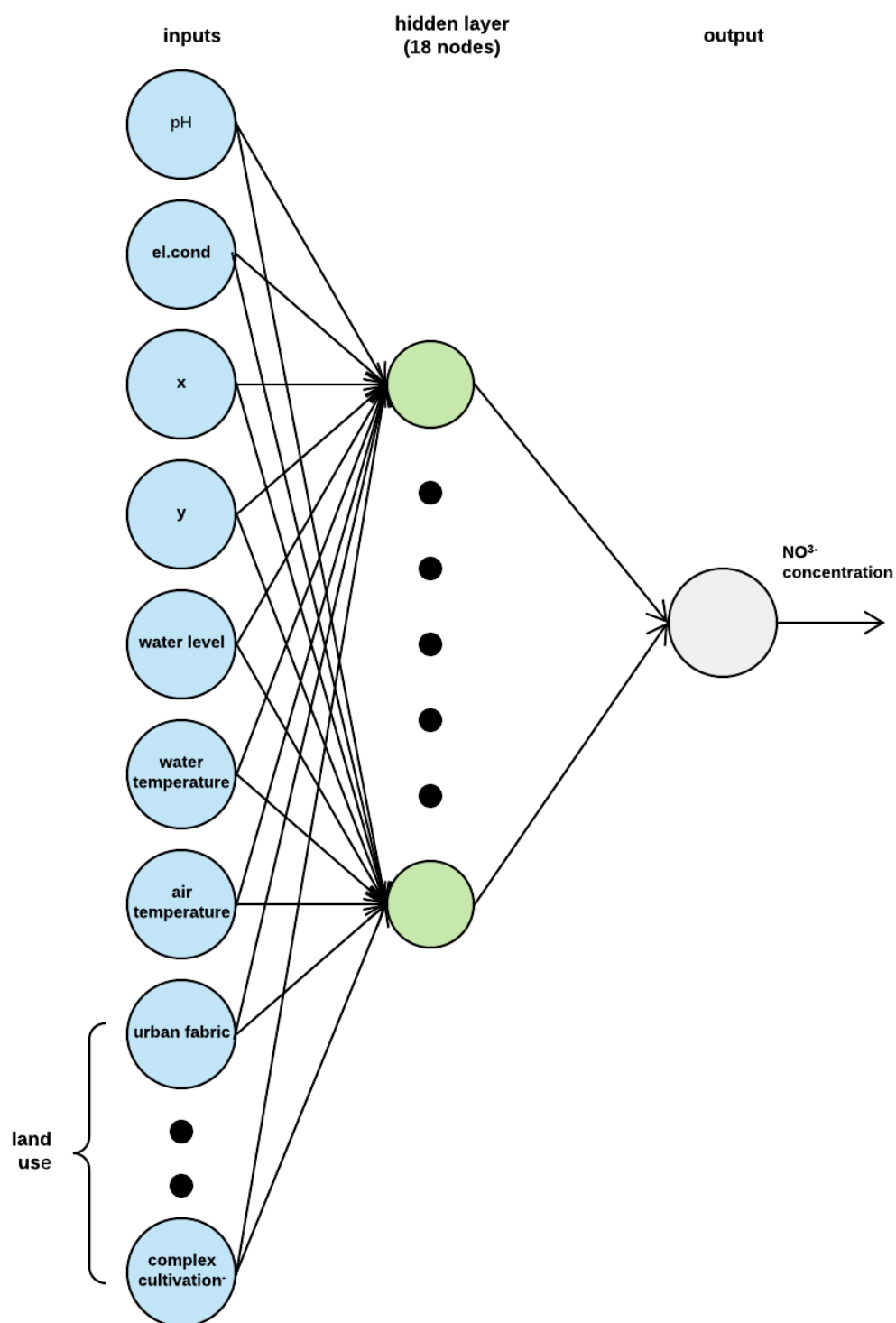
Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται οι εκτάσεις των χρήσεων γης για κάθε γεώτρηση.

Πίνακας 6.3. Εκτάσεις χρήσεων γης σε ακτίνα 1000 m από τις γεωτρήσεις

	Έκταση (km <sup>2</sup> )								
Γεώτρηση	1.1.2	1.2.1	1.3.1	1.2.2	2.1.1	2.1.2	2.4.2	3.2.1	3.2.3
Γ/1	0	0	0	0	0	2125	0	0	1062.5
Γ/43	0	0	125	0	0	1687.5	0	0	1062.5
ΥΜ3	0	0	0	0	2937.5	0	0	0	0
ΧVI/31	375	0	0	0	0	2625	0	0	0
07/Γ1	250	0	0	0	0	2687.5	125	0	0
07/Γ2	0	0	0	0	0	1000	0	0	1937.5
07/Γ3	437.5	125	0	0	0	62.5	0	0	125
Θ39	0	312.5	0	0	0	2687.5	250	0	0
Θ477	0	0	0	0	1812.5	0	0	0	62.5
Θ600	0	0	0	0	2250	0	0	0	937.5
VIII/87	0	0	0	0	0	0	750	0	2312.5
ΧVI/28	0	0	0	0	62.5	2062.5	0	0	1000
ΧVII/27	0	0	0	625	750	437.5	0	0	1437.5
ΧVII/30	0	0	0	0	0	1437.5	0	1125	562.5
B116	0	0	0	0	0	2500	0	0	500
ΧVI/590	0	0	0	0	0	2625	312.5	62.5	62.5

### 6.2.2 Αρχιτεκτονική δικτύου

Η αρχιτεκτονική του δικτύου παρέμεινε ίδια, εκτός από τον αριθμό των νευρώνων στο κρυφό επίπεδο, ο οποίος αυξήθηκε, καθώς τώρα οι μεταβλητές εισόδου είναι 16. Στις περισσότερες περιπτώσεις δεν ενδείκνυται οι νευρώνες του κρυφού επιπέδου να είναι λιγότεροι από τους νευρώνες εισόδου, γιατί το δίκτυο δε θα είναι σε θέση να περιγράψει την πολυπλοκότητα του συστήματος. Μετά από δοκιμές ο βέλτιστος αριθμός κόμβων προσδιορίστηκε στους 18. Η αρχιτεκτονική του δικτύου απεικονίζεται στην ακόλουθη εικόνα:

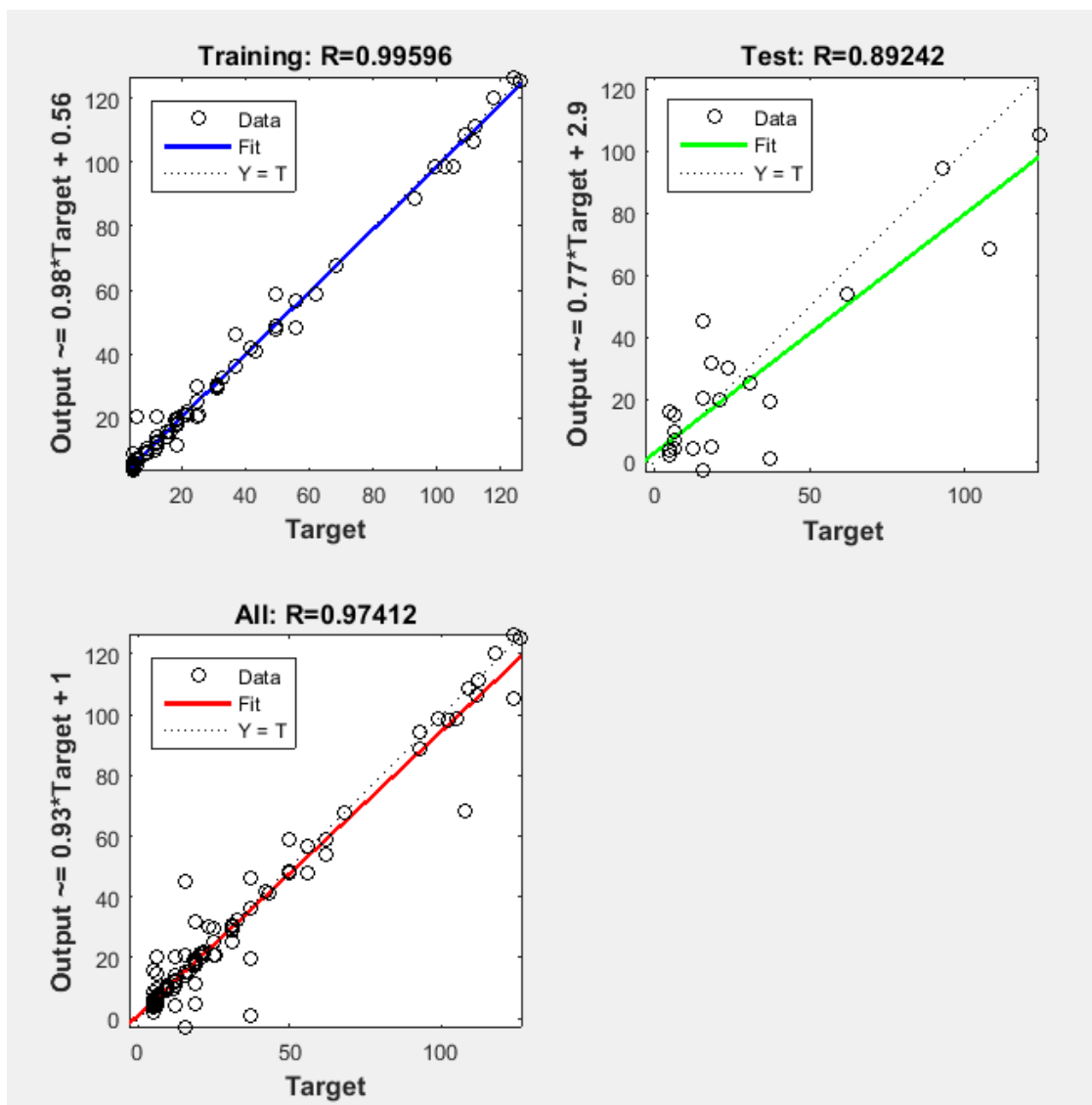


Εικόνα 6.6: 2<sup>ο</sup> Νευρωνικό δίκτυο



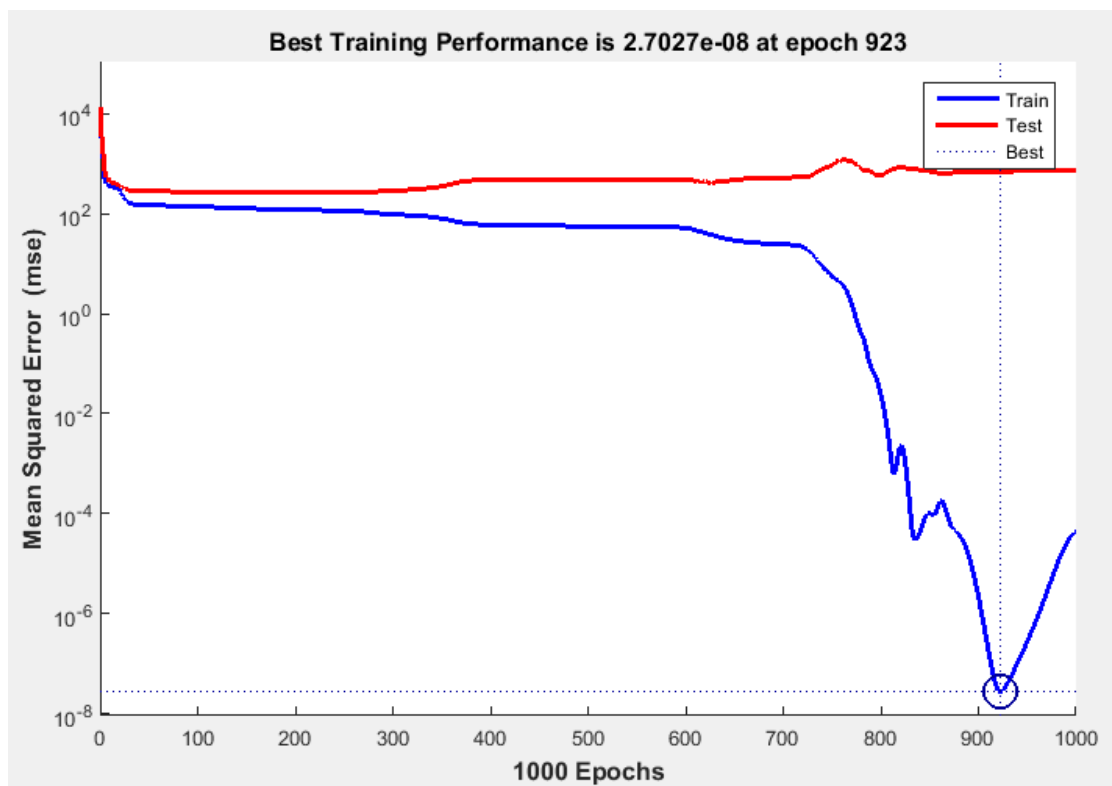
### 6.2.3 Αποτελέσματα 2<sup>ου</sup> Νευρωνικού Δικτύου

Τα αποτελέσματα της εκπαίδευσης παρουσιάζονται και αναλύονται ακολούθως.



Εικόνα 6.7: Αποτελέσματα εκπαίδευσης ΤΝΔ2 - Υπολογισμός δείκτη R

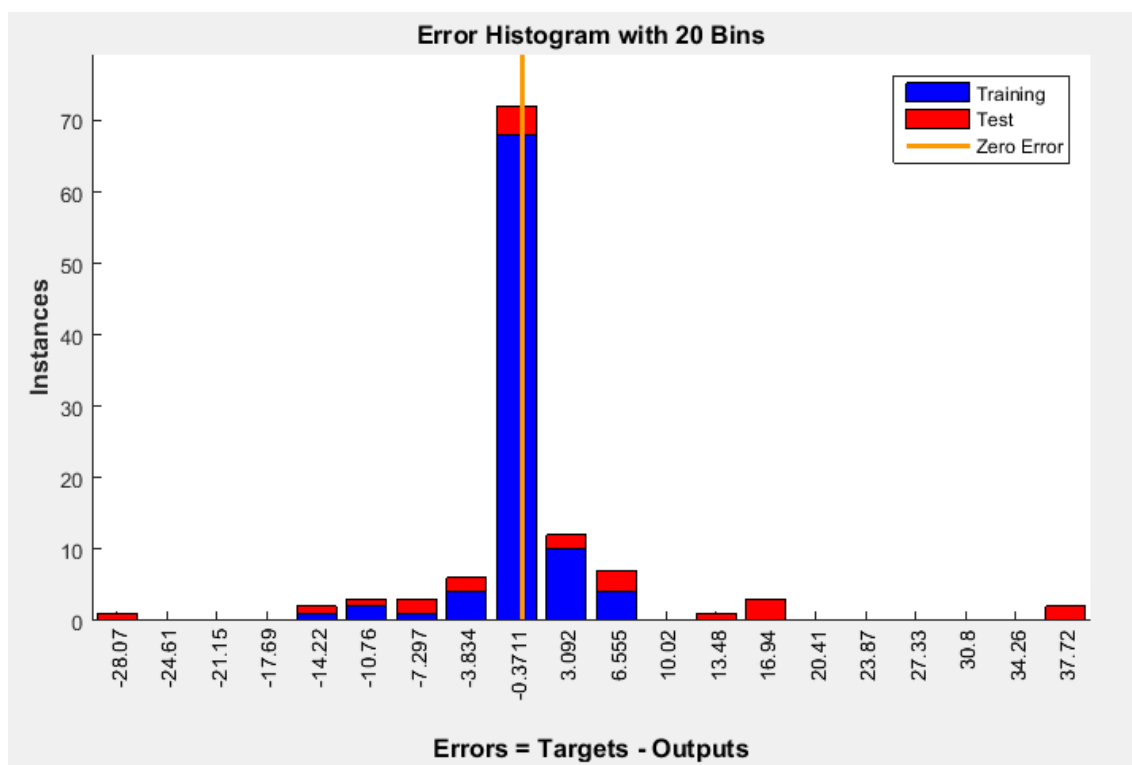
Η απόδοση του μοντέλου φαίνεται να αυξήθηκε αισθητά, με συνολικό δείκτη συσχέτισης  $R=0.97412$ . Στα δεδομένα εκπαίδευσης ο συντελεστής είναι πολύ υψηλός  $R=0.99596$  και στο σετ επαλήθευσης  $R=0.89242$ .



Εικόνα 6.8: Κύκλοι εκπαίδευσης μέχρι τη σύγκλιση του αλγόριθμου στο ελάχιστο mse (TNΔ2)

Ο χρόνος σύγκλισης του αλγόριθμου αυξήθηκε, αφού ολοκληρώθηκε στις 923 εποχές, όμως η τιμή mse της εκπαίδευσης βελτιώθηκε θεαματικά, με  $mse = 2.27027 \cdot 10^{-8}$ .

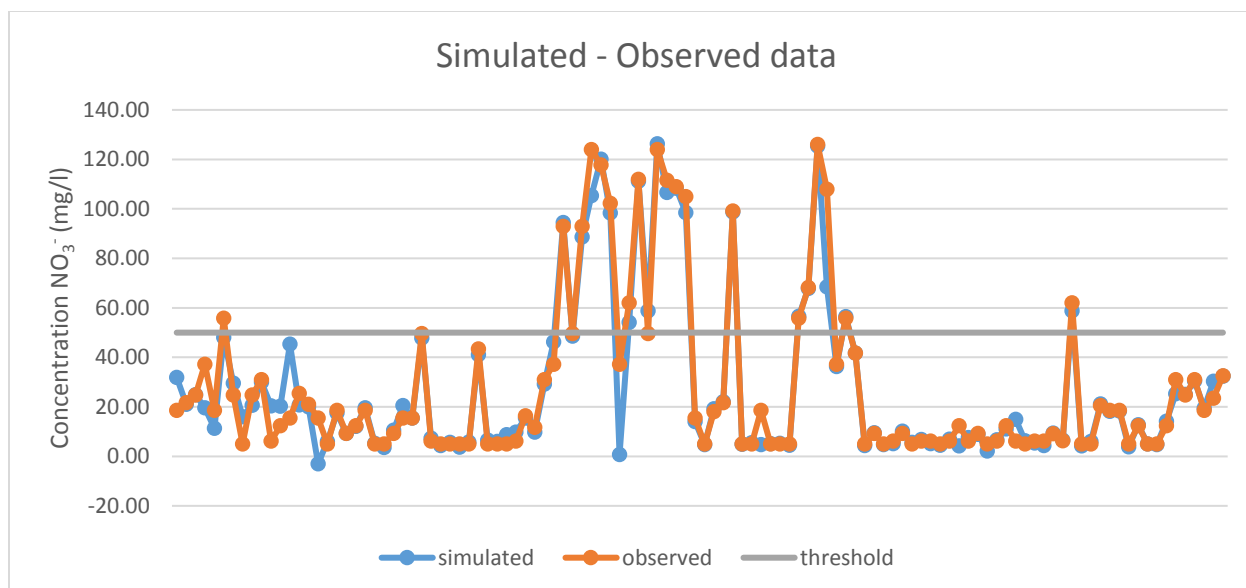
Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζονται τα απόλυτα σφάλματα μεταξύ εκτιμημένης και πραγματικής τιμής.



Εικόνα 6.9: Απόλυτο σφάλμα μεταξύ πραγματικών και προσομοιωμένων τιμών TNΔ2

Από το ιστόγραμμα παρατηρείται πως στις περισσότερες περιπτώσεις, η απόκλιση είναι πολύ χαμηλή ( $\approx -0.3711$ ), ιδιαίτερα κατά τη διαδικασία της εκπαίδευσης. Κατά τη διαδικασία της επαλήθευσης παρατηρούνται μόνο δύο ακραίες περιπτώσεις όπου έχει υπάρξει υψηλό σφάλμα (-28.07 και 37.72), πολύ χαμηλότερο όμως σε σχέση με του πρώτου μοντέλου. Πολύ σημαντικό είναι επίσης το γεγονός πως οι δύο ακραίες αποκλίσεις παρατηρούνται σε τιμές κάτω από το όριο των 50 mg/l, όπως φαίνεται και από το διάγραμμα στην εικόνα 6.10.

Από τον γραφικό έλεγχο προκύπτει πως συνολικά το μοντέλο έχει δώσει τιμές πολύ κοντά στις πραγματικές, ιδιαίτερα σε τιμές υψηλότερες από το όριο των 50 mg/l.



Εικόνα 6.10: Σύγκριση προσομοιωμένων – πραγματικών τιμών 2<sup>ου</sup> νευρωνικού δικτύου

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται οι υπολογισμένοι δείκτες για την αξιολόγηση του μοντέλου.

Πίνακας 6.4. Δείκτες αξιολόγησης TNΔ2

Index	All	Test
RMSE (mg/l)	7.55916	15.9512
MAE (mg/l)	3.649875	11.52588
Bias (mg/l)	-0.81992	-4.1956
NSE	0.9481	0.7038
St. Deviation	33.32997	34.82799

Για το σύνολο των δεδομένων ο NSE είναι ίσος με **0.9481** και για τα δεδομένα της εκπαίδευσης **0.7038**, σημειώνοντας σημαντική αύξηση σε σχέση με το 1<sup>ο</sup> νευρωνικό δίκτυο (30% για τα δεδομένα επαλήθευσης). Σύμφωνα με όλους τους δείκτες η απόδοση του μοντέλου αυξήθηκε πολύ με την είσοδο των μεταβλητών των χρήσεων γης. Η μικρή διαφορά μεταξύ RMSE και MAE (15.9512 mg/l – 11.52588 mg/l), υποδεικνύει τη μη ύπαρξη ακραίων σφαλμάτων, ενώ οι τιμές και των δύο δεικτών μειώθηκαν κατά περίπου 30% σε σχέση με το 1<sup>ο</sup> μοντέλο. Επιπλέον, είναι μικρότεροι από το μισό της τυπικής απόκλισης του δείγματος, γεγονός που κατατάσσει τα σφάλματα σε αποδεκτά όρια. Τέλος, σύμφωνα με το δείκτη Bias παρατηρείται πως και αυτό το μοντέλο έχει την τάση να υποεκτιμάει τις πραγματικές τιμές, σε πολύ μικρότερο βαθμό όμως σχετικά με το 1<sup>ο</sup> μοντέλο, αφού η τιμή του μειώθηκε κατά 60%.

Λόγω της καλύτερης προσομοίωσης που παρατηρήθηκε στο συγκεκριμένο μοντέλο, εξετάστηκαν επίσης και οι εκτάσεις των χρήσεων γης σε ακτίνα 500 m και 2000 m γύρω από τις γεωτρήσεις. Η απόδοση του μοντέλου μειώθηκε και συνεπώς η ακτίνα επιρροής των 1000 m κρίθηκε ως βέλτιστη.

### 6.3 3<sup>ο</sup> Νευρωνικό δίκτυο

#### 6.3.1 Δεδομένα εισόδου

Στο 3<sup>ο</sup> νευρωνικό δίκτυο εισήχθησαν ως μεταβλητές εισόδου, τυπικές μετρήσεις ποιότητας νερού. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν το pH, η ηλεκτρική αγωγιμότητα, τα ανθρακικά ιόντα ( $\text{HCO}_3^-$ ) και τα ιόντα  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ . Για τις συγκεκριμένες μεταβλητές υπήρχαν περισσότερες μετρήσεις (συνολικά 263) και το μοντέλο αναμένονταν να παράγει καλύτερα αποτελέσματα. Οι παράμετροι αυτές δεν επαρκούν για να περιγράψουν τη διαδικασία μεταφοράς νιτρικών ιόντων στο νερό. Παρόλα αυτά η ύπαρξη των κύριων ιόντων σχετίζεται με την ύπαρξη των  $\text{NO}_3^-$ , ενώ όπως έχει αναλυθεί, το pH και η ηλεκτρική αγωγιμότητα επηρεάζουν τις συγκεντρώσεις τους. Επιπρόσθετα, οι χημικές αναλύσεις για τον υπολογισμό των νιτρικών ιόντων είναι πιο περίπλοκες ή πιο ακριβές σε σχέση με των υπολοίπων, ενώ σε περίπτωση επιβαρυμένων υδάτων, υπάρχει μια υποεκτίμηση των νιτρικών, λόγω παρεμβολής άλλων ιόντων, ιδιαίτερα των  $\text{Cl}^-$ . Έτσι, το νευρωνικό δίκτυο που δημιουργήθηκε θα μπορούσε να αποτελέσει μια εναλλακτική μέθοδο εκτίμησης των συγκεντρώσεων, ειδικά αν ληφθεί υπόψη η υψηλή ακρίβεια που επετεύχθη.

Στον πίνακα 6.5 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές, οι μέγιστες και οι ελάχιστες των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν ως είσοδοι στο μοντέλο και των συγκεντρώσεων  $\text{NO}_3^-$ .

Πίνακας 6.5. Μέγιστες, ελάχιστες και μέσες τιμές παραμέτρων ΤΝΔ3

	$\text{NO}_3^-$ (mg/l)	pH	COND	$\text{Ca}^{2+}$ (mg/l)	$\text{Mg}^{2+}$ (mg/l)	$\text{Na}^+$ (mg/l)	$\text{K}^+$ (mg/l)	$\text{HCO}_3^-$ (mg/l)	$\text{Cl}^-$ (mg/l)	$\text{SO}_4^{2-}$ (mg/l)
<b>Min</b>	5	6.4	234	2.4	4.4	2.3	0.4	49	5.3	10
<b>Max</b>	167	9.1	2750	236	121.1	303.5	13	585	560.2	148.9
<b>Mean</b>	27.31	7.66	791.03	66.66	38.40	36.62	1.94	324.10	58.01	38.04

Για τις μεταβλητές εισόδου υπολογίστηκε ο συντελεστής συσχέτισης Pearson, σε σχέση με τη συγκέντρωση των νιτρικών ιόντων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 6.6.

Πίνακας 6.6. Συντελεστής συσχέτισης μεταβλητών (φυσικοχημικές παράμετροι)

Μεταβλητή Εισόδου	pH	COND	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$
<b>R</b>	0.030808	0.345022	0.098366	0.386589	0.0459	0.121176	0.13375	0.13855	0.128708

Παρατηρείται πως μεταξύ όλων των μεταβλητών και των συγκεντρώσεων των νιτρικών δεν υπάρχει γραμμική συσχέτιση, εκτός από την περίπτωση των  $Mg^{2+}$  και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας όπου υπάρχει ασθενής συσχέτιση.

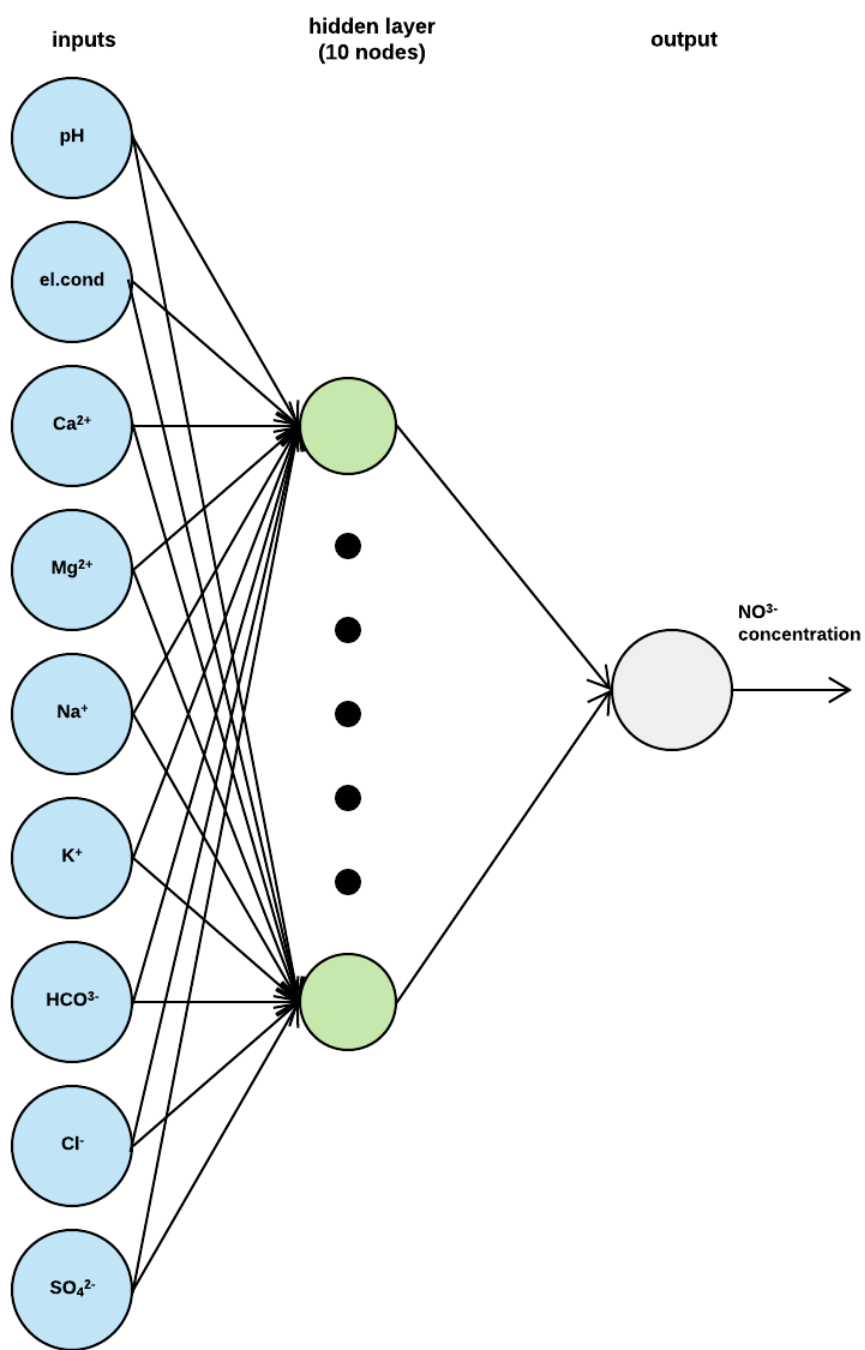
### 6.3.2 Αρχιτεκτονική δικτύου

Η επιλογή της βέλτιστης αρχιτεκτονικής του δικτύου, προσδιορίστηκε εκ νέου βάσει δοκιμών.

Εντέλει η αρχιτεκτονική του δικτύου έχει ως εξής:

- Δίκτυο πρόσθιας τροφοδότησης με ανάδραση (feed- forward neural network with Back propagation)
- Ένα κρυφό επίπεδο
- Συνάρτηση μεταφοράς στο πρώτο επίπεδο: σιγμοειδής
- Συνάρτηση μεταφοράς στο νευρώνα εξόδου: γραμμική
- Για την εκπαίδευση του δικτύου χρησιμοποιήθηκε το 80% των δεδομένων και το 20% για την επαλήθευση του.
- Αριθμός νευρώνων στο κρυφό επίπεδο: 10
- Συνάρτηση εκπαίδευσης: Levenberg – Marquardt
- Τυχαία αρχικοποίηση βαρών και πολώσεων

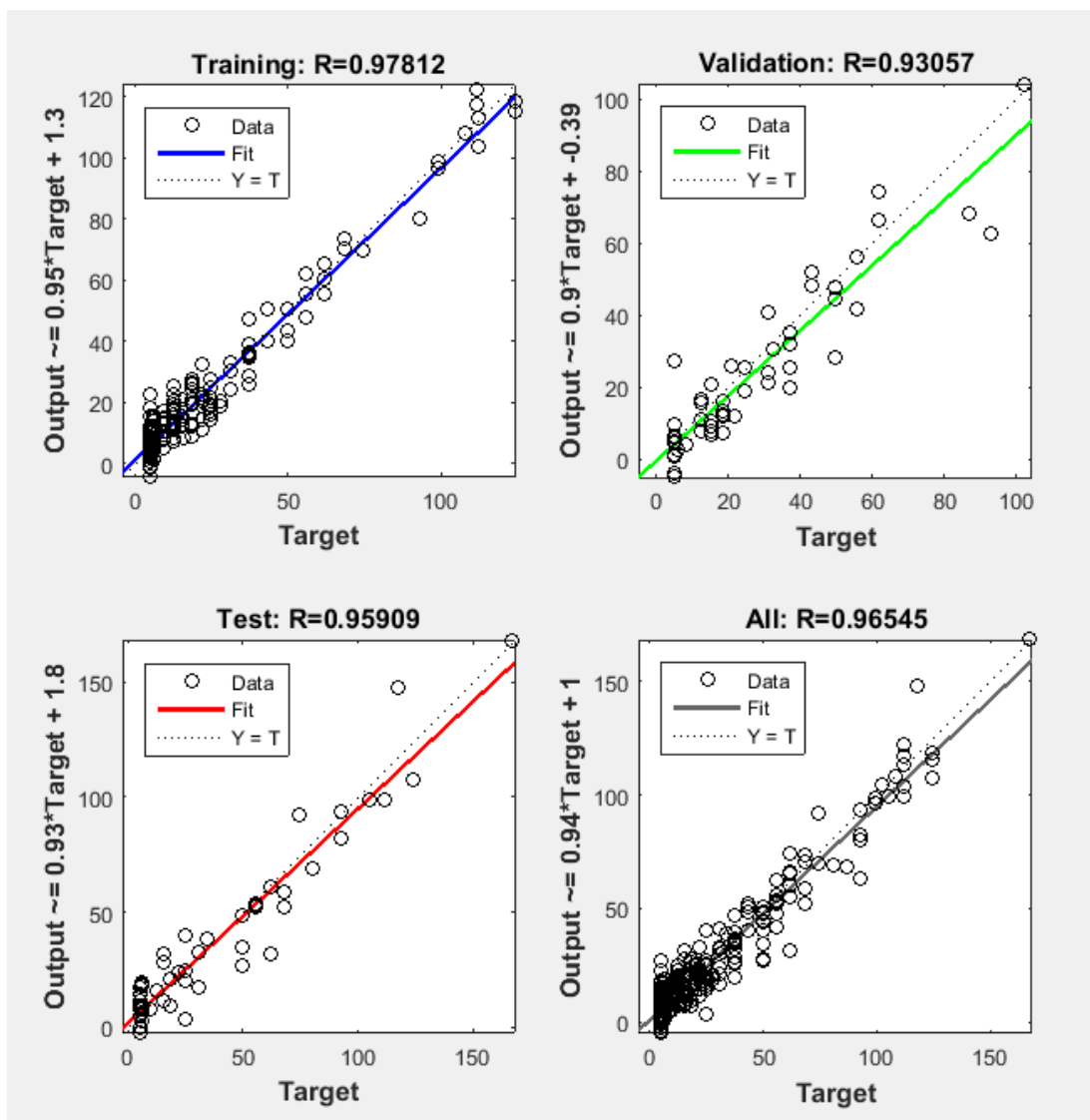
Η αρχιτεκτονική του δικτύου απεικονίζεται στην επόμενη εικόνα:



Εικόνα 6.11: 3<sup>ο</sup> Νευρωνικό δίκτυο

### 6.3.3 Αποτελέσματα 3<sup>ου</sup> Νευρωνικού Δικτύου

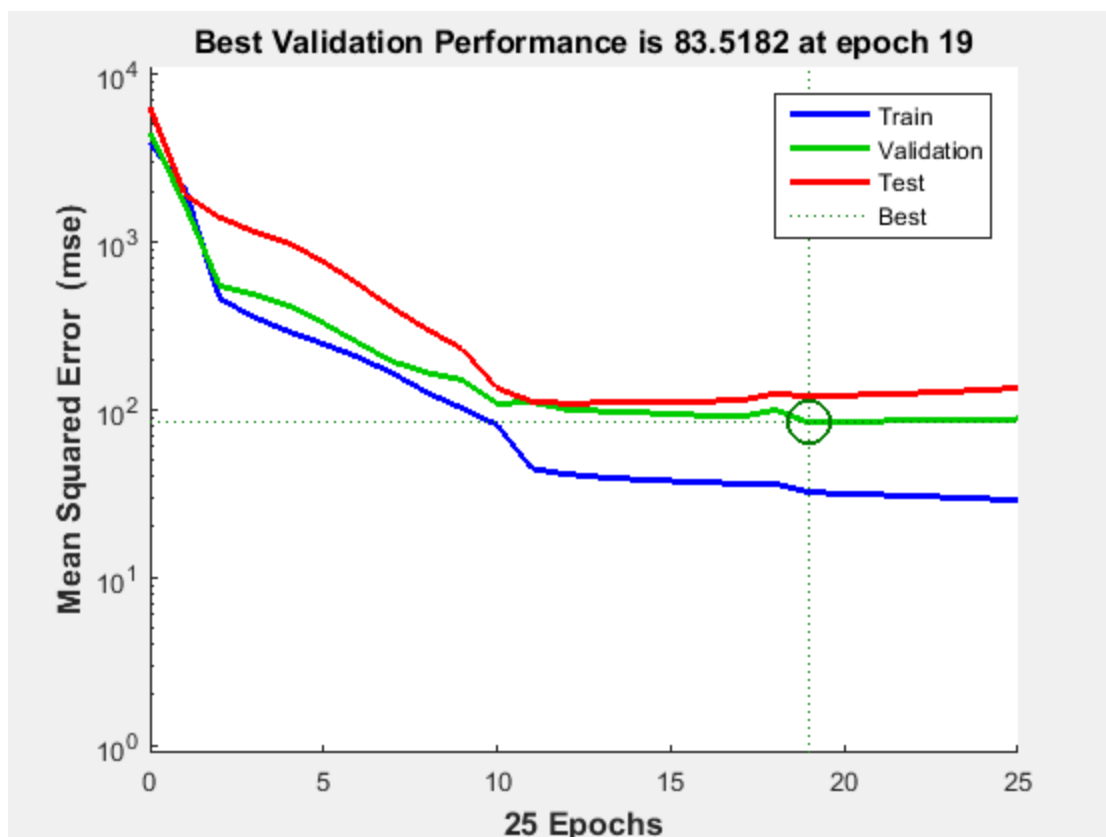
Τα αποτελέσματα της εκπαίδευσης παρουσιάζονται στα διαγράμματα της εικόνας 6.12.



Εικόνα 6.12: Αποτελέσματα εκπαίδευσης TNΔ3 - Υπολογισμός δείκτη R

Η απόδοση του μοντέλου, με συνολικό δείκτη συσχέτισης  $R=0.96545$  είναι πολύ υψηλή. Υπενθυμίζεται πως στη συνάρτηση εκπαίδευσης Levenberg – Marquardt, χρησιμοποιείται και ένα ποσοστό από τα δεδομένα για την περαιτέρω επαλήθευση του μοντέλου (validation set), με σκοπό την αποφυγή της υπερεκπαίδευσης. Έτσι, στο test σετ ο δείκτης R είναι ίσος με 0.95909 και στο validation set 0.93057. Λαμβάνοντας υπόψιν πως τα δεδομένα αυτά δεν έχουν χρησιμοποιηθεί για την εκπαίδευση του μοντέλου, οι τιμές των δεικτών θεωρούνται πολύ υψηλές.

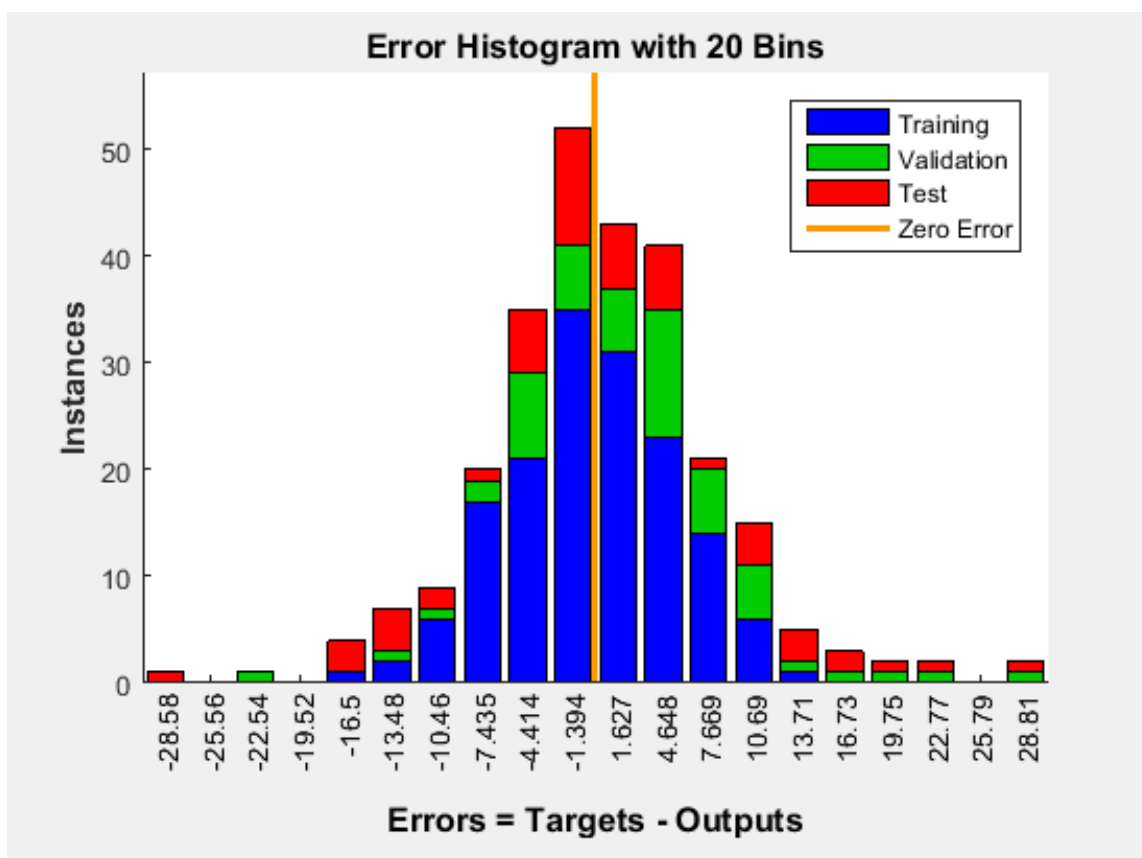




Εικόνα 6.13: Κύκλοι εκπαίδευσης μέχρι τη σύγκλιση του αλγόριθμου στο ελάχιστο mse (ΤΝΔ3)

Στο συγκεκριμένο αλγόριθμο, τίθεται επιπλέον κριτήριο για την διακοπή των επαναλήψεων και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα των τιμών του validation set. Η σύγκλιση του αλγόριθμου εκπαίδευσης ήταν πολύ γρήγορη καθώς χρειάστηκαν 25 επαναλήψεις για την ολοκλήρωση του και απέδωσε τιμή  $mse = 83,5182$ . Η τιμή αυτή είχε επιτευχθεί ήδη από την 19<sup>η</sup> επανάληψη.

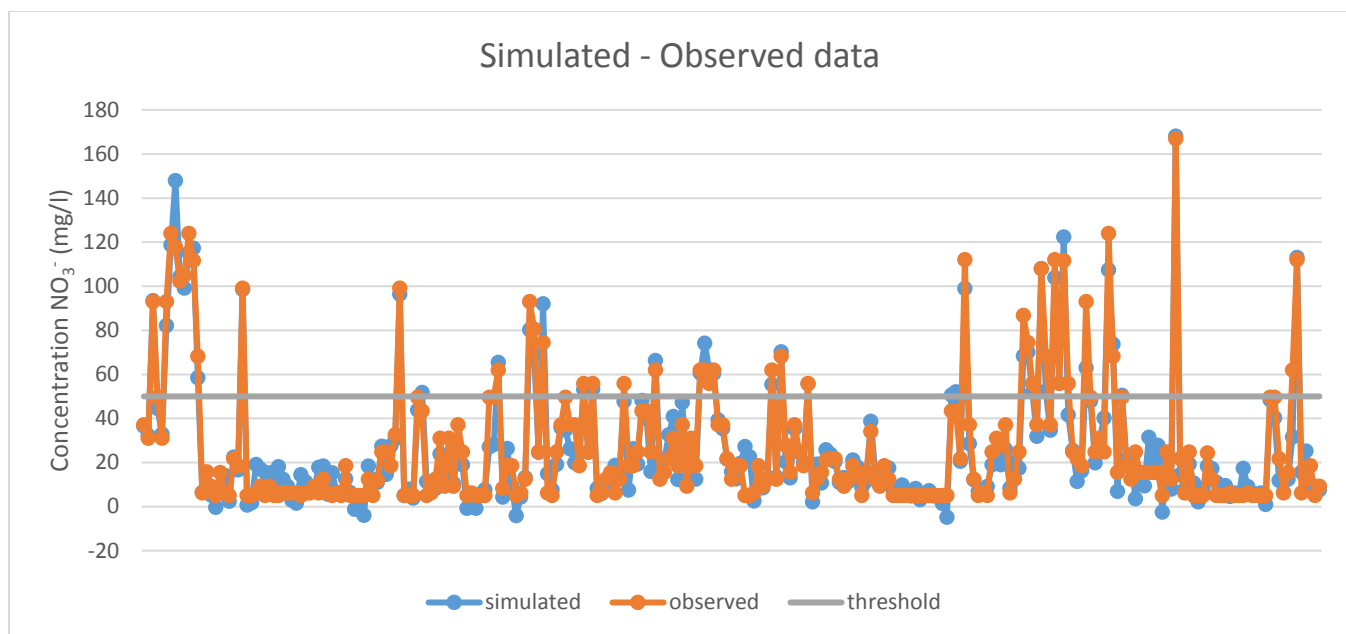
Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζονται τα σφάλματα μεταξύ εκτιμημένης και πραγματικής τιμής.



Εικόνα 6.14: Απόλυτο σφάλμα μεταξύ πραγματικών και προσομοιωμένων τιμών ΤΝΔ3

Από το ιστόγραμμα παρατηρείται πως στις περισσότερες περιπτώσεις, η απόκλιση είναι αρκετά χαμηλή, ( $-1.394 < \text{Error} < 1.627$ ). Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός, πως στο μοντέλο αυτό οι μικρές αποκλίσεις παρατηρούνται εξίσου και στα δείγματα επαλήθευσης, ενώ τα μεγαλύτερα σφάλματα που παρατηρούνται (-28.58 και 28.81) είναι χαμηλά σε σχέση με τα πρώτα δύο ΤΝΔ.

Τα πραγματικά δεδομένα και οι προσομοιωμένες τιμές, απεικονίζονται στο επόμενο διάγραμμα, μαζί με το όριο των 50 mg/l. Από το γραφικό έλεγχο φαίνεται πως συνολικά το νευρωνικό δίκτυο έχει δώσει τιμές πολύ κοντά στις πραγματικές.



Εικόνα 6.15: Σύγκριση προσομοιωμένων – πραγματικών τιμών 3<sup>ου</sup> νευρωνικού δικτύου

Στον πίνακα 6.7 παρουσιάζονται οι τιμές των υπόλοιπων δεικτών.

Πίνακας 6.7. Δείκτες αξιολόγησης TNΔ3

Index	All	Test	Validation
<b>RMSE (mg/l)</b>	7.754874	10.94331	9.138832
<b>MAE (mg/l)</b>	5.702638	8.074492	6.898432
<b>Bias (mg/l)</b>	-0.65076	-0.76912	-3.06839
<b>NSE</b>	0.987838	0.919301	0.996947
<b>St. Deviation</b>	29.69823	38.89672	23.64051

Σύμφωνα με τους δείκτες το μοντέλο παρουσιάζει πολύ καλή απόδοση. Ο NSE έχει δώσει εξαιρετικές τιμές ακόμα και στα σετ που δε χρησιμοποιήθηκαν στην εκπαίδευση ( $NSE_{test}=0.919301$ ,  $NSE_{valid}=0.996947$ ). Οι δείκτες RMSE και MSE παρουσιάζουν χαμηλές τιμές και μικρές αποκλίσεις μεταξύ τους, επομένως δεν υπάρχουν μεγάλα σφάλματα κατά την προσομοίωση. Επίσης, για όλα τα σετ δεδομένων οι τιμές τους είναι αρκετά χαμηλότερες από τη μισή τιμή της τυπικής απόκλισης του δείγματος. Ο δείκτης Bias δείχνει πως υπάρχει τάση υποεκτίμησης των τιμών, σε μικρό όμως βαθμό. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός πως το μοντέλο δεν παρουσιάζει τάση υποεκτίμησης σε υψηλές τιμές συγκεντρώσεων, εκτός από μία ακραία περίπτωση όπου δίνεται τιμή κάτω από το όριο (32 mg/l) για πραγματική συγκέντρωση ίση με 62 mg/l, το οποίο αποτελεί και το υψηλότερο παρατηρημένο σφάλμα της προσομοίωσης.

Στους πίνακες που ακολουθούν φαίνονται συγκεντρωτικά οι τιμές των δεικτών για τα τρία μοντέλα, για όλα τα δεδομένα (6.8) και για τα δεδομένα επαλήθευσης (6.9).

Πίνακας 6.8. Δείκτες αξιολόγησης όλων των ΤΝΔ, για το σύνολο των δεδομένων

	<b>TNΔ1</b>	<b>TNΔ2</b>	<b>TNΔ3</b>
<b>Index</b>	<b>All</b>		
<b>RMSE</b>	13.24733	7.55916	7.754874
<b>MAE</b>	7.174992	3.649875	5.702638
<b>Bias</b>	-2.14435	-0.81992	-0.65076
<b>NSE</b>	0.8406	0.9481	0.987838

Πίνακας 6.9. Δείκτες αξιολόγησης όλων των ΤΝΔ, για το σετ δεδομένων επαλήθευσης

	<b>TNΔ1</b>	<b>TNΔ2</b>	<b>TNΔ3</b>	
<b>Index</b>	<b>Test</b>	<b>Test</b>	<b>Test</b>	<b>Validation</b>
<b>RMSE</b>	26.18449	15.9512	10.94331	9.138832
<b>MAE</b>	17.45723	11.52588	8.074492	6.898432
<b>Bias</b>	-10.9297	-4.1956	-0.76912	-3.06839
<b>NSE</b>	0.5432	0.7038	0.919301	0.996947

Όσον αφορά το νευρωνικό δίκτυο που βασίζεται στις μετρήσεις πεδίου, κρίνοντας από τις τιμές όλων των δεικτών, σημειώνεται σημαντική βελτίωση στην απόδοση του μοντέλου με την εισαγωγή των παραμέτρων των χρήσεων γης. Ακόμα και από τους δείκτες υπολογισμένους μόνο από το σύνολο της επαλήθευσης, φαίνεται πως το μοντέλο έχει την ικανότητα να προσομοιώνει τις πραγματικές τιμές σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό. Λαμβάνοντας υπόψιν πως τα δεδομένα εισόδου ήταν περιορισμένα, το μοντέλο θεωρείται πως έχει δώσει πολύ καλά αποτελέσματα. Με την εφαρμογή νέων μετρήσεων, μπορεί να γίνει επανεκπαίδευση, έτσι ώστε να αναπροσαρμόσουν τα βάρη και οι πολώσεις και το μοντέλο να επιτύχει καλύτερη προσομοίωση.

Το τρίτο νευρωνικό δίκτυο που δέχεται ως εισόδους φυσικοχημικές παραμέτρους πέτυχε τα καλύτερα αποτελέσματα. Ιδιαίτερα στα σετ επαλήθευσης, όπου παρουσιάζονται στο δίκτυο νέες τιμές, οι τιμές όλων των δεικτών δείχνουν πως το δίκτυο είναι πολύ ικανοποιητικής ακρίβειας. Οι τιμές των συντελεστών συσχέτισης μεταξύ των μεταβλητών, υπέδειξαν πως δεν υπάρχει γραμμική σχέση (υποκεφάλαιο 6.3.1), επομένως φαίνεται πως το δίκτυο κατάφερε να προσεγγίσει τις πολύπλοκες σχέσεις που διέπουν τις μεταβλητές. Το γεγονός αυτό πιθανά

οφείλεται στην ύπαρξη επαρκούς μεγέθους δείγματος για την εκπαίδευση του, το οποίο είναι καθοριστικής σημασίας.

#### 6.4 Σενάρια αλλαγών στο περιβάλλον

Για το 2<sup>ο</sup> μοντέλο, το οποίο θεωρείται ότι περιέχει μεταβλητές που καθορίζουν την τύχη των νιτρικών ιόντων στο περιβάλλον, επιλέχθηκε να γίνει η μελέτη συνολικά 4 σεναρίων, με σκοπό την πρόβλεψη των συγκεντρώσεων  $\text{NO}_3^-$ , σε σχέση με ενδεχόμενες αλλαγές στο περιβάλλον.

Στο πρώτο μελετήθηκε η αλλαγή στις συγκεντρώσεις των  $\text{NO}_3^-$  σε σχέση με την κλιματική αλλαγή και λήφθηκε υπόψιν αύξηση της θερμοκρασίας κατά 2 °C και πτώση της στάθμης του υδροφορέα κατά 10%, κατά αντιστοιχία με τη μείωση βροχοπτώσεων.

Στα υπόλοιπα εξετάστηκε η επίδραση της αστικοποίησης, της εκβιομηχάνισης και της αύξησης των σύνθετων καλλιεργειών, στις συγκεντρώσεις των  $\text{NO}_3^-$ . Για τη μελέτη των σεναρίων αυτών έγινε προσπάθεια ρεαλιστικής προσέγγισης, όμως λόγω έλλειψης πλήρους εικόνας της εδαφοκάλυψης και των αναγκών της περιοχής, πιθανόν δεν ανταποκρίνονται σε πραγματικές ενδεχόμενες αλλαγές. Έτσι, σε κάθε περίπτωση επιλέχθηκε να μειωθεί η έκταση της σκληρόφυλλης βλάστησης που θεωρείται πως δε συμβάλλει στη νιτρορύπανση και να αυξηθεί κατά αντίστοιχο ποσό η έκταση των βιομηχανιών, του αστικού ιστού και των γεωργικών περιοχών. Να σημειωθεί πως η αύξηση των εκάστοτε εκτάσεων υπολογίστηκε μόνο για τις ακάλυπτες περιοχές και όχι για τις ήδη κατειλημμένες από τις χρήσεις γης που εξετάστηκαν.

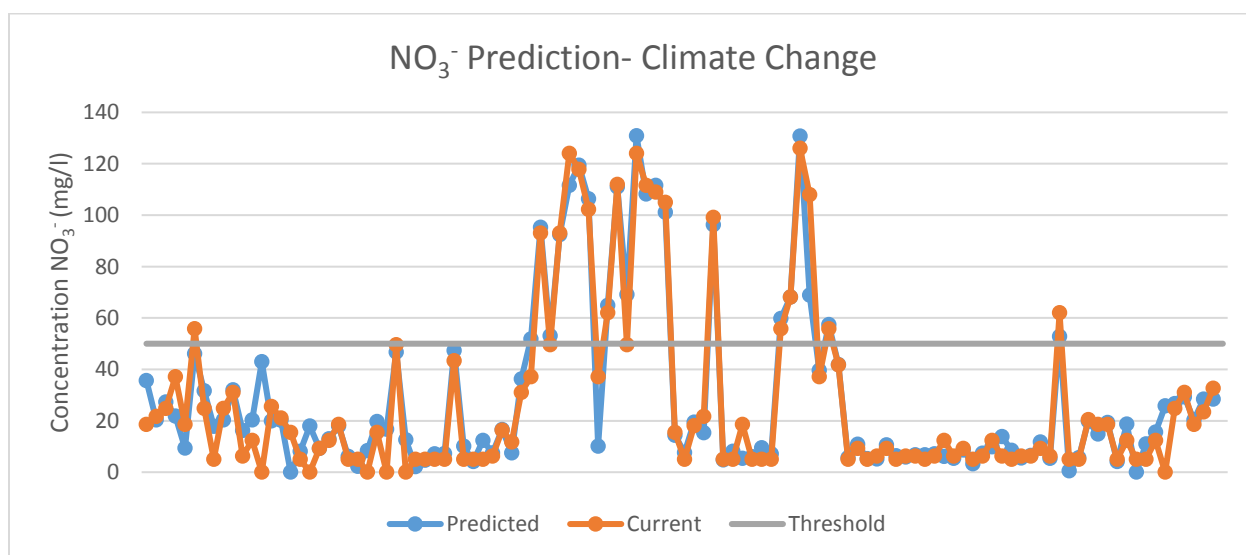
##### 6.4.1 1<sup>ο</sup> Σενάριο – Κλιματική αλλαγή

Τις τελευταίες δεκαετίες, έχει παρατηρηθεί μια έντονη τάση μεταβολής του κλίματος σε παγκόσμια κλίμακα, με ρυθμούς ταχύτερους από αυτούς του παρελθόντος, η οποία σε μεγάλο ποσοστό αποδίδεται στην ανθρώπινη δραστηριότητα.

Ειδικά μετά την βιομηχανική επανάσταση, η συμβολή του ανθρώπινου παράγοντα στην τροποποίηση του κλίματος σε εθνικό αλλά και παγκόσμιο επίπεδο υπήρξε άμεση και καταλυτική. Οι εκπομπές  $\text{CO}_2$  καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τη μέση αύξηση της επιφανειακής θερμοκρασίας, από τα τέλη του 21<sup>ου</sup> αιώνα και έπειτα. Οι προβλέψεις για τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου ποικίλλουν σε ευρύ φάσμα, καθώς επηρεάζονται από παράγοντες όπως η οικονομική δραστηριότητα, το μέγεθος του πληθυσμού, ο τρόπος ζωής, οι αλλαγές στη χρήση ενέργειας και στις χρήσεις γης, η τεχνολογία και η πολιτική για το κλίμα.

Η 5<sup>η</sup> Έκθεση Αξιολόγησης (AR5) της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Αλλαγή του Κλίματος (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) χρησιμοποιεί ένα τυποποιημένο σύνολο σεναρίων πρόβλεψης του μελλοντικού κλίματος, τις **Αντιπροσωπευτικές Διαδρομές Συγκέντρωσης** (Representative Concentration Pathways, **RCPs**). Τα RCPs περιγράφουν τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις για τον 21<sup>ο</sup> αιώνα, αναφορικά με τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου (Greenhouse Gases – GHGs) και τις ατμοσφαιρικές τους συγκεντρώσεις, τις εκπομπές άλλων αερίων ρύπων και τις χρήσεις γης. Περιλαμβάνουν ένα αυστηρό σενάριο

μετρίασης (RCP2.6), δύο ενδιάμεσα σενάρια (RCP4.5 και RCP6.0) και ένα σενάριο με πολύ υψηλές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (RCP8.5). Τα ενδιάμεσα σενάρια αναφέρονται στην περίπτωση όπου δε θα υπάρξουν πρόσθετες προσπάθειες περιορισμού των εκπομπών και αποτελούν τα «βασικά σενάρια». Βάσει του σεναρίου RCP6.0 το πιθανό εύρος της μεταβολής της μέσης επιφανειακής θερμοκρασίας κυμαίνεται μεταξύ 0.9 και 2 °C για τις επόμενες δεκαετίες. Δεδομένου ότι στην περιοχή της Μεσογείου αναμένονται μεγαλύτερες μεταβολές σε σχέση με τις περιοχές μεγάλου γεωγραφικού πλάτους, και γενικότερα δυσμενέστερες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, επιλέχθηκε να μελετηθεί για την περιοχή, αύξηση της θερμοκρασίας κατά 2 °C. Όσον αφορά τις βροχοπτώσεις, σε σχέση με το ίδιο σενάριο, στην περιοχή ενδιαφέροντος αναμένεται μείωση που θα κυμανθεί στο εύρος 5-10% (ΤτΕ, 2011). Και σε αυτήν την περίπτωση επιλέχθηκε να μελετηθεί η ακραία περίπτωση της μείωσης της βροχόπτωσης κατά 10% και κατ' επέκταση ανάλογη πτώση στάθμης του νερού. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο επόμενο γράφημα, όπου με μπλε χρώμα απεικονίζεται η πρόβλεψη των συγκεντρώσεων  $\text{NO}_3^-$  και με πορτοκαλί, η σημερινή καταγραφή. Επιπλέον σημειώνεται η μέση τιμή των νιτρικών ιόντων στην παρούσα κατάσταση και στη μελλοντική στον πίνακα 6.10.



Εικόνα 6.16: Πρόβλεψη συγκεντρώσεων  $\text{NO}_3^-$  - Κλιματική αλλαγή

Πίνακας 6.10. Τρέχουσα και εκτιμημένη μέση συγκέντρωση  $\text{NO}_3^-$  λόγω κλιματικής αλλαγής

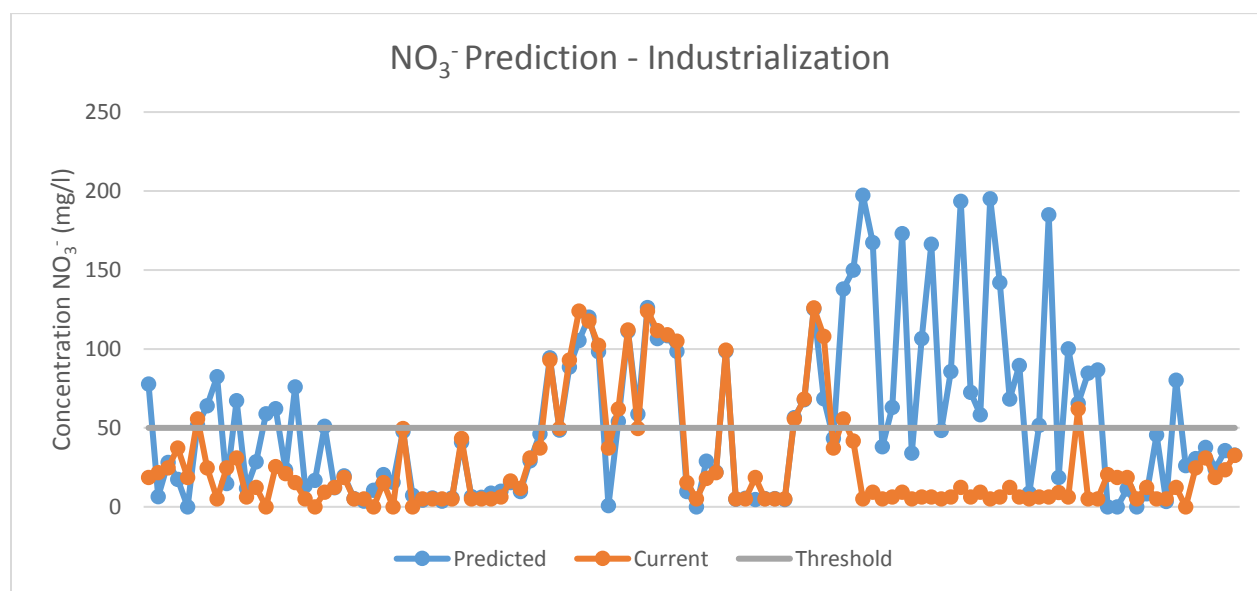
Current Mean Concentration $\text{NO}_3^-$ (mg/l)	Predicted Mean Concentration $\text{NO}_3^-$ (mg/l)
29.10	28.57

Στο σύνολο των μετρήσεων παρατηρείται μικρή πτώση των τιμών των συγκεντρώσεων  $\text{NO}_3^-$ . Η μέση τιμή των συγκεντρώσεων προβλέπεται πως θα μειωθεί κατά περίπου 2%. Η μείωση αυτή

είναι λογική καθώς λόγω μικρότερης κατείσδυσης νερού, τα νιτρικά ιόντα θα συμπαρασύρονται σε μικρότερο βαθμό. Παράλληλα, λόγω της αυξημένη θερμοκρασίας η εξατμισοδιαπνοή θα λαμβάνει χώρα σε πιο έντονους ρυθμούς.

#### 6.4.2 2<sup>ο</sup> Σενάριο – Εκβιομηχάνιση

Όπως έχει αναφερθεί, εκτιμάται πως οι βιομηχανίες είναι υπεύθυνες για το 13% της νιτρορύπανσης των υπόγειων υδάτων που παρατηρείται σε παγκόσμιο επίπεδο. Ορισμένες βιομηχανίες όπως μονάδες παρασκευής βαφών και βιομηχανίες επεξεργασίας μετάλλων χρησιμοποιούν ενώσεις που περιέχουν άζωτο, όπως άνυδρη αμμωνία και νιτρικό οξύ, το οποίο μετά την απόρριψη του στο περιβάλλον μέσω των υγρών ή των στερεών αποβλήτων των βιομηχανιών, μετατρέπεται σε νιτρώδη και νιτρικά ιόντα (Shukla & Saxena, 2018). Για τη μελέτη της επίδρασης των βιομηχανικών δραστηριοτήτων στα επίπεδα της νιτρορύπανσης, εξετάστηκε η περίπτωση μείωσης της σκληρόφυλλης βλάστησης κατά 50%, με αντίστοιχη αύξηση της έκτασης των βιομηχανιών. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο διάγραμμα της εικόνας 6.17 και στον πίνακα 6.11.



Εικόνα 6.17: Πρόβλεψη συγκεντρώσεων  $\text{NO}_3^-$  - Εκβιομηχάνιση

Πίνακας 6.11. Τρέχουσα και εκτιμημένη μέση συγκέντρωση  $\text{NO}_3^-$  λόγω εκβιομηχάνισης

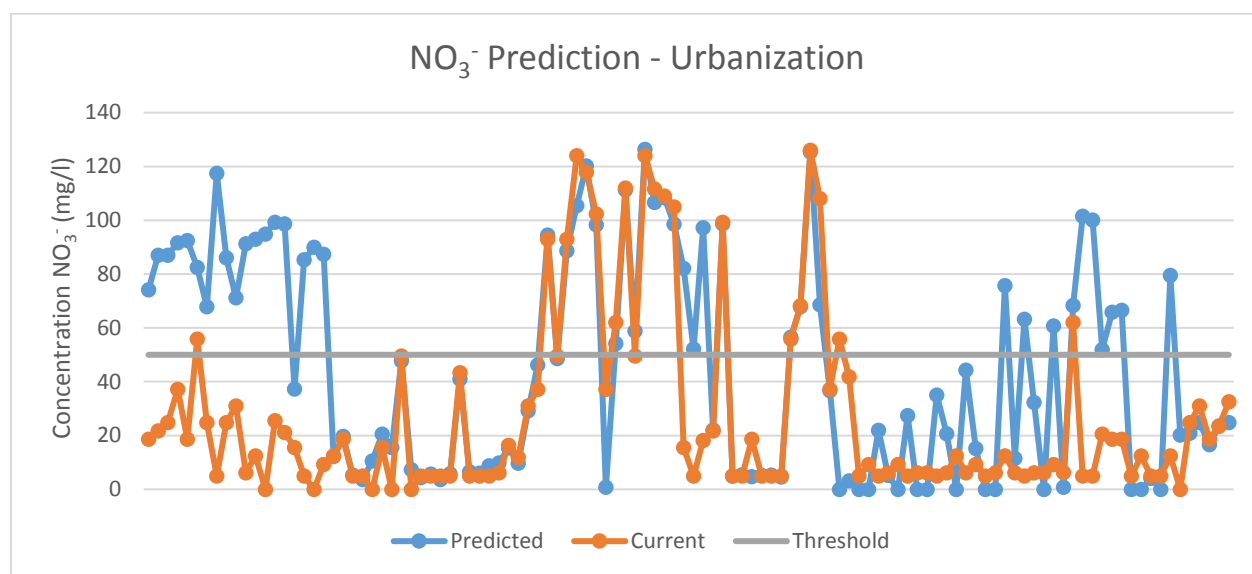
Current Mean Concentration $\text{NO}_3^-$ (mg/l)	Predicted Mean Concentration $\text{NO}_3^-$ (mg/l)
29.10	53.43

Σύμφωνα με αυτό το σενάριο παρατηρείται πολύ μεγάλη αύξηση στα επίπεδα της νιτρορύπανσης, περίπου 84%. Τα σημεία όπου παρατηρείται η μεγαλύτερη αύξηση αφορούν πηγές τα οποία δε έχουν βιομηχανικές εγκαταστάσεις στην ακτίνα επιρροής τους. Αυτό

υποδηλώνει πως οι βιομηχανίες της περιοχής συμβάλουν σε μεγάλο βαθμό στις υψηλές συγκεντρώσεις  $\text{NO}_3^-$  που καταγράφονται στην περιοχή. Συνεπώς οποιαδήποτε κίνηση προς την κατεύθυνση της εκβιομηχάνισης θα έχει ως αποτέλεσμα δυσμενείς επιπτώσεις στο υπόγειο υδατικό σύστημα.

### 6.4.3 3<sup>ο</sup> Σενάριο – Αστικοποίηση

Η νιτρορύπανση που ενδεχομένως προέρχεται από αστικές πηγές οφείλεται σε σηπτικές δεξαμενές, διαρροές αστικών λυμάτων και εφαρμογή λιπασμάτων σε κήπους. Η αποστράγγιση των αστικών βόθρων μπορεί να συνεισφέρει σημαντικές ποσότητες αζώτου στο υπόγειο νερό, καθώς τα οικιακά λύματα περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις αζώτου. Στο συγκεκριμένο σενάριο εξετάστηκε η μείωση της σκληρόφυλλης βλάστησης κατά 50% και αντίστοιχη αύξηση των αστικών εκτάσεων. Όπως προκύπτει από το διάγραμμα 6.18 και τον πίνακα 6.12 και σε αυτήν την περίπτωση αναμένεται αύξηση των επιπέδων της νιτρορύπανσης, κατά μικρότερο όμως ποσοστό (54%).



Εικόνα 6.18: Πρόβλεψη συγκεντρώσεων  $\text{NO}_3^-$  - Αστικοποίηση

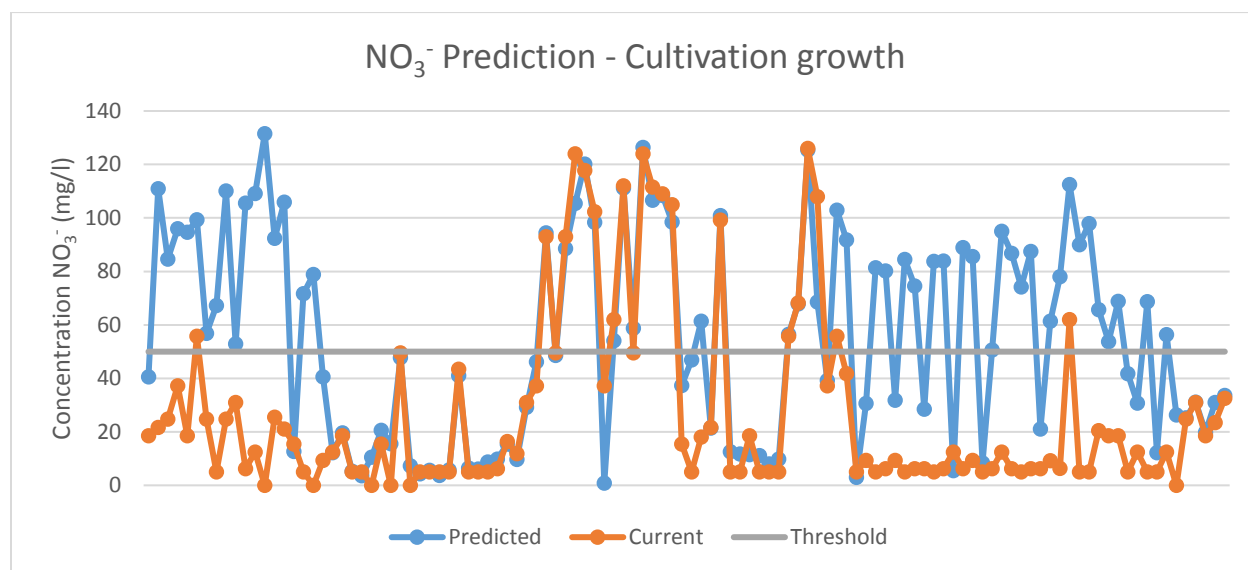
Πίνακας 6.12. Τρέχουσα και εκτιμημένη μέση συγκέντρωση  $\text{NO}_3^-$  λόγω αστικοποίησης

Current Mean Concentration $\text{NO}_3^-$ (mg/l)	Predicted Mean Concentration $\text{NO}_3^-$ (mg/l)
29.10	44.76



#### 6.4.4 4<sup>ο</sup> Σενάριο – Αύξηση καλλιεργειών

Σε αυτό το σενάριο εξετάστηκε η περίπτωση αύξησης των σύνθετων καλλιεργειών που απαντώνται στην περιοχή, μειώνοντας και σε αυτήν την περίπτωση την έκταση της σκληρόφυλλης βλάστησης κατά 50%. Όπως ήταν αναμενόμενο, στο συγκεκριμένο σενάριο σημειώθηκε η μεγαλύτερη αύξηση στις συγκεντρώσεις των νιτρικών ιόντων, της τάξης του 90%. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει τη μεγάλη συνεισφορά των καλλιεργειών στα υψηλά επίπεδα της νιτρορύπανσης.



Εικόνα 6.19: Πρόβλεψη συγκεντρώσεων  $\text{NO}_3^-$  - Αύξηση Καλλιεργειών

Πίνακας 6.13. Τρέχουσα και εκτιμημένη μέση συγκέντρωση  $\text{NO}_3^-$  λόγω αύξησης των σύνθετων καλλιεργειών

Current Mean Concentration $\text{NO}_3^-$ (mg/l)	Predicted Mean Concentration $\text{NO}_3^-$ (mg/l)
29.10	55.29

## 7 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε η δυνατότητα χρήσης ΤΝΔ για τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων  $\text{NO}_3^-$  σε υπόγειο νερό, βασιζόμενων σε απλές μετρήσεις πεδίου και φυσικοχημικές παραμέτρους. Για το σκοπό αυτόν, δημιουργήθηκαν συνολικά τρία νευρωνικά δίκτυα. Για κάθε δίκτυο δοκιμάστηκαν διαφορετικές αρχιτεκτονικές, έτσι ώστε να προσδιοριστεί η πιο κατάλληλη για το πρόβλημα που εξετάστηκε. Έπειτα από τη διαδικασία αυτή, τα μοντέλα αξιολογήθηκαν στατιστικά βάσει τεσσάρων δεικτών. Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων φαίνεται πως τα ΤΝΔ μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εργαλεία για την εκτίμηση των επιπέδων της νιτρορύπανσης υπόγειων υδάτων, αρκεί να εντοπιστούν οι κατάλληλες παράμετροι εισόδου και η βέλτιστη δομή του ΤΝΔ. Όσον αφορά τη λειτουργία των μοντέλων, και στις τρεις περιπτώσεις τα μοντέλα πέτυχαν ικανοποιητική προσομοίωση. Σημαντικό είναι το γεγονός, πως επετεύχθη ικανοποιητική εκπαίδευση των δικτύων και παράλληλα πολύ καλή γενίκευση, ενώ οι τιμές συγκέντρωσης που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση του δικτύου, θεωρούνται αντιπροσωπευτικό δείγμα του υπερχώρου των πιθανών τιμών (οι τιμές συγκεντρώσεων  $\text{NO}_3^-$  σπάνια ξεπερνούν τα 150 mg/l στην περιοχή). Το γεγονός αυτό καθιστά τα μοντέλα ικανά για τον υπολογισμό συγκεντρώσεων νιτρικών και με την είσοδο νέων παραμέτρων. Σύμφωνα με τους στατιστικούς δείκτες, το μοντέλο που βασίστηκε στις παραμέτρους ποιότητας του νερού προσέγγισε σε μεγαλύτερο βαθμό τις συγκεντρώσεις των  $\text{NO}_3^-$ . Το γεγονός αυτό κατά πάσα πιθανότητα οφείλεται στο αυξημένο μέγεθος του δείγματος (263 τιμές έναντι 112 των άλλων δύο μοντέλων), καθώς το μέγεθος του δείγματος εκπαίδευσης είναι καθοριστικής σημασίας για την επίτευξη ικανοποιητικών αποτελεσμάτων από το ΤΝΔ. Επιπρόσθετα, έγινε προσπάθεια εκτίμησης των επιπτώσεων στα επίπεδα της νιτρορύπανσης που θα επιφέρουν αλλαγές στις χρήσεις γης και η κλιματική αλλαγή. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν ήταν συνεπή ως προς τα ποσοστά συνεισφοράς των χρήσεων γης που έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία, όπως και ως προς τις επιπτώσεις που αναμένονται εξ' αιτίας της κλιματικής αλλαγής.

Πιο αναλυτικά, ως προς την απόδοση και τη λειτουργία των μοντέλων:

- Το 1<sup>ο</sup> νευρωνικό δίκτυο, με παραμέτρους εισόδου τις μετρήσεις πεδίου πέτυχε ικανοποιητική προσομοίωση, λαμβανομένου υπόψιν του μικρού μεγέθους των δεδομένων.
- Το 2<sup>ο</sup> νευρωνικό δίκτυο, στο οποίο εισήχθησαν επιπλέον και οι εκτάσεις που καταλαμβάνουν διάφορες χρήσεις γης σε ακτίνα 1000m γύρω από κάθε γεώτρηση, παρουσίασε αυξημένη απόδοση. Χαρακτηριστικό είναι πως οι τιμές όλων των δεικτών βελτιώθηκαν σημαντικά. Η τιμή του NSE για το σετ επαλήθευσης, δηλαδή για το σύνολο των δεδομένων που δεν χρησιμοποιήθηκαν για τη διαδικασία της εκπαίδευσης, θεωρείται αρκετά υψηλή ( $\text{NSE}_{\text{test}} \approx 0.7$ ). Τα καλά αποτελέσματα του συγκεκριμένου δικτύου είναι ιδιαίτερα σημαντικά, καθώς εκτιμάται πως έχει προσεγγιστεί, σε κάποιο βαθμό, το πολύπλοκο σύστημα μεταφοράς  $\text{NO}_3^-$  στο γεωπεριβάλλον. Αυτό πρακτικά σημαίνει, πως η εκτίμηση των συγκεντρώσεων δε βασίζεται απλά σε μια υψηλή

συσχέτιση μεταβλητών, χωρίς να υπάρχει αιτιότητα, αλλά σε παράγοντες που όντως επηρεάζουν τη μεταφορά νιτρικών στο υπόγειο υδατικό σύστημα.

- Το 3<sup>ο</sup> νευρωνικό δίκτυο παρουσίασε την καλύτερη επίδοση. Βάσει όλων των δεικτών, υπολογισμένων για τα σετ δεδομένων που δεν χρησιμοποιήθηκαν στην εκπαίδευση, το μοντέλο είναι ικανό να εκτιμήσει τις συγκεντρώσεις των νιτρικών ιόντων με μικρή απόκλιση. Αξιοσημείωτο είναι επίσης το γεγονός πως ο NSE έχει δώσει χαρακτηριστικά υψηλά τιμές ( $NSE_{test}=0.919301$ ,  $NSE_{valid}=0.996947$ ).
- Όλα τα μοντέλα παρουσιάζουν τάση υποεκτίμησης των συγκεντρώσεων, με τη μεγαλύτερη να παρατηρείται στο 1<sup>ο</sup> νευρωνικό δίκτυο και τη μικρότερη στο 3<sup>ο</sup>.
- Σε όλα τα μοντέλα παρατηρήθηκαν κάποιες μεμονωμένες περιπτώσεις ακραίων σφαλμάτων, η οποία υποδηλώνει την αβεβαιότητα για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης  $NO_3^-$  σε ορισμένα πηγάδια. Λόγω του μικρού δείγματος εκπαίδευσης δικτύων, η ύπαρξη αυτών των σφαλμάτων είναι λογική και πιθανότατα δε θα μπορούσε να αποφευχθεί. Με την είσοδο νέων μετρήσεων στο μοντέλο, η συχνότητα των ακραίων σφαλμάτων όπως και η τιμή τους αναμένεται να μειωθεί.
- Η παραμετροποίηση των μοντέλων και η αναζήτηση της κατάλληλης αρχιτεκτονικής των δικτύων ήταν αρκετά δύσκολη και χρονοβόρα διαδικασία. Με το κατασκευασμένο μοντέλο όμως, η διαδικασία εκτίμησης των συγκεντρώσεων  $NO_3^-$  βάσει νέων δεδομένων είναι ιδιαίτερα εύκολη και δεν απαιτείται παρέμβαση από το χρήστη.
- Όσον αφορά την αρχιτεκτονική των ΤΝΔ, σε κάθε περίπτωση αριθμός νευρώνων χαμηλότερος ή ίσος με τον αριθμό των μεταβλητών εισόδου, δεν απέδιδε ικανοποιητικά αποτελέσματα.
- Οι μέθοδοι εκπαίδευσης που εξετάστηκαν σημείωσαν υψηλή ταχύτητα σύγκλισης - η οποία όμως είναι ανάλογη του αριθμού των δεδομένων εισόδου - και υψηλή επίδοση στη φάση της γενίκευσης.

Ως προς τα σενάρια:

- Βάσει του σεναρίου κλιματικής αλλαγής, όπου αναμένεται αύξηση της θερμοκρασίας κατά 2 °C και μείωση των βροχοπτώσεων κατά 10%, θα προκληθεί μικρή μείωση στα επίπεδα των νιτρικών ιόντων στο υπόγειο νερό, κατά περίπου 2%.
- Όσον αφορά τις χρήσεις γης, όπως ήταν αναμενόμενο, η μεγαλύτερη επίδραση σημειώθηκε στην αύξηση των σύνθετων καλλιεργειών. Μείωση κατά 50% των εκτάσεων σκληρόφυλλης βλάστησης για την τοποθέτηση καλλιεργειών σε ακτίνα 1000 m γύρω από τις γεωτρήσεις που δεν περιβάλλονται από εκτάσεις τέτοιου είδους χρήσης γης, επέφερε τη θεαματική αύξηση της μέσης τιμής των συγκεντρώσεων  $NO_3^-$  κατά 90%. Η τιμή αυτή συνάδει με την επικρατούσα αντίληψη στη βιβλιογραφία, πως κύριος επιβαρυντικός παράγοντας της νιτρορύπανσης των υπόγειων υδάτων είναι η χρήση λιπασμάτων στις αγροτικές δραστηριότητες.

- Πολύ σημαντική αύξηση της νιτρορύπανσης αναμένεται και στην περίπτωση τοποθέτησης νέων βιομηχανιών στην περιοχή (αντίστοιχης δραστηριότητας με τις ήδη υπάρχουσες), κατά περίπου 84%.
- Τέλος, και οι αστικές πηγές παίζουν σημαντικό ρόλο στην νιτρορύπανση της περιοχής, αφού προβλέφθηκε αύξηση των νιτρικών ιόντων κατά 54%, για αύξηση του αστικού ιστού κατά λιγότερο από 50% στο σύνολο της περιοχής.

#### Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η καλή προσομοίωση που επετεύχθη στα μοντέλα, υποδηλώνει τη δυνατότητα χρήσης τους ως εργαλεία για την πρόβλεψη των επιπέδων ρύπανσης, που θα αποτελούν τη βάση για την κατάστρωση σχεδίων διαχείρισης των υπόγειων υδροφορέων. Η απόδοση των μοντέλων μάλιστα δύναται να αυξηθεί, με την εύρεση νέων μετρήσεων και την επανεκπαίδευση του δικτύου.

Για τη βελτίωση της απόδοσης τους επίσης, ενδιαφέρον θα ήταν να αναπτυχθεί ένας κώδικας που να εξετάζει με αυτοματοποιημένη διαδικασία τις παραμέτρους της δομής του δικτύου, με σκοπό τη βελτιστοποίηση της αρχιτεκτονικής τους.

Για το δεύτερο δίκτυο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί, αντί της στάθμης του υδροφορέα, η βροχόπτωση στην περιοχή, κάτι που ήταν επιθυμητό και στο πλαίσιο αυτής της εργασίας, όμως υπήρχε έλλειψη δεδομένων.

Επίσης, ως παράμετρος εισόδου θα μπορούσε να εξεταστεί και το διαλυμένο οξυγόνο στο νερό (DO), το οποίο φαίνεται πως επηρεάζει τα επίπεδα των νιτρικών ιόντων, καθώς η νιτρική ρίζα είναι πολύ ισχυρή σε οξειδωτικό περιβάλλον.

Επιπλέον, ενδιαφέρουσα θα ήταν η εκτίμηση της χρήσης αζωτούχων ενώσεων στις παρακείμενες των γεωτρήσεων περιοχές και η είσοδος των φορτίσεων αζώτου στο μοντέλο. Με τον τρόπο αυτό θα γινόταν καλύτερη περιγραφή της τύχης των  $\text{NO}_3^-$  στο γεωπεριβάλλον, σίγουρα όμως η καταμέτρηση των φορτίσεων είναι μια απαιτητική διαδικασία.

Τα μοντέλα που δημιουργήθηκαν θα μπορούσαν να συνδυαστούν με γεωστατιστικές μεθόδους για την προσέγγιση της χωρικής κατανομής της νιτρορύπανσης. Ο συνδυασμός τους θα αποτελούσε εν δυνάμει εργαλείο για την εκτίμηση των επιπέδων των νιτρικών και σε γεωτρήσεις όπου υπάρχει έλλειψη δεδομένων, ή για τον εντοπισμό του μικρότερου δυνατού αριθμού γεωτρήσεων στις οποίες θα πρέπει να γίνουν δειγματοληψίες για την εκτίμηση της νιτρορύπανσης σε μια περιοχή, ελαχιστοποιώντας με αυτόν το τρόπο το κόστος.

Τέλος, η χρήση των TNA θα μπορούσε να επεκταθεί και στην εκτίμηση των επιπέδων και άλλων ρύπων στο υπόγειο νερό, όπως το εξασθενές χρώμιο ( $\text{Cr(VI)}$ ) που έχει πολύ έντονη παρουσία στα υπόγεια και στα επιφανειακά νερά της περιοχής, ή των χλωριόντων ( $\text{Cl}^-$ ) σε περιπτώσεις παράκτιων υδροφορέων.

## 8 Βιβλιογραφία

- Alahi, Md & Mukhopadhyay, S.C. (2018). Detection methods of Nitrate in water: A Review. *Sensors and Actuators A: Physical*. 280.
- Al-mahallawi, Khamis & Jacky, Mania & HANI, Azzedine & Shahrour, Isam. (2011). Using of neural networks for the prediction of nitrate groundwater contamination in rural and agricultural areas. *Environmental Earth Sciences*. 65. 917-928.
- Almahallawi, Khamis & Jacky, Mania & HANI, Azzedine & Shahrour, Isam. (2011). Using of neural networks for the prediction of nitrate groundwater contamination in rural and agricultural areas. *Environmental Earth Sciences*. 65. 917-928.
- Almasri, M., Kaluarachchi, J. (2007): Modeling nitrate contamination of groundwater in agricultural watersheds. *Journal of Hydrology*, 343, pp.211–229.
- Azmi, Aizat & Amsyar Azman, Ahmad & Ibrahim, Sallehuddin & Md Yunus, Mohd Amri. (2017). Techniques in advancing the capabilities of various nitrate detection methods: A review. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*. 10. 223-261.
- Banerjee, P., V. S. Singh, K. Chattopadhyay, P. C. Chandra and B. Singh (2011). Artificial neural network model as a potential alternative for groundwater salinity forecast, *Journal of Hydrology*, 398 (3-4), 212-220.
- Bashi-Azghadi, Seyyed & Kerachian, Reza & Bazargan-Lari, Mohammad Reza & Solouki, Kazem. (2010). Characterizing an unknown pollution source in groundwater resources systems using PSVM and PNN. *Expert Systems with Applications*. 37. 7154-7161.
- Benzer, Semra & Benzer, Recep. (2018). Modelling Nitrate Prediction of Groundwater and Surface Water Using Artificial Neural Networks. *Journal of Polytechnic*.
- Brindha, K., Elango, L., (2014). Soil and groundwater quality with reference to nitrate in a semiarid agricultural region. *Arab. J. Geosci*. 7:4683.
- Cameron, K.C. & Di, H.J. & Moir, Jim. (2013). Nitrogen losses from the soil/plant system: A review. *Annals of Applied Biology*. 162.
- Case, M., Hall, J. W., Yerramareddy, S., Herman, A., Sun, R., Ranjithan, S. and Westervelt, J. (1993). "Engineering applications of neural networks", *Journal of Intelligent Manufacturing*, 4, 1-21.
- Chien S.H., Prochnow L.I., Cantarella H., Donald L.S. (2009) Recent developments of fertilizer production and use to improve nutrient efficiency and minimize environmental impacts. *Advances in Agronomy*, 102, 268–322.
- Cho, Kyung & Sthiannopkao, Suthipong & Pachepsky, Yakov & Kim, Kyoung-Woong & Kim, Joon Ha. (2011). Prediction of contamination potential of groundwater arsenic in Cambodia, Laos, and Thailand using artificial neural network. *Water research*. 45. 5535-44.

Comly, H.H. Landmark article 8 September 1945: Cyanosis in infants caused by nitrates in well-water. By Hunter H. Comly. JAMA 1987, 257, 2788–2792.

Coppola, E., C. McLane, M. Poulton, F. Szidarovszky, & R. Magelky. (2005a). Predicting conductance due to upcoming using neural networks. Journal of Ground Water 43, no.6: 827±836.

Di H.J., Cameron K.C. (2002a). Nitrate leaching in temperate agroecosystems: sources, factors and mitigating strategies. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 46, 237–256.

Drozd V.M., Branovan I., Shiglik N., Biko J., Reiners C. (2018). Thyroid cancer induction: Nitrates as independent risk factors or risk modulators after radiation exposure, with a focus on the chernobyl accident. Eur. Thyroid J., 7:67–74.

Francis, A.J., Slater, J.M., Dodge, C.J. (1989). Denitrification in deep sub-surface sediments Geomicrobiol. J., 7 (1–2) pp. 103-116.

Ghose, Dillip & Das, Umesh & Roy, Parthajit. (2018). Modeling response of runoff and evapotranspiration for predicting water table depth in arid region using dynamic recurrent neural network. Groundwater for Sustainable Development. 6.

Goulding K., Jarvis S., Whitmore A. (2008). Optimizing nutrient management for farm systems. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences, 363, 667–680.

Govindaraju, Rao. (2000a). Artificial neural networks in hydrology. I: Preliminary concepts. Journal of Hydrologic Engineering. 5. 115-123.

Govindaraju, Rao. (2000b). Artificial Neural Networks in hydrology. II: Hydrologic applications. J. Hydrol. Eng. 5. 124-137.

Greer, F.R.; Shannon, M., 2005. American Academy of Pediatrics Committee on Nutrition and the Committee on Environmental Health. Infant methemoglobinemia: The role of dietary nitrate in food and water. Pediatrics, 116, 784–786.

Griffiths, B & Philippot, Laurent. (2012). Insights into the resistance and resilience of the soil microbial Community. FEMS microbiology reviews. 37.

Gutierrez, Melida & N. Biagioni, Richard & Alarcón-Herrera, Ma & A. Rivas-Lucero, Bertha. (2018). An overview of nitrate sources and operating processes in arid and semiarid aquifer systems. Science of the Total Environment. 624. 1513-1522.

Haykin, S.S., (1999). Neural networks: a comprehensive foundation. Prentice Hall

Haynes R.J., Sherlock R.R. (1986). Gaseous losses of nitrogen. In Mineral Nitrogen in the Plant—Soil System, pp. 242–302. Ed. R.J. Haynes. New York, NY, USA: Academic Press.

Hebb, D.O. (1949). The Organization of Behavior. A neuropsychological theory. John Wiley & Sons, New York, pp. xix, 335.

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

Jenkinson, D.S. (2001). The impact of humans on the nitrogen cycle, with focus on temperate arable agriculture. *Plant and Soil*, 228, 3–15.

Jensen, O.M. (1982). Nitrate in drinking water and cancer in northern Jutland, Denmark, with special reference to stomach cancer, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, Volume 6, Issue 3, pp 258-267, ISSN 0147-6513.

Jianxi Huang, Jingyu Xu, Xingquan Liu, Jia Liu, Limin Wang. (2011). Spatial distribution pattern analysis of groundwater nitrate nitrogen pollution in Shandong intensive farming regions of China using neural network method, *Mathematical and Computer Modelling*, Volume 54, Issues 3–4, pp 995-1004, ISSN 0895-7177.

Kalogirou, Soteris. (2001). Kalogirou, S.A.: Artificial neural networks in renewable energy systems applications: a review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 5, 373-401. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 5.

Kayri Murat (2016). Predictive Abilities of Bayesian Regularization and Levenberg–Marquardt Algorithms in Artificial Neural Networks: A Comparative Empirical Study on Social Data. *Math. Comput. Appl.* 21(2), 20.

Kazakis, Nerantzis & Voudouris, K. (2015). Groundwater vulnerability and pollution risk assessment of porous aquifers to nitrate: Modifying the DRASTIC method using quantitative parameters. *Journal of Hydrology*. 525. 13-25.

Krose, B., & Smagt, P. V. (1996). *An Introduction to Neural Networks*. The University of Amsterdam.

Lallahem, S., Mania, J., Hani, A. & Najjar, Y. (2005). On the use of neural networks to evaluate groundwater levels in fractured media. *J. Hydrol.*, 307, 92–111.

Lehmann, J., Schroth, G., (2003). Nutrient leaching. In: Schroth, G., Sinclair, F.L. (Eds.), *Trees, Crops and Soil Fertility - Concepts and Research Methods*. CABI Publishing, pp. 151–166.

Levy, Y., Shapira, R.H., Chefetz, B., Kurtzman, D. (2017). Modeling nitrate from land-surface to wells' perforations under agricultural land: success, failure, and future scenarios in a Mediterranean case study. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 26.

Lin, G.F. & Chen, G.R. (2008) A systematic approach to the input determination for neural network rainfall–runoff models. *Hydrol. Process.*, 22 14, 2524–2530.

Lin, G.F. & Wu, M.C. (2009). A hybrid neural network model for typhoon rainfall forecasting. *J. Hydrol.*, 375 3–4, 450–458.

- Lin, G.F., Chen, G.R., Huang, P.Y. & Chou, Y.C. (2009). Support vector machine-based models for hourly reservoir inflow forecasting during typhoon-warning periods. *J. Hydrol.*, 372 1–4, 17–29.
- Lin, G.F., Chen, G.R., Wu, M.C. & Chou, Y.C. (2009). Effective forecasting of hourly typhoon rainfall using support vector machines. *Water Resour. Res.*, 45, p. W08440.
- Lin, Szu-Yin & Chiang, Chi-Chun & Li, Jung-Bin & Hung, Zih-Siang & Chao, Kuo-Ming. (2018). Dynamic fine-tuning stacked auto-encoder neural network for weather forecast. *Future Generation Computer Systems*. 89.
- Maria Laura Foddis, Augusto Montisci, Gabriele Uras, Philippe Ackerer. ANN BASED APPROACH TO SOLVE GROUNDWATER POLLUTION INVERSE PROBLEM. 9th International Conference on Modeling, Optimization SIMulation, Jun 2012, Bordeaux, France. 2012.
- Maria, Laura, Foddis & Montisci, Augusto & Uras, Gabriele & Matzeu, Anna & Seddaiu, Giovanna & Carletti, Alberto. (2019). Prediction of nitrate concentration in groundwater using an Artificial Neural Network (ANN) approach.
- Matiatos, Ioannis & Varouchakis, Emmanouil & Papadopoulou, Maria. (2014). Statistical Sensitivity Analysis of Multiple Groundwater Mass Transport Models.
- McCulloch, W.S. & Pitts, W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5: 115-133.
- McLay, C., Dragden, R., Sparling, G., Selvarajah, N. (2001): Predicting groundwater nitrate concentrations in a region of mixed agricultural land use: a comparison of three approaches. *Environmental Pollution*, 115, pp.191– 204.
- Minsky, M. L., & Papert, S. A. (1969). *Perceptrons*. Cambridge, MA: MIT Press
- Morales-Suárez-Varela, Maria & Llopis-Gonzalez, Augustin & L. Tejerizo-Perez, María. (1995). Impact of nitrates in drinking water on cancer mortality in Valencia, Spain. *European Journal of Epidemiology*. 11. 15-21.
- Moriasi, D. N.; Arnold, J. G.; Van Liew, M. W.; Bingner, R. L.; Harmel, R. D.; Veith, T. L. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations (PDF). *Transactions of the ASABE*. 50 (3): 885–900.
- Morris, J.T., Whiting, G.J., Chapelle, F.H. (1988). Potential denitrification rates in deep sediments from the Southeastern Coastal Plain *Environ. Sci. Technol.*, 22 (7) pp. 832-836.
- Muñoz-Leoz B., Ruiz-Romera E., Antigüedad I., Garbisu C. (2011). Tebuconazole application decreases soil microbial biomass and activity. *Soil Biology and Biochemistry*, 43, 2176–2183.
- Murphy P.M. and Aha D.W., (1994). “UCI repository of machine learning databases”, Irvine, CA: University of California, Department of Information and Computer Science.
- Nayak, P., Rao, Y. & Sudheer, K. (2006) Groundwater level forecasting in a shallow aquifer using artificial neural network approach. *Water Resour. Manage*, 20, 77–90.



Neilsen, M.E., Fisk, M.R., Istok, J.D., Pedersen, K. (2006). Microbial nitrate respiration of lactate at in situ conditions in ground water from a granitic aquifer situated 450 m underground. *Geobiology*. 4 (1) pp. 43-52.

Neural Network Toolbox For Use with MATLAB® .Howard Demuth & Mark Beale. User's Guide Version 4, The Math Works,2004.

Ostad-Ali-Askari, Kaveh & Shayannejad, Mohammad & Ghorbanizadeh-Kharazi, Hossein. (2017). Artificial Neural Network for Modeling Nitrate Pollution of Groundwater in Marginal Area of Zayandeh-rood River, Isfahan, Iran. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 21. 134-140.

Palanaippan, M., Gleick, P. H, Allen, L., Cohen, M. J., Christian-Smith, J., Smith, C. (2010). *Clearing the Waters: A focus on water quality solutions*. Nairobi: United Nations Environment Programme, Pacific Institute.

Palli, Domenico & Saieva, Calogero & Coppi, Claudio & Del Giudice, Giuseppe & Magagnotti, Cinzia & Nesi, Gabriella & Orsi, Federica & Airoidi, Luisa. (2001). O 6 -Alkylguanines, Dietary N-Nitroso Compounds, and Their Precursors in Gastric Cancer. *Nutrition and cancer*. 39. 42-9.

Parvizishad, Mina & Dalvand, Arash & Mahvi, Amir & Goodarzi, Fatemeh. (2017). A Review of Adverse Effects and Benefits of Nitrate and Nitrite in Drinking Water and Food on Human Health. *Health Scope*. In Press.

Pliego Marugán, Alberto & García Márquez, Fausto Pedro & Pinar Pérez, Jesús María & Ruiz-Hernández, Diego. (2018). A survey of artificial neural network in wind energy systems. *Applied Energy*. 228. 1822-1836.

Pratt P.F., Lund L.J., Warneke J.E. (1980). Nitrogen losses in relation to soil profile characteristics. In *Agrochemicals in Soils*, pp. 33–47. Eds A. Banin and V. Kafkafi. Oxford, UK: Pergamon.

Purchase B.S. (1974). The influence of phosphate deficiency on nitrification. *Plant and Soil*, 41, 541–547.

Re, V., Sacchi, E., Kammoun, S., Tringali, C., Trabelsi, R., Zouari, K., Daniele, S. (2017). Integrated socio-hydrogeological approach to tackle nitrate contamination in groundwater resources. The case of Grombalia Basin (Tunisia). *Sci. Total Environ*. 593-594, 664–676.

Rivett, Michael & R Buss, Stephen & Morgan, Philip & Smith, Jonathan & D Bemment, Chrystina. (2008). Nitrate Attenuation in Groundwater: A Review of Biogeochemical Controlling Processes. *Water research*. 42. 4215-32.

Rosenblatt, F. (1958). The Perceptron: A Probabilistic Model for Information Storage and Organization in the Brain. *Psychological Review*, 65(6): 386-408.

Rumelhart, D.E., Hinton, G.E. & Williams, R.J. (1986). Learning representations by back-propagating errors. *Nature*, 323(6088): 533-536.

- Ruyters S., Mertens J., Springael D., Smolders E. (2010). Stimulated activity of the soil nitrifying community accelerates community adaption to Zn stress. *Soil Biology and Biochemistry*, 42, 766–772.
- Shomar B, Osenbrück K, Yahya A. (2008). Elevated nitrate levels in the groundwater of the Gaza Strip: distribution and sources. *Sci Total Environ* 398:164–174.
- Shukla, Saurabh & Saxena, Abhishek. (2018). Global Status of Nitrate Contamination in Groundwater: Its Occurrence, Health Impacts, and Mitigation Measures. *Handbook of Environmental Materials Management*. Springer, Cham.
- Silva, R & Cameron, Keith & Di, H.J. & Hendry, Trevor. (1999). A lysimeter study of the impact of cow urine, dairy shed euent, and nitrogen fertiliser on nitrate leaching. *Australian Journal of Soil Research - AUST J SOIL RES.* 37.
- Singh, J., H. V. Knapp, and M. Demissie. 2004. Hydrologic modeling of the Iroquois River watershed using HSPF and SWAT. ISWS CR 2004-08. Champaign, Ill.: Illinois State Water Survey.
- Singh, Raj & Datta, Bithin. (2007). Artificial neural network modeling for identification of unknown pollution sources in groundwater with partially missing concentration observation data. *Water Resources Management*. 21. 557-572.
- Spalding R.F., Exner M.E. (1993) Occurrence of nitrate in groundwater—a review. *J Environ Quality* 22:392–402.
- Tabach, Eddy & Lancelot, Laurent & Shahrour, Isam & Najjar, Yacoub. (2007). Use of artificial neural network simulation metamodeling to assess groundwater contamination in a road project. *Mathematical and Computer Modelling*. 45. 766-776.
- Tanty, Rakesh & S. Desmukh, Tanweer. (2015). Application of Artificial Neural Network in Hydrology- A Review. *International Journal of Engineering Research*. V4.
- Tapoglou, Evdokia & Karatzas, George & Trichakis, Ioannis & Varouchakis, Emmanouil. (2014b). A spatio-temporal hybrid neural network-Kriging model for groundwater level simulation. *Journal of Hydrology*. 519. 3193-3203.
- Tapoglou, Evdokia & Trichakis, Ioannis & Dokou, Zoi & Nikolos, Ioannis & Karatzas, George. (2014a). Groundwater-level forecasting under climate change scenarios using an artificial neural network trained with particle swarm optimization. *Hydrological Sciences Journal*. 59.
- Thavamani P., Malik S., Beer M., Megharaj M., Naidu R. (2012). Microbial activity and diversity in long-term mixed contaminated soils with respect to polyaromatic hydrocarbons and heavy metals. *Journal of Environmental Management*, 99, 10–17.
- Trichakis, I., Nikolos, I., & Karatzas, G. (2009). Optimal selection of artificial neural network parameters for the prediction of a karstic aquifer's response. *Hydrological Processes*, pp. 2956-2969.

- Trichakis, I.C., Nikolos, I.K. & Karatzas, G.P. (2011). Artificial Neural Network (ANN) Based Modeling for Karstic Groundwater Level Simulation. *Water resources management*, pp. Volume 25, Number 4, 1143-1152.
- Vitousek, P.M., Cassman, K., Cleveland, C., Crews, T., Field, C.B., Grimm, N.B., et al., (2002). Towards an ecological understanding of biological nitrogen fixation. *Biogeochemistry* 57 (58):1–45.
- W. Pitts, W.S. McCulloch. How we know universals. The perception of auditory and visual forms *Bull. Math. Biophys.*, 9 (1947), pp. 127-147
- Wagh, Vasant & Panaskar, Dipak & Muley, Aniket & Mukate, Shrikant & Gaikwad, Satyajit. (2018). Neural Network Modelling for Nitrate Concentration in groundwater of Kadava River basin, Nashik, Maharashtra, India. *Groundwater for Sustainable Development*.
- Wakida, F.T., Lerner, D.N. (2005). Non-agricultural sources of groundwater nitrate: a review and case study. *Water Res.* 39, 3–16.
- Ward, Mary & Jones, Rena & Brender, Jean & de Kok, Theo & J Weyer, Peter & T Nolan, Bernard & M Villanueva, Cristina & Breda, Simone. (2018). Drinking Water Nitrate and Human Health: An Updated Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 15. 1557.
- WHO (World Health Organization) (2011) Guidelines for drinking-water quality, 4th edn. World Health Organization, Geneva. Available: Accessed 10 Apr 201.
- Wu, Jing & Li, Zhenbo & Zhu, Ling & Li, Guangyao & Niu, Bingshan & Peng, Fang. (2018). Optimized BP neural network for Dissolved Oxygen prediction. *IFAC-PapersOnLine*. 51. 596-601.
- Yadav, Amit & Chandel, S. (2014). Solar radiation prediction using Artificial Neural Network techniques: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 33. 772-781.
- Yesilnacar M.I., Sahinkaya E., Naz M. and. Ozkaya B. (2008). Neural network prediction of nitrate in groundwater of Harran Plain, Turkey. *Environmental Geology*, 56:19–25.
- Young C.P., Hall E.S., Oakes D.B. (1976). Nitrate in Groundwater Studies on the Chalk near Winchester, Hampshire. Technical Report 31. Medmenham, UK: Water Research Centre.
- Zhang, Y., Li, F., Zhang, Q., Li, J., Liu, Q. (2014). Tracing nitrate pollution sources and transformations in surface- and ground-waters using environmental isotopes. *Sci. Total Environ.* 490, 213–222.

## Ελληνική

Γεωργούλη, Α. (2015). Μηχανική Μάθηση, Τεχνητή νοημοσύνη (κεφ 4.). [ηλεκτρ. βιβλ.] Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών.

Γιαννουλόπουλος Π. (2008). Αναγνωριστική Υδρογεωλογική - Υδροχημική Έρευνα Ποιοτικής Επιβάρυνσης των Υπόγειων Νερών της Ευρύτερης Περιοχής της Λεκάνης του Ασωπού Ν. Βοιωτίας. ΙΓΜΕ, Διεύθυνση Υδρογεωλογίας.

Δερματάς Δ., 2009. «Ρύπανση του Εδάφους και των Υπόγειων Υδροφορέων». Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Ειδική Γραμματεία Υδάτων. (2017). 1<sup>η</sup> Αναθεώρηση Σχεδίου Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας (EL 07), Προσχέδιο Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών. Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας.

Επιτροπή Μελέτης Επιπτώσεων Κλιματικής Αλλαγής (ΤτΕ) (2011). Οι περιβαλλοντικές, Οικονομικές και Κοινωνικές επιπτώσεις της Κλιματικής Αλλαγής στην Ελλάδα, Ίδρυμα Εκτύπωσης Τραπεζογραμματίων και Άξιων της Τράπεζας της Ελλάδος.

Ευρωπαϊκή Επιτροπή. (2018). ΕΚΘΕΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟ ΚΑΙ ΤΟ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΟΒΟΥΛΙΟ σχετικά με την εφαρμογή της οδηγίας 91/676/ΕΟΚ του Συμβουλίου για την προστασία των υδάτων από τη νιτρορύπανση γεωργικής προέλευσης με βάση τις εκθέσεις των κρατών μελών για την περίοδο 2012–2015, Βρυξέλλες.

Θέος Δ. Ν., (2008). Υδρολογικό ισοζύγιο της λεκάνης του Ασωπού ποταμού. Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα.

Καμπουρλάζος Γ. Βασίλειος, Παπακώστας Α. Γεώργιος (2015). Εισαγωγή στην Υπολογιστική Νοημοσύνη, Μια ολιστική Προσέγγιση. Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα.

Κατσαμάγκα Τ. (2014). Πλήρης Κοστολόγηση του αρδευτικού νερού στην ευρύτερη περιοχή του Κωπαϊδικού Πεδίου Ν. Βοιωτίας, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Δ.Π.Μ.Σ. "ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ", Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ).

Κοψιάυτη Μ. (2009). Διερεύνηση στρατηγικών παραμετροποίησης υδρογεωλογικού υπομοντέλου του λογισμικού Υδρόγειος – εφαρμογή στη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ).

Λαμπράκης, Ν. (1991): Εισαγωγή στην Υδροχημεία. Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Πατρών.

Λάμπας Ν. Ιωάννης (2018). «Εφαρμοσμένη υδρογεωλογική έρευνα παράκτιων υδατικών συστημάτων: η περίπτωση του παράκτιου τμήματος Αταλάντης Ν. Φθιώτιδας», Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών, Τομέας Γεωλογικών Επιστημών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ) Ελλάδα.

Νίκα Κ., Πούλος Σ., Γκουρνέλος Θ., Νάστος Π., (2014) Μελέτη της υδάτινης απορροής και στερεοπαροχής της λεκάνης του Βοιωτικού Ασωπού. Η επίδραση της κλιματικής αλλαγής.

ΤΕΕ (2009) “Το πρόβλημα του Ασωπού ποταμού, προτάσεις αντιμετώπισής του”, Ομάδα εργασίας: Ζιώγας Χ., Θεοχάρη Χ., Λειβαδάρος Ρ., Μπούρα Α., Παντελάρας Π., Παπαδοπούλου Μ., Στάμου Α.

Χυσέني Σ., Ε., (2014). Εκτίμηση της επιβάρυνσης του υπόγειου υδροφορέα της Λ.Α.Π. Ασωπού, με χρώμιο από βιομηχανικές δραστηριότητες, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ).

Ψαρροπούλου Ευτυχία (2010). «Μαθηματικό μοντέλο προσομοίωσης της νιτρικής ρύπανσης στον προσχωματικό υδροφόρο της παραλιακής ζώνης Κορινθίας», Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, Ελλάς.

## Παράρτημα Α

### Κώδικας TNΔ1

```
function [Y1,Xf,Af] = NO3NNFunction7par(X,~,~)
%MYNEURALNETWORKFUNCTION neural network simulation function.
%
% Generated by Neural Network Toolbox function genFunction, 25-Jan-2019
15:53:14.
%
% [Y] = myNeuralNetworkFunction(X,~,~) takes these arguments:
%
%   X = 1xTS cell, 1 inputs over TS timesteps
%   Each X{1,ts} = 7xQ matrix, input #1 at timestep ts.
%
% and returns:
%   Y = 1xTS cell of 1 outputs over TS timesteps.
%   Each Y{1,ts} = 1xQ matrix, output #1 at timestep ts.
%
% where Q is number of samples (or series) and TS is the number of timesteps.

%#ok<*RPMT0>

% ===== NEURAL NETWORK CONSTANTS =====

% Input 1
x1_step1_xoffset = [385623.94;4238644;6.92;376;8.5;0;2.3];
x1_step1_gain = [2.42000550793254e-05;6.28515760032683e-
05;1;0.00105042016806723;0.137931034482759;0.0526315789473684;0.0122189638318
671];
x1_step1_ymin = -1;

% Layer 1
b1 = [0.28279758186800225;0.62017944271192649;0.28521916496569943;-
0.1284898264323541;-0.67685395835057505;-0.66688392177200118;-
0.0074031869838971911;-0.0086673534011659503;1.6360378248536955;-
0.56612102216856253];
IW1_1 = [-0.00118950261875686 0.80853541036767296 -0.52517771711247052
0.40946173527394902 -0.63160862550507779 -0.34627848776981351
0.76234052293271415;1.3520794462781287 0.74142138695763604 -
0.34557480038476518 0.031884245627168115 -0.0031007898118921842
1.0672386613326768 0.76894081087784061;-1.0097955538458352 0.8256073474768082
-0.073667779859953292 1.068635284277113 -0.25762364033475893 -
0.24287126282064256 -0.51026916952026025;0.35492050068000774
0.93386582519153938 0.4661284120703727 -0.011718467937461572 -
0.28390969210087363 0.68297889808976697
0.66693180659175866;1.1112920986022601 -0.94415507425332645 -
0.069334720700630556 -0.55946904665452557 -0.95737142927271379
0.6818029374790131 1.990072190441257;0.77378763366578995 0.007461085682329731
-0.11017739145831218 0.28704050922433028 0.83063942407042812
1.1225715879472167 -0.7762828847426726;-0.013314495573644877
0.017201051350052728 0.019815520601088765 -0.029215976291530985
0.022238836168844006 -0.0072175819991587495 -0.0042738613297471206;-
0.015586736124891257 0.020185715771287811 0.023304314510903167 -
0.034394890479095573 0.026157580024042743 -0.0085978525020618396 -
0.0050159559036431186;-2.0294187608987788 3.1169757085099317
```

```

0.26214200840346702 -0.62059728159199856 -0.22663526787186472 -
0.58575520782310742 -1.6192569427283767;0.10610041302408095 -
1.3778145439646647 0.49513127013007757 0.44136123726205551 1.2468390016794131
-0.19267576038761292 0.11210479192060331];

% Layer 2
b2 = -0.13427439571770614;
LW2_1 = [1.3263688162884257 -1.6382712101686163 -1.4425956389861325
1.0177091673816512 -2.2838900756451754 1.2420879892103609
0.048416461947781861 0.056960077235118818 -2.3626684190262472 -
1.1869132320719225];

% Output 1
y1_step1_ymin = -1;
y1_step1_gain = 0.0165289256198347;
y1_step1_xoffset = 5;

% ===== SIMULATION =====

% Format Input Arguments
isCellX = iscell(X);
if ~isCellX, X = {X}; end;

% Dimensions
TS = size(X,2); % timesteps
if ~isempty(X)
    Q = size(X{1},2); % samples/series
else
    Q = 0;
end

% Allocate Outputs
Y = cell(1,TS);

% Time loop
for ts=1:TS

    % Input 1
    Xp1 =
    mapminmax_apply(X{1,ts},x1_step1_gain,x1_step1_xoffset,x1_step1_ymin);

    % Layer 1
    a1 = tansig_apply(repmat(b1,1,Q) + IW1_1*Xp1);

    % Layer 2
    a2 = repmat(b2,1,Q) + LW2_1*a1;

    % Output 1
    Y{1,ts} =
    mapminmax_reverse(a2,y1_step1_gain,y1_step1_xoffset,y1_step1_ymin);
end

% Final Delay States
Xf = cell(1,0);

```

```
Af = cell(2,0);

% Format Output Arguments
if ~isCellX, Y = cell2mat(Y); end
Y1=Y{1};
Y1(Y1<0)=0;
end

% ===== MODULE FUNCTIONS =====

% Map Minimum and Maximum Input Processing Function
function y = mapminmax_apply(x,settings_gain,settings_xoffset,settings_ymin)
y = bsxfun(@minus,x,settings_xoffset);
y = bsxfun(@times,y,settings_gain);
y = bsxfun(@plus,y,settings_ymin);
end

% Sigmoid Symmetric Transfer Function
function a = tansig_apply(n)
a = 2 ./ (1 + exp(-2*n)) - 1;
end

% Map Minimum and Maximum Output Reverse-Processing Function
function x =
mapminmax_reverse(y,settings_gain,settings_xoffset,settings_ymin)
x = bsxfun(@minus,y,settings_ymin);
x = bsxfun(@rdivide,x,settings_gain);
x = bsxfun(@plus,x,settings_xoffset);
end
```



## Κώδικας TNΔ2

```
function [Y2,Xf,Af] = NeuralNetworkFunctionNO3(X,~,~)
%MYNEURALNETWORKFUNCTION neural network simulation function.
%
% Generated by Neural Network Toolbox function genFunction, 25-Jan-2019
18:06:22.
%
% [Y] = myNeuralNetworkFunction(X,~,~) takes these arguments:
%
%   X = 1xTS cell, 1 inputs over TS timesteps
%   Each X{1,ts} = 16xQ matrix, input #1 at timestep ts.
%
% and returns:
%   Y = 1xTS cell of 1 outputs over TS timesteps.
%   Each Y{1,ts} = 1xQ matrix, output #1 at timestep ts.
%
% where Q is number of samples (or series) and TS is the number of timesteps.

%#ok<*RPMT0>

% ===== NEURAL NETWORK CONSTANTS =====

% Input 1
x1_step1_xoffset = [385623.94;4238644;6.92;376;8.5;0;2.3;0;0;0;0;0;0;0;0;0];
x1_step1_gain = [2.42000550793254e-05;6.28515760032683e-
05;1;0.00105042016806723;0.137931034482759;0.0526315789473684;0.0122189638318
671;4.57142857142857e-06;6.4e-06;1.6e-05;3.2e-06;6.80851063829787e-
07;7.44186046511628e-07;2.66666666666667e-06;1.77777777777778e-
06;8.64864864864865e-07];
x1_step1_ymin = -1;

% Layer 1
b1 = [-0.058245989211265725;0.12432415049346263;-0.058247676592851579;-
0.055440910122607524;0.058246239433220916;-
0.058249789037510324;0.084626152199595392;-0.058245797364234284;-
0.30016394599910506;-
0.10689951790236181;0.058245735146874589;0.058245055950411753;0.0821500940578
84288;0.058248037636904872;0.058246066154004926;-
0.089071300689658572;0.058246092227360602;-0.27170071453495648];
IW1_1 = [-0.0031549083269342003 -0.034148766263905811 0.072197033170338015 -
0.021831288825913425 -0.017507163498272891 0.04712717574217698
0.033238375244352296 0.0094503642577329107 0.076609488843936202
0.047757603304487313 0.062848421462985291 -0.028357092523104237
0.031767039510326084 0.015440075107332776 0.037660654129866425
0.08377524681341128;0.38445371797374944 -1.0562290661301332 -
0.011350289197666657 0.1099347098334205 0.042717704270295288
1.3211637859258496 2.1999221259447661 -0.82344965422712568
0.066857228938162816 -0.21373530798902368 -0.015407530147607068 -
0.36165216304743997 -0.32404116647619646 -0.30661036617269399 -
0.084109286377574907 0.80225492771108764;-0.0031554823142962681 -
0.034150044157764431 0.072200327586946861 -0.021832450964794577 -
0.017508533403212807 0.047129000918943162 0.033239364393705659
0.0094500194487901305 0.0766121750124346 0.047758918921017815
0.062850280288335197 -0.028358232357187253 0.031769592290557862
0.015440667820157883 0.037661394899896838
```

0.083778193671470352;0.2586624756157872 -0.29641575007148513  
 0.78042211510494608 0.65575047129673902 0.065915841750574827  
 0.63930350458101792 0.067228904849073651 0.017537088690325896  
 0.02856254651584135 0.10470646257753743 0.0031105101522651626 -  
 0.21822587774301097 -0.15608490737699043 0.067881958714031507 -  
 0.043369547548977747 -0.2685236101743721;0.0031549934391511092  
 0.0341489557600064 -0.072197521685573418 0.021831461156314444  
 0.017507366630754518 -0.047127446392134544 -0.033238521922301062 -  
 0.0094503131301477729 -0.076609887171500746 -0.047757798397696671 -  
 0.062848697108221677 0.028357261547443779 -0.031767418048078686 -  
 0.015440162997559995 -0.03766076398208542 -0.083775683797503067;-  
 0.0031562009916329963 -0.034151644026329454 0.072204452204091787 -  
 0.021833905927472513 -0.017510248638554694 0.047131285996611524  
 0.033240602785619688 0.0094495876872011508 0.076615537947668191  
 0.04776056594318083 0.062852607367499966 -0.028359659362434338  
 0.031772788451629515 0.015441409913032163 0.037662322199789357  
 0.083781882991419698;0.11964705842811299 -0.24486504535857448  
 0.55366137282424699 -0.39263568498947332 0.48340511527001156  
 0.19855491717918933 0.35167815551869752 0.32938253833050424  
 0.12805383216863722 -0.21059066032488136 -0.047710813061917989 -  
 0.43963993234880405 -0.69881443661691955 0.16670009871482153 -  
 0.26880437409166402 0.46978907039997919;-0.0031548430718070677 -  
 0.034148620976519523 0.072196658625398841 -0.021831156699686174 -  
 0.01750700775764568 0.047126968234178696 0.033238262786008714  
 0.0094504034566510568 0.076609183444315457 0.047757453724997831  
 0.062848210123765805 -0.028356962931301022 0.03176674928597871  
 0.015440007721999245 0.037660569904559439  
 0.083774911775814725;0.44744700521960401 -0.69528447462529597  
 0.28939690300335874 -0.33191743814789848 -0.56896490897481999 -  
 1.0933260288767772 -1.5179337338576475 -0.12583760114024078  
 0.49552386049138525 0.20197270140600027 0.3912943699579457  
 0.19551378654274232 -0.40361959677384307 0.43468315291962645  
 0.33532754358573047 -0.012059766115889275;0.033292518521953737 -  
 0.37153274209047654 1.4445859209704646 -0.76989823430156601  
 0.056782098711389589 1.048193287838376 0.22876559015499653  
 0.55688563555306825 0.25042197788919207 -0.17972201397635065  
 0.067016105025051786 0.090778654426494035 0.27945862751568623  
 0.039916441651386074 0.18581076270496097 -  
 0.17804995865474216;0.0031548219092984039 0.034148573858911409 -  
 0.072196537158424098 0.021831113850352881 0.017506957250326766 -  
 0.047126900938104489 -0.033238226315102856 -0.0094504161689563954 -  
 0.076609084401243213 -0.047757405215288783 -0.062848141584956232  
 0.028356920903833176 -0.031766655164779958 -0.015439985868596073 -  
 0.037660542589543954 -0.08377480312098648;0.0031545908947321301  
 0.034148059503084902 -0.072195211182621441 0.021830646089731606  
 0.017506405901814407 -0.047126166307719146 -0.033237828184394504 -  
 0.0094505549371476892 -0.076608003202919592 -0.047756875658085909 -  
 0.062847393380499689 0.028356462112981696 -0.031765627709658753 -  
 0.0154397473101803 -0.037660244400171815 -  
 0.083773616997433561;0.3361431111941503 -0.56918154889527262  
 0.095320965921573547 -0.57053690255824663 -0.36359527090269267 -  
 0.35775556708694672 0.72774918153037205 -0.37912041467044044  
 0.056419464731442479 -0.26403569152161943 -0.15652983274145618  
 0.28206108739104235 0.080071986478081003 -0.42407119044849206 -  
 0.18970960313780841 0.088063684341529391;0.0031556051377600119  
 0.034150317590872954 -0.072201032512487301 0.021832699630942583

```
0.017508826540011086 -0.047129391458257293 -0.033239576045428432 -
0.0094499456624807868 -0.07661274977340192 -0.047759200418931842 -
0.062850678015969053 0.028358476247720015 -0.031770138530688288 -
0.015440794647766216 -0.037661553393341693 -
0.083778824213776484;0.0031549344986031447 0.034148824533462428 -
0.072197183387251604 0.021831341817037893 0.017507225960693758 -
0.047127258966275593 -0.033238420347406469 -0.0094503485362593519 -
0.076609611328677413 -0.047757663295261897 -0.062848506223326689
0.028357144497677979 -0.031767155909383345 -0.015440102133279246 -
0.037660687909323795 -0.08377538118491272;-0.17190124543317051 -
0.24658833522297546 0.59417156065458021 -0.012456757858887363 -
0.30644221388048148 0.35593131838267994 0.15430494131699277
0.037371192094018298 0.15316676262761136 0.1266146279701485
0.093485602304027179 0.09583234718971681 0.39470743921949886
0.42702109756670042 0.053827430041092375 -
0.11964514386879919;0.0031549433673510384 0.034148844279113744 -
0.072197234290912057 0.021831359774006309 0.017507247127227947 -
0.047127287168218908 -0.033238435631366949 -0.0094503432087397667 -
0.076609652834748937 -0.047757683624153807 -0.062848534945810747
0.028357162110158915 -0.031767195353288542 -0.015440111291504648 -
0.037660699356042368 -0.083775426719023785;0.14091840672332054 -
0.55745255297039353 -0.53736285117086835 -0.18848715127756005 -
0.004827460113794522 0.69848939495676543 0.036231032920856734 -
0.16617520519541706 0.50108192489887482 -0.12040802547442074
0.3159108282860334 0.04300030663301159 0.19381073092648043
0.41508572327368676 0.24286071652293076 -0.18670698734426341];
```

```
% Layer 2
```

```
b2 = -0.37132660702288794;
LW2_1 = [0.2033244557099109 -1.8138513542103776 0.20333241591827372
1.0665556542017345 -0.20332563610964494 0.20334238180954342
1.3216626562702505 0.20332355069343777 -1.6760335708035985 -
1.2704576296362997 -0.20332325719103411 -0.20332005319726185
1.2056944936332705 -0.2033341191821352 -0.20332481867966451
0.99392301720335119 -0.2033249416782878 1.1869814451228482];
```

```
% Output 1
```

```
y1_step1_ymin = -1;
y1_step1_gain = 0.0165289256198347;
y1_step1_xoffset = 5;
```

```
% ===== SIMULATION =====
```

```
% Format Input Arguments
```

```
isCellX = iscell(X);
if ~isCellX, X = {X}; end;
```

```
% Dimensions
```

```
TS = size(X,2); % timesteps
if ~isempty(X)
    Q = size(X{1},2); % samples/series
else
    Q = 0;
end
```

```
% Allocate Outputs
Y = cell(1,TS);

% Time loop
for ts=1:TS

    % Input 1
    Xp1 =
    mapminmax_apply(X{1,ts},x1_step1_gain,x1_step1_xoffset,x1_step1_ymin);

    % Layer 1
    a1 = tansig_apply(repmat(b1,1,Q) + IW1_1*Xp1);

    % Layer 2
    a2 = repmat(b2,1,Q) + LW2_1*a1;

    % Output 1
    Y{1,ts} =
    mapminmax_reverse(a2,y1_step1_gain,y1_step1_xoffset,y1_step1_ymin);
end

% Final Delay States
Xf = cell(1,0);
Af = cell(2,0);

% Format Output Arguments
if ~isCellX, Y = cell2mat(Y); end
Y2=Y{1};
Y2(Y1<0)=0;
end

% ===== MODULE FUNCTIONS =====

% Map Minimum and Maximum Input Processing Function
function y = mapminmax_apply(x,settings_gain,settings_xoffset,settings_ymin)
y = bsxfun(@minus,x,settings_xoffset);
y = bsxfun(@times,y,settings_gain);
y = bsxfun(@plus,y,settings_ymin);
end

% Sigmoid Symmetric Transfer Function
function a = tansig_apply(n)
a = 2 ./ (1 + exp(-2*n)) - 1;
end

% Map Minimum and Maximum Output Reverse-Processing Function
function x =
mapminmax_reverse(y,settings_gain,settings_xoffset,settings_ymin)
x = bsxfun(@minus,y,settings_ymin);
x = bsxfun(@rdivide,x,settings_gain);
x = bsxfun(@plus,x,settings_xoffset);
end
```

### Κώδικας TNΔ3

```
function [Y3,Xf,Af] = NeuralNetworkFunctionions(X,~,~)
%MYNEURALNETWORKFUNCTION neural network simulation function.
%
% Generated by Neural Network Toolbox function genFunction, 29-Jan-2019
15:56:04.
%
% [Y] = myNeuralNetworkFunction(X,~,~) takes these arguments:
%
%   X = 1xTS cell, 1 inputs over TS timesteps
%   Each X{1,ts} = 9xQ matrix, input #1 at timestep ts.
%
% and returns:
%   Y = 1xTS cell of 1 outputs over TS timesteps.
%   Each Y{1,ts} = 1xQ matrix, output #1 at timestep ts.
%
% where Q is number of samples (or series) and TS is the number of timesteps.

%#ok<*RPMT0>

% ===== NEURAL NETWORK CONSTANTS =====

% Input 1
x1_step1_xoffset = [6.4;234;2.4;4.4;2.3;0.4;49;5.3;0];
x1_step1_gain =
[0.740740740740741;0.000794912559618442;0.00856164383561644;0.017137960582690
7;0.00664010624169987;0.158730158730159;0.00373134328358209;0.003604253018561
9;0.0134318334452653];
x1_step1_ymin = -1;

% Layer 1
b1 = [1.8412099373171944;1.2690531339772844;-
1.4133189797013976;0.61667528734986488;0.62344874482800794;-
0.4837035238705587;0.84303155634102134;0.43754122539962409;1.4301559415674097
;-1.9956699710086188];
IW1_1 = [-0.57064217664749339 0.7803112362775414 -0.69045206796558911 -
0.62744427134326741 -0.093300039933440729 0.47780433589974658
0.79710412051061097 -0.67688610456547726 0.12256755620703744;-
1.1395585416210254 0.66901264953837603 0.34926767227767236
0.44461291599396807 0.20924032838824269 -0.35483936308079522 -
0.015759285337047908 1.4997168915987229 1.4006543454599774;-
0.089407654516449359 -0.20657298866305809 0.51566269801110221
1.1343202102529226 -1.1634196753926853 -0.086719294362472096 -
1.0633345586409815 -0.77110900399694771 -0.44769573580026634;-
0.68903666955867671 0.79959254100574351 -0.21334860746489615 -
0.42954546349967559 1.3685118508487319 0.70202249189309029
0.53281447684332095 -1.3432588935665952 -0.15660582654328026;-
0.15400098106018578 0.45430241501675411 0.55858547273551584
0.41070048211767218 0.73808439024597872 -0.62645055350732359 -
0.3277590766185523 0.054755326982828437 0.49316198360796265;-
0.036676709052577111 0.1333088624737872 1.526823638418298 1.4324509722912855
0.38110725486954705 -0.053237534357362643 -1.716707409552729 -
1.30027931802063 -0.31996007997104209;0.71884591113533569 -1.1860021373668186
-0.00977092268309291 0.22396714269126311 -1.1302251166964521 -
0.016323762419122229 0.36575588274209181 -0.49039872676626917 -
```

```

1.0026741504704679;0.16962669605691152 0.07387386498627041 -
0.56985598453529207 -0.56798195530592843 -0.7627994074618748 -
0.83941965379276884 0.46269440010941071 0.93942885559053246 -
0.31908299101394877;0.19762798428013237 -0.29205612006101161
1.1341957754881959 -0.1432010373271487 0.3901847718526551 -
0.48967038188496953 0.75264132409266382 -0.91597107550530199 -
0.61474744645135571;-0.61373523431723964 0.51702966966302011 -
0.84623485510847662 -0.087038553384128275 -2.3110589472959129
0.17336330086353277 -0.15582734936706763 0.43920795123912787
0.037780958467412668];

% Layer 2
b2 = 0.2671472093893722;
LW2_1 = [-0.20413170399495856 -0.39729756828728086 1.176130702170471
0.80789786164038369 0.72805001333574448 1.8854144662287133 -
0.1964076320280321 -1.0324336804436591 1.1732122825080138 -
1.4209732306123564];

% Output 1
y1_step1_ymin = -1;
y1_step1_gain = 0.0123456790123457;
y1_step1_xoffset = 5;

% ===== SIMULATION =====

% Format Input Arguments
isCellX = iscell(X);
if ~isCellX, X = {X}; end;

% Dimensions
TS = size(X,2); % timesteps
if ~isempty(X)
    Q = size(X{1},2); % samples/series
else
    Q = 0;
end

% Allocate Outputs
Y = cell(1,TS);

% Time loop
for ts=1:TS

    % Input 1
    Xp1 =
    mapminmax_apply(X{1,ts},x1_step1_gain,x1_step1_xoffset,x1_step1_ymin);

    % Layer 1
    a1 = tansig_apply(repmat(b1,1,Q) + IW1_1*Xp1);

    % Layer 2
    a2 = repmat(b2,1,Q) + LW2_1*a1;

    % Output 1

```

```
Y{1,ts} =  
mapminmax_reverse(a2,y1_step1_gain,y1_step1_xoffset,y1_step1_ymin);  
end  
  
% Final Delay States  
Xf = cell(1,0);  
Af = cell(2,0);  
  
% Format Output Arguments  
if ~isCellX, Y = cell2mat(Y); end  
Y3=Y{1};  
Y3(Y3<0)=0;  
end  
  
% ===== MODULE FUNCTIONS =====  
  
% Map Minimum and Maximum Input Processing Function  
function y = mapminmax_apply(x,settings_gain,settings_xoffset,settings_ymin)  
y = bsxfun(@minus,x,settings_xoffset);  
y = bsxfun(@times,y,settings_gain);  
y = bsxfun(@plus,y,settings_ymin);  
end  
  
% Sigmoid Symmetric Transfer Function  
function a = tansig_apply(n)  
a = 2 ./ (1 + exp(-2*n)) - 1;  
end  
  
% Map Minimum and Maximum Output Reverse-Processing Function  
function x =  
mapminmax_reverse(y,settings_gain,settings_xoffset,settings_ymin)  
x = bsxfun(@minus,y,settings_ymin);  
x = bsxfun(@rdivide,x,settings_gain);  
x = bsxfun(@plus,x,settings_xoffset);  
end
```