



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Προσομοίωση της στάθμης υδροφορέα με χρήση ANN και
σύγκριση με τα αποτελέσματα του μοντέλου PTC»**

ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΧΑΤΖΑΚΗΣ

Εξεταστική επιτροπή:

- Καρατζάς Γεώργιος (Επιβλέπων)
- Νικόλαος Καλογεράκης
- Ζωή Δόκου

Χανιά

Ιούνιος 2014

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ.Γεώργιο Καρατζά. Αποτελεί μεγάλη τιμή για εμένα το γεγονός ότι μου έδειξε εμπιστοσύνη αναθέτοντάς μου ένα απαιτητικό θέμα διπλωματικής. Οι συμβουλές και η καθοδήγησή του τόσο στο πλαίσιο της διπλωματικής, όσο και σχετικά με το μέλλον μου και την συνέχιση των σπουδών μου, ήταν πολύτιμες. Η συνεργασία μου μαζί του ήταν άριστη και η προθυμία του, η οξυδέρκεια του και η αμεσότητά του συνέβαλαν καθοριστικά στην ομαλή διεξαγωγή της εργασίας.

Ιδιαίτερος, θα ήθελα να ευχαριστήσω το άτομο που καθ'όλη την διάρκεια εκπόνησης αυτής της δύσκολης, απαιτητικής και χρονοβόρας εργασίας ήταν δίπλα μου σαν καθηγήτρια και σαν μέντορας. Πάντα πρόθυμη να βοηθήσει, να λύσει απορίες, να με ενθαρρύνει όταν απογοητευόμουν και να με επαινέσει για τους κόπους μου όταν χρειαζόταν. Χάρης στο άτομο αυτό η διπλωματική αυτή εργασία πραγματοποιήθηκε πολύ ευχάριστα κάνοντάς με να αγαπήσω ακόμα περισσότερο την επιστήμη με την οποία ασχολούμαι. Ευδοκία Ταπόγλου σε ευχαριστώ πολύ.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Γιάννη Τριχάκη, την Δρ. Ζωή Δόκου και την υποψήφια διδάκτορα Ειρήνη Βοζινάκη που με την συμβολή τους που με βοήθησαν να ξεπεράσω εμπόδια που προέκυπταν κατά την διεξαγωγή της εργασίας.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στην παρέα μου Αργύρη, Ζώη, Ζωή, Ελένη, Νίκο και Δήμητρα για τα υπέροχα 6 χρόνια που περάσαμε μαζί. Ευχαριστώ την κοπέλα μου Βασιλική που πάντα ήταν εκεί να μου δίνει κουράγιο και όρεξη για παραπάνω προσπάθεια.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου, τον πατέρα μου Χάρη, την μητέρα μου Ευγενία και την αγαπημένη μου αδερφή Ελισάβετ. Χωρίς αυτούς και την υποστήριξή τους, πνευματική και υλική, η απόκτηση του πτυχίου μου δεν θα μπορούσε να γίνει πραγματικότητα.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το νερό αποτελεί αγαθό ζωτικής σημασίας για τους έμβιους οργανισμούς, και όχι μόνο, και για αυτό ανάγεται σε ένα από τους σημαντικότερους φυσικούς πόρους. Αν και το 70% της επιφάνειας της γης καλύπτεται από νερό, μόνο το 3,5 % των παγκόσμιων υδάτινων πόρων αποτελείται από γλυκό νερό. Το διαθέσιμο προς χρήση γλυκό νερό, ωστόσο, είναι ακόμα λιγότερο καθώς το 69% βρίσκεται με τη μορφή χιονιού και πάγου κυρίως στους πόλους. Περίπου το 30% βρίσκεται αποθηκευμένο στο υπέδαφος. Οι λίμνες και τα ποτάμια συγκεντρώνουν λιγότερο από 1% των αποθεμάτων γλυκού νερού.

Από τα παραπάνω στοιχεία γίνεται αντιληπτή η σπουδαιότητα των υπόγειων υδάτων και δικαιολογείται γιατί το υπόγειο νερό αποτελεί τον ευρύτερα χρησιμοποιούμενο υδάτινο πόρο. Υπολογίζεται ότι περίπου 1,5 δισεκατομμύρια άνθρωποι παγκοσμίως εφοδιάζονται με νερό που προέρχεται από το υπέδαφος για την κάλυψη των καθημερινών τους αναγκών (ύδρευση, άρδευση κ.ά.). Οι ανάγκες για νερό παρουσιάζουν αυξητικές τάσεις λόγω της συνεχόμενης αύξησης του πληθυσμού της γης που συντελεί στη μεγαλύτερη ζήτηση για νερό και τροφή. Το γεγονός αυτό κάνει επιτακτική την ανάγκη της παρακολούθησης και της αειφόρου διαχείρισης των υπογείων υδάτων ώστε οι επόμενες γενιές να μπορούν να προμηθεύονται επαρκές σε ποσότητα και υψηλό σε ποιότητα νερό από το υπέδαφος. Αυτή είναι και η λύση για την αντιμετώπιση μελλοντικών κρίσεων που σχετίζονται με το νερό όπως είναι η ξηρασία και η μόλυνση των υδάτινων πόρων.

Μέχρι σήμερα έχουν πραγματοποιηθεί πολλές μελέτες που χρησιμοποιούν πολλά διαφορετικά μοντέλα για την προσομοίωση υπόγειων υδροφορέων και την πρόβλεψη της μελλοντικής τους κατάστασης. Τέτοια μοντέλα ποικίλουν από μοντέλα φυσικής βάσης όπως το MODFLOW, το AQUIFEM, το PTC και άλλα που χρησιμοποιούν εκτεταμένα φυσικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης, μέχρι και μοντέλα μαύρου κουτιού όπως τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα. Τα μοντέλα του δεύτερου τύπου χρησιμοποιούν εμπειρικές συνδέσεις μεταξύ μεταβλητών του συστήματος που είναι εύκολα διαθέσιμες, όπως μετεωρολογικά δεδομένα και δεδομένα για το υδραυλικό ύψος. Ανάλογα με το μοντέλο είναι εφικτό τόσο η προσομοίωση της κίνησης του υπόγειου νερού, όσο και η πρόβλεψη της διασποράς ενός ρύπου στον υπόγειο υδροφόρο.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και η προσομοίωση των διαθέσιμων ποσοτήτων υπόγειου νερού στην Βαυαρία της Γερμανίας, στην ευρύτερη περιοχή του Μονάχου. Για την προσομοίωση έγινε χρήση 2 διαφορετικών μοντέλων και στη συνέχεια έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων τους. Τα μοντέλα που εξετάστηκαν ήταν μοντέλα με χρήση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων μέσω του περιβάλλοντος της Matlab και το τρισδιάστατο μαθηματικό μοντέλο PTC (Princeton Transport Code).

Αρχικά παρατίθενται κάποιες βασικές έννοιες της υπόγειας υδραυλικής που περιλαμβάνουν την περιγραφή του υδρολογικού κύκλου καθώς και πληροφορίες σχετικά με τους υδροφορείς και τις ιδιότητές τους. Στην συνέχεια γίνεται αναφορά στην μοντελοποίηση της ροής των υπόγειων υδάτων με πληροφορίες σχετικά με την κατηγοριοποίηση των μοντέλων και τη χρήση αυτών.

Το επόμενο στάδιο είναι η παράθεση του θεωρητικού υποβάθρου των μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν. Συγκεκριμένα, γίνεται λεπτομερής ανάλυση των αρχών που διέπουν τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, τα πεδία εφαρμογής τους, τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν και μια ιστορική αναδρομή για τη χρήση τους. Όπως αναφέρθηκε, η ανάπτυξη των αλγορίθμων των δικτύων αυτών έγινε μέσω του περιβάλλοντος της Matlab και για το λόγο αυτό αναλύεται η σχέση των νευρωνικών δικτύων με τη Matlab, ο τρόπος που μπορεί να δημιουργηθεί ένα δίκτυο καθώς και οι δυνατότητες που παρέχονται στον χρήστη από το λογισμικό αυτό. Ακόμα, γίνεται αναφορά στο λογισμικό Argus One μέσω του οποίου χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο PTC και παρουσιάζονται οι βασικές εξισώσεις που χρησιμοποιεί το PTC για την επίλυση των προβλημάτων ροής, τόσο για την φάση χρήσης της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων, όσο και στο στάδιο χρήσης πεπερασμένων διαφορών.

Στην συνέχεια ακολουθεί περιγραφή της περιοχής μελέτης. Αυτή περιλαμβάνει δημογραφικά στοιχεία, κλιματολογικά στοιχεία (θερμοκρασία, κατακρημνίσεις, ηλιοφάνεια, ανεμολογία), πληροφορίες για το ανάγλυφο, καθώς και πληροφορίες για τη γεωλογία και την υδρογεωλογία της περιοχής.

Το επόμενο μέρος καταλαμβάνει η παράθεση πληροφοριών σχετικά με τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε. Στο κομμάτι των νευρωνικών δικτύων το πρώτο βήμα ήταν η επιλογή των δεδομένων προς χρήση ως είσοδοι στα δίκτυα. Τα δεδομένα αυτά περιλαμβάνουν μετεωρολογικά δεδομένα, όπως η βροχόπτωση, η χιονόπτωση, η ηλιοφάνεια, η σχετική υγρασία και η θερμοκρασία, η ροή του ποταμού που διέρχεται από την περιοχή και το υδραυλικό ύψος στον υδροφορέα. Για τα δεδομένα της βροχόπτωσης, της χιονόπτωσης και τη ροής του ποταμού ήταν απαραίτητη η προεπεξεργασία και, συγκεκριμένα, η χρήση του συντελεστή συσχέτισης πριν την εισαγωγή τους στο μοντέλο. Εκπαιδεύτηκε ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο για κάθε ένα από τα 30 πηγάδια παρατήρησης για τα οποία υπήρχαν δεδομένα υδραυλικού ύψους με στόχο κάθε δικτύου την ημερήσια διαφορά υδραυλικού ύψους στο πηγάδι. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για το χρονικό διάστημα από 2/11/2008 έως 27/10/2012. Εξετάστηκαν 2 διαφορετικές περιπτώσεις: η μία περιελάμβανε την χιονόπτωση και η άλλη όχι. Για κάθε μία περίπτωση εξετάστηκε μία αρχιτεκτονική με 1 κρυφό επίπεδο και μία αρχιτεκτονική με 2 κρυφά επίπεδα. Προέκυψε ότι όταν η χιονόπτωση δεν χρησιμοποιείται υπάρχει καλύτερη απόδοση.

Όσον αφορά το μοντέλο PTC πραγματοποιήθηκε προσομοίωση για 1 χρόνο με αφετηρία την 1/12/2008. Αρχικά, εισήχθησαν ψηφιοποιημένοι χάρτες με δεδομένα για την γεωλογία, και κατά επέκταση για την υδραυλική αγωγιμότητα του εδάφους, το υψόμετρο της περιοχής και την θέση των πηγαδιών παρατήρησης. Επίσης, εισήχθη η ποσότητα της βροχής που διηθείται στον υδροφορέα και ο μέσος όρος υδραυλικού ύψους του προηγούμενου μήνα της προσομοίωσης για κάθε πηγάδι ως αρχικό υδραυλικό ύψος. Στη συνέχεια ακολούθησε η βαθμονόμηση του μοντέλου με έξοδο το προσομοιωμένο υδραυλικό ύψος στην περιοχή μελέτης.

Τέλος, έγινε η σύγκριση των δύο μοντέλων. Ως συμπέρασμα της μελέτης προέκυψε ότι τα νευρωνικά δίκτυα είναι περισσότερο ακριβή στην προσομοίωση σε συγκεκριμένα σημεία σε αντίθεση με το PTC που παρόλο που δεν είναι ιδιαίτερα ακριβές σε συγκεκριμένα σημεία, δίνει καλύτερη γενική εικόνα του επιπέδου του υπόγειου ύδατος σε μια μεγάλη περιοχή. Η επιλογή του μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί σε κάθε περίπτωση πρέπει να γίνεται με βάση τη μετέπειτα χρήση του μοντέλου, τα διαθέσιμα δεδομένα για την περιοχή μελέτης και την πρόθεση ή όχι της μελέτης διάφορων μελλοντικών σεναρίων, ανάλογα και με τη διαθεσιμότητα των δεδομένων.

ABSTRACT

The purpose of this study is to simulate the hydraulic head change in an aquifer using two different models. The first model is based on Artificial Neural Networks (ANNs), and was implemented using the ANN MATLAB toolbox. The simulation period is from November of 2008 until October 2012. The input to the ANN includes meteorological parameters, such as rainfall, snowfall, and temperature, as well as flow data of the river running through the study area. For rainfall, snowfall and flow data of the river, correlation analysis was conducted in order to define the appropriate time lags in which the parameter affects the hydraulic head and the use of multiple time lag was considered necessary. Two different cases were studied. One case included snowfall as input parameter, while the other case did not. For each case, two ANN architectures were considered. One of them was consisted by 1 hidden layer and the other architecture included 2 hidden layers. One ANN is trained for each one of the 30 observation wells, where data are available, and the hydraulic head change of a daily time step is simulated. The case that did not contain snowfall as input parameter proved to have significantly better performance than the case that contained snowfall.

The second model is the groundwater flow simulator PTC (Princeton Transport Code), combined with the ArgusOne GIS program. The simulation period is one year starting in December of 2008. Digital maps of elevation, geology of the area and position of the observation wells are imported in the program. The model is calibrated using meteorological and geological data and by setting as initial conditions the observed field measurements. The output of the model is the simulated hydraulic heads.

The performance of both models is evaluated and compared based on the observed field data in the Bayern region, Germany. As conclusion, ANNs were found to be more accurate in point simulation, while PTC although it is not very accurate in simulating the hydraulic head in points where data were available, gives a better general figure of the groundwater level in a large area (total water balance). The selection of the most appropriate model for the simulation at hand, depends on the further use of it, as well as the available data.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	ii
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	iii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	iv
ABSTRACT.....	vi
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο: ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ.....	1
1.1 ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ	1
1.2 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ	2
1.3 ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ.....	3
1.4 ΥΔΡΑΥΛΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΡΟΗΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ	9
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΜΟΝΤΕΛΑ	9
2.2 ΓΕΝΙΚΕΣ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ	10
2.3 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΣΥΝΕΧΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΝΕΥΡΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ	14
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	14
3.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ.....	14
3.2 ΣΧΕΣΗ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΝΕΥΡΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΜΕ ΤΟΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ ΕΓΚΕΦΑΛΟ	16
3.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ.....	17
3.4 ΒΑΣΙΚΕΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ	19
3.5 ΜΟΝΑΔΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	20
3.6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΙΣΟΔΟΥ ΚΑΙ ΕΞΟΔΟΥ ΜΟΝΑΔΑΣ	21
3.7 ΤΥΠΟΙ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗΣ ΝΕΥΡΩΝΩΝ.....	21
3.8 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ -ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΔΙΚΤΥΩΝ	24
3.9 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ.....	26
3.10 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ.....	26
3.11 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ LEVENBERG-MARQUARDT.....	27

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ^ο : ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ MATLAB	29
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ MATLAB	29
4.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ MATLAB	29
4.3 TOOLBOX ΤΟΥ MATLAB ΓΙΑ ΤΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ.....	30
4.4 ΥΠΟΣΤΗΡΙΖΟΜΕΝΕΣ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΠΟ ΤΟ TOOLBOX ΤΗΣ MATLAB	31
4.5 ΥΠΟΣΤΗΡΙΖΟΜΕΝΕΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΕΚΜΑΘΗΣΗΣ	32
4.6 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΦΑΣΗΣ ΤΗΣ ΓΕΝΙΚΕΥΣΗΣ (GENERALIZATION).....	34
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ^ο : ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ARGUS ONE ΚΑΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ PTC	35
5.1 ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ARGUS ONE.....	35
5.2 ΜΟΝΤΕΛΟ PRINCETON TRANSPORT CODE (PTC)	37
5.2.1 Θεμελιώδεις εξισώσεις του PTC.....	37
5.2.2 Αλγόριθμος επίλυσης PTC	38
5.3 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΡΟΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ	39
5.3.1 Κυρίαρχη εξίσωση	39
5.3.2 Εφαρμογή Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων	39
5.3.3 Εφαρμογή Μεθόδου Πεπερασμένων Διαφορών.....	41
5.3.3.1 Η Κάθετη Παράγωγος	41
5.3.3.2 Η Χρονική Παράγωγος.....	42
5.4 ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	43
5.4.1 Οριακές Συνθήκες 1 ^ο Τύπου: Σταθερό Υδραυλικό Ύψος	43
5.4.2 Οριακές Συνθήκες 2 ^ο Τύπου: Σταθερή Ροή	43
5.4.3 Οριακές συνθήκες 3 ^ο Τύπου: Συνθήκες διαρροής.....	44
5.5 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ ΟΡΙΖΟΝΤΑ	44
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ^ο : ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	47
6.1 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	47
6.2 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΒΑΥΑΡΙΑ	47
6.3 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΩ ΒΑΥΑΡΙΑ	48
6.4. ΜΟΝΑΧΟ ΚΑΙ ΓΥΡΩ ΠΕΡΙΟΧΗ.....	49
6.5 ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	52

6.5.1 Θερμοκρασία	54
6.5.2 Κατακρημνίσεις	56
6.5.3 Ηλιοφάνεια	57
6.5.4 Άνεμοι.....	58
6.6 ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑ.....	58
6.7 ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ.....	59
6.7.1. Λεκάνη της Μολάσσας.....	63
6.7.2 Τεταρτογενή Ιζήματα	67
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ^ο : ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	71
7.1 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ.....	71
7.1.1 Επιλογή δεδομένων εισαγωγής.....	71
7.1.2 Επεξεργασία δεδομένων πριν την εισαγωγή στο ΤΝΔ	73
7.1.3 Δεδομένα εισόδου	74
7.1.4 Διαμόρφωση του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου	76
7.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΡΤC	80
7.2.1 Γενικές Παράμετροι Μοντέλου	80
7.2.2 Εισαγωγή Ειδικών Παραμέτρων.....	80
7.3.3 Βαθμονόμηση	84
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 ^ο : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	85
8.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ	85
8.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΡΤC.....	101
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 ^ο : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	103
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10 ^ο : ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	105

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο: ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

1.1 ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ

Για τη μελέτη των υπόγειων υδάτων και την κατανόηση βασικών εννοιών που τα διέπουν, αρχικά απαιτείται μία σφαιρικότερη εξέταση του κύκλου του νερού ή, διαφορετικά, του υδρολογικού κύκλου (Εικόνα 1). Ο όρος αυτός περιγράφει την κυκλοφορία του νερού μεταξύ υδρόσφαιρας, ατμόσφαιρας, ξηράς και θάλασσας κατά την οποία το νερό εμφανίζεται σε διάφορες μορφές: υγρό, αέριο (υδρατμοί) και στερεό (χιόνι, χαλάζι). Η ενέργεια που προκαλεί τη διαρκή αυτή κίνηση του νερού είναι η ηλιακή ενέργεια (Καλλέργης, 1999).



Εικόνα 1: Ο κύκλος του νερού(<http://water.usgs.gov>)

Η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτοντας πάνω στις υδάτινες επιφάνειες, καθώς και στο έδαφος, προκαλεί μερική εξάτμιση του νερού το οποίο ανυψώνεται στην ατμόσφαιρα με την μορφή ατμών. Υδρατμοί απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα και μέσω του σώματος των φυτών με τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης. Η συνδυασμένη δράση της εξάτμισης και της διαπνοής αναφέρονται με τον όρο εξατμισοδιαπνοή και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως: θερμοκρασία, υγρασία, βαρομετρική πίεση, πορώδες, ηλιακή ακτινοβολία, είδος χλωρίδας κ.ά. Ένα μικρό μέρος των υδρατμών της ατμόσφαιρας προέρχεται και από την εξάχνωση, δηλαδή την απευθείας μετατροπή μορίων νερού από τη στερεή στην αέρια μορφή.

Οι υδρατμοί ανυψώνονται λόγω ανοδικών ρευμάτων αέρα σε υψόμετρα όπου, λόγω μικρότερης πίεσης και θερμοκρασίας, έχουμε συμπύκνωση μέρους τους σχηματίζοντας τα σύννεφα. Τα σταγονίδια νερού στα σύννεφα όταν μεγαλώσουν πολύ πέφτουν στη Γη σε υγρή (βροχή) ή στερεή μορφή (χαλάζι, χιόνι) και αποτελούν τις λεγόμενες κατακρημνίσεις. Το μεγαλύτερο μέρος των κατακρημνίσεων πέφτει στους ωκεανούς. Μέρος των κατακρημνίσεων που πέφτει στην ξηρά, αφού καλυφθούν οι ανάγκες του εδάφους και των φυτών, μεταφέρεται με τη μορφή χειμάρρων (υδατορεμάτων) στους τελικούς αποδέκτες (λίμνες, θάλασσες), ενώ άλλο μέρος αυτών διηθείται και

σχηματίζει το υπόγειο νερό. Το υπόγειο νερό είτε επανέρχεται στα επιφανειακά νερά (εκφόρτιση υπόγειου νερού), είτε πηγαίνει βαθύτερα εμπλουτίζοντας τους υπόγειους υδροφορείς (κατείσδυση).

Το υδρολογικό ισοζύγιο με βάση το οποίο περιγράφεται μαθηματικά ο υδρολογικός κύκλος δίνεται από την σχέση 1.1:

$$P - R - G - E - T = \Delta S \quad (1.1)$$

Όπου:

P: Βροχόπτωση

R: Επιφανειακή απορροή

G: Υπόγεια ροή

E: Εξάτμιση

T: Διαπνοή

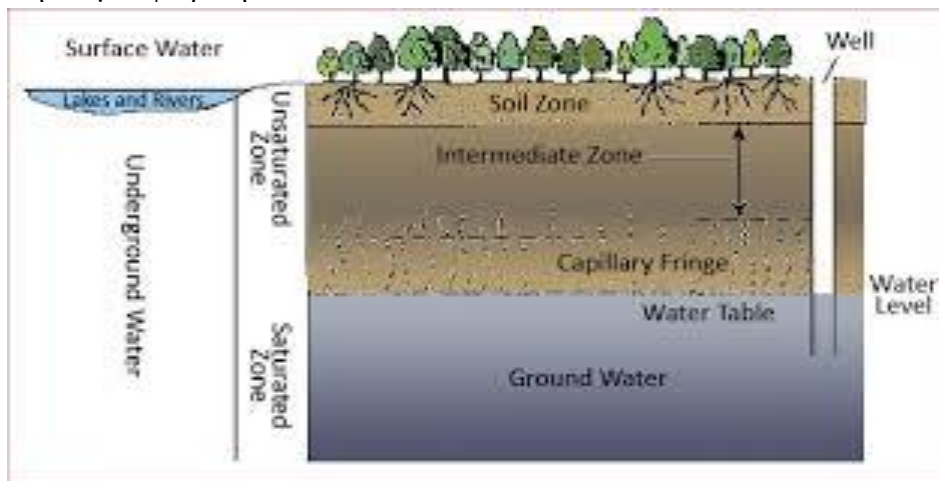
ΔS : Μεταβολή ρυθμού αποθήκευσης νερού

1.2 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

Ως υπόγειο νερό αναφέρεται το νερό που βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους ανεξάρτητα από το βάθος και την κατάσταση που βρίσκεται. Προέρχεται κυρίως από τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, ενώ μικρό είναι το ποσοστό του υπόγειου νερού που είναι μαγματικής ή κοσμικής προέλευσης και εισέρχεται για πρώτη φορά στον υδρολογικό κύκλο. Υπάρχουν δύο ζώνες (Εικόνα 2) στις οποίες μπορεί να κινηθεί το υπόγειο νερό (Καλλέργης, 1999)

- **Η ακόρεστη ή μη κορεσμένη ζώνη (unsaturated zone)**, όπου οι πόροι του εδάφους καταλαμβάνονται μερικώς από αέρα και μερικώς από νερό (διφασική ροή). Ειδική περίπτωση αποτελούν οι πλημμύρες όπου όλα τα διάκενα των πόρων καταλαμβάνονται προσωρινά από νερό. Εδώ η κίνηση του νερού γίνεται κατά την κατακόρυφη διεύθυνση. Η ζώνη αυτή περιλαμβάνει τρεις υποζώνες και ξεκινώντας από την επιφάνεια του εδάφους είναι οι ακόλουθες:
 - **Ζώνη εδαφικού ύδατος μικρού πάχους (soil zone)** η οποία εκτείνεται από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι το τέλος της ζώνης του ριζικού συστήματος. Το πάχος της ποικίλει ανάλογα τον τύπο του εδάφους και της βλάστησης.
 - **Ενδιάμεση ζώνη (intermediate zone)** από την οποία διέρχεται το νερό κινούμενο προς τα κάτω και έχει ως κατώτατο όριο την έναρξη τριχοειδών φαινομένων.
 - **Ζώνη τριχοειδών φαινομένων (capillary zone)**. Η ζώνη αυτή εκτείνεται από το όριο που παρατηρούνται τριχοειδή φαινόμενα μέχρι τον υδροφόρο ορίζοντα. Το πάχος της είναι αντιστρόφως ανάλογο με το μέγεθος των διακένων του εδάφους.

- Η ζώνη κορεσμού (**Saturated zone**) όπου όλα τα διάκενα είναι πλήρη από νερό (μονοφασική ροή) και η πίεση είναι μικρότερη της υδροστατικής. Η κίνηση του νερού στη ζώνη κορεσμού γίνεται κυρίως κατά την οριζόντια διεύθυνση. Αποτελεί το υδροφόρο στρώμα το οποίο τροφοδοτεί με νερό και για το λόγο αυτό παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Το άνω όριο της ζώνης αυτής είναι ο υδροφόρος ορίζοντας, όπου η πίεση είναι ίση με την ατμοσφαιρική.



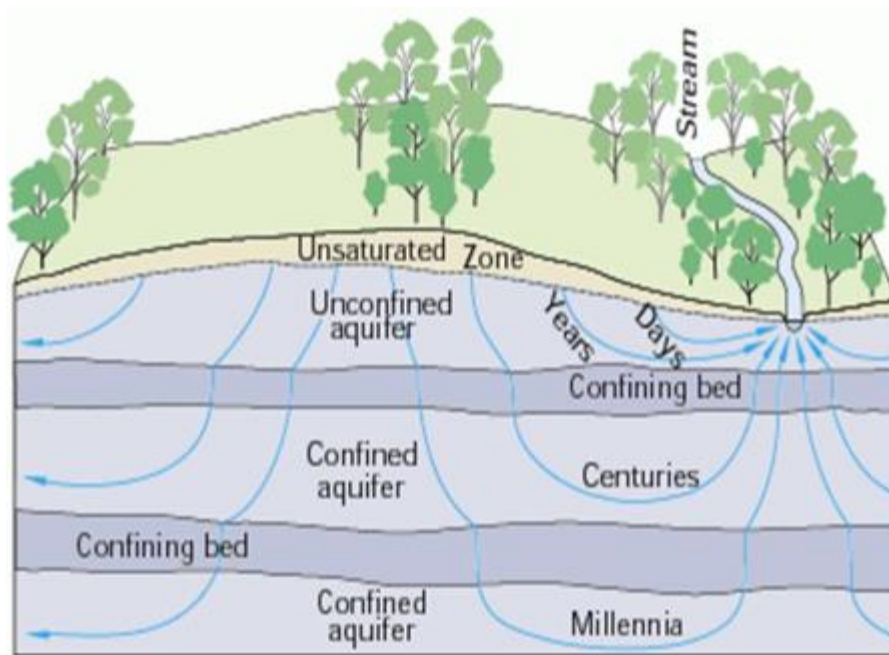
Εικόνα 2: Κατανομή υπογείων υδάτων. Πηγή: Washington State University.

1.3 ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ

Σύμφωνα με τον Καρατζά (2003) ως υδροφορέας ορίζεται ένας υπεδάφιος σχηματισμός που περιέχει σημαντικές ποσότητες διαπερατών υλικών κορεσμένων με ύδωρ τα οποία προμηθεύουν φρέατα και πηγές με υδατικές ποσότητες.

Η ταξινόμηση των υδροφορέων γίνεται με βάση την ανώτατη στάθμη του νερού στο έδαφος, δηλαδή τον υδροφόρο ορίζοντα. Διακρίνονται δύο είδη υδροφορέων (Εικόνα 3):

- **Ελεύθερος υδροφορέας (unconfined aquifer)** χαρακτηρίζεται ο υδροφορέας που το κατώτερο όριο του είναι ένα στεγανό στρώμα, ενώ η ανώτερη επιφάνεια του είναι ο υδροφόρος ορίζοντας
- **Περιορισμένος ή αρτεσιανός υδροφορέας (confined aquifer)** όπου το νερό είναι εγκλωβισμένο ανάμεσα σε αδιαπέρατα στρώματα στο δάπεδο και την οροφή. Η πίεση που επικρατεί στον υδροφορέα αυτού του τύπου είναι υψηλότερη της ατμοσφαιρικής. Αυτός είναι και ο λόγος που η πιεζομετρική επιφάνεια, η οποία αντιστοιχεί σε μία εικονική επιφάνεια που συμπίπτει με το επίπεδο της υδροστατικής επιφάνειας στον υδροφορέα, βρίσκεται πιο ψηλά από το ανώτερο αδιαπέρατο στρώμα



Εικόνα 3: Περιορισμένος και ελεύθερος υδροφορέας). Πηγή: Kentucky Department for Environmental Protection (<http://kyocp.wordpress.com/2012/04/25/groundwater/>).

1.4 ΥΔΡΑΥΛΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ

Οι υδροφορείς δρουν σαν αγωγοί καθώς έχουν την δυνατότητα να αποθηκεύουν νερό αλλά και να το μεταβιβάζουν. Τα σημαντικότερα υδραυλικά χαρακτηριστικά τους είναι (Καλλέργης, 1999):

Α) Υδραυλικό ύψος (Hydraulic head)

Η ενέργεια την οποία φέρουν τα υπόγεια ύδατα και βάση της οποίας κινούνται, ισούται ανά μονάδα όγκου με το άθροισμα της κινητικής, της δυναμικής και της υδροστατικής. Η ενέργεια αυτή ανά μονάδα βάρους καλείται και υδραυλικό ύψος (h) και ισούται με το άθροισμα του φορτίου πίεσης (P/γ) και του φορτίου ύψους (z), δηλαδή της απόστασης του σημείου από το σημείο επίπεδο αναφοράς (συνήθως επίπεδο αναφοράς ορίζεται το επίπεδο της θάλασσας). Η σχέση αντιπροσωπεύεται από τη σχέση 1.2 και έχει μονάδες μήκους (L).

$$h = \frac{P}{\gamma} + z \quad (1.2)$$

Όπου:

P : η υδροστατική πίεση [M/L^2]

γ : το ειδικό βάρος του νερού [$M/(T^2 \cdot L^2)$]

Σε γεωτρήσεις σε ελεύθερο υδροφορέα το υδραυλικό ύψος ταυτίζεται με το απόλυτο υψόμετρο της στάθμης του υπόγειου νερού. Αντίθετα σε γεωτρήσεις σε περιορισμένο υδροφορέα, το

υδραυλικό ύψος είναι το υψόμετρο που θα έφτανε το νερό σε περίπτωση που ο σωλήνας της γεώτρησης επεκτεινόταν ακόμα και ψηλότερα από την επιφάνεια του εδάφους.

Β) Πορώδες (porosity), n

Η ιδιότητα αυτή αναφέρεται στο ποσοστό του πετρώματος ή του εδάφους που δεν καταλαμβάνεται από στέρεα υλικά (κενοί πόροι). Μαθηματικά ορίζεται ως ο λόγος του όγκου των κενών (όγκος νερού και αέρα, $V_{κενών}$) προς το όγκο των στερεών ($V_{στερεών}$) και είναι καθαρός αριθμός (σχέση 1.3).

$$n = \frac{V_{κενών}}{V_{στερεών}} \quad (1.3)$$

Παράγοντες που επηρεάζουν το πορώδες είναι (Καρατζάς, 2003):

- **Η κοκκομετρική σύνθεση.** Κατά κανόνα όσο πιο μεγάλο είναι το εύρος των διαμέτρων των κόκκων, τόσο μικρότερο πορώδες έχει ο εδαφικός σχηματισμός.
- **Η διάταξη των πόρων.**
- **Το σχήμα των κόκκων**

Πίνακας 1.1: Τιμές ολικού πορώδους (Καλλέργης, 1999).

Υλικό	Πορώδες (%)	Υλικό	Πορώδες (%)	Υλικό	Πορώδες (%)
Προσχώσεις		Ιζηματογενή πετρώματα		Κρυσταλλικά πετρώματα	
Μικρά χαλίκια	24-36	Ψαμμίτες	5-30	Ρηγματωμένα	0-10
Μεγάλα χαλίκια	25-38	Ιλύολιθοι	21-41	Μη ρηγματωμένα	0-5
Χονδρόκοκκη άμμος	31-48	Ασβεστόλιθοι-Δολομίτες	0,5-30	Βασάλτες	3-35
Λεπτόκοκκη άμμος	26-53	Καρστοποιημένοι ασβεστόλιθοι	0,5-40	Αποσαθρωμένοι γρανίτες	34-57
Ιλύς	34-61	Σχιστόλιθοι	0-10		
Άργιλος	34-60				

Γ) Ενεργό πορώδες (effective porosity), n_e

Επειδή ένα ποσοστό των πόρων δεν επικοινωνούν μεταξύ τους, χρησιμοποιείται η παράμετρος του ενεργού πορώδους (n_e), που αντιστοιχεί στο ποσοστό των πόρων που είναι διαθέσιμο για τη ροή του ρευστού (σχέση 1.4). Εκφράζεται σε ποσοστό επί τις εκατό (Καρατζάς, 2003).

$$n_e = \frac{V_{\gamma}}{V_o} \quad (1.4)$$

Όπου:

V_{γ} : ο όγκος του νερού που μπορεί να στραγγιστεί κάτω από την επίδραση της βαρύτητας, δηλαδή ο όγκος του νερού που περιέχεται εντός των ενεργών πόρων [L^3]

V_0 : ο συνολικός όγκος του εδάφους [L^3]

Αξίζει να αναφερθεί ότι στα ιζηματογενή πετρώματα δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ του πορώδους και του ενεργού πορώδους. Αντίθετα, η διαφορά αυτή είναι μεγάλη στα αργιλώδη εδάφη.

Στους κοκκώδεις σχηματισμούς το ενεργό πορώδες κυμαίνεται από 0-3% (άργιλος) έως 20% (χαλίκια).

Δ) Διαπερατότητα (permeability), K και υδραυλική αγωγιμότητα (hydraulic conductivity), k

Η υδραυλική αγωγιμότητα (k) εκφράζει την ευκολία με την οποία ρέει ένα ρευστό μέσα σε ένα πορώδες μέσο και εξαρτάται από το πορώδες υλικό και από το είδος του ρευστού. Ο Γάλλος μηχανικός υδραυλικής Henry Darcy μελέτησε το 1856 τη ροή ύδατος διαμέσου οριζόντιων στρωμάτων άμμου που συνήθως χρησιμοποιούνται σαν υδατικά φίλτρα. Το αποτέλεσμα της μελέτης αυτής ήταν η εξίσωση που αναφέρεται ως νόμος Darcy (σχέση 1.5) σύμφωνα με τον οποίο ο ρυθμός ροής διαμέσου πορώδους μέσου είναι ανάλογος των απωλειών φορτίου, ανάλογος του συντελεστή της υδραυλικής αγωγιμότητας και αντιστρόφως ανάλογος του μήκους πορείας της ροής (Καρατζάς, 2003).

$$\frac{Q}{A} = -k \frac{\Delta h}{L} \Rightarrow q = -k \frac{\Delta h}{L} \quad (1.5)$$

Όπου:

Q: η παροχή [L^3/T]

A: η επιφάνεια [L^2]

k: η υδραυλική αγωγιμότητα [L/T]

Δh : η απώλεια φορτίου [L]

L: το μήκος της στήλης [L]

q: η ταχύτητα Darcy ή ειδική παροχή [L/T]

Η έκφραση $\frac{\Delta h}{L}$ αναφέρεται ως υδραυλική κλίση (hydraulic gradient)

Το αρνητικό πρόσημο στο νόμο του Darcy δείχνει ότι η ροή γίνεται προς την κατεύθυνση που ελαττώνεται το φορτίο.

Κριτήριο για την εφαρμογή του νόμου του Darcy αποτελεί ο αριθμός Reynolds καθώς πρέπει να είναι μικρότερος της μονάδας. Ωστόσο, έχει παρατηρηθεί ότι για αριθμό Reynolds μικρότερο του 10 το σφάλμα του νόμου αυτού δεν είναι ιδιαίτερα υψηλό. Στα υπόγεια ύδατα το κριτήριο αυτό πληρείται καθώς η ροή συμβαίνει με αριθμό Reynolds μικρότερο της μονάδας και έτσι μπορεί να βρει εφαρμογή ο νόμος του Darcy. Μόνες εξαιρέσεις αποτελούν οι περιπτώσεις όπου η υδραυλική κλίση είναι πολύ μεγάλη, όπως για παράδειγμα κοντά σε φρέαρ άντλησης, καθώς και σε περιπτώσεις όπου έχουμε τυρβώδη ροή, π.χ. σε περιοχές όπου κυριαρχούν ασβεστόλιθοι ή βασάλτες με μεγάλα ανοίγματα.

Πίνακας 1.2: Τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας (Καλλέργης, 1999)

Υλικό	k (m/s)
Μεγάλα χαλίκια	$1,7 \times 10^{-3}$
Χαλίκια μεσαίου μεγέθους	$3,1 \times 10^{-3}$
Χαλίκια μικρού μεγέθους	$5,2 \times 10^{-3}$
Χονδρόκοκκη άμμος	$5,2 \times 10^{-4}$
Μεσόκοκκη άμμος	$1,4 \times 10^{-4}$
Λεπτόκοκκη άμμος	$2,9 \times 10^{-5}$
Ιλύς	$9,2 \times 10^{-7}$
Άργιλος	$2,3 \times 10^{-9}$

Η **διαπερατότητα (K)** είναι μια σταθερά που εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του πορώδους μέσου, δηλαδή το σχήμα, τη διάταξη και το μέγεθος των κόκκων (Καλλέργης, 1999). Εκφράζεται σε μονάδες επιφάνειας (L^2) και συνδέεται με την υδραυλική αγωγιμότητα με την σχέση 1.6:

$$K = \frac{k \cdot \mu}{\gamma} \quad (1.6)$$

Όπου:

μ : το δυναμικό ιξώδες [$M/(L \cdot T)$]

γ : το ειδικό βάρος του ρευστού [$M/(T^2 \cdot L^2)$]

E) Ταχύτητα διήθησης (Seepage velocity)

Η ταχύτητα Darcy θεωρεί ότι η ροή πραγματοποιείται μέσω της ολικής επιφάνειας του εδάφους, χωρίς να λαμβάνει υπόψη το στέρεο υλικό και τους πόρους. Για αυτό συχνά χρησιμοποιείται η ταχύτητα διήθησης, ή αλλιώς πραγματική ταχύτητα, η οποία αναφέρεται στη ροή ενός ρευστού διαμέσου του χώρου των πόρων ενός πορώδους υλικού και υπολογίζεται από την σχέση 1.7 (Καρατζάς, 2003).

$$q_p = \frac{Q}{n \cdot A} = \frac{q}{n} = -\frac{k}{n} \frac{dh}{dl} \quad (1.7)$$

Όπου:

q_p : η ταχύτητα διήθησης [L/T]

Q : η παροχή [L^3/T]

A : η επιφάνεια [L^2]

n : το πορώδες [αδιάστατο]

q : η ταχύτητα Darcy ή ειδική παροχή [L/T]

k: η υδραυλική αγωγιμότητα [L/T]

Δh : η απώλεια φορτίου [L]

dl: το μήκος της στήλης [L]

ΣΤ) Συντελεστής μεταβιβασιμότητας (Transmissivity), T

Η μεταβιβασιμότητα (T) εκφράζει το ρυθμό με τον οποίο νερό δεδομένου κινητικού ιξώδους μεταβιβάζεται δια μέσου μοναδιαίου πλάτους υδροφορέα με υδραυλική κλίση ίση με τη μονάδα και εκφράζεται μαθηματικά από τη σχέση 1.8 (Καρατζάς, 2003).

$$T = k \cdot D \quad (1.8)$$

Όπου:

T: μεταβιβασιμότητα [L^2/T]

k: η υδραυλική αγωγιμότητα [L/T]

D: το κορεσμένο βάθος του υδροφορέα [L]

Ζ) Αποθηκευτικότητα (Storativity) ή υδροχωρητικότητα, S

Ο συντελεστής αποθηκευτικότητας ή υδροχωρητικότητας (S) αποτελεί τον όγκο του νερού που μπορεί να ληφθεί ή να αποθηκευτεί από ένα κατακόρυφο πρίσμα ενός υδροφορέα με μοναδιαία επιφάνεια ανά μονάδα μεταβολής του φορτίου. Είναι καθαρός αριθμός και μαθηματικά εκφράζεται από την σχέση 1.9 (Καλλέργης, 1999).

$$S = \frac{\Delta V}{A \cdot \Delta h} \quad (1.9)$$

Όπου:

ΔV : ο όγκος νερού [L^3] που απελευθερώνεται ή προστίθεται από τη μονάδα οριζόντιας επιφάνειας A [L^2], εξαιτίας μοναδιαίας πτώσεις ή αύξησης του φορτίου Δh [L].

Στους ελεύθερους υδροφορείς η αποθηκευτικότητα (S) παίρνει τιμές από 1%-30% και εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την πλήρωση ή εκκένωση των πόρων, και ελάχιστα από την συμπιεστότητα του εδάφους ή του ύδατος. Επομένως, συμπίπτει με το ενεργό πορώδες.

Λόγω διαφορετικού μηχανισμού απελευθέρωσης νερού, στους υπό πίεση υδροφορείς, ο συντελεστής S παίρνει πολύ χαμηλότερες τιμές και συγκεκριμένα κυμαίνεται από 0,0001%-0,5%. Στους συγκεκριμένους υδροφορείς η αφαίρεση ή η προσθήκη νερού οφείλεται σε διόγκωση του νερού και συμπίεση του υδροφορέα και συνεπώς η αποθηκευτικότητα είναι συνάρτηση της ελαστικότητας του υδροφορέα και της συμπιεστότητας του περιεχομένου σε αυτόν υπόγειου νερού. Στην πράξη αυτό σημαίνει ότι για να επιτύχουμε άντληση μεγάλων ποσοτήτων νερού σε υπό πίεση υδροφόρα στρώματα, είναι αναγκαίες μεγάλες πτώσεις της πιεζομετρικής στάθμης και σε μεγάλη έκταση του υδροφορέα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΡΟΗΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Σε πολλούς επιστημονικούς κλάδους απαιτείται μια προσεγγιστική λύση σε προβλήματα που ο κάθε κλάδος αντιμετωπίζει. Προκειμένου να βρεθεί αυτή η προσεγγιστική λύση χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο τα τελευταία χρόνια διάφορες μέθοδοι προσομοίωσης (simulation) και μοντελοποίησης (modelling). Οι μέθοδοι αυτοί έχουν ως σκοπό να αναπαραστήσουν (προσομοιάσουν) την πραγματικότητα εφαρμόζοντας κάποιο πρότυπο ή, αλλιώς, μαθηματικό μοντέλο.

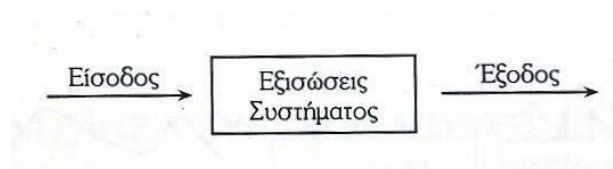
Ως μοντέλο καλείται οποιοδήποτε εργαλείο ή μαθηματική έκφραση περιγράφει προσεγγιστικά μία κατάσταση στο πεδίο. Διακρίνονται δύο κατηγορίες μοντέλων (Anderson & Woessner, 1992):

- **Φυσικά μοντέλα:** απεικονίζουν απευθείας τις φυσικές συνθήκες. Αναπτύσσονται κυρίως σε εργαστήρια (π.χ. εργαστηριακές στήλες άμμου).
- **Μαθηματικά μοντέλα:** προσομοιάζουν τις φυσικές συνθήκες έμμεσα χρησιμοποιώντας μαθηματικές εξισώσεις που θεωρούνται αντιπροσωπευτικές των φυσικών διεργασιών μαζί με οριακές συνθήκες.

Τα φυσικά μοντέλα διακρίνονται σε **εικονικά** και **αναλογικά**. Τα εικονικά είναι απλοποιημένες παρουσιάσεις συστημάτων πραγματικού κόσμου, όπως οι εξομοιωτές βροχόπτωσης και οι πειραματικές λεκάνες απορροής. Τα αναλογικά μοντέλα είναι αυτά τα οποία οι μετρήσεις τους βασίζονται σε διαφορετική υπόσταση από ότι τα πρωτότυπα, όπως η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος που αντιπροσωπεύει τη ροή του νερού (Κ. Β. Μπέλλος, n.a.).

Τα μαθηματικά μοντέλα μπορούν να επιλυθούν είτε με **αριθμητικές** είτε με **αναλυτικές** μεθόδους. Οι αριθμητικές μέθοδοι θεωρούνται πιο κατάλληλες για την επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων καθώς με αυτές απαιτούνται λιγότερες απλοποιήσεις συγκριτικά με την επίλυση μέσω αναλυτικών μεθόδων. Όσο λιγότερες υποθέσεις γίνονται κατά τη δημιουργία του μοντέλου, τόσο πιο περίπλοκο είναι αυτό. Το σύνολο των εντολών που χρησιμοποιούνται για την επίλυση του μοντέλου ονομάζεται πρόγραμμα H/Y ή κώδικας. Ο κώδικας γράφεται μία φορά, ωστόσο για κάθε ξεχωριστή εφαρμογή κατασκευάζεται ένα καινούργιο μοντέλο (Anderson & Woessner, 1992).

Η εφαρμογή μοντέλων στην υδρολογία και τη διαχείριση υδατικών πόρων είναι ευρέως διαδεδομένη στις μέρες μας. Τα μοντέλα αποτελούν ένα πολύτιμο εργαλείο για την αντιμετώπιση προβλημάτων που σχετίζονται με την ποιότητα αλλά και την ποσότητα των υδάτων. Μέχρι και σήμερα ο αριθμός των υδρολογικών μοντέλων που έχουν κατασκευαστεί και χρησιμοποιηθεί είναι ιδιαίτερα μεγάλος. Σχηματικά ένα μαθηματικό μοντέλο αναπαρίσταται γραφικά όπως φαίνεται στην Εικόνα 4 (Τσακίρης, 1995).



Εικόνα 4: Γενική αναπαράσταση μοντέλου (Τσακίρης, 1995).

Όπου για ένα υδρολογικό μοντέλο:

Είσοδος: μετεωρολογικές μεταβλητές όπως κατακρημνίσεις, θερμοκρασία, άνεμος, ηλιοφάνεια κλπ.

Εξισώσεις συστήματος: σύνολο μαθηματικών εξισώσεων που απεικονίζουν τις φυσικές διαδικασίες μετατροπής της βροχής σε απορροή (κατακράτηση, εξατμισοδιαπνοή, διήθηση, επιφανειακή απορροή, ενδιάμεση απορροή, εδαφική υγρασία, αποθήκευση υπόγειου ορίζοντα).

Έξοδος: απορροή

Η δημιουργία μοντέλων για προβλήματα σχετιζόμενα με το περιβάλλον είναι απαραίτητη για 3 κυρίως λόγους (Νικολαΐδης, π.α.):

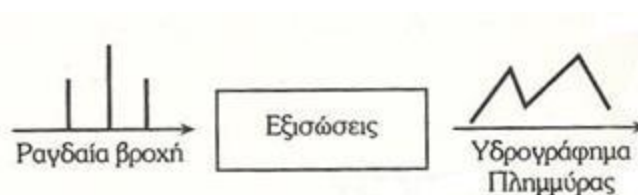
1. Για τον υπολογισμό της περιεκτικότητας των χημικών ενώσεων σε υπόγεια νερά και νερά επιφάνειας και η συσχέτισή τους με το βαθμό τοξικότητας.
2. Για να κατανοήσουμε τον τρόπο μεταφοράς και μετάλλαξης των χημικών ενώσεων στο περιβάλλον.
3. Διαχείριση φυσικών και τεχνητών συστημάτων για την πρόγνωση της συμπεριφοράς τους και για την πρόληψη επικίνδυνων καταστάσεων.

2.2 ΓΕΝΙΚΕΣ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Η ταξινόμηση των υδρολογικών μοντέλων σε διάφορες κατηγορίες γίνεται με βάση διάφορα χαρακτηριστικά όπως το είδος των εξισώσεων που περιλαμβάνουν, το χρονικό τους βήμα, τη λειτουργία τους σε πραγματικό χρόνο κλπ.

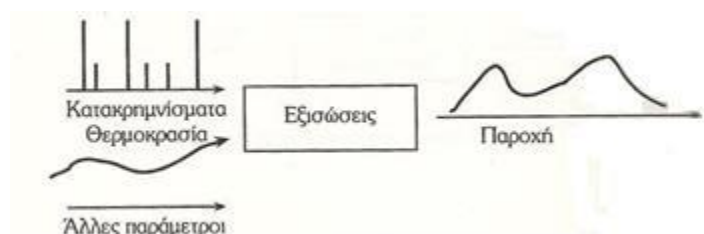
Πιο συγκεκριμένα, **ανάλογα με τον χρόνο προσομοίωσης** παρατηρούνται οι εξής κατηγορίες μοντέλων (Τσακίρης, 1995):

- **Μοντέλα μεμονωμένου υδρολογικού γεγονότος.** Περιλαμβάνουν ως είσοδο δεδομένα ενός μεμονωμένου γεγονότος νετόπτωσης (συνήθως βροχής) και ως έξοδο αποδίδει την απορροή του γεγονότος (π.χ. Μοναδιαίο υδρογράφημα, Μέθοδος SCS, Ορθολογική εξίσωση κλπ). Σχηματικά το είδος των μοντέλων αυτών αναπαρίσταται στην Εικόνα 6.



Εικόνα 5: Μοντέλο μεμονωμένου υδρολογικού γεγονότος (Τσακίρης, 1995).

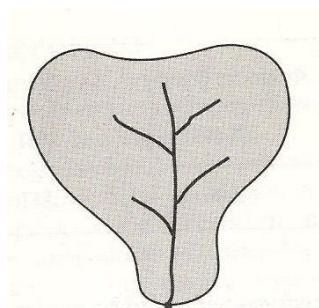
- **Συνεχή υδρολογικά μοντέλα.** Ως δεδομένα εισόδου εισάγονται μία ή περισσότερες σειρές παρατηρήσεων στο χρόνο (χρονοσειρές) μίας ή περισσότερων μετεωρολογικών παραμέτρων (Εικόνα 6). Ανάλογα με το χρονικό βήμα της προσομοίωσης, τα συνεχή υδρολογικά μοντέλα διακρίνονται σε: ετήσια, μηνιαία, ημερήσια και ωριαία.



Εικόνα 6: Συνεχές υδρολογικό μοντέλο (Τσακίρης, 1995).

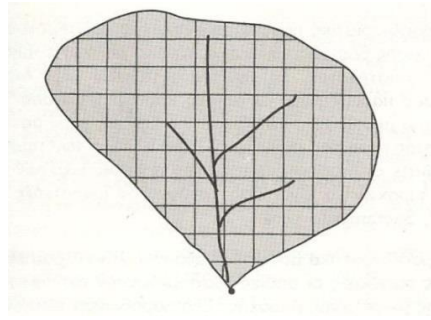
Για ταξινόμηση με βάση την χωρική προσομοίωση της λεκάνης απορροής προκύπτουν οι παρακάτω κατηγορίες υδρολογικών μοντέλων:

- **Ενιαία ή αδρομερή μοντέλα.** Βασίζονται στην υπόθεση της ομοιόμορφης κατανομής στην επιφάνεια της λεκάνης απορροής (Εικόνα 7) των δεδομένων εισόδου (θερμοκρασία, βροχή κλπ.) και εξόδου (απορροή).



Εικόνα 7: Ενιαίο μοντέλο (Τσακίρης, 1995).

- **Κατανεμημένα μοντέλα.** Βασίζονται στην υπόθεση της χωρικής κατανομής των μεγεθών εισόδου και εξόδου στην λεκάνη απορροής. Στα μοντέλα αυτά γίνεται διαχωρισμός της λεκάνης απορροής σε τμήματα με ανομοιόμορφα τοπογραφικά ή άλλα χαρακτηριστικά (Εικόνα 8).



Εικόνα 8: Κατανεμημένο μοντέλο (Τσακίρης, 1995).

2.3 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΣΥΝΕΧΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Οι κατηγορίες στις οποίες κατατάσσονται τα συνεχή μοντέλα προκύπτουν με βάση δύο διαφορετικά κριτήρια: το είδος των εξισώσεων και την τυχαιότητα ή όχι των φαινομένων (Τσακίρης, 1995).

Ανάλογα με το είδος των εξισώσεων διακρίνονται τα εξής συνεχή μοντέλα:

- Φυσικά ή φυσικής βάσης (physically-based)
- Παραμετρικά ή εννοιολογικά (conceptual)
- Εμπειρικά ή μαύρου κουτιού (black box)

Ανάλογα με την τυχαιότητα ή όχι των φαινομένων διακρίνονται τα εξής συνεχή μοντέλα:

- Ντετερμινιστικά (deterministic)
- Στατιστικά-Στοχαστικά (stochastic)

Ντετερμινιστικά φυσικά μοντέλα

Τα ντετερμινιστικά φυσικά μοντέλα έχουν ως βάση τους τις εξισώσεις φυσικής, δηλαδή στις εξισώσεις διατήρησης της μάζας (συνέχειας) και της ενέργειας (κίνησης). Τα μοντέλα αυτά περιλαμβάνουν μεγάλο αριθμό εξισώσεων (συνήθως διαφορικών εξισώσεων) και στις περισσότερες περιπτώσεις περιλαμβάνουν μεγάλο αριθμό παραμέτρων. Ένα μειονέκτημά τους είναι ότι απαιτούν πολλά δεδομένα εισόδου που συνήθως δεν είναι διαθέσιμα. Ο προσδιορισμός των απαραίτητων αυτών δεδομένων εισόδου αποτελεί μία δύσκολη και χρονοβόρα διαδικασία με μεγάλο κόστος. Τέτοια μοντέλα βρίσκουν εφαρμογή μόνο σε μικρές πειραματικές λεκάνες απορροής όπου υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα εισόδου (π.χ. μοντέλο SHE).

Ντετερμινιστικά παραμετρικά μοντέλα

Τα ντετερμινιστικά παραμετρικά μοντέλα, τα οποία είναι ιδιαίτερα διαδεδομένα, βασίζονται σε απλουστευτικές παραδοχές του φυσικού συστήματος. Περιλαμβάνουν παραμέτρους οι οποίες καθορίζονται από την διαδικασία της βελτιστοποίησης (calibration). Η διαδικασία αυτή επιδιώκει με την αλλαγή των τιμών των παραμέτρων την ελαχιστοποίηση της διαφοράς των προσομοιωμένων από τις μετρημένες στο πεδίο παροχές (π.χ. μοντέλο Stanford IV, HBV, Sacramento κλπ)

Ντετερμενιστικά μοντέλα μαύρου κουτιού

Τα ντετερμενιστικά μοντέλα μαύρου κουτιού βασίζονται σε απλές μαθηματικές εξισώσεις οι οποίες δεν έχουν καμία φυσική βάση αλλά προσομοιώνουν ικανοποιητικά την παρατηρούμενη απορροή.

Στοχαστικά μοντέλα μαύρου κουτιού

Τα στοχαστικά μοντέλα μαύρου κουτιού βασίζονται στις αρχές της βασικής στατιστικής θεωρίας και είναι περισσότερο μαθηματικά αναπτυγμένα από τα προσδιοριστικά μοντέλα μαύρου κουτιού. Προκειμένου να υπολογίσουν την μεταβλητή εξόδου (π.χ. απορροή), λαμβάνουν υπόψη τα στατιστικά χαρακτηριστικά της μεταβλητής εισόδου (π.χ. βροχή, απορροή σε προηγούμενα χρονικά βήματα) υπό τον όρο να ικανοποιούνται τα στατιστικά χαρακτηριστικά της μετρημένης παροχής (π.χ. διασπορά, αυτοσυσχέτιση, διασταυρούμενη συσχέτιση κλπ). Παραδείγματα μοντέλων αυτής της κατηγορίας αποτελούν: ARIMA, CLS, API κλπ.

Στοχαστικά παραμετρικά και φυσικά μοντέλα

Τα στοχαστικά παραμετρικά και φυσικά μοντέλα λαμβάνουν υπόψη τα στατιστικά χαρακτηριστικά της και περιλαμβάνουν εξισώσεις που απεικονίζουν τις βασικές διαδικασίες μετασχηματισμού της βροχής σε απορροή (Τσακίρης, 1995).

Στην παρούσα εργασία τα μοντέλα που θα εξεταστούν είναι τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα και το μοντέλο PTC. Τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα κατατάσσονται στα στοχαστικά μοντέλα μαύρου κουτιού, ενώ το μοντέλο PTC ανήκει στα ντετερμενιστικά παραμετρικά μοντέλα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΝΕΥΡΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η τεχνολογία στις μέρες μας έχει καταφέρει σπουδαία άλματα προόδου και σε αυτό έχει συντελέσει σε μεγάλο βαθμό η ανάπτυξη της επιστήμης των υπολογιστών. Ωστόσο, δεν έχει επιτευχθεί ακόμα, τουλάχιστον σε ικανοποιητικό βαθμό, η ουσιαστική επικοινωνία των ανθρώπων με τους υπολογιστές καθώς και η εξάλειψη μειονεκτημάτων των υπολογιστών όπως είναι η ανικανότητα απόκτησης εμπειρίας και γνώσης από τα λάθη και γενικότερα η έλλειψη διανοητικών ικανοτήτων ανάλογων του ανθρώπινου εγκεφάλου. Η τεχνητή νοημοσύνη (TN) αποτελεί τον τομέα εκείνο ο οποίος ερευνά τα θέματα αυτά.

Ως εκ τούτου, η τεχνητή νοημοσύνη (TN) αποτελεί την προσπάθεια ενσωμάτωσης και προσομοίωσης σε ένα υπολογιστικό σύστημα των βασικών χαρακτηριστικών της ανθρώπινης σκέψης. Διάφορα εργαλεία της TN που παρουσιάζουν ενδιαφέρον είναι οι γενετικοί αλγόριθμοι (Genetic algorithms), τα ασαφή συστήματα (fuzzy systems), τα έμπειρα συστήματα (expert systems), οι ευφυείς πράκτορες (intelligent agents) και η μηχανική μάθηση (machine learning).

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (TNA) αποτελούν δίκτυα απλών μονάδων επεξεργασίας (νευρώνων) που εμφανίζουν πολύπλοκη, συλλογική και παράλληλη συμπεριφορά, η οποία καθορίζεται από τις συνδέσεις μεταξύ των μονάδων επεξεργασίας και από τις παραμέτρους αυτών. Το δίκτυο περιλαμβάνει αλγόριθμους σχεδιασμένους να τροποποιούν την ισχύ των εν λόγω συνδέσεων μεταξύ των νευρώνων, ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή ροή σήματος (Καραμπερίδου, 2007). Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, ή απλώς νευρωνικά δίκτυα, αποτελούν μία τεχνολογία η οποία συνδέεται με πολλούς επιστημονικούς κλάδους όπως είναι τα μαθηματικά, η φυσική, η ιατρική, η μηχανική κ.ά. Η ιδιαίτερη ικανότητα τους να μαθαίνουν από τα δεδομένα εισόδου και να εκπαιδεύονται είναι αυτή που τα κάνει ξεχωριστά με αποτέλεσμα να βρίσκουν εφαρμογή σε διάφορα πεδία όπως η μοντελοποίηση, η ανάλυση χρονοσειρών, επεξεργασία σημάτων κ.ά.

3.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Τα Νευρωνικά Δίκτυα αποτελούν ένα καινούργιο τομέα με μικρή διαδρομή στο χώρο της επιστήμης. Αν και η αρχή έγινε τη δεκαετία του 1940, η μεγάλη ώθηση δόθηκε μετά το 1980. Μεγάλη συνεισφορά σε αυτό είχε η ανάπτυξη των Ηλεκτρονικών Υπολογιστών, καθώς και η ανάπτυξη νέων αλγορίθμων εκπαίδευσης.

Οι McCulloch και Pitts (1943) ανέπτυξαν μοντέλα νευρωνικών δικτύων βασιζόμενοι στην αντίληψη που είχαν για την νευρολογία. Τα δίκτυα τους βασίζονταν σε απλούς νευρώνες που θεωρούνταν ότι είναι δυαδικές διατάξεις με σταθερά όρια. Τα αποτελέσματα των μοντέλων αυτών ήταν απλές λογικές συναρτήσεις όπως “α ή β” και “α και β”. Οι ίδιοι συγγραφείς το 1949 προχώρησαν σε ένα πιο εξελιγμένο πρότυπο για την αναγνώριση σχημάτων. Στο πρότυπο αυτό ο νευρώνας μπορεί να έχει μόνο δύο καταστάσεις, οι οποίες είναι να πυροδοτεί ή να βρίσκεται σε

ηρεμία. Είναι εφικτό ένας νευρώνας να έχει πολλές εισόδους αλλά πρέπει υποχρεωτικά να δίνει μία μόνο έξοδο. Οι έξοδοι από διαφορετικούς νευρώνες δεν επιτρέπεται να ενώνονται αλλά υποχρεωτικά πρέπει να οδηγούν σε είσοδο άλλου νευρώνα. Οι απολήξεις των νευρώνων είναι 2 ειδών: διεγερτικές ή ανασταλτικές. Στην περίπτωση που ένας πυροδοτεί, τότε στέλνεται ένας παλμός. Τα δίκτυα McCulloch-Pitts προσπαθούν να εξηγήσουν το πως δουλεύει η μνήμη. Θεωρούν πως ένας πιθανός μηχανισμός μπορεί να είναι η ύπαρξη κλειστών διαδρομών του σήματος μέσα στο δίκτυο. Έτσι, μια ίνα ενώνει την έξοδο ενός κυττάρου με το σημείο εισόδου στο ίδιο κύτταρο, δημιουργώντας ένα μηχανισμό ανάδρασης (feedback).

Το 1949 ο D. Hebb με το βιβλίο “The organization of behavior”, εισάγει τον κανόνα μάθησης του Hebb. Ο κανόνας αυτός λέει ότι κάθε φορά που το δίκτυο χρησιμοποιεί τις συνδέσεις μεταξύ των νευρώνων, οι συνδέσεις αυτές ενισχύονται και το δίκτυο πλησιάζει περισσότερο στο να μάθει το πρότυπο το οποίο παρουσιάζεται. Το 1957 παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το μοντέλο του αισθητήρα (Perceptron) από τον Rosenblatt ο οποίος έφτιαξε το πρώτο δίκτυο με υλικό που μπορούσε να κάνει πολλές και διάφορες εργασίες. Το δίκτυο αυτό αποτελούνται από τρία στρώματα όπου το μεσαίο στρώμα ήταν γνωστό και ως διασυνδεδεμένο στρώμα. Αυτό το σύστημα μπορούσε να μάθει να επικοινωνεί ή να συνδέει μια δεδομένη είσοδο με μια τυχαία μονάδα εξόδου. Ωστόσο, το 1969 οι Minsky και Papert με το βιβλίο τους “Perceptrons” παρουσίασαν μια εκτίμηση της χρησιμότητας του δικτύου αυτού, γενικεύοντας τους περιορισμούς τους. Η δημοσίευση αυτή έχει πολύ σημαντικό αντίκτυπο που οδήγησε στην κατάργηση της χρηματοδότησης της έρευνας για τα Νευρωνικά Δίκτυα.

Πριν το βιβλίο των Minsky και Papert, και συγκεκριμένα το 1960, αναπτύχθηκαν από τους Widrow και Hoff τα δίκτυα Adaline και Madaline. Τα δίκτυα αυτά χρησιμοποιούσαν τη μέθοδο εκμάθησης των ελάχιστων μέσων τετραγώνων που ήταν διαφορετική από αυτή που εφαρμοζόταν στα Perceptrons. Αποτέλεσαν τα πρώτα δίκτυα που χρησιμοποιήθηκαν επιτυχώς σε πρακτικά προβλήματα, εξαλείφοντας την ηχώ σε τηλεφωνικές γραμμές.

Το 1974 ο Paul Werbos ανέπτυξε και χρησιμοποίησε για πρώτη φορά τη μέθοδο της οπίσθιας τροφοδότησης (back-propagation). Τα δίκτυα αυτά, αν και πέρασαν αρκετά χρόνια μέχρι να διαδοθούν, αποτελούν τα πιο διαδεδομένα και εφαρμοσμένα δίκτυα σήμερα. Στην ουσία τα δίκτυα back-propagation είναι perceptrions με πολλά επίπεδα, με διαφορετική συνάρτηση τιμής-ορίου στον τεχνητό νευρώνα και ένα πολύ περισσότερο σταθερό και ικανό κανόνα εκπαίδευσης. Λίγο αργότερα, το 1975, ο Fukusima (F. Kuniyiko) ανέπτυξε ένα βηματικώς εκπαιδευόμενο πολυστρωματικό νευρωνικό δίκτυο για την ερμηνεία χειρόγραφων χαρακτήρων. Η ονομασία του δικτύου αυτού ήταν Cognitron.

Το 1982 ο Hopfield απέδειξε με αυστηρά μαθηματική απόδειξη πως ένα Νευρωνικό Δίκτυο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αποθηκευτικός χώρος και, επίσης, πως μπορεί να επανακτήσει όλη την πληροφορία ενός συστήματος έστω και αν του δοθούν μερικά μόνο τμήματα του συστήματος και όχι ολοκληρω.

Το 1986 οι McClelland και Rumelhart δημοσίευσαν το “Parallel Distributed Processing” το οποίο παρουσίαζε την ιδέα ότι ένα νευρωνικό δίκτυο μπορεί να θεωρηθεί και να χρησιμοποιηθεί ως παράλληλος επεξεργαστής. Με το έργο αυτό έγινε ένα βήμα πέρα από το Perceptron καθώς

επιτρέπει την ύπαρξη και άλλων επιπέδων νευρώνων πέρα από την είσοδο και την έξοδο, που αποτελούν την εσωτερική δομή του δικτύου. Πρότειναν τη χρήση της μεθόδου της όπισθεν διάδοσης σφάλματος (back-propagation), που αν και είχε προταθεί και νωρίτερα από τον Paul Werbos, ήταν η πρώτη φορά που παρουσιάστηκε ολοκληρωμένα και με αυστηρό μαθηματικό τρόπο.

Η πρόοδος που σημειώθηκε στο τομέα των Νευρωνικών Δικτύων την δεκαετία του 70 και του 80 βοήθησε σημαντικά στην αναζωπύρωση του ενδιαφέροντος για τον τομέα αυτό. Το πρώτο συνέδριο που ήταν αφιερωμένο αποκλειστικά στα Νευρωνικά Δίκτυα έγινε το 1985. Έκτοτε η ανταπόκριση στα συνέδρια και στις δημοσιεύσεις αυτού του θέματος ήταν ιδιαίτερα θετική. Ταυτόχρονα δημιουργήθηκαν επαγγελματικές εταιρίες Νευρωνικών Δικτύων με χιλιάδες μέλη, άρχισαν να εκδίδονται επιστημονικά περιοδικά αποκλειστικά αφιερωμένα στα νευρωνικά δίκτυα και τα πρώτα μαθήματα μπήκαν στα μεγαλύτερα πανεπιστήμια σε Αμερική και Ευρώπη.

Από την δεκαετία του '90, τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα βρίσκουν εφαρμογή και στην υδρολογία. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η πρόβλεψη της παροχής ποταμού (Half et al. 1993, Gupta et al. 1997), πρόβλεψη της ποιότητας νερού (Maier & Dandy, 1996, Starrett et al., 1996), η χωρική και χρονική πρόβλεψη της βροχόπτωσης (French et al., 1992) και άλλες. Όσον αφορά στη χρήση τους για τη μοντελοποίηση υπόγειων υδάτων μερικές από τις περιπτώσεις εφαρμογής είναι οι παρακάτω: Rogers & Dowla, 1994, Shukla et al., 1996, Trichakis et al., 2009.

3.2 ΣΧΕΣΗ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΝΕΥΡΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΜΕ ΤΟΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ ΕΓΚΕΦΑΛΟ

Τα ΤΝΔ είναι εμπνευσμένα από τη διαφορετικότητα με την οποία επεξεργάζεται διάφορες πληροφορίες ένας ανθρώπινος εγκέφαλος σε σχέση με έναν συμβατικό υπολογιστή. Ο ανθρώπινος εγκέφαλος αποτελεί έναν εξαιρετικά πολύπλοκο, μη γραμμικό και με παράλληλο τρόπο λειτουργίας υπολογιστή. Τα χαρακτηριστικά αυτά του επιτρέπουν να εκτελεί υπολογισμούς σε πολύ μεγαλύτερες ταχύτητες ακόμα και από τους πιο εξελιγμένους υπολογιστές. Για παράδειγμα, όταν ο εγκέφαλος εκτελεί λειτουργίες για την οπτική αναγνώριση ενός γνωστού προσώπου σε ένα πλήθος κόσμου, απαιτούνται μόλις 100-200 ms, την στιγμή που για λιγότερο πολύπλοκες διαδικασίες ένας υπολογιστής μπορεί να χρειαστεί μέρες.

Από τη γέννηση ενός ανθρώπου, ο εγκέφαλος του έχει πολύ καλή δομή και, επίσης, την ικανότητα να κατασκευάζει τους δικούς του κανόνες, δηλαδή αυτό που ονομάζουμε «εμπειρία» η οποία μεγαλώνει με την πάροδο του χρόνου. Κατά τα δύο πρώτα χρόνια της ζωής του εγκεφάλου, η εμπειρία μεγαλώνει με τον μεγαλύτερο ρυθμό δημιουργώντας ως και 1 εκατομμύριο συνάψεις ανά δευτερόλεπτο. Ως συνάψεις αναφέρουμε τις βασικές λειτουργικές και δομικές μονάδες που μεσολαβούν στην ενδοεπικοινωνία των νευρώνων (Εικόνα 9). Μετά τα δύο πρώτα χρόνια, η εμπειρία συνεχίζει να αναπτύσσεται, αλλά με μικρότερο ρυθμό.



Εικόνα 9:Βιολογικός νευρώνας

Θα μπορούσαμε να πούμε ότι τα ΤΝΔ είναι ένας τρόπος να μοντελοποιήσουμε τον τρόπο με τον οποίο λειτουργεί και πραγματοποιεί υπολογισμούς ο ανθρώπινος εγκέφαλος.

Δεδομένου ότι ένα νευρωνικό δίκτυο είναι ένας συμπαγής παράλληλος κατανεμημένος επεξεργαστής που έχει τη φυσική κλίση να αποθηκεύει εμπειριστατωμένη γνώση και να την κάνει διαθέσιμη προς χρήση, τα ΤΝΔ μοιάζουν με τον ανθρώπινο εγκέφαλο στα εξής σημεία:

- Η γνώση αποκτάται από το δίκτυο μέσα από μια διαδικασία εκμάθησης.
- Οι δυνάμεις σύνδεσης των νευρώνων, γνωστές ως συναπτικά βάρη, χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση γνώσης.

Η διαδικασία που χρησιμοποιείται για την εκμάθηση ονομάζεται αλγόριθμος εκμάθησης, ο σκοπός της οποίας είναι να τροποποιήσει τα συναπτικά βάρη με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Ο καθορισμός του τρόπου μεταβολής των συναπτικών βαρών αποτελεί την παραδοσιακή μέθοδο για τον σχεδιασμό των νευρωνικών δικτύων (Haykin, 1999).

3.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

Η μεγάλη υπολογιστική ισχύς των ΤΝΔ αντλείται από τη μαζικά παράλληλη κατανεμημένη δομή τους, καθώς και από την ικανότητα τους να μαθαίνουν και κατ' επέκταση να γενικεύουν. Η γενίκευση αναφέρεται στην δυνατότητα που έχουν τα δίκτυα αυτά να παράγουν λογικές εξόδους από εισόδους οι οποίες δεν χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευσή τους. Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματά τους είναι (Haykin, 1999).:

1. **Μη γραμμικότητα.** Ένας τεχνητός νευρώνας μπορεί να είναι γραμμικός και μη-γραμμικός. Ένα ΤΝΔ το οποίο συγκροτείται από την σύνδεση μη-γραμμικών νευρώνων, είναι κατ'επέκταση μη-γραμμικό. Η μη γραμμικότητα είναι μια ιδιότητα ιδιαίτερα σημαντική, κυρίως στην περίπτωση που ο φυσικός μηχανισμός παραγωγής της τιμής εισόδου είναι μη γραμμικός.

2. **Απεικόνιση εισόδου-εξόδου.** Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα περιγραφής αυτής της ιδιότητας είναι η επιβλεπόμενη εκπαίδευση. Στην εκπαίδευση αυτού του είδους πραγματοποιείται τροποποίηση των συναπτικών βαρών ενός ΤΝΔ με την εφαρμογή δειγμάτων εκπαίδευσης που αποτελούνται από ένα σήμα εισόδου και την αντίστοιχη επιθυμητή απόκριση. Η τροποποίηση γίνεται με τέτοιο τρόπο ούτως ώστε να ελαχιστοποιηθεί η διαφορά μεταξύ της επιθυμητής και της πραγματικής απόκρισης. Όταν επιτευχθεί αυτός ο στόχος, το σύστημα φτάνει σε μία σταθερή κατάσταση. Παρόλο που τα ΤΝΔ δεν είναι τα μόνα συστήματα με ικανότητα μάθησης μέσω παραδειγμάτων, εντούτοις διακρίνονται για την ικανότητα τους να οργανώνουν την πληροφορία των δεδομένων εισόδου σε χρήσιμες μορφές. Αυτές οι μορφές αποτελούν στην ουσία ένα μοντέλο που αναπαριστά τη σχέση που ισχύει μεταξύ των δεδομένων εισόδου και εξόδου.
3. **Προσαρμοστικότητα.** Τα νευρωνικά δίκτυα έχουν μια έμφυτη ικανότητα να προσαρμόζουν τα συναπτικά βάρη στις μεταβολές του περιβάλλοντος. Πιο συγκεκριμένα, ένα νευρωνικό δίκτυο που έχει εκπαιδευτεί για να λειτουργεί σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον, μπορεί εύκολα να επανεκπαιδευτεί για να αντιμετωπίζει μικρές αλλαγές στις συνθήκες του περιβάλλοντος λειτουργίας του. Επιπλέον, όταν στο περιβάλλον όπου λειτουργεί το δίκτυο τα χαρακτηριστικά αλλάζουν με το χρόνο (είναι δηλαδή μη στατικό), είναι εφικτό να σχεδιαστεί το δίκτυο έτσι ώστε τα συναπτικά βάρη να αλλάζουν σε πραγματικό χρόνο. Έτσι, η φυσική αρχιτεκτονική ενός νευρωνικού δικτύου για αναγνώριση προτύπων, επεξεργασία σημάτων και εφαρμογές αυτόματου ελέγχου σε συνδυασμό με την προσαρμοστική ικανότητά του, το κάνουν χρήσιμο εργαλείο για προσαρμοστική αναγνώριση προτύπων, προσαρμοστική επεξεργασία σημάτων και προσαρμοστικό έλεγχο. Σαν γενικός κανόνας μπορεί να ειπωθεί ότι όσο περισσότερο προσαρμοστικό κάνουμε ένα σύστημα, διασφαλίζοντας παράλληλα και τη σταθερότητά του, τόσο πιο ισχυρή απόδοση θα έχει το σύστημα όταν τεθεί σε λειτουργία σε περιβάλλον με μη σταθερές συνθήκες. Ωστόσο, η προσαρμοστικότητα δεν οδηγεί πάντα σε καλές αποδόσεις, αλλά ενδέχεται να υπάρξουν και αντίθετα αποτελέσματα. Για παράδειγμα, ένα προσαρμοσμένο σύστημα με σταθερές μικρού χρονικού διαστήματος μπορεί να αλλάξει πολύ γρήγορα και για το λόγο αυτό τείνουν να ανταποκρίνονται σε ψευδείς διαταραχές, προκαλώντας δραστική υποβάθμιση της απόδοσης του συστήματος. Για να επιτευχθούν, λοιπόν, τα πλεονεκτήματα της προσαρμοστικότητας πρέπει οι κύριες σταθερές χρόνου του συστήματος πρέπει να είναι αρκετά μεγάλες για να έχει την ικανότητα το σύστημα να αγνοεί τις ψευδείς διαταραχές, αλλά και αρκετά μικρή για να ανταποκρίνεται στις σημαντικές αλλαγές του περιβάλλοντος. Αυτό το πρόβλημα συχνά αναφέρεται και ως σταθερότητα-πλαστικότητα.
4. **Αναγνώριση προτύπων (pattern recognition).** Τα ΤΝΔ είναι ιδιαίτερα ικανά στο να αναγνωρίζουν πρότυπα, καθώς δεν επηρεάζονται από ελλιπή ή/και με θόρυβο δεδομένα. Στον τομέα της αναγνώρισης προτύπων ένα νευρωνικό δίκτυο μπορεί να χρησιμοποιηθεί όχι μόνο για την επιλογή του κατάλληλου προτύπου αλλά και για την εγκυρότητα της απόφασης. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι σημαντικό καθώς δίνει τη δυνατότητα στο δίκτυο να απορρίψει τυχόν διφορούμενα πρότυπα, βελτιώνοντας έτσι την απόδοση του συστήματος. Από τη στιγμή που είναι σύστημα εκπαιδευτεί στο να αναγνωρίζει συνθήκες και καταστάσεις, απαιτείται μόνο ένας κύκλος λειτουργίας τους για να προσδιορίσουν μια συγκεκριμένη κατάσταση. Αυτό, λοιπόν, το χαρακτηριστικό τους αναγάγει τα ΤΝΔ ως ιδανικά για χρήση σε αυτοματισμούς ακόμα και κάτω από αντίξοες συνθήκες.

5. **Συναφής πληροφορία.** Η γνώση αναπαρίσταται από την πολύ δομημένη και ενεργή κατάσταση του νευρωνικού δικτύου.
6. **Ανοχή σε σφάλματα (fault tolerance).** Ένα νευρωνικό δίκτυο που είναι υλοποιημένο σε hardware έχει την ικανότητα να είναι ανθεκτικό σε βλάβες, υπό την έννοια ότι κάτω από αντίξοες συνθήκες λειτουργίας η απόδοσή του μειώνεται βαθμιαία και ομαλά. Σε περίπτωση που κάποιος νευρώνας ή οι κάποιες συνδέσεις μεταξύ νευρώνων καταστραφούν, η ποιότητα της εξόδου μειώνεται. Ωστόσο, επειδή η πληροφορία που αποθηκεύεται στο ίδιο δίκτυο είναι κατανεμημένη σε όλη τη δομή του, η βλάβη θα πρέπει να λάβει μεγάλη έκταση προκειμένου η απόδοση του δικτύου να μειωθεί δραματικά.
7. **Υλοποιησιμότητα σε Συστήματα Πολύ Υψηλής Ολοκλήρωσης (VLSI - Very Large Scale Integration).** Η μαζικά παράλληλη φύση των ΤΝΔ επιτρέπει στο δίκτυο να μοιράζει μια εργασία στα διάφορα τμήματα (νευρώνες) του, είναι δηλαδή ένα σύστημα παράλληλων κατανεμημένων διεργασιών. Αυτό το χαρακτηριστικό παρέχει μεγάλες ταχύτητες στο σύστημα. Για το λόγο αυτό τα νευρωνικά δίκτυα είναι ιδανικά για υλοποίηση εφαρμογών με τεχνολογία πολύ υψηλού επιπέδου ολοκλήρωσης.
8. **Ομοιομορφία ανάλυσης και σχεδιασμού.** Τα ΤΝΔ απολαμβάνουν κοινής αποδοχής ως επεξεργαστές πληροφοριών, υπό την έννοια ότι η ίδια σημειογραφία χρησιμοποιείται σε όλα τα πεδία που περιέχουν εφαρμογή τους. Πιο συγκεκριμένα, οι νευρώνες αποτελούν ένα κοινό συστατικό για όλα τα νευρωνικά δίκτυα με αποτέλεσμα να είναι εφικτή η εφαρμογή κοινών θεωριών και αλγορίθμων εκμάθησης σε διάφορες εφαρμογές των ΤΝΔ.
9. **Νευροβιολογική αναλογία.** Η σχεδίαση ενός ΤΝΔ είναι εμπνευσμένη από τη λειτουργία του ανθρώπινου εγκεφάλου ο οποίος είναι ζωντανή απόδειξη ότι η ανθεκτική σε σφάλματα παράλληλη επεξεργασία είναι εφικτή και, μάλιστα, με άκρως ικανοποιητικά και γρήγορα αποτελέσματα. Αυτή η αναλογία έχει ωθήσει τους νευροβιολόγους να αντιμετωπίζουν τα ΝΔ σαν αντικείμενο έρευνας προκειμένου να εξηγήσουν τα νευροβιολογικά φαινόμενα. Αντίστοιχα, οι μηχανικοί εξετάζουν την νευροβιολογία με σκοπό την εύρεση νέων ιδεών για την αντιμετώπιση ακόμα πιο πολύπλοκων προβλημάτων.

Αυτές οι ιδιότητες καθιστούν τα ΤΝΔ ικανά να βρίσκουν καλές προσεγγιστικές λύσεις σε πολύπλοκα προβλήματα μεγάλης κλίμακας. Ωστόσο, στην πράξη τα ΤΝΔ δεν μπορούν να δώσουν τη λύση σε τέτοια προβλήματα από μόνα τους. Το ιδανικό είναι να είναι μέρος ενός συνεκτικού συστήματος της προσέγγισης που θα χρησιμοποιηθεί για την επίλυση. Για την ακρίβεια, ένα σύνθετο πρόβλημα διασπάται σε μικρότερα και πιο απλά προβλήματα και τα ΤΝΔ χρησιμοποιούνται για την επίλυση κάποιων από αυτά τα οποία και ταιριάζουν στις ικανότητες των ΤΝΔ.

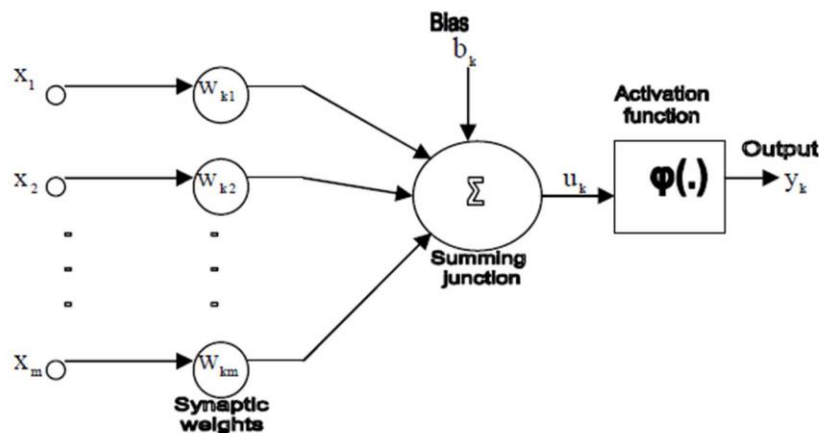
3.4 ΒΑΣΙΚΕΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

Τα ΤΝΔ αποτελούνται από ένα σύνολο απλών υπολογιστικών μονάδων, τους νευρώνες, οι οποίοι επικοινωνούν μεταξύ τους στέλνοντας σήματα μέσω μεγάλου πλήθους σταθμισμένων συνδέσεων (Kröse, Van der Smagt, 1996). Τα μέρη από τα οποία αποτελούνται είναι τα εξής:

1. Ένα σύνολο μονάδων επεξεργασίας που ονομάζονται νευρώνες ή κελιά.

2. Συνδέσεις μεταξύ των μονάδων, κάθε μία από τις οποίες χαρακτηρίζεται από ένα συναπτικό βάρος w_{jk} , που προσδιορίζει την επίδραση που έχει το σήμα της μονάδας j στη μονάδα k . Πιο συγκεκριμένα, ένα σήμα x_j στην είσοδο της σύναψης j που συνδέεται στον νευρώνα k , πολλαπλασιάζεται με το συναπτικό βάρος w_{jk} .
3. Ένα κανόνα διάδοσης (propagation rule) που καθορίζει την ενεργό είσοδο s_k μιας μονάδας από τις εξωτερικές εισόδους.
4. Μια συνάρτηση ενεργοποίησης F_k , που καθορίζει την ενημέρωση (update) της μονάδας k , δηλαδή το νέο επίπεδο ενεργοποίησής της, βάσει της ενεργού εισόδου $s_k(t)$ και της τρέχουσας ενεργοποίησής της $y_k(t)$.
5. Μια εξωτερική είσοδο b_k για κάθε μονάδα που καλείται κατώφλι ή πόλωση (bias).
6. Μια κατάσταση ενεργοποίησης y_k για κάθε μονάδα, που αποτελεί και την έξοδο της μονάδας.
7. Έναν κανόνα εκμάθησης, μέσω του οποίου συλλέγονται οι πληροφορίες.
8. Ένα περιβάλλον μέσα στο οποίο λειτουργεί το σύστημα, παρέχοντας σήματα εισόδου και αν χρειαστεί σήματα λάθους.

Η σχηματική απεικόνιση ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου με ένα νευρώνα όπου περιέχονται όλες οι συνιστώσες του παρατίθεται στην Εικόνα 10.



Εικόνα 10: Τεχνητό νευρωνικό δίκτυο.

3.5 ΜΟΝΑΔΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ

Κάθε μονάδα επεξεργασίας έχει διπλό ρόλο. Ο πρώτος είναι να δέχεται εισόδους (input) από γειτονικές ή εξωτερικές πηγές και να τις χρησιμοποιήσει προκειμένου να υπολογίσει ένα σήμα εξόδου (output) το οποίο μεταβιβάζεται στις άλλες μονάδες επεξεργασίας. Ο δεύτερος ρόλος τους είναι να προσαρμόζουν τα συναπτικά βάρη. Το σύστημα χαρακτηρίζεται ως παράλληλο καθώς

πολλές μονάδες μπορούν να κάνουν τους υπολογισμούς τους ταυτόχρονα. Διακρίνονται τρεις τύποι κόμβων (Kröse, Van der Smagt, 1996):

1. **Κόμβοι εισόδου** οι οποίοι λαμβάνουν δεδομένα που έχουν προέλευση εκτός του συστήματος
2. **Κρυμμένοι κόμβοι** οι οποίοι στέλνουν σήματα εισόδου και εξόδου εντός του δικτύου
3. **Κόμβοι Εξόδου** οι οποίοι στέλνουν δεδομένα εκτός δικτύου

Κατά τη διάρκεια λειτουργίας ενός νευρωνικού δικτύου, οι μονάδες μπορούν είτε να ενημερώνονται ταυτόχρονα, όπου όλες οι μονάδες ενημερώνουν την ενεργοποίησή τους την ίδια ώρα, είτε μη ταυτόχρονα όπου, αν και υπάρχει μια καθορισμένη πιθανότητα κάθε μονάδα να ενημερώσει την ενεργοποίησή της την χρονική στιγμή t , συνήθως μόνο μία μονάδα μπορεί να το κάνει αυτό κάποια δεδομένη στιγμή.

3.6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΙΣΟΔΟΥ ΚΑΙ ΕΞΟΔΟΥ ΜΟΝΑΔΑΣ

Προκειμένου να υπολογιστεί η ενεργός είσοδος s_k μιας μονάδας k αρχικά πολλαπλασιάζεται η κάθε είσοδος x_j με το αντίστοιχο συναπτικό βάρος w_{jk} και τα γινόμενα αυτά αθροίζονται. Στη συνέχεια προστίθεται και ο εξωτερικός παράγοντας πόλωσης (bias) b_k . Η συνολική είσοδος εκφράζεται μαθηματικά από την σχέση 3.1.

$$s_k = \sum_{j=1}^m w_{jk} x_j + b_k \quad (3.1)$$

Το βάρος w_{jk} είναι θετικό αν η σύναψη είναι διεγερτική, δηλαδή όταν ωθεί τον νευρώνα να ανταποκριθεί στη διέγερση, και αρνητικό αν η σύναψη είναι απαγορευτική, δηλαδή αποτρέπει τον νευρώνα να παράγει μια απόκριση. Οι μονάδες που ακολουθούν τον κανόνα διάδοσης της σχέσης 3.1 καλούνται σίγμα μονάδες.

Για τον υπολογισμό του σήματος εξόδου y_k του νευρώνα, το οποίο αναφέρεται και ως πραγματική έξοδος, χρησιμοποιείται μια συνάρτηση ενεργοποίησης που ορίζει και την έξοδο του νευρώνα. Μαθηματικά ο υπολογισμός του σήματος εξόδου συμβολίζεται από την σχέση 3.2.

$$y_k = F_k(s_k) \quad (3.2)$$

3.7 ΤΥΠΟΙ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗΣ ΝΕΥΡΩΝΩΝ

Η συνάρτηση ενεργοποίησης $F(\cdot)$ ορίζει την έξοδο του νευρώνα. Υπάρχουν 3 βασικοί τύποι συναρτήσεων ενεργοποίησης:

1. Συνάρτηση κατωφλίου (Threshold function)

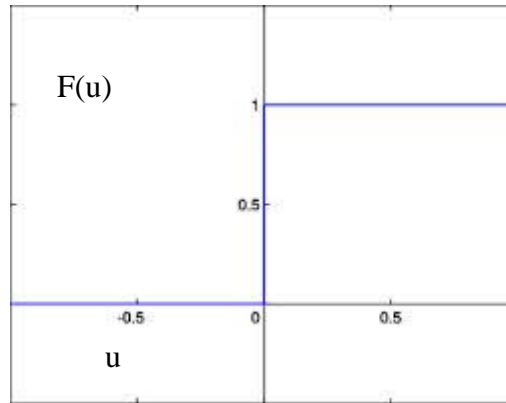
Για τον συγκεκριμένο τύπο συνάρτησης ισχύει η σχέση 3.3, ενώ σχηματικά απεικονίζεται στην Εικόνα 11.

$$F(u) = \begin{cases} 1, & u \geq 0 \\ 0, & u < 0 \end{cases} \quad (3.3)$$

Η έξοδος του νευρώνα k που χρησιμοποιεί αυτό τον τύπο συνάρτησης έχει τη μορφή που δίνει η σχέση 3.4.

$$y_k = \begin{cases} 1, & s_k \geq 0 \\ 0, & s_k < 0 \end{cases} \quad (3.4)$$

Όπου το s_k είναι η ενεργός είσοδος και δίνεται από την σχέση 3.1.



Εικόνα 11: Συνάρτηση κατωφλίου.

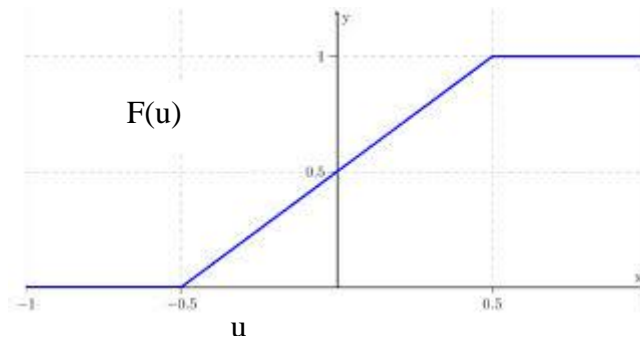
Ένας νευρώνας που χρησιμοποιεί αυτού του είδους την συνάρτηση, αναφέρεται στην βιβλιογραφία ως μοντέλο McCulloch-Pitts. Η έξοδος του νευρώνα παίρνει την τιμή 1 αν η ενεργός είσοδος είναι μη αρνητική, ενώ όταν η ενεργός είσοδος είναι αρνητική, τότε η έξοδος του νευρώνα γίνεται 0.

2. Τμηματικά γραμμική συνάρτηση(Piecewise-Linear function)

Αυτός ο τύπος συνάρτησης εκφράζεται μαθηματικά από την σχέση 3.5.

$$F_u = \begin{cases} 1, & u \geq +\frac{1}{2} \\ u, & +\frac{1}{2} > u > -\frac{1}{2} \\ 0, & u \leq -\frac{1}{2} \end{cases} \quad (3.5)$$

Στην τμηματικώς γραμμική συνάρτηση, οι τιμές εξόδου του νευρώνας είναι και πάλι στο διάστημα $[0,1]$. Η σχηματική παράσταση φαίνεται στην Εικόνα 12.



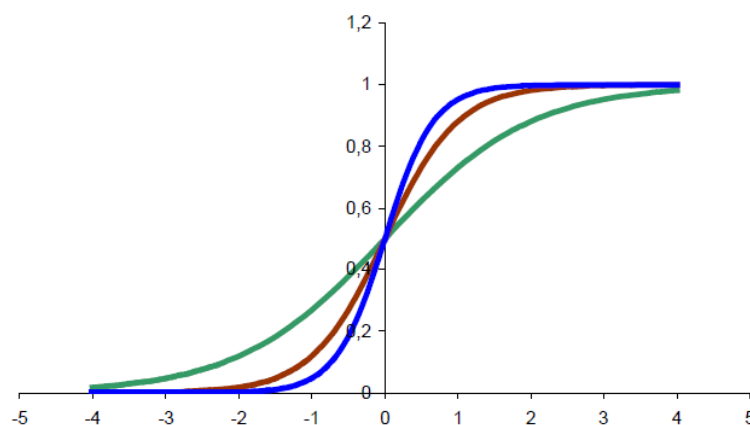
Εικόνα 12: Τμηματικώς γραμμική συνάρτηση ενεργοποίησης.

3. Σιγμοειδής συνάρτηση

Η σιγμοειδής συνάρτηση έχει σχήμα τελικού “ζ” και αποτελεί την πιο διαδεδομένη συνάρτηση ενεργοποίησης. Είναι αυστηρά αύξουσα και παρουσιάζει μια εξομάλυνση μεταξύ γραμμικής και μη-γραμμικής συμπεριφοράς. Ένα παράδειγμα σιγμοειδούς συνάρτησης, αποτελεί η λογιστική συνάρτηση που παρουσιάζεται στη σχέση 3.6.

$$F_u = \frac{1}{1+e^{-a \cdot u}} \quad (3.6)$$

Όπου η παράμετρος a αποτελεί την κλίση της σιγμοειδούς συνάρτησης και δίνοντας της διαφορετικές τιμές προκύπτουν συναρτήσεις με διαφορετικές κλίσεις (Εικόνα 13). Οριακά όταν η τιμή της κλίσης πλησιάζει το άπειρο, η σιγμοειδής συνάρτηση παίρνει τη μορφή της συνάρτησης κατωφλίου. Ωστόσο, αυτοί οι δύο τύποι συναρτήσεων παρουσιάζουν κάποιες βασικές διαφορές. Η σιγμοειδής, σε αντίθεση με την κατωφλίου, είναι μια παραγωγίσιμη συνάρτηση. Επίσης, ενώ η κατωφλίου μπορεί να πάρει την τιμή 1 ή 0, η σιγμοειδής συνάρτηση μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμές μεταξύ του 0 και του 1.



Εικόνα 13: Σιγμοειδής συνάρτηση για διάφορες τιμές της κλίσης a .

Όπως εύκολα μπορεί να παρατηρήσει κάποιος, και οι 3 συναρτήσεις που παρουσιάστηκαν παραπάνω, παίρνουν τιμές από 0 έως 1. Σε περίπτωση που θέλουμε να πάρουμε τιμές που να κυμαίνονται από -1 έως 1, μπορούμε να επαναπροσδιορίσουμε τη συνάρτηση κατωφλίου με τον τρόπο που παρουσιάζεται στην σχέση 3.7. Ονομάζεται συνάρτηση προσήμου (signum) και συμβολίζεται $\text{sgn}(\cdot)$

$$F(u) = \begin{cases} 1, & u > 0 \\ 0, & u = 0 \\ -1, & u < 0 \end{cases} \quad (3.7)$$

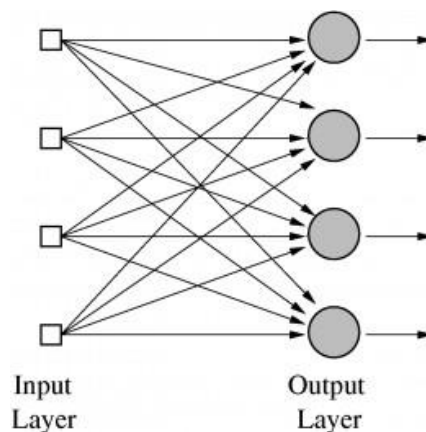
Αν θέλουμε να έχει και σιγμοειδή μορφή, με τα πλεονεκτήματα που αυτή παρουσιάζει, χρησιμοποιούμε την συνάρτηση της υπερβολικής εφαπτομένης (σχέση 3.8).

$$F(u) = \tanh(u) \quad (3.8)$$

3.8 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ -ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΔΙΚΤΥΩΝ

Αρχιτεκτονική ή τοπολογία ενός δικτύου ονομάζεται ο τρόπος με τον οποίο είναι παραταγμένοι και συνδεδεμένοι μεταξύ τους οι νευρώνες. Οι νευρώνες είναι χωρισμένοι σε επίπεδα, με τους νευρώνες του ίδιου επιπέδου να έχουν την ίδια συνάρτηση ενεργοποίησης και, συνεπώς, να παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά. Ανάλογα με τον αριθμό των επιπέδων που έχει ένα δίκτυο, διακρίνονται οι παρακάτω κατηγορίες:

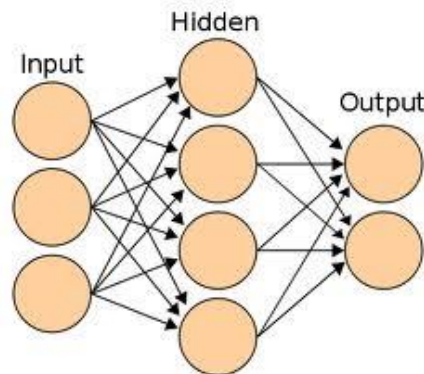
- **Μονοστρωματικά Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (Single-layer Artificial Neural Networks).** Αποτελούν την πιο απλή δομή δικτύου και περιλαμβάνουν μόνο ένα υπολογιστικό επίπεδο. Στην ουσία περιλαμβάνουν δύο επίπεδα: το επίπεδο εισόδου και το επίπεδο εξόδου. Ωστόσο, επειδή το επίπεδο εισόδου δεν πραγματοποιεί κάποιον υπολογισμό, δεν μετρίεται και για αυτό τα δίκτυα αυτού του τύπου αναφέρονται ως μονοστρωματικά (Εικόνα 14).



Εικόνα 14: Μονοστρωματικό Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο.

- **Πολυστρωματικά Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (Multi-layer Artificial Neural Networks).** Αν ένα δίκτυο δεν αποτελείται μόνο από το επίπεδο εισόδου και το επίπεδο εξόδου, τότε το

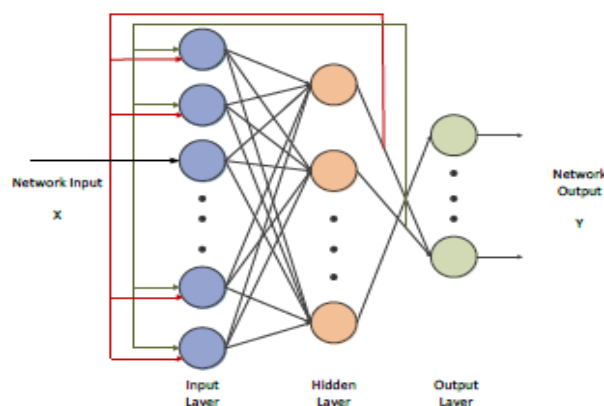
δίκτυο είναι πολυστρωματικό και τα επιπλέον επίπεδα ονομάζονται κρυφά (hidden layers). Όσο περισσότερα επίπεδα έχει ένα δίκτυο, τόσο πιο πολύπλοκο γίνεται με αποτέλεσμα να είναι πιο δύσκολο να εκπαιδευτεί. Παρολαυτά σε αυτή την περίπτωση το δίκτυο μπορεί να προσομοιώσει μη γραμμικές σχέσεις με ακρίβεια.



Εικόνα 15: Πολυστρωματικό ΤΝΔ με 2 layers.

Εκτός, όμως, από τον αριθμό των επιπέδων που έχει ένα δίκτυο, η αρχιτεκτονική του εξαρτάται και από το είδος των συνδέσεων μεταξύ των νευρώνων και τον τρόπο με τον οποίο επικοινωνούν μεταξύ τους. Με βάση αυτό το χαρακτηριστικό διακρίνονται σε εξής κατηγορίες ΤΝΔ:

- **Προσω-τροφοδότησης δίκτυα (feed-forward networks).** Η ροή των πληροφοριών γίνεται αποκλειστικά προς τα εμπρός, δηλαδή από την είσοδο προς την έξοδο. Σε περιπτώσεις δικτύων με πολλαπλά επίπεδα (layers), ένα σήμα δεν μπορεί να μεταδοθεί από την έξοδο ενός νευρώνα στην είσοδο κάποιου άλλου νευρώνα που βρίσκεται στο ίδιο ή σε προηγούμενο επίπεδο (layer).
- **Δίκτυα με ανάδραση (recurrent networks).** Εδώ τα σήματα μεταδίδονται και προς τις δύο κατευθύνσεις. Τα δίκτυα αυτά είναι ιδιαίτερα πολύπλοκα και δυναμικά καθώς η κατάστασή τους αλλάζει διαρκώς μέχρις ότου να φτάσουν σε μια κατάσταση ισορροπίας στην οποία παραμένουν μέχρι να αλλάξει η είσοδος και να βρεθεί καινούργιο σημείο ισορροπίας (Εικόνα 16).



Εικόνα 16: Δίκτυο με ανάδραση.

3.9 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ

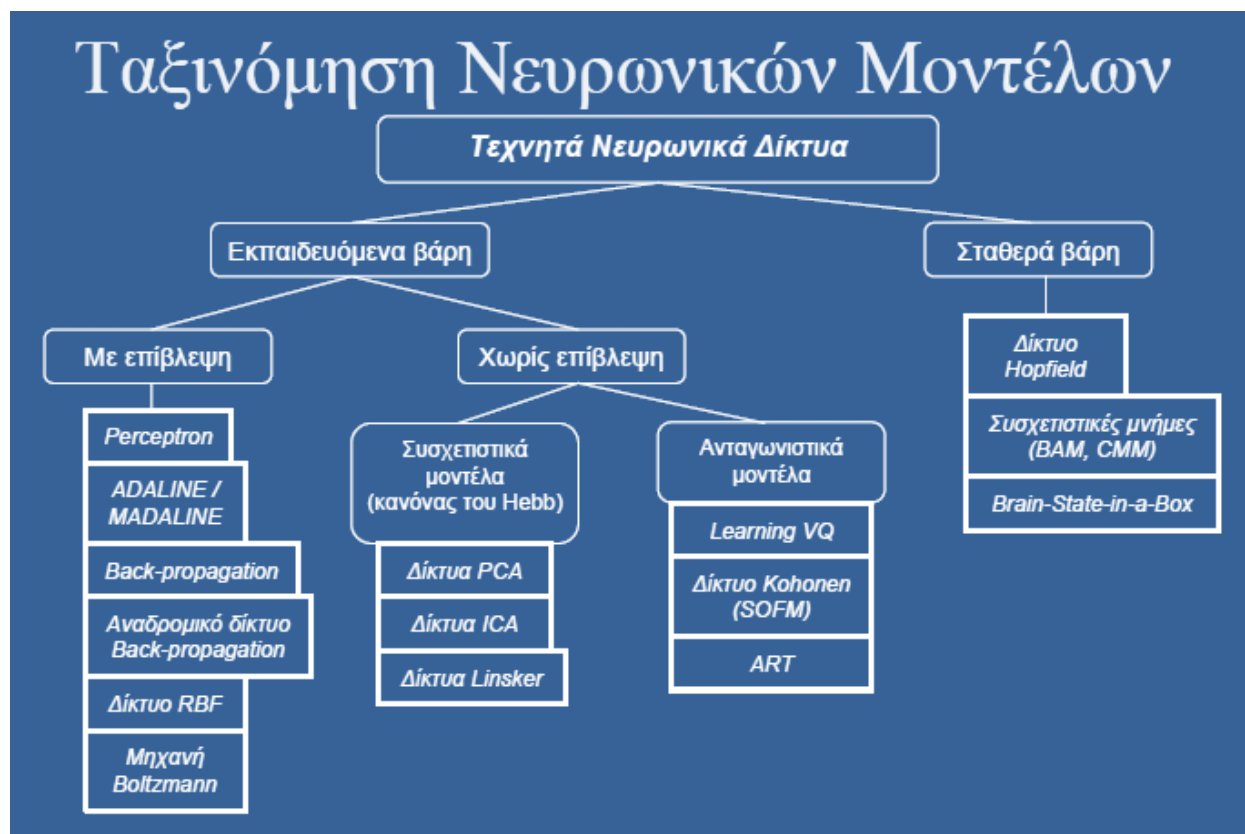
Η εκπαίδευση ενός ΤΝΔ αποτελεί διαδικασία αντίστοιχη της βαθμονόμησης των κλασσικών μοντέλων. Κατά την εκπαίδευση στόχος είναι ο υπολογισμός των τιμών των συναπτικών βαρών. Οι κύριες κατηγορίες εκπαίδευσης είναι:

- **Η επιβλεπόμενη εκπαίδευση (supervised/associative learning).** Κατά τη συγκεκριμένη εκπαίδευση εισάγονται από τον χρήστη, ή από το σύστημα που περιέχει το ΤΝΔ (αυτοεπιβλεπόμενο δίκτυο), συγκεκριμένα ζεύγη εισόδου εξόδου. Το εξωτερικό περιβάλλον λειτουργεί δηλαδή ως δάσκαλος για το δίκτυο. Στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του σφάλματος, μέσω μιας αναζήτησης βαρών και όρων πόλωσης για τα οποία είναι οι εξοδοι του δικτύου είναι ικανοποιητικά κοντά στην επιθυμητή έξοδο. Παραδείγματα επιβλεπόμενης εκπαίδευσης αποτελούν η εκπαίδευσης διόρθωσης σφάλματος, η εκπαίδευση με ενίσχυση και η στοχαστική εκπαίδευση.
- **Η μη-επιβλεπόμενη εκπαίδευση (unsupervised learning/ self-organization).** Εδώ σε αντίθεση με την επιβλεπόμενη εκπαίδευση δεν χρησιμοποιείται κάποιος «δάσκαλος». Το σύστημα τροφοδοτείται μόνο με δεδομένα εισόδου χωρίς να παρέχεται η επιθυμητή έξοδος. Το σύστημα προσπαθεί να ομαδοποιήσει τα δεδομένα εισόδου σύμφωνα με κάποια κριτήρια ομοιότητας και να ανακαλύψει στατιστικά αξιοπρόσεκτα χαρακτηριστικά των διανυσμάτων εισόδου. Χρησιμοποιώντας, δηλαδή, την συσχέτιση (correlation) των διανυσμάτων εισόδου ο κανόνας μάθησης αλλάζει τα βάρη του δικτύου με στόχο την ομαδοποίηση των διανυσμάτων εισόδου σε ομάδες (clusters), έτσι ώστε να παράγουν παρόμοιες εξόδους του δικτύου, εφόσον ανήκουν στην ίδια ομάδα.

Σε περίπτωση που φάση της εκπαίδευσης γίνεται ταυτόχρονα με την φάση της λειτουργίας, αναφέρεται ως on-line εκπαίδευση. Συνήθως, η μη-επιβλεπόμενη εκπαίδευση γίνεται on-line. Αντίθετα, off-line εκπαίδευση αποκαλείται η εκπαίδευση που γίνεται σε διαφορετική χρονική περίοδο από τη λειτουργία. Η επιβλεπόμενη εκπαίδευση γίνεται κυρίως off-line.

3.10 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Ανάλογα με τον τύπο του νευρώνα, την αρχιτεκτονική του δικτύου και τη μέθοδο εκπαίδευσης, τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα ταξινομούνται στις κατηγορίες που φαίνονται στην Εικόνα 17 (Διαμαντάρας, 2006).



Εικόνα 17: Ταξινόμηση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων. Πηγή: Διαμαντάρας, (2006).

3.11 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ LEVENBERG-MARQUARDT

Η εκπαίδευση των δικτύων που αναπτύχθηκαν σε αυτή την εργασία έγινε με τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt. Ο αλγόριθμος αυτός συνδυάζει 2 διαφορετικούς αλγορίθμους εκπαίδευσης: τον αλγόριθμο gradient descent (γνωστό και ως error back propagation (EBP)) και τον αλγόριθμο Gauss-Newton. Ο EBP είναι ιδιαίτερα δημοφιλής λόγω της σταθερότητας που παρουσιάζει. Ωστόσο, έχει το μειονέκτημα ότι συγκλίνει με αρκετά χαμηλή ταχύτητα. Αντιθέτως, ο αλγόριθμος Gauss-Newton ενώ συγκλίνει γρήγορα, χαρακτηρίζεται ως ιδιαίτερα ασταθής. Συνεπώς, ο αλγόριθμος Levenberg-Marquardt με τον κατάλληλο συνδυασμό των 2 αυτών αλγορίθμων καταφέρνει να είναι ταχύτερος και με μεγάλη σταθερότητα (Hagan et al., 1994, Haykin, 1999). Πιο συγκεκριμένα, γύρω από μια περιοχή με σύνθετη καμπυλότητα ο αλγόριθμος αυτός λειτουργεί όπως ο EBP μέχρι η τοπική καμπυλότητα να είναι κατάλληλη για τετραγωνική προσέγγιση. Μετά από αυτό ο αλγόριθμος προσεγγίζει τον αλγόριθμο Gauss-Newton, δίνοντας τη δυνατότητα για επιτάχυνση της σύγκλισης. Η διαδικασία εκπαίδευσης που ακολουθεί ο Levenberg-Marquardt αναπαρίσταται από την σχέση 3.9.

$$w_{k+1} = w_k - (J^T J + \mu I)^{-1} J^T e \quad (3.9)$$

Όπου:

J: ο ιακωβιανός πίνακας που περιέχει τις πρώτες παραγώγους των σφαλμάτων του δικτύου ως προς τα βάρη και τα biases

e: διάνυσμα των σφαλμάτων του δικτύου

μ : μια θετική παράμετρος

w_k : το διάνυσμα των βαρών με την k-οστή επανάληψη

w_{k+1} : το διάνυσμα των βαρών μετά την k+1-οστή επανάληψη

Στην περίπτωση που το σφάλμα μειωθεί, δηλαδή γίνει μικρότερο από το προηγούμενο σφάλμα, ο συντελεστής μ μειώνεται και, έτσι, η επίδραση του EBP μειώνεται. Αντίθετα, αν το σφάλμα αυξηθεί, δηλαδή γίνει μεγαλύτερο από το τελευταίο σφάλμα, τότε πρέπει να συνεχιστεί η επίδραση του EBP, αναζητώντας μια καταλληλότερη καμπυλότητα για τετραγωνική προσέγγιση και ο συντελεστής μ αυξάνεται.

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 3.9.
3. Εκτίμηση του σφάλματος χρησιμοποιώντας τα νέα βάρη.
4. Στην περίπτωση που το νέο σφάλμα αυξηθεί λόγω της ενημέρωσης των βαρών, τότε η τελευταία ενημέρωση των βαρών ακυρώνεται και ο συντελεστής μ πολλαπλασιάζεται με 10 ή κάποιον άλλο παράγοντα. Επιστροφή στο βήμα 2.
5. Στην περίπτωση που το νέο σφάλμα μειωθεί λόγω της ενημέρωσης των βαρών, τότε η τελευταία ενημέρωση των βαρών επικυρώνεται και ο συντελεστής μ διαιρείται με τον ίδιο παράγοντα του βήματος 4.
6. Επιστροφή στο βήμα 2 με τα νέα βάρη μέχρι το σφάλμα να γίνει μικρότερο από μία ορισμένη τιμή.

Ο αλγόριθμος Levenberg-Marquardt, όπως είναι λογικό, παρουσιάζει και κάποια μειονεκτήματα. Ένα από αυτά είναι ότι ο ιακωβιανός πίνακας που πρέπει να αποθηκεύεται έχει διαστάσεις $P \times M \times N$, όπου P ο αριθμός των προτύπων, M ο αριθμός των εξόδων και N ο αριθμός των βαρών. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι σε ενδεχόμενη εκπαίδευση μεγάλων δικτύων, απαιτείται πολύ μεγάλη μνήμη. Ακόμα, υπάρχει ένας σημαντικός περιορισμός, καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε πολυεπίπεδα δίκτυα perceptrons. Τέλος, για μεγάλης κλίμακας εκπαίδευση ο ταχύτητα ενδέχεται να είναι απελπιστικά κακή. Ωστόσο, για μικρής και μεσαίας κλίμακας δίκτυα είναι εξαιρετικά αποδοτικός (http://www.eng.auburn.edu/~wilambm/pap/2011/K10149_C012.pdf).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ MATLAB

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ MATLAB

Το MATLAB (Matrix Laboratory) αποτελεί μια γλώσσα προγραμματισμού υψηλού επιπέδου και, ταυτόχρονα, ένα διαδραστικό και εύχρηστο περιβάλλον για αριθμητικούς υπολογισμούς, προσομοίωση, γραφική οπτικοποίηση και προγραμματισμό. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση δεδομένων, την ανάπτυξη αλγορίθμων και τη δημιουργία μοντέλων και εφαρμογών. Βρίσκει εφαρμογή σε ένα πολύ ευρύ φάσμα πεδίων όπως η γραμμική άλγεβρα, η στατιστική, τα εφαρμοσμένα μαθηματικά, η αριθμητική ανάλυση, η επεξεργασία σημάτων και εικόνες κ.ά.

Βασική δομική μονάδα του MATLAB αποτελούν οι πίνακες καθώς όλα τα δεδομένα αποθηκεύονται σε πίνακες χωρίς αρχικές διαστάσεις. Έτσι, παρέχεται η δυνατότητα για υπολογισμούς με πίνακες (επίλυση γραμμικών συστημάτων, εύρεση ιδιοτιμών και ιδιοδιανυσμάτων, αντιστροφή τετραγωνικού πίνακα κ.ά.). Επίσης, υπάρχουν εργαλεία διασύνδεσης με το χρήστη μέσω γραφικών τα οποία αποτελούν εργαλεία ανάπτυξης. Ακόμα, το MATLAB παρέχει δυνατότητες προγραμματισμού στη δική του γλώσσα προγραμματισμού.

Το MATLAB είναι σχεδιασμένο για την αριθμητική επίλυση προβλημάτων σε αριθμητική πεπερασμένη ακρίβεια. Αυτό σημαίνει ότι επιδιώκει να βρει μια προσεγγιστική λύση ενός προβλήματος και όχι την ακριβή λύση. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι που το κάνει να ξεχωρίζει σε σχέση με άλλα συστήματα συμβολικών υπολογισμών όπως το Mathematica και το Maple.

Οι λειτουργίες της διακρίνονται στις τυποποιημένες, δηλαδή σε αυτές που διαχειρίζονται αριθμητικά δεδομένα και εξάγουν αριθμητικά αποτελέσματα, και στις συναρτήσεις του Symbolic Toolbox, οι οποίες διαχειρίζονται και υπολογίζουν συμβολικές εκφράσεις, δηλαδή επεξεργάζονται μαθηματικά σύμβολα.

Το περιβάλλον του MATLAB διαθέτει, εκτός των άλλων, ένα σύνολο πρόσθετων, εξειδικευμένων προγραμματιστικών λύσεων που ονομάζονται εργαλειοθήκες (toolboxes) ή ενίοτε αναφέρονται ως εξωτερικές βιβλιοθήκες. Αυτές είναι εκτενείς συλλογές συναρτήσεων (m-files) που επεκτείνουν τις δυνατότητες των συστημάτων με στόχο την επίλυση προβλημάτων συγκεκριμένου τύπου. Προβλήματα για την επίλυση των οποίων χρησιμοποιούνται εργαλειοθήκες είναι προβλήματα επεξεργασίας σήματος, ελέγχου συστήματος, νευρωνικών δικτύων, προσομοιώσεις δεδομένων, ασαφής λογικής κ.ά.

4.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ MATLAB

Τα πλεονεκτήματα του MATLAB τα οποία το έχουν καταστήσει ως ένα ιδιαίτερα δημοφιλές και ισχυρό επιστημονικό εργαλείο είναι τα εξής (Μαθιουδάκης, π.α):

- Ευκολότερη εκμάθηση από οποιαδήποτε άλλη γλώσσα προγραμματισμού.
- Βελτιστοποιημένος κώδικας για διεξαγωγή υπολογισμών με πίνακες.
- Γλώσσα προγραμματισμού για ανάπτυξη εφαρμογών και ταυτόχρονα λογισμικό υλοποίησης επιστημονικών υπολογισμών.
- Εύκολος εντοπισμός και διόρθωση λαθών.
- Φιλικό περιβάλλον προς στο χρήστη.

Αν και ιδιαίτερα χρήσιμο και πετυχημένο, σαφώς και έχει κάποια μειονεκτήματα τα οποία είναι:

- Αποτελεί εξειδικευμένη γλώσσα προγραμματισμού.
- Το λογισμικό MATLAB αναπτύχθηκε μόνο για διεξαγωγή επιστημονικών υπολογισμών και έτσι δεν υποστηρίζει την ανάπτυξη άλλου είδους εφαρμογών, όπως για παράδειγμα επεξεργασία κειμένου.
- Οι αναπτυσσόμενες εφαρμογές υστερούν σε απόδοση από την άποψη του χρόνου εκτέλεσης σε σχέση με αντίστοιχες που αναπτύσσονται με τις κλασσικές γλώσσες προγραμματισμού.

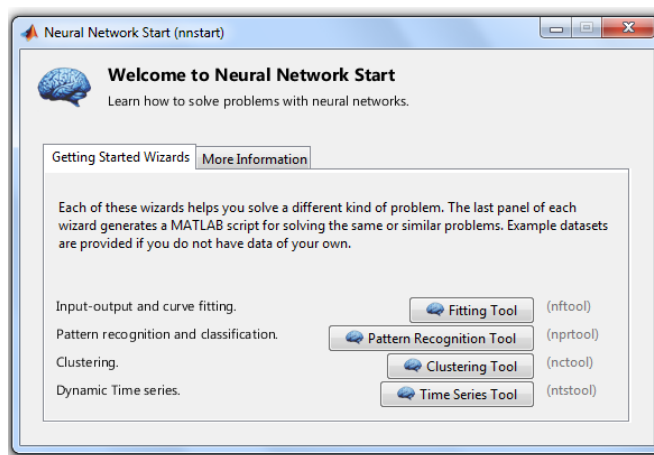
4.3 TOOLBOX ΤΟΥ MATLAB ΓΙΑ ΤΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

Η εργαλειοθήκη του MATLAB για τα Νευρωνικά Δίκτυα προσφέρει συναρτήσεις και εφαρμογές για τη μοντελοποίηση πολύπλοκων μη-γραμμικών συστημάτων που δεν είναι εύκολο να μοντελοποιηθούν με τα κλασσικά μοντέλα. Πιο συγκεκριμένα, προσφέρει την δυνατότητα σε κάποιον να σχεδιάσει, να εκπαιδεύσει, να οπτικοποιήσει και να προσομοιώσει ένα νευρωνικό δίκτυο. Προκειμένου να κάνει πιο απλή και πιο εύχρηστη αυτή τη διαδικασία για το χρήστη, η εργαλειοθήκη των νευρωνικών δικτύων προσφέρει έτοιμες δομές για το σχεδιασμό και τη διαμόρφωση των νευρωνικών δικτύων. Ιδιαίτερα σημαντικό είναι επίσης το γεγονός πως επιτρέπεται και η χρήση γραφικών εργαλείων για την εκπαίδευση των δικτύων αυτών.

Ο πιο απλός και εύκολος τρόπος να χρησιμοποιήσει κάποιος την εργαλειοθήκη για τα νευρωνικά δίκτυα είναι μέσω γραφικών διεπαφών με το χρήστη (graphical user interface-GUI). Απλά καλώντας την συνάρτηση **nnstart** (Εικόνα 18), ο χρήστης αποκτά πρόσβαση στις δυνατότητες της εργαλειοθήκης για τις εξής εργασίες:

1. **Προσαρμογή λειτουργίας (Function fitting).** Εναλλακτικά γίνεται απευθείας με την συνάρτηση `nftool`.
2. **Αναγνώριση προτύπων (Pattern recognition).** Εναλλακτικά γίνεται απευθείας με την συνάρτηση `nprrtool`.
3. **Ομαδοποίηση δεδομένων (Data clustering).** Εναλλακτικά γίνεται απευθείας με την συνάρτηση `nctool`.
4. **Ανάλυση χρονοσειρών (Time series analysis).** Εναλλακτικά γίνεται απευθείας με την συνάρτηση `ntsftool`.

Δίνεται, επίσης, η δυνατότητα για τροποποίηση του πρότυπου κώδικα του MATLAB, έτσι ώστε ο χρήστης έχοντας το γενικό πλαίσιο να μπορεί να προσθέσει ή να τροποποιήσει κάποιες εντολές προκειμένου να δημιουργήσει το επιθυμητό δίκτυο.



Εικόνα 18: Εντολή nnstart.

4.4 ΥΠΟΣΤΗΡΙΖΟΜΕΝΕΣ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΠΟ ΤΟ TOOLBOX ΤΗΣ MATLAB

Σύμφωνα με τη μέθοδο που χρησιμοποιείται για την εκπαίδευση ενός ΤΝΔ, διακρίνονται, όπως έχει ήδη αναφερθεί παραπάνω, δύο βασικές κατηγορίες: α) τα Επιβλεπόμενα Νευρωνικά Δίκτυα και β) τα Μη Επιβλεπόμενα Νευρωνικά Δίκτυα. Η εργαλειοθήκη της MATLAB υποστηρίζει και τις δύο αυτές κατηγορίες και για κάθε κατηγορία υπάρχει ποικιλία στο είδος της αρχιτεκτονικής που μπορεί να χρησιμοποιηθεί.

Όσον αφορά τα **επιβλεπόμενα νευρωνικά δίκτυα**, οι αρχιτεκτονικές που υποστηρίζονται είναι οι εξής:

- **Δίκτυα προώθησης (feed-forward networks).** Εδώ τα δεδομένα 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: 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 διαισθητικά δίκτυα (perceptron).
- **Δίκτυα ακτινικής συνάρτησης βάσης (radial basis networks).** Τα δίκτυα αυτά παρέχουν μία εναλλακτική και γρήγορη μέθοδο για το σχεδιασμό feedforward δικτύων. Εδώ ανήκουν οι αρχιτεκτονικές των δικτύων γενικευμένης παλινδρόμησης (generalized regression) και στοχαστικών Νευρωνικά Δίκτυα (probabilistic neural networks).

- **Περιοδικά δίκτυα (*recurrent networks*)**, χρησιμοποιούν την ανάδραση για να αναγνωρίζουν χωρικά και χρονικά μεταβαλλόμενα πρότυπα. Δίκτυα τέτοιου τύπου που υποστηρίζει η Matlab είναι τα δίκτυα Elman και Hopfield.
- **Δίκτυα κβαντοποίησης των δεδομένων κατά την εκμάθηση (*Learning vector quantization (LVQ)*)**. Αποτελεί μια σπουδαία 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*)**. Εδώ 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.

4.5 ΥΠΟΣΤΗΡΙΖΟΜΕΝΕΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΕΚΜΑΘΗΣΗΣ

Οι υποστηριζόμενες από την Matlab συναρτήσεις για εκπαίδευση (training) και εκμάθηση (learning) των Νευρωνικών Δικτύων είναι μαθηματικές διαδικασίες που χρησιμοποιούνται για να ρυθμίζουν αυτόματα τα συναπτικά βάρη και τα bias του δικτύου. Οι συναρτήσεις εκπαίδευσης υπαγορεύουν έναν γενικό αλγόριθμο που επηρεάζει όλα τα συναπτικά βάρη και τα bias του Νευρωνικού Δικτύου. Οι συναρτήσεις εκμάθησης μπορούν να εφαρμοστούν και σε ξεχωριστά συναπτικά βάρη και bias μέσα σε ένα δίκτυο.

Οι υποστηριζόμενες **συναρτήσεις εκπαίδευσης (*training functions*)** είναι οι παρακάτω:

- ***trainb*** – Εκπαίδευση σε δεσμίδες δεδομένων με κανόνες εκμάθησης των συναπτικών βαρών και των bias (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)

- ***traincgb*** – Powell-Beale με σύζευξη συντελεστή και ανάδραση
- ***traincgf*** – 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 αυξητικής ενημέρωσης
- ***trainrp*** – Ελαστική ανάδραση (resilient backpropagation (Rprop))
- ***train*** – Σειριακή αυξητική ενημέρωση
- ***trainscg*** – Κλιμακωτή σύζευξη συντελεστή και ανάδραση

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

- ***learncon*** – Συνάρτηση εκμάθησης των bias με «συνείδηση»
- ***learngd*** – Ελαττούμενου συντελεστή weight/bias συνάρτηση εκμάθησης
- ***learngdm*** – Ελαττούμενου συντελεστή με ορμή weight/bias συνάρτηση εκμάθησης
- ***learnh*** – Hebb weight συνάρτηση εκμάθησης
- ***learnhd*** – Hebb με εξασθένηση των weights κανόνας εκμάθησης
- ***learnis*** – Συνάρτηση εκμάθησης των weights με ενδιάμεσες φάσεις
- ***learnk*** – Kohonen συνάρτηση εκμάθησης των weights
- ***learnlv1*** – LVQ1 συνάρτηση εκμάθησης των weights
- ***learnlv2*** – LVQ2 συνάρτηση εκμάθησης των weights

- *learnos* – Outstar συνάρτηση εκμάθησης των weights
- *learnp* – Perceptron συνάρτηση εκμάθησης των weights και των bias
- *learnpn* – Κανονικοποιημένη perceptron συνάρτηση εκμάθησης των weights και των bias
- *learnsom* – Συνάρτηση εκμάθησης αυτορυθμιζόμενων «χαρτών»
- *learnwh* – Widrow-Hoff κανόνας εκμάθησης των weights και των bias

4.6 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΦΑΣΗΣ ΤΗΣ ΓΕΝΙΚΕΥΣΗΣ (GENERALIZATION).

Γενίκευση (generalization) ονομάζεται η φάση που ακολουθεί την εκπαίδευση και εκμάθηση του δικτύου και κατά την οποία ο χρήστης παίρνει τα αποτελέσματα που του δίνει το δίκτυο για νέα διανύσματα εισόδου, με τα οποία το δίκτυο δεν έχει εκπαιδευτεί.

Με την βελτιστοποίηση του Generalization ο χρήστης βοηθιέται στο να αποφύγει το overfitting των τιμών που παίρνει σαν έξοδο στην φάση του generalization. Με τον αγγλικό όρο overfitting αναφερόμαστε στην κατάσταση εκείνη όπου κατά το generalization παρατηρούμε ότι το δίκτυο μπορεί να έχει «απομνημονεύσει» τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την φάση της εκπαίδευσης, αλλά δεν έχει μάθει να τα γενικεύει σωστά πάνω στα καινούργια δεδομένα εισόδου. Το overfitting επιφέρει ένα σχετικά μικρό λάθος πάνω στις εξόδους που προκύπτουν κατά την εκπαίδευση του δικτύου αλλά και ένα αρκετά σημαντικό λάθος στις εξόδους παρουσιάζεται όταν δίνονται στο δίκτυο νέα δεδομένα. Η Matlab υποστηρίζει δύο λύσεις για την βελτιστοποίηση του generalization. Αυτές είναι:

- Η λύση μέσω της **κανονικοποίησης (regularization)** αλλάζει την συνάρτηση σφάλματος του δικτύου, που συνήθως είναι το σφάλμα των ελαχίστων τετραγώνων (mse) με την συνάρτηση msereg που, εκτός από το σφάλμα των ελαχίστων τετραγώνων, περιλαμβάνει και το μέγεθος των αλλαγών στα συνναπτικά βάρη (weights) και στα bias του δικτύου.
- Η λύση μέσω του «**ξαφνικού τέλους**» (**early stopping**) είναι μία τεχνική όπου χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικές ομάδες δεδομένων για την εκπαίδευση του δικτύου. Η μία ομάδα είναι τα training set δεδομένα, με την οποία αλλάζουν κατά την διαδικασία της εκπαίδευσης τα συνναπτικά βάρη και τα bias του δικτύου, και η άλλη είναι το validation set («επίσημη» ομάδα) δεδομένων που χρησιμοποιείται για να διακόπτεται η διαδικασία της εκπαίδευσης όταν στο δίκτυο ξεκινά να συμβαίνει το overfitting.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ARGUS ONE ΚΑΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ PTC

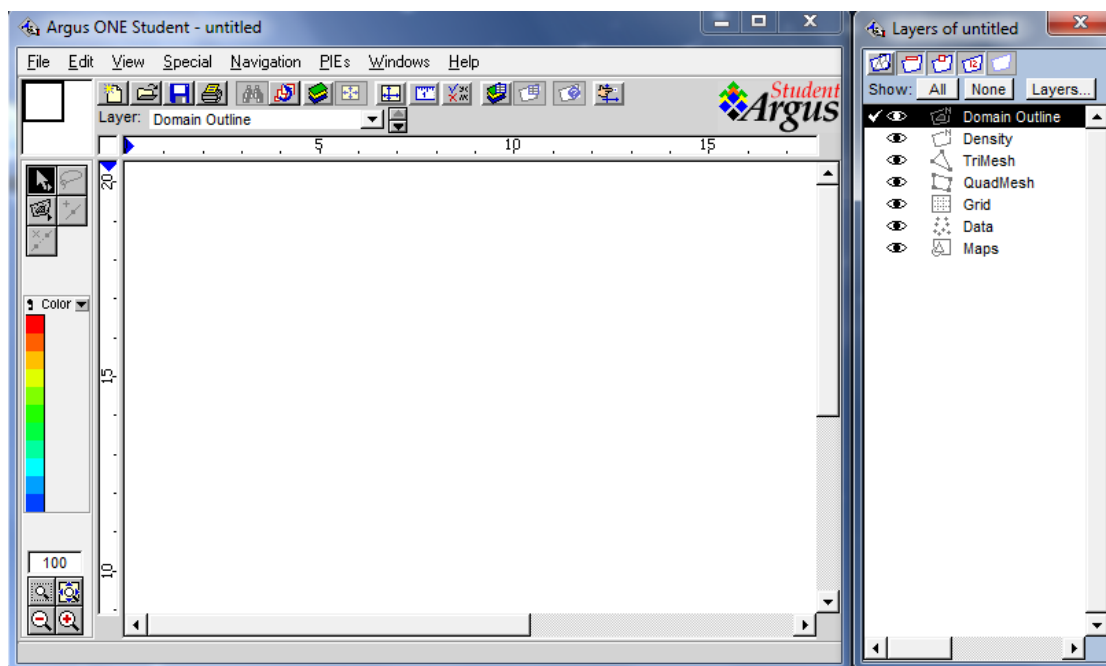
5.1 ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ARGUS ONE

Το λογισμικό ARGUS ONE είναι ένα γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών (GIS) που χρησιμοποιείται ευρέως για μοντελοποίηση στο πεδίο των γεωεπιστημών με χρήση αριθμητικών μεθόδων. Το πρόγραμμα αυτό δημιουργεί πλέγματα πεπερασμένων στοιχείων και πλέγματα πεπερασμένων διαφορών με ένα εύκολο τρόπο, καθώς επιτρέπει στο χρήστη την απλή γραφική απεικόνιση δεδομένων και αποτελεσμάτων. Διαθέτει ένα σύνολο δυνατοτήτων που επιτρέπει την εισαγωγή και τη χρήση ψηφιακών χαρτών, την περιγραφή πεδίων ορισμού και την αυτόματη δημιουργία πλεγμάτων στις ορισμένες περιοχές. Επίσης, είναι εφικτός ο συνδυασμός διαφόρων μεταβλητών στα διάφορα στοιχεία και στους κόμβους του πλέγματος, όπως οι αρχικές και οριακές τιμές, τιμές συγκεντρώσεων κλπ. Πρόκειται για ένα πρόγραμμα που απεικονίζει γραφικά την κάθε πληροφορία που εισάγει ο χρήστης με αποτέλεσμα την απλοποίηση στη μελέτη της περιοχής.

Η λειτουργία του προγράμματος ARGUS ONE έχει ως ακρογωνιαίο λίθο τα «στρώματα» (layers). Τα στρώματα μπορούν να περιγραφούν σαν διάφανα φύλλα εργασίας που το καθένα περιέχει διάφορες πληροφορίες. Σχεδιάζονται τομείς, πλέγματα και χάρτες σε διαφορετικά διάφανα στρώματα τα οποία μπορούν να μετακινηθούν πάνω είτε κάτω, να διαγραφούν ή να κρυφτούν δίνοντας έτσι στο χρήστη τη δυνατότητα να προσθέσει ή να αλλάξει μέρος της εργασίας του με ένα γραφικό τρόπο. Τα διαφορετικά είδη πληροφοριών καταγράφονται σε διαφορεικούς τύπους στρωμάτων. Οι τύποι στρωμάτων είναι:

- Στρώματα τομέων (domain). Σε αυτά σχεδιάζονται τα όρια κάθε τομέα.
- Στρώματα πλέγματος (mesh). Όπως λέει και το όνομα, εδώ εισάγονται τα πλέγματα.
- Στρώματα πληροφοριών πλέγματος (grid). Σχεδιάζονται τα πλέγματα.
- Στρώματα πληροφοριών (Information). Χρησιμοποιούνται για να συσχετίσουν τις μεταβλητές με τα meshes or grids. Είναι πιθανό να οριστούν διάφορες μεταβλητές σε ένα μόνο στρώμα πληροφοριών.
- Στρώματα χαρτών. Εδώ εισάγονται ψηφιακοί χάρτες. Επίσης χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία και την εξαγωγή γραφικών παραστάσεων όπως ισοϋψών ή τρισδιάστατες επιφάνειες.
- Στρώματα δεδομένων. Χρησιμοποιούνται για την εισαγωγή δεδομένων που εξάγονται από άλλα προγράμματα (π.χ. το PTC). Για παράδειγμα, αυτά τα δεδομένα-έξοδος του PTC μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία γραφικών.

Το αρχείο που περιέχει όλες τις πληροφορίες που ο χρήστης έχει εισάγει στο πρόγραμμα καλείται Argus Project και έχει κατάληξη .mmb. Όταν το πρόγραμμα ανοίγει εμφανίζεται η μορφή που φαίνεται στην Εικόνα 19. Κατά την εκκίνηση δημιουργείται ένα απλό περιβάλλον με επτά στρώματα που ονομάζονται: Domain outline, Density, TriMesh, QuadMesh, Grid, Data και Maps.



Εικόνα 19: Πρόγραμμα Argus One κατά την εκκίνηση.

Ο ρόλος του Argus One κατά τη μοντελοποίηση είναι ουσιαστικός αλλά βοηθητικός. Το κύριο κομμάτι της μοντελοποίησης αναλαμβάνεται από κάποιο μοντέλο. Υποστηρίζει τα περισσότερα μοντέλα υπογείων υδάτων που κυκλοφορούν στην αγορά και για αυτό το λόγο είναι ιδιαίτερα δημοφιλές. Τα υποστηριζόμενα μοντέλα είναι τα εξής:

- Princeton Transport Code (PTC). Αποτελεί ένα προηγμένο τρισδιάστατο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών που προσομοιώνει την υπόγεια ροή και μεταφορά ουσιών.
- MODFLOW. Αποτελεί ένα αρθρωτό τρισδιάστατο μοντέλο υπογείων υδάτων που χρησιμοποιεί πεπερασμένες διαφορές και μπορεί να προσομοιώσει τη μεταφορά διαλυμένων ουσιών και να εκτιμήσει παραμέτρους.
- NAPL. Πρόκειται για ένα μοντέλο προσομοίωσης της ρύπανσης του εδάφους και των υδροφορέων από οργανικά υγρά, γνωστά και ως υγρά μη υδατώδους φάσης (Non Aqueous Phase Liquids)
- SUTRA. Το μοντέλο αυτό προσομοιώνει την κορεσμένη και ακόρεστη ροή, ροή υγρού σταθερής ή μεταβλητής πυκνότητας και μεταφορά διαλυμένων ουσιών και ενέργειας .
- Το HST3D, ένα πρόγραμμα μοντελοποίησης πεπερασμένων διαφορών για την προσομοίωση ρευστών , διαλυμάτων μιας ουσίας και μεταφοράς θερμότητας στις τρεις διαστάσεις και υπό συνθήκες κορεσμού . Επίσης , επιτρέπει την προσομοίωση της προσρόφησης και της αποσύνθεσης .

Άλλα μοντέλα είναι το FEMWATER, το Acunsaf2d, το CFEST και το FEM3DmeshE-Pie.

5.2 ΜΟΝΤΕΛΟ PRINCETON TRANSPORT CODE (PTC)

Το PTC, όπως αναφέρθηκε, αποτελεί ένα τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών που προσομοιώνει την υπόγεια ροή υδάτων και τη μεταφορά μάζας σε υδροφορείς. Ο κώδικας PTC είναι γραμμένος στη γλώσσα προγραμματισμού Fortran 77 και είναι αποτέλεσμα συνεισφορών πολλών ατόμων στο πανεπιστήμιο του Princeton. Αρχικά αναπτύχθηκε σε δύο διαστάσεις, από τους Pinder & Gray και αργότερα ο κώδικας επεκτάθηκε στον τρισδιάστατο χώρο από τους Babu et al. (1997).

5.2.1 Θεμελιώδεις εξισώσεις του PTC

Το μοντέλο PTC προκειμένου να αναπαραστήσει την υπόγεια ροή χρησιμοποιεί το παρακάτω σύστημα μερικών διαφορικών εξισώσεων για να περιγράψει:

- Το υδραυλικό ύψος(h) στην εξίσωση 5.1:

$$\frac{\theta}{\theta x} \left(K_{xx} \frac{\theta h}{\theta x} \right) + \frac{\theta}{\theta y} \left(K_{yy} \frac{\theta h}{\theta y} \right) + \frac{\theta}{\theta z} \left(K_{zz} \frac{\theta h}{\theta z} \right) - S \frac{\theta h}{\theta t} + Q = 0 \quad (5.1)$$

- Τις συνιστώσες της ταχύτητας ροής του υπόγειου ύδατος στις εξισώσεις 5.2:

$$V_x = -K_{xx} \frac{\theta h}{\theta x}, V_y = -K_{yy} \frac{\theta h}{\theta y}, V_z = -K_{zz} \frac{\theta h}{\theta z} \quad (5.2)$$

- Τη μεταφορά ρύπων που περιγράφεται από τη συγκέντρωση, c (εξίσωση 5.3):

$$\begin{aligned} & \frac{\theta}{\theta x} \left[D_{xx} \frac{\theta c}{\theta x} + D_{xy} \frac{\theta c}{\theta y} + D_{xz} \frac{\theta c}{\theta z} \right] + \frac{\theta}{\theta y} \left[D_{yx} \frac{\theta c}{\theta x} + D_{yy} \frac{\theta c}{\theta y} + D_{yz} \frac{\theta c}{\theta z} \right] \\ & + \frac{\theta}{\theta z} \left[D_{zx} \frac{\theta c}{\theta x} + D_{zy} \frac{\theta c}{\theta y} + D_{zz} \frac{\theta c}{\theta z} \right] - \left[V_x \frac{\theta c}{\theta x} + V_y \frac{\theta c}{\theta y} + V_z \frac{\theta c}{\theta z} \right] \\ & + Q(c^w - c) - \theta [1 + E(c)] \left(\frac{\theta c}{\theta t} \right) = 0 \end{aligned} \quad (5.3)$$

Όπου:

H: το υδραυλικό ύψος [L]

K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} : οι συνιστώσες υδραυλικής αγωγιμότητας στους άξονες x,y και z αντίστοιχα [LT^{-1}]

S: ειδική αποθηκευτικότητα [L^{-1}]

Q: Ρυθμός άντλησης [L^3T^{-1}]

V_x, V_y, V_z : συνιστώσες ταχύτητας στους x,y και z [LT^{-1}]

$D_{xx}, D_{yy}, D_{zz}, D_{xy}, D_{yx}, D_{zx}, D_{xz}, D_{zy}, D_{yz}$: συνιστώσες υδροδυναμικής διασποράς [L^2T^{-1}]

c: συγκέντρωση ρύπου στο σημείο (x,y,z) τη χρονική στιγμή t [ML^{-3}]

c^w : συγκέντρωση αντλούμενο νερού στο σημείο (x_i, y_i, z_i)

θ: πορώδες υδροφορέα (αδιάστατο)

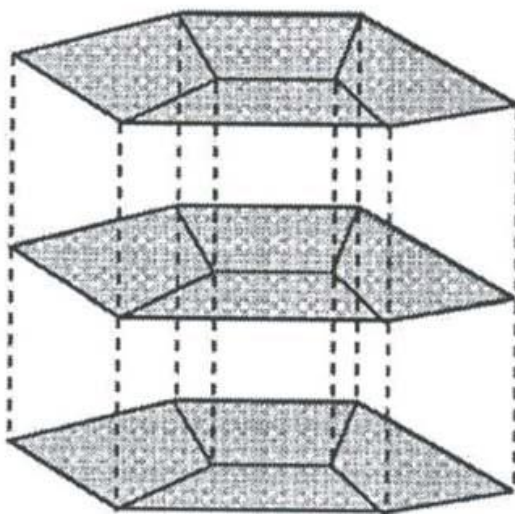
E(c): όρος που αντιπροσωπεύει τις ιδιότητες της χημικής προσρόφησης

Οι εξισώσεις αυτές προκύπτουν από την αρχή διατήρησης της μάζας και το νόμο του Darcy. Για την επίλυσή τους ακολουθείτε η σειρά με την οποία παρουσιάζονται πιο πάνω, δηλαδή αρχικά υπολογίζεται το υδραυλικό ύψος μέσω της εξ. 5.1, ύστερα μέσω των εξισώσεων 5.2 υπολογίζονται οι συνιστώσες της ταχύτητας και, τέλος, χρησιμοποιείται η εξ. 5.3 για την εύρεση της συγκέντρωσης του ρύπου.(Babu et al.,1997).

5.2.2 Αλγόριθμος επίλυσης PTC

Η εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων είναι απαραίτητη για την επίλυση του συστήματος πολύπλοκων διαφορικών εξισώσεων που παρατέθηκαν παραπάνω. Σε περιπτώσεις εφαρμογής τους σε συστήματα κλίμακας πεδίου, τα οποία περιλαμβάνουν τριών διαστάσεων εξισώσεις, απαιτείται τεράστια υπολογιστική ισχύς για την αριθμητική τους επίλυση. Ο αλγόριθμος «PTC» χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο διαχωρισμού, ο οποίος επιλύει τις εξισώσεις των τριών διαστάσεων και ταυτόχρονα περιορίζει σημαντικά τον υπολογιστικό φόρτο.

Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος διαχωρίζει το μοντέλο σε παράλληλα, περίπου οριζόντια, στρώματα. Σε κάθε στρώμα πραγματοποιείται διακριτοποίηση πεπερασμένων στοιχείων (Pinder & Gray, 1977), έτσι ώστε να αναπαρασταθούν με ακρίβεια οι γεωμετρικές ανωμαλίες που παρουσιάζονται σε ακανόνιστα συστήματα. Αφού έχει πραγματοποιηθεί αυτή η ακριβής γεωμετρική διακριτοποίηση, τα στρώματα ενώνονται κάθετα μεταξύ τους μέσω μίας διακριτοποίησης πεπερασμένων διαφορών. Αυτή η υβριδική σύζευξη της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και αυτής των πεπερασμένων διαφορών παρέχει τη δυνατότητα εφαρμογής της διαχωριστικής διαδικασίας (splitting algorithms). Στη διάρκεια μίας, ορισμένου χρόνου, επανάληψης όλοι οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται σε δύο στάδια. Κατά το πρώτο στάδιο επιλύονται ξεχωριστά όλοι οι οριζόντιοι διαχωρισμοί πεπερασμένων στοιχείων, ενώ κατά το δεύτερο επιλύονται οι κάθετες εξισώσεις των πεπερασμένων διαφορών, οι οποίες συνδέουν τα διάφορα επίπεδα που σχηματίζουν τα οριζόντια στρώματα (Εικόνα 20).



Εικόνα 20:Απεικόνιση τρόπου επίλυσης του αλγορίθμου PTC. Ο αλγόριθμος διαχωρίζει τα οριζόντια στρώματα με βάση τα πεπερασμένα στοιχεία. Στη συνέχεια, τα στρώματα ενώνονται κάθετα και διακριτοποιούνται με πεπερασμένες διαφορές (Κανελλόπουλος, 2003).

5.3 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΡΟΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

5.3.1 Κυρίαρχη εξίσωση

Ο κώδικας PTC προσδιορίζει τα χαρακτηριστικά της ροής των συστημάτων υπόγειας ροής λύνοντας την ακόλουθη μερική διαφορική εξίσωση (εξ. 5.4) ως προς το υδραυλικό ύψος, h :

$$\frac{\theta}{\theta x} \left(K_{xx} \frac{\theta h}{\theta x} \right) + \frac{\theta}{\theta y} \left(K_{yy} \frac{\theta h}{\theta y} \right) + \frac{\theta}{\theta z} \left(K_{zz} \frac{\theta h}{\theta z} \right) - S \frac{\theta h}{\theta t} + \sum_{i=1}^r Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i) = 0 \quad (5.4)$$

Όπου:

Q_i : ένας γενικός όρος πηγής/δεξαμενής στη θέση i (θετικός αριθμός σε περίπτωση εμπλουτισμού) [$L^3 T^{-1}$]

δ : η συνάρτηση δέλτα του Dirac

r : ο αριθμός των σημείων πηγών/δεξαμενών

Πολλές φορές ο όρος $\sum_{i=1}^r Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i)$ θεωρείται ίσος με Q για λόγους απλοποίησης. Η εξίσωση 5.4 επιλύεται αριθμητικά χρησιμοποιώντας τις μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών.

5.3.2 Εφαρμογή Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ο αλγόριθμος επίλυσης PTC επιλύει την εξίσωση ροής σε δύο στάδια, σε οριζόντια και σε κάθετη διεύθυνση. Η επίλυση κατά την οριζόντια διεύθυνση πραγματοποιείται με προσέγγιση των όρων της εξίσωσης 5.4 που περιέχουν παράγωγους των x και y με χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων θεωρεί την ύπαρξη ενός αθροίσματος συναρτήσεων, οι οποίες αναπαριστούν με ακρίβεια τη λύση της μερικής διαφορικής εξίσωσης που περιγράφει την υπόγεια ροή. Τα πεπερασμένα στοιχεία έχουν ευρεία χρήση σε οριζόντια επίπεδα. Μια πεπερασμένη προσέγγιση αυτής της σειράς είναι αυτή του υδραυλικού ύψους (εξ. 5.5):

$$h(x, y, z) \approx \hat{h}(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^N h_i(z, t) w_i(x, y) \quad (5.5)$$

Όπου

h : το υδραυλικό ύψος [L]

\hat{h} : η προσεγγιστική σειρά του h [L]

h_i : ένας μη καθορισμένος συντελεστής [L]

w_i : μια βασική συνάρτηση [αδιάστατη]

N : ο αριθμός των κόμβων στο δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων

Η προσεγγιστική σειρά (εξ. 5.5) παρέχει μια ακριβή σχέση καθώς το N τείνει στο άπειρο (το \hat{h} πλησιάζει το h). Με μια προσεκτική επιλογή των βασικών συναρτήσεων w_i , οι μη καθορισμένοι συντελεστές h_i γίνονται οι τιμές των υδραυλικών υψών h στους κόμβους με συντεταγμένες (x,y,z) . Ένας τρόπος αύξησης της υπολογιστικής ικανότητας επιτυγχάνεται με χρήση συνεχών βασικών συναρτήσεων τμηματικά (piecewise), οι οποίες είναι μη μηδενικές μόνο πάνω από μια μικρή περιοχή του συνόλου. Παρότι υπάρχουν αρκετοί τύποι βασικών συναρτήσεων (Lapidus and Pinder, 1982), ο PTC επιλέγει να χρησιμοποιεί τμηματικές, γραμμικές βασικές συναρτήσεις μεταξύ γειτονικών κόμβων πεπερασμένων στοιχείων.

Στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων παρατηρείται ότι παρόλο που ο διαφορικός τελεστής L (σχέση (5.4)) που περιέχει το h ισούται με μηδέν, όταν ο L περιέχει την προσεγγιστική συνάρτηση παρουσιάζεται σφάλμα. Με μαθηματικούς τύπους η εξίσωση (5.4) ξαναγράφεται ως εξής:

$$L(h)=0 \quad (5.6)$$

Όταν

$$L(\hat{h}) = R \quad (5.7)$$

Όπου R είναι το υπολειμματικό σφάλμα.

Για την επίλυση της εξίσωσης (5.5) με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, επιχειρείται η ελαχιστοποίηση του σφάλματος R . Αυτό επιτυγχάνεται θεωρώντας αρχικά μια ολοκληρωμένη ομάδα συναρτήσεων w_j . Υποχρεώνοντας το σφάλμα R να γίνει ορθογώνιο για κάθε πιθανή τιμή του w_j , το R εξαναγκάζεται να τείνει προς το μηδέν και έτσι επιτυγχάνεται μια λύση της εξ. (5.5). Δηλαδή ισχύει η σχέση 5.8:

$$L(h)=L(\hat{h}) \text{ όταν } R=0 \quad (5.8)$$

Ο PTC χρησιμοποιεί την ίδια ομάδα συναρτήσεων για τις συναρτήσεις βάρους w_j (weighting functions) όπως και για τις βασικές συναρτήσεις w_i (basis functions). Αυτή η διαδικασία ονομάζεται μέθοδος Galerkin. Συνεπώς, τα w_i και w_j χρησιμοποιούνται εναλλακτικά στο υπόλοιπο αυτής της εργασίας.

Με περαιτέρω ανάλυση προκύπτει η εξίσωση 5.9:

$$\iint_{\Omega} \left[K_{xx} \left(\sum_{j=1}^N h_j \frac{\partial w_j}{\partial x} \right) \frac{\partial w_i}{\partial x} + K_{yy} \left(\sum_{j=1}^N h_j \frac{\partial w_j}{\partial y} \right) \frac{\partial w_i}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial}{\partial z} \sum_{j=1}^N h_j w_j \right) w_i + S \frac{\partial}{\partial t} \left(\sum_{j=1}^N h_j w_j \right) w_i - Q w_i \right] dx dy - \int_{\sigma} \left[K_{xx} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} I_x + K_{yy} \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} I_y \right] w_i d\sigma = 0 \quad (5.9)$$

Όπου:

$$i=1,2,\dots,N$$

Ω : περιοχή ολοκλήρωσης που καλύπτει ολόκληρη την οριζόντια τομή της περιοχής ροής

I_x, I_y : Συνημίτονα κατεύθυνσης των γωνιών που σχηματίζονται μεταξύ του κανονικού και του διατμητικού ορίου σ , στους άξονες x και y αντίστοιχα.

Η ποσότητα μέσα στις αγκύλες αντιστοιχεί στην οριζόντια ροή. Η εξίσωση (5.9) για τη ροή αυτή οδηγεί σε N εξισώσεις με N αγνώστους συντελεστές (υδραυλικά ύψη), όπως ορίζονται από την σχέση (5.5). Η μέθοδος, αυτή, των πεπερασμένων στοιχείων μετατρέπει τις παραγώγους των αγνώστων αρχικά υδραυλικών υψών ως προς x και y σε παραγώγους γνωστών συναρτήσεων βάσης (Babu et al., 1997).

5.3.3 Εφαρμογή Μεθόδου Πεπερασμένων Διαφορών

Με χρήση διανυσμάτων η εξίσωση (5.9) γράφεται ως εξής (εξίσωση 5.10) (Babu et al., 1997):

$$Ah + B \frac{\theta h}{\theta t} - v + f = 0 \quad (5.10)$$

Όπου

A, B : διανύσματα ($N \times N$)

$h, \frac{\theta h}{\theta t}, v, f$: διανύσματα στήλης μήκους N

Τα στοιχεία A, B, v και f είναι:

$$A_{ij} = \iint_{\Omega} \left[K_{xx} \frac{\theta w_i}{\theta x} \frac{\theta w_j}{\theta x} + K_{yy} \frac{\theta w_i}{\theta y} \frac{\theta w_j}{\theta y} \right] dx dy \quad (5.11)$$

$$B_{ij} = \iint_{\Omega} S w_i w_j dx dy \quad (5.12)$$

$$f_i = - \iint_{\Omega} Q w_i dx dy - \int_{\sigma} \left[K_{xx} \frac{\theta \hat{h}}{\theta x} I_x + K_{yy} \frac{\theta \hat{h}}{\theta y} I_y \right] w_i d\sigma \quad (5.13)$$

$$v_i = \sum_{j=1}^N \left[\iint_{\Omega} \frac{\theta}{\theta z} \left(K_{zz} \frac{\theta h_j}{\theta z} \right) w_i w_j dx dy \right] \quad (5.14)$$

5.3.3.1 Η Κάθετη Παράγωγος

Το κυρίαρχο γνώρισμα του κώδικα PTC είναι η χρήση ενός σχήματος κεντρικών διαφορικών εξισώσεων για τις χωρικές παραγώγους της εξίσωσης (5.14) στη διεύθυνση z . Η κάθετη διακριτοποίηση επιτυγχάνεται με την επανάληψη των οριζόντιων δικτύων πεπερασμένων στοιχείων σε στρώματα, με τους κόμβους να βρίσκονται ο ένας πάνω στον άλλον. Αυτό σημαίνει ότι για την κάθετη διεύθυνση, είναι εφικτό να χρησιμοποιηθεί μια μονοδιάστατη εξίσωση πεπερασμένων διαφορών για την προσέγγιση της εξίσωσης (5.14). Χρησιμοποιώντας τον κάθετο δείκτη k , όπου για

$k=1$ εννοείται το κάτω στρώμα, αυτή η προσέγγιση γραμμένη σε μορφή διανυσμάτων δίνει την σχέση 5.15:

$$v \cong C_k^+(h_{k+1} - h_k) - C_k^-(h_k - h_{k-1}) \quad (5.15)$$

Όπου ο αρμονικός μέσος των ιδιοτήτων των παρακείμενων στρωμάτων χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των στοιχείων C_k^+ καθέτου όρου μεταξύ των στρωμάτων k και $k+1$, και C_k^- , καθέτου όρου μεταξύ των στρωμάτων k και $k-1$.

$$C_{ij;k}^{\pm} = \iint_{\Omega} \frac{2}{\Delta z_k \left[\frac{\Delta z_{k\pm 1}}{(K_{zz})_k} + \frac{\Delta z_k}{(K_{zz})_{k\pm 1}} \right]} w_i w_j dx dy \quad (5.16)$$

Όπου (Δz_k) το πάχος του k στρώματος στο σημείο της προσέγγισης. Ο αρμονικός μέσος δίνει πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα στις ετερογενείς καταστάσεις που συναντώνται συνήθως.

Για ένα τυπικό k στρώμα αντικαθιστούμε την εξίσωση (5.15) στην εξίσωση (5.13) και προκύπτει η σχέση 5.16:

$$A_k h_k + B_k \frac{\partial h_k}{\partial t} - [C_k^+(h_{k+1} - h_k) - C_k^-(h_k - h_{k-1})] + f_k = 0 \quad (5.17)$$

Όπου

h_k : αντιπροσωπεύει το διάνυσμα h των υδραυλικών υψών στο στρώμα k

$k=1,2,\dots,M$

M : ο αριθμός των στρωμάτων στη διεύθυνση z (Babu et al., 1997)

5.3.3.2 Η Χρονική Παράγωγος

Για τα προβλήματα ροής υπόγειων υδάτων ενδείκνυται η χρήση οπίσθιας διαφοράς προσέγγισης για την παράγωγο του χρόνου μιας και παρέχει την πιο ακριβή λύση. Για την προσέγγιση της χρονικής παραγώγου χρησιμοποιείται διόρθωση 1^{ης} τάξης και οι χωρικές παράγωγοι γράφονται βάση της νέας χρονικής στιγμής. Έτσι, η εξίσωση (5.17) γράφεται (Babu et al., 1997) όπως απεικονίζεται η σχέση (5.18):

$$A_k h_k^{(t+\Delta t)} + \frac{(B_D)_k}{\Delta t} [h_k^{(t+\Delta t)} - h_k^t] - [C_k^+(h_{k+1} - h_k) - C_k^-(h_k - h_{k-1})]^{(t+\Delta t)} + f_k^t = 0 \quad (5.18)$$

Η εξίσωση (5.18) αποτελεί την πλήρως διακριτοποιημένη μορφή της (5.1) και έχει ως αποτέλεσμα $M \times N$ εξισώσεις, όπου N είναι άγνωστοι σε κάθε M στρώμα (Babu et al., 1997).

5.4 ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Το PTC χρησιμοποιεί τρεις τύπους οριακών συνθηκών στην εξίσωση της ροής. Οι τρεις αυτοί τύποι είναι οι συνθήκες Dirichlet (σταθερού υδραυλικού ύψους), Neumann (σταθερής ροής) και τρίτου τύπου (διαρροή). Οι οριακές, αυτές, συνθήκες είναι εφικτό να μεταβληθούν από το χρήστη κατά τη διάρκεια μιας προσομοίωσης. Η προκαθορισμένη οριακή συνθήκη για όλα τα όρια είναι μηδενικής ροής. Αυτό υποδηλώνει περιορισμένο υδροφορέα με αδιαπέρατα στρώματα τόσο στις πλευρές, όσο και στον πυθμένα του. Επιλέγοντας διαφορετικές οριακές συνθήκες κατά μήκος της περιοχής μελέτης, ο χρήστης μπορεί να αναπαραστήσει άλλες υδρολογικές συνθήκες (Babu et al., 1997).

5.4.1 Οριακές Συνθήκες 1^{ου} Τύπου: Σταθερό Υδραυλικό Ύψος

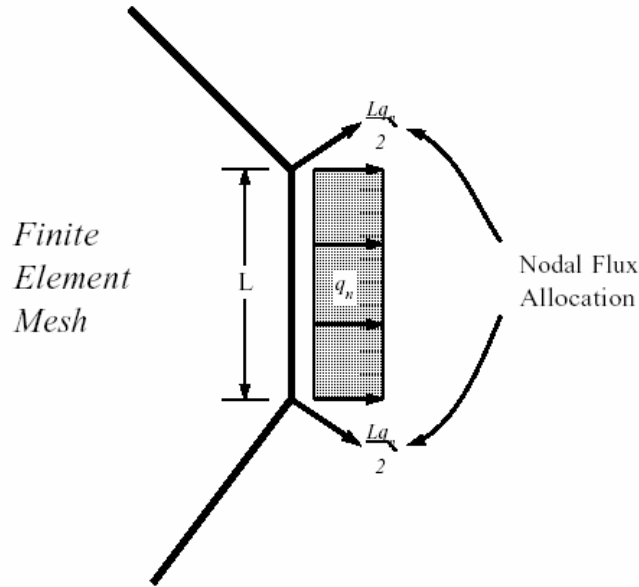
Οι οριακές συνθήκες σταθερού υδραυλικού ύψους (ή όπως αναφέρονται πιο απλά: οριακές συνθήκες 1^{ου} τύπου) ορίζονται δηλώνοντας τους κόμβους και τη σταθερή τιμή υδραυλικού ύψους σε καθένα από αυτούς. Το πρόγραμμα αυτόματα ορίζει ως σταθερούς όρους τις γραμμές και στήλες του πίνακα των συντελεστών που σχετίζονται με αυτούς τους κόμβους. Αφού οι κόμβοι με σταθερό υδραυλικό ύψος ουσιαστικά απαλείφονται από την εξίσωση του πίνακα οπότε απομένουν $(N \times M - N_c)$ εξισώσεις με $(N \times M - N_c)$ αγνώστους, όπου N_c ο ολικός αριθμός κόμβων με σταθερό υδραυλικό ύψος στην περιοχή μελέτης.

5.4.2 Οριακές Συνθήκες 2^{ου} Τύπου: Σταθερή Ροή

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων παρέχει ένα πολύ απλό μέσο καθορισμού των οριακών συνθηκών σταθερής ροής. Με την εφαρμογή του θεωρήματος του Green (από τη σχέση (5.9)) προκύπτει ένας οριακός όρος που αναπαριστάται από την σχέση (5.19):

$$-\int_{\sigma} \left[K_{xx} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} I_x + K_{yy} \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} I_y \right] w_i d\sigma = \int_{\sigma} q_n w_i d\sigma \quad (5.19)$$

Όταν η ροή θεωρείται σταθερή κατά μήκος ενός στοιχείου μήκους L η ολοκλήρωση των σχέσεων θα δίνει κομβικές κατανομές (Εικόνα 21). Έτσι ο χρήστης αρκεί να ορίσει την ογκομετρική ροή σε ένα κόμβο για να αναπαραστήσει τη ροή κατά μήκος ενός ορίου. Η ροή λόγω άντλησης εισάγεται μαθηματικά επίσης με τον καθορισμό της ογκομετρικής ροής σε ένα κόμβο (αρνητική ροή). Για διευκόλυνση της εισαγωγής ομοιόμορφης διήθησης το πρόγραμμα επιτρέπει τον καθορισμό μιας κομβικής ροής διήθησης, ενώ κάνει αυτόματα ολοκλήρωση σε όλη την περιοχή για να καθορίσει την ογκομετρική ροή.



Εικόνα 21: Κομβική κατανομή της ροής διαμέσου ενός στοιχείου μήκους L (Babu et al., 1997).

5.4.3 Οριακές συνθήκες 3^{ου} Τύπου: Συνθήκες διαρροής

Οι οριακές συνθήκες διαρροής εισάγονται με τη μετατροπή των εξισώσεων του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, εισάγεται στην σχέση (5.13) η τιμή που φαίνεται στην σχέση (5.20):

$$Q = k_L(h_{j,L}^t - h_{j,k}^t) \quad (5.20)$$

Όπου

k_L : η αγωγιμότητα της διαρροής (υδραυλική αγωγιμότητα προς απόσταση)

$h_{j,L}^t$: το αντίστοιχο υδραυλικό ύψος στο σημείο αναφοράς της διαρροής

$h_{j,k}^t$: το άγνωστο υδραυλικό ύψος στον κόμβο j του στρώματος k , την χρονική στιγμή t

Έτσι, εισάγεται ένας όρος αγωγιμότητας διαρροής (υδραυλική αγωγιμότητα προς την απόσταση). Ο όρος αυτός ολοκληρώνεται επιφανειακά και αναπαριστά, έτσι, την κάθετη διαρροή. Με τον κατάλληλο προσδιορισμό της παραμέτρου που δηλώνεται από τον χρήστη, k_L , μπορεί να υπολογιστεί η διαρροή προς οποιαδήποτε κατεύθυνση.

5.5 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ ΟΡΙΖΟΝΤΑ

Οι οριακές συνθήκες υδροφόρου ορίζοντα απαιτούν την εισαγωγή των δύο οριακών συνθηκών που εφαρμόζονται στο επίπεδο του νερού στο ανώτερο στρώμα. Στην εικόνα 22 αναπαρίσταται σχηματικά η κατάσταση που περιέχει έναν κινούμενο υδροφόρο ορίζοντα, ο οποίος υπόκειται σε διήθηση μεγέθους $R(x,y,t)$. Το σταθερό υψόμετρο του ανώτερου ορίου της περιοχής ροής δίνεται από την σχέση (5.21):

$$z = z_{M+1}(x,y,t) \quad (5.21)$$

και το πραγματικό ύψος του υδροφορέα από την (5.22):

$$z = z_{WT}(x,y,t) \quad (5.22)$$

Η πρώτη οριακή συνθήκη δηλώνει ότι το επίπεδο του νερού στο ανώτερο στρώμα (h_M) ορίζει το πάχος του υδροφορέα στο ανώτερο στρώμα ($z_{WT}-z_M$). Σύμφωνα με αυτό σε κάθε κόμβο απαιτείται η ισχύς της παρακάτω σχέσης(5.23):

$$(z_{WT})_i = (h_M)_i \quad (5.23)$$

Θεωρείται ότι ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται πάντα στο ανώτερο στρώμα όπου $k=M$. Έτσι, όταν το πρόγραμμα υπολογίζει τα υδραυλικά ύψη στο ανώτερο στρώμα, ελέγχει αν οι τιμές του h_M στους κόμβους είναι μέσα στα περιθώρια των υψομέτρων που ορίζονται από την (5.24).

$$z_M \leq h_M \leq z_{M+1} \quad (5.24)$$

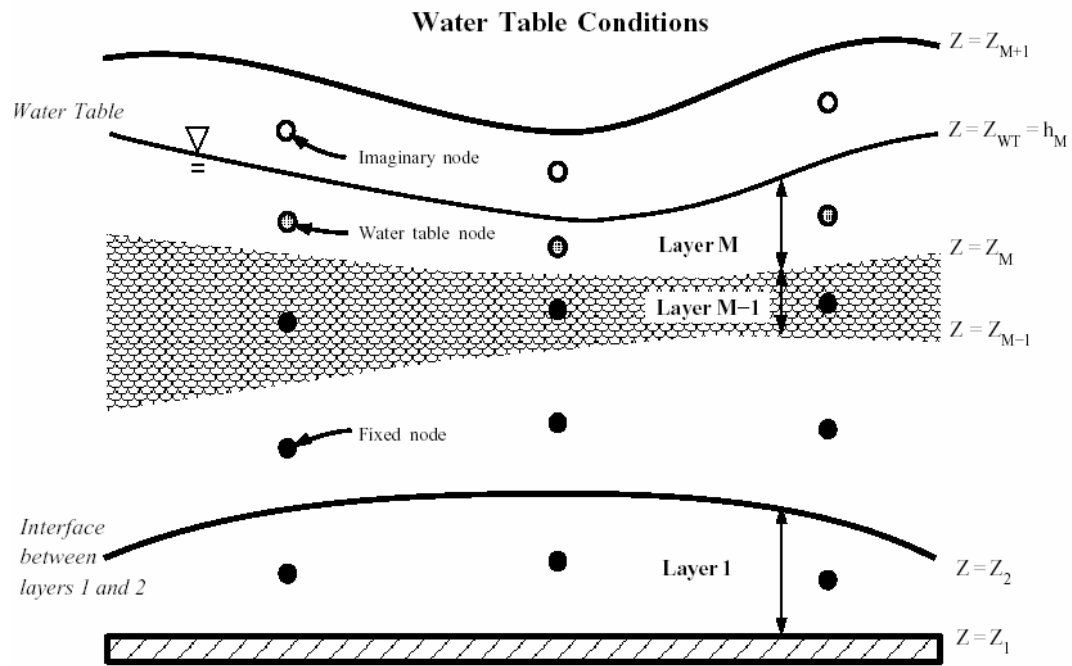
Το **PTC** εμφανίζει ένα μήνυμα εάν παραβιάζεται η σχέση (5.24) και, ύστερα, τυπώνει τη θέση του κόμβου, το μέγιστο πάχος κ.α. σχετικά με αυτή την παραβίαση και η εκτέλεση τερματίζεται. Επίσης, η (5.24) πρέπει να ικανοποιεί και τις αρχικές συνθήκες υδραυλικού ύψους. Καθώς το z_{WT} ορίζει το πάχος του ανώτερου στρώματος, το οποίο βρίσκεται μέσα στους πίνακες των συντελεστών, η (5.23) εισάγει μη γραμμικότητα στη λύση του συστήματος των εξισώσεων ροής. Αυτή η μη γραμμικότητα εξομαλύνεται με την επανάληψη του δεύτερου βήματος του χωριστικού αλγορίθμου.

Η δεύτερη οριακή συνθήκη υδροφόρου ορίζοντα περιγράφει τη μη μόνιμη απόκριση του υδροφόρου ορίζοντα στη διήθηση. Αν θεωρηθεί ότι το S_y σημαίνει την ειδική απόδοση κοντά στον υδροφόρο ορίζοντα, τότε προκύπτει η (5.26):

$$S_y \frac{\partial h}{\partial t} + K_z \frac{\partial h}{\partial z} = R \quad (5.26)$$

Χρησιμοποιώντας τους φανταστικούς κόμβους του στρώματος πάνω από το ανώτερο στρώμα ($M + 1$), η παραπάνω εξίσωση γράφεται με μορφή πεπερασμένων διαφορών όπου για κάθε κόμβο i του ανώτερου στρώματος ($k = M$), S_{yi} είναι το πορώδες του υδροφορέα, R_i είναι η καθαρή κάθετη διήθηση, Δz_i είναι το πάχος του στρώματος, και $(K_z)_i$ είναι η κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα.

Η εξίσωση που προκύπτει χρησιμοποιείται ως οριακή συνθήκη για τις τελικές εξισώσεις του μοντέλου όταν αυτό επιλύει το ανώτερο στρώμα $k = M$. Οι όροι που περιέχουν παραγώγους του χρόνου εισάγονται ως ανεξάρτητες μεταβλητές (άγνωστοι) στις τελικές εξισώσεις του συστήματος μόνο για το ανώτερο στρώμα.



Εικόνα 22: Συνθήκες υδροφόρου ορίζοντα και βροχόπτωσης στο ανώτερο στρώμα. Οι επιφάνειες δηλώνονται με $z=z_1$, $z=z_2$ κλπ., είναι καθορισμένα όρια στο χώρο και ορίζουν τα στρώματα. Υπενθυμίζεται ότι ο κινούμενος υδροφόρος ορίζοντας $z=z_{WT}$ πρέπει να ικανοποιεί την συνθήκη $z_M \leq z_{WT} \leq z_{M+1}$.

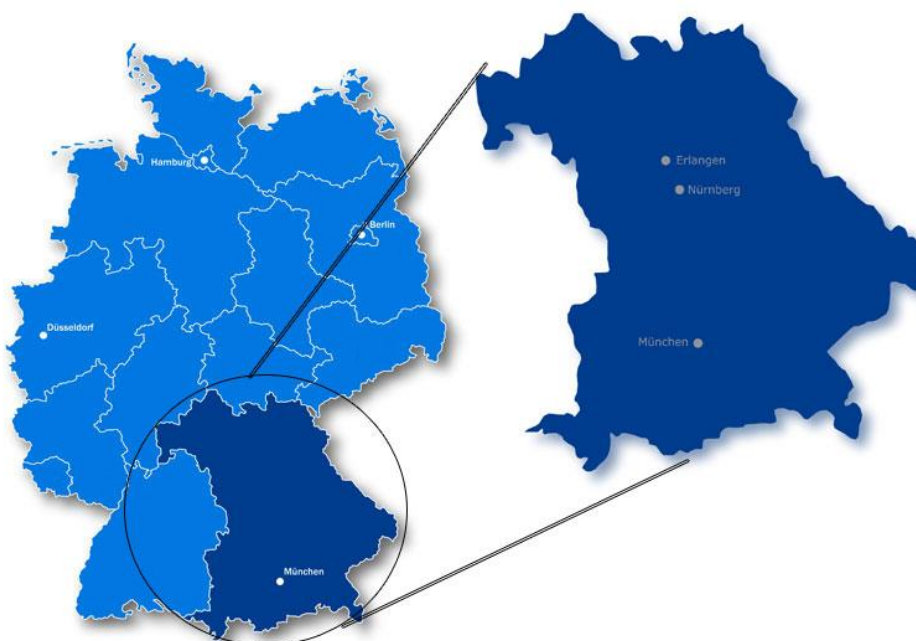
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο: ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

6.1 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η περιοχή μελέτης της συγκεκριμένης εργασίας βρίσκεται στην κεντρική Ευρώπη, στο κράτος της Γερμανίας. Πιο συγκεκριμένα, βρίσκεται στο νοτιοδυτικό άκρο της Γερμανίας, στην περιοχή της Βαυαρίας και υπάγεται στη διοικητική περιφέρεια της άνω Βαυαρίας. Καταλαμβάνει μία έκταση 2400 km² και πρόκειται ουσιαστικά για την ευρύτερη περιοχή του Μονάχου, της πρωτεύουσας της Βαυαρίας.

6.2 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΒΑΥΑΡΙΑ

Η Βαυαρία αποτελεί ένα από τα 16 ομόσπονδα κρατίδια της Γερμανίας (Εικόνα 23). Είναι, με διαφορά από το δεύτερο, το μεγαλύτερο σε έκταση κρατίδιο της Γερμανίας με επιφάνεια 70,549 km² (Πολιτειακή Κυβέρνηση Βαυαρίας) και καταλαμβάνει το 20% της συνολικής έκτασης της χώρας. Όσον αφορά τα πληθυσμιακά στοιχεία, αποτελεί το δεύτερο μεγαλύτερο κρατίδιο με πληθυσμό 12.444.893 κατοίκους (Πολιτειακή Κυβέρνηση Βαυαρίας). Ανατολικά συνορεύει με την Τσεχία, νοτιοανατολικά με την Αυστρία, νοτιοδυτικά με την Ελβετία και, εν συνεχεία, με τα γερμανικά κρατίδια, δυτικά με τη Βάδη-Βυτεμβέργη, βορειοδυτικά με την Έσση, βόρεια με την Θουριγγία και βορειοδυτικά με τη Σαξωνία. Οι βαυαρικές Άλπεις είναι αυτές που διαμορφώνουν τα σύνορα με την Αυστρία και σε αυτές βρίσκεται και το υψηλότερο σημείο στην Γερμανία, το Τσούγκσπιτσε (Zugspitze) στα 2,962 m.



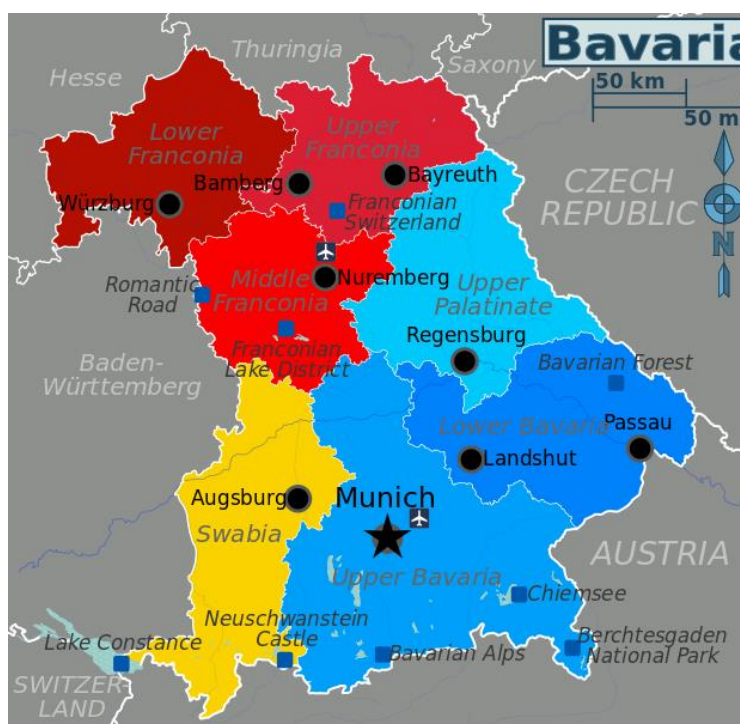
Εικόνα 23:Θέση της Βαυαρίας στην Γερμανία (<http://www.uni-erlangen.org/university/region/>)

Οι μεγαλύτερες πόλεις της Βαυαρίας είναι το Μόναχο (München), η Νυρεμβέργη (Nürnberg), το Άουγκσμπουργκ (Augsburg), το Ρέγκενσμπουργκ (Regensburg), το Βύρτσμπουργκ (Würzburg), το Ινγκολστατ (Ingolstadt), το Φύρτ (Fürth), το Μπαϊρόιτ (Bayreuth) και το Έρλανγκεν (Erlangen).

Η Βαυαρία κατοικείται από τρεις βασικές ομάδες κατοίκων: έναν κλάδο των Σουηβικών φύλων στο δυτικό τμήμα της, απόγονους των μυθικών Μπαγιουβάρων, τους κατοίκους της Άνω Βαυαρίας στη κεντρική περιοχή, και αυτούς της Κάτω Βαυαρίας στα ανατολικά.

Η Βαυαρία διαιρείται σε επτά διοικητικές περιφέρειες (Bezirke), (Εικόνα 24):

- την Άνω Βαυαρία (Oberbayern) με πρωτεύουσα το Μόναχο
- την Κάτω Βαυαρία (Niederbayern) με πρωτεύουσα το Λάντσχουτ
- τη Σουηβία (Schwaben) με πρωτεύουσα το Άουγκσμπουργκ
- την Άνω Φρανκονία (Oberfranken) με πρωτεύουσα το Μπαϊρόιτ
- τη Μέση Φρανκονία (Mittelfranken) με πρωτεύουσα το Άνσπαχ
- την Κάτω Φρανκονία (Unterfranken) με πρωτεύουσα το Βίρτσμπουργκ
- και το Άνω Παλατινάτο (Oberpfalz) με πρωτεύουσα το Ρέγκενσμπουργκ



Εικόνα 24: Διοικητική διαίρεση της Βαυαρίας.

6.3 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΩ ΒΑΥΑΡΙΑ

Όπως προαναφέρθηκε, η περιοχή που εξετάστηκε ανήκει στο διοικητικό διαμέρισμα της Άνω Βαυαρίας (Upper Bavaria). Η Άνω Βαυαρία, όπως φαίνεται και στην εικόνα 21, βρίσκεται στο νοτιοανατολικό μέρος της Βαυαρίας και συνορεύει βορειοανατολικά με την διοικητική περιφέρεια

της Κάτω Βαυαρίας, βόρεια με το Άνω Παλατινάτο, βορειοδυτικά με την Μέση Φραγκονία, δυτικά με την Σουηβία και στο νότο και την ανατολή με την Αυστρία. Κεντρικά της περιοχής βρίσκεται η μεγαλύτερη πόλη και πρωτεύουσα της περιοχής, το Μόναχο. Έχει έκταση περίπου 17530 km² και κατοικείται από 4.415.649 κατοίκους σύμφωνα με στοιχεία του 2012.

Ο πληθυσμός της Άνω Βαυαρίας με την πάροδο του χρόνου αποτυπώνεται στον πίνακα 6.1:

Πίνακας 6.1: Πληθυσμός Άνω Βαυαρίας ανά διάφορες χρονικές περιόδους.

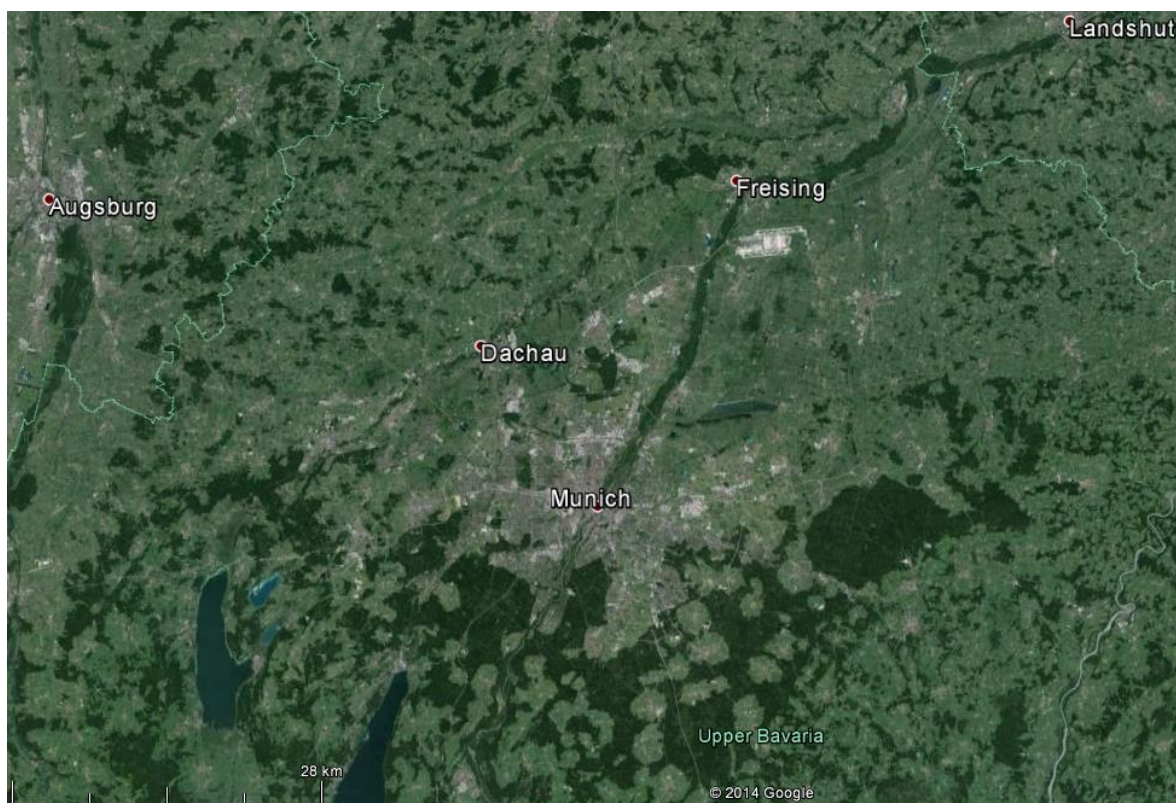
ΧΡΟΝΟΛΟΓΙΑ	ΠΛΗΘΥΣΜΟΣ
1840	711.861
1871	865.178
1900	1.351.086
1925	1.727.483
1939	1.999.048
1950	2.541.896
1961	2.831.744
1970	3.324.104
1987	3.598.126
2002	4.169.657
2005	4.238.195
2006	4.279.112
2008	4.320.934
2010	4.373.588
2012	4.415.649

Είναι εύκολα αντιληπτό ότι η Άνω Βαυαρία αποτελεί μια περιοχή με αυξητικές τάσεις όσον αφορά τον πληθυσμό και, μάλιστα, με μεγάλο ρυθμό.

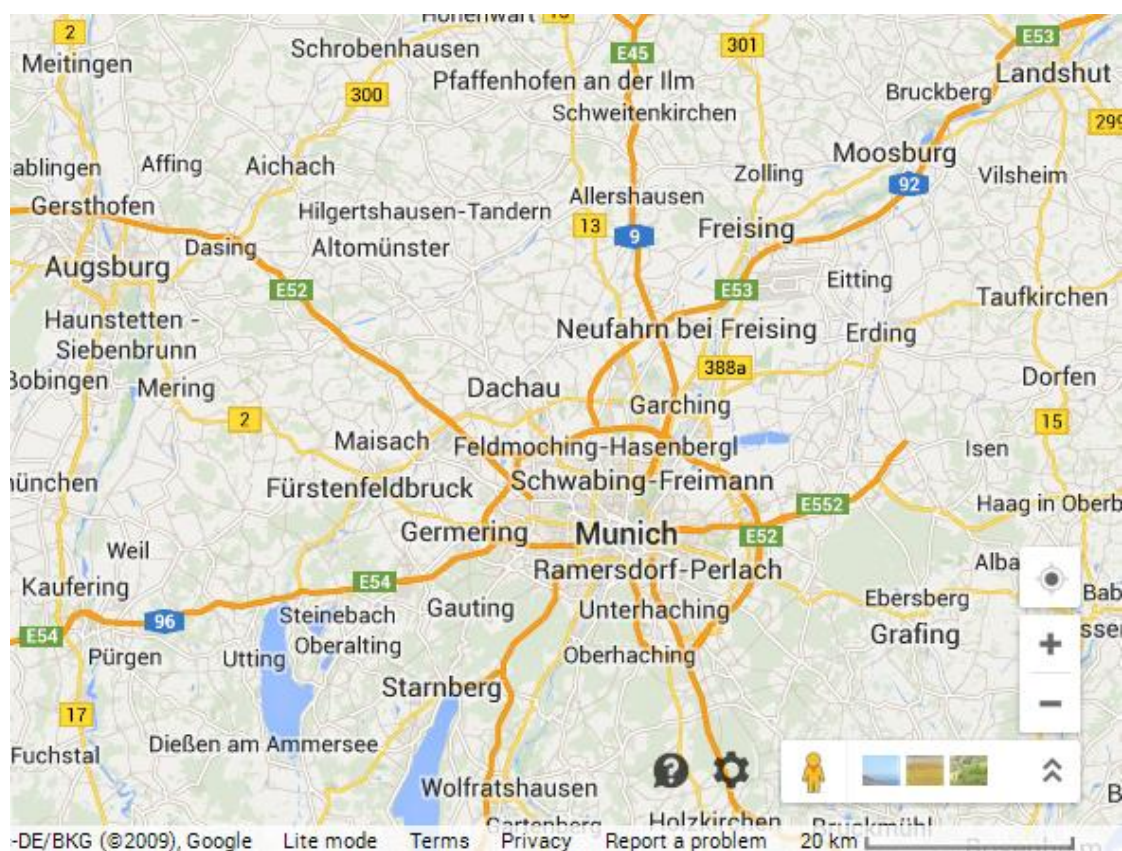
Αν και η περιοχή που μελετήθηκε αποτελεί μικρό μέρος της Άνω Βαυαρίας (περίπου 2400 km² έναντι 17530 km² συνολικής έκτασης της διοικητικής αυτής περιοχής), αφορά το μεγαλύτερο κομμάτι του πληθυσμού αυτής. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι το Μόναχο, που βρίσκεται στο κέντρο της περιοχής μελέτης, αριθμεί, σύμφωνα με στοιχεία του 2012, 1.340.597 κατοίκους (Πολιτειακή Κυβέρνηση Βαυαρίας), ενώ η έκταση της πόλης υπολογίζεται σε 310,43 km². Συνεπώς, η περιοχή για την οποία έγινε η μελέτη ενδέχεται να κατοικείται από περίπου 2 εκατομμύρια ανθρώπους.

6.4. ΜΟΝΑΧΟ ΚΑΙ ΓΥΡΩ ΠΕΡΙΟΧΗ

Το Μόναχο βρίσκεται σε οροπέδιο στο κέντρο της Άνω Βαυαρίας σχεδόν 50 km βόρεια από το βόρειο άκρο των Άλπεων. Το Μόναχο και η γύρω περιοχή που θα μελετηθεί εικονίζονται στην Εικόνα 25. Το υψόμετρό της πόλης είναι 520 m πάνω από το επίπεδο της θάλασσας, ενώ αυτό της εξεταζόμενης περιοχής συνολικότερα κυμαίνεται από 500 m έως 750 m πάνω από το επίπεδο της θάλασσας. Στην Εικόνα 26 απεικονίζεται ο πολιτικός χάρτης της περιοχής.

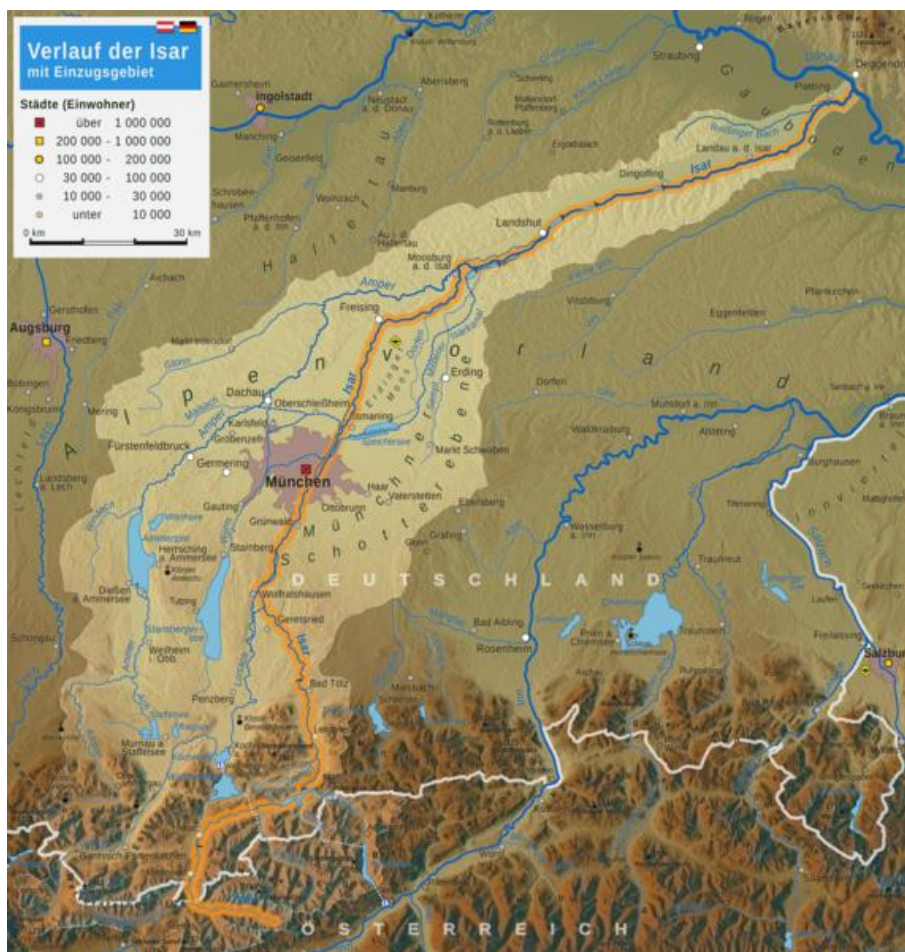


Εικόνα 25:Εξεταζόμενη περιοχή όπως φαίνεται από δορυφόρο. Πηγή: Google Earth, ημερομηνία λήψης:10/05/14.



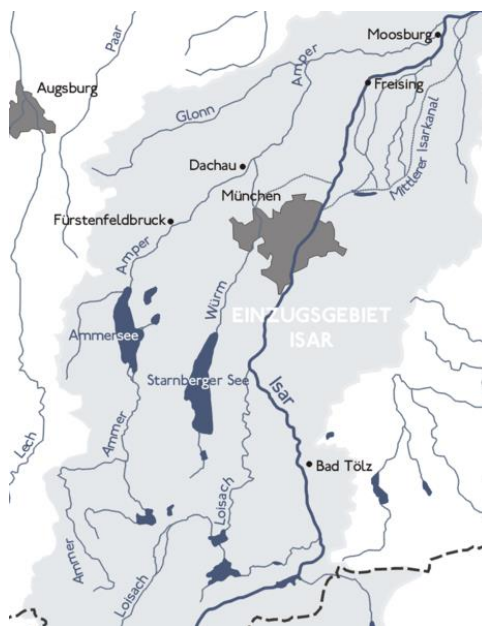
Εικόνα 26: Πολιτικός χάρτης εξεταζόμενης περιοχής. Πηγή: Google Maps, ημερομηνία λήψης: 10/05/14.

Την περιοχή διασχίζουν αρκετά ποτάμια με σημαντικότερα τον Ίζαρ (Isar), τον Άμπερ (Amper) και τον Βουρμ (Würm). Ο Ίζαρ (Εικόνα 27) έχει μήκος 291,5 km, επιφάνεια 8962,29 km² και μέση παροχή 175m³ ανά δευτερόλεπτο (Βαυαρική Κρατική Υπηρεσία Περιβάλλοντος). Πηγάζει από τις Αυστριακές Άλπεις, εισέρχεται στη Γερμανία και αφού περάσει, μεταξύ άλλων, από την πόλη του Μονάχου, καταλήγει στο Δούναβη. Η ύπαρξή του είναι ζωτικής σημασίας για την περιοχή καθώς συνεισφέρει στην οικονομία, τον τουρισμό, την άρδευση των γύρω καλλιεργειών, την ύδρευση, την παραγωγή ενέργειας αλλά και για τη αναψυχή των κατοίκων.



Εικόνα 27: Ο ποταμός Ίζαρ.

Ο ποταμός Άμπερ έχει μήκος 168 km και επιφάνεια 3076 km². Αποτελεί τον μεγαλύτερο παραπόταμο του Ιζάρ. Ξεκινάει την πορεία του από τις Άλπεις, περνάει από την λίμνη Άμμερ (Ammersee), την πόλη Νταχάου (Dachau) και λίγο μετά την πόλη Μουσμπουργκ (Moosburg) ενώνεται με τον Ιζάρ με μέση παροχή 45m³ ανά δευτερόλεπτο (Βαυαρική Κρατική Υπηρεσία Περιβάλλοντος), (Εικόνα 28).



Εικόνα 28: Τα κυριότερα ποτάμια στην περιοχή μελέτης.

Ο Βουρμ είναι, σαφώς, μικρότερο ποτάμι από τον Ίζαρ και τον Άμπερ. Έχει μήκος 39,5 km, επιφάνεια 386 km² και μια μέση παροχή 3,38 m³ ανά δευτερόλεπτο (Βαυαρική Κρατική Υπηρεσία Περιβάλλοντος). Ξεκινάει από την λίμνη Στάνμπεργκ (Γερμανικά: Starnberger See), περνάει από το Μόναχο και κοντά στο Νταχάου ενώνεται με τον Άμπερ.

Δύο είναι οι μεγαλύτερες λίμνες κοντά στην περιοχή μελέτης: η λίμνη Στάνμπεργκ (Stanberger See) και η λίμνη Άμμερ (Ammer See). Η Στάνμπεργκ βρίσκεται 25 km νοτιοδυτικά του Μονάχου και αποτελεί σημαντικό υδροβιότοπο που προστατεύεται από την συνθήκη Ραμσάρ. Καλύπτει μια επιφάνεια 58,36km², έχει λεκάνη απορροής 314 km² και αποθηκεύει γύρω στα 2.998.000 km³ όγκο νερού (Βαυαρική Κρατική Υπηρεσία Περιβάλλοντος).

Η λίμνη Άμμερ βρίσκεται νοτιοδυτικά του Μονάχου (γύρω στα 30 km) και 10 km βορειοδυτικά της λίμνης Στάνμπεργκ. Με επιφάνεια περίπου 47 km² αποτελεί την 6^η μεγαλύτερη λίμνη της Γερμανίας. Αναπτύχθηκε ως αποτέλεσμα της τήξης των πάγων κατά την εποχή των παγωτώνων. Ο ποταμός Άμμερ είναι ο κύριος τροφοδότης νερού της λίμνης και ο ίδιο ποταμός, ονομαζόμενος, ωστόσο, Άμπερ εκρέει από την λίμνη. Έχει λεκάνη απορροής επιφάνειας 993 km² και αποθηκεύει περίπου 175.001 km³ όγκο νερού (Βαυαρική Κρατική Υπηρεσία Περιβάλλοντος).

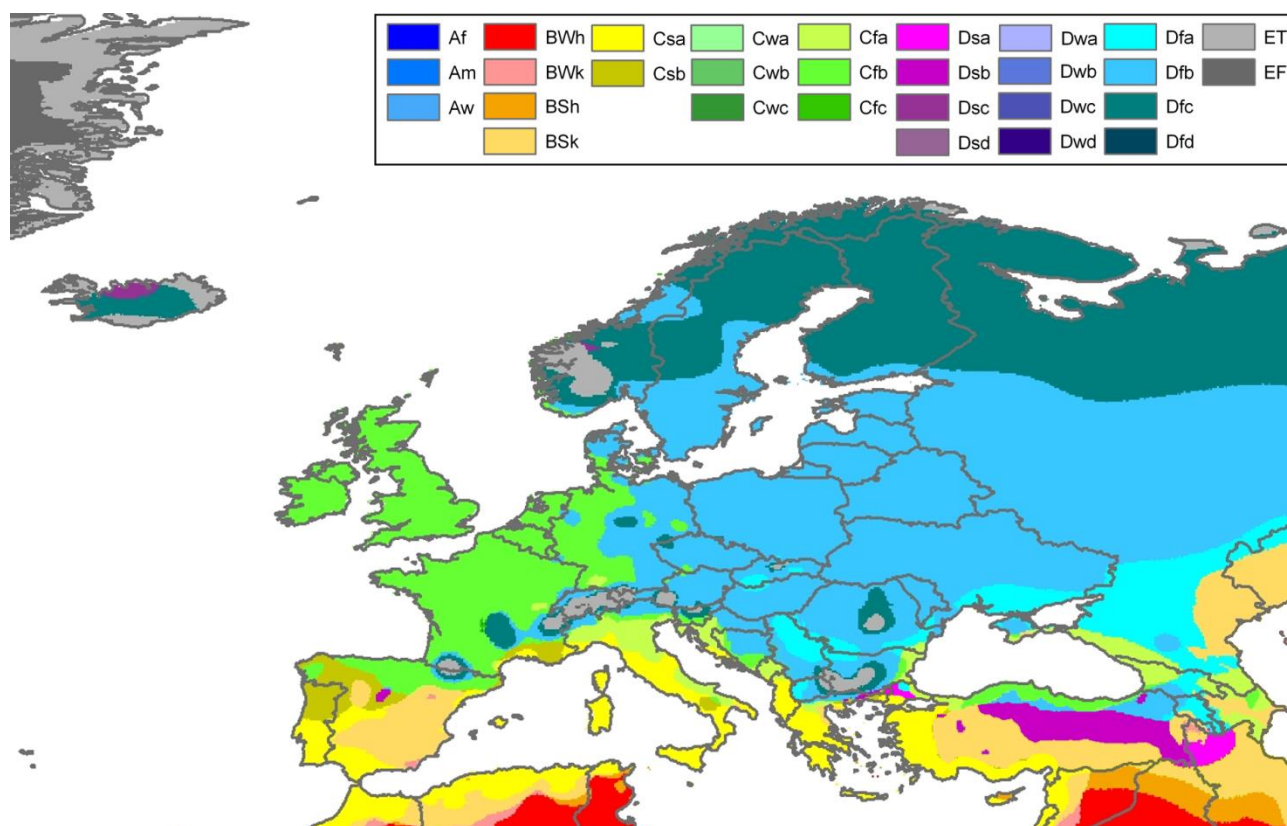
6.5 ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Με βάση την, ευρέως διαδεδομένη, κλιματική ταξινόμηση κατά Κέππεν (Köppen climate classification), Εικόνα 29, η περιοχή που εξετάζεται ανήκει στην κατηγορία Dfb που αντιστοιχεί σε υγρό ηπειρωτικό κλίμα (Humid continental climate), (Peel, Finlayson, and McMahon, 2007). Ανήκει οριακά σε αυτήν την κατηγορία καθώς στα δυτικά της περιοχής ξεκινάει η κατηγορία Cfb που σημαίνει εύκρατο ωκεάνιο κλίμα (temperate oceanic climate). Αξίζει να αναφερθεί ότι το σύστημα αυτό ταξινόμησης των κλιματικών περιοχών βασίζεται στην άποψη ότι η βλάστηση ενός τόπου καθορίζει και την κλιματική του ταξινόμηση. Για την ταξινόμηση αυτή χρησιμοποιούνται

βασικά οι μέσες ετήσιες και μηνιαίες θερμοκρασίες και βροχοπτώσεις, όπως και η εποχιακή κατανομή του υετού.

Το υγρό ηπειρωτικό κλίμα χαρακτηρίζεται από μεγάλες εποχιακές θερμοκρασιακές διαφορές με δριμύ χειμώνα και βραχύ και θερμό καλοκαίρι. Όλες οι εποχές χαρακτηρίζονται ως υγρές. Οι κατακρημνίσεις είναι σχετικά καλά κατανεμημένες κατά την διάρκεια του έτους και οι περισσότερες βροχοπτώσεις παρατηρούνται τους θερινούς μήνες. Μάλιστα, η βροχόπτωση τους θερινούς μήνες εμφανίζεται συχνά μαζί με καταιγίδες. Κατά τους χειμερινούς μήνες, η χιονόπτωση είναι πιο σύννηθες φαινόμενο από την βροχόπτωση. Παρόλο που το επίπεδο της υγρασίας είναι συχνά υψηλό, ο χαρακτηρισμός του κλίματος ως «υγρό» δεν σημαίνει ότι η υγρασία είναι εξαιρετικά υψηλή, απλά το κλίμα δεν είναι τόσο ξηρό ώστε να χαρακτηριστεί ως ξηρό ή ημί-ξηρο.

Οι κλιματικοί παράγοντες είναι έντονα επηρεασμένοι από το σχετικά υψηλό υψόμετρο που βρίσκεται η περιοχή (500-700 m) και από την ύπαρξη των Άλπεων σε κοντινή απόσταση. Οι παράγοντες αυτοί έχουν ως αποτέλεσμα περισσότερη βροχή και χιόνι από άλλες περιοχές της ίδιας κατηγορίας. Οι Άλπεις επηρεάζουν την περιοχή και με άλλους τρόπους, όπως, με τα ζεστά νοτιοδυτικά ρεύματα αέρα (Föhn) που μπορούν να αυξήσουν απότομα τις θερμοκρασίες αισθητά, αλλά για λίγες μέρες, ακόμα και κατά την διάρκεια του χειμώνα. Αντίθετα, κάθε χρόνο εμφανίζονται βορειοδυτικά κρύα ρεύματα αέρα (Alpenstau),συνήθως την άνοιξη και το καλοκαίρι, τα οποία ρίχνουν απότομα την θερμοκρασία και προκαλούν βροχές και χιόνια. Γενικά, ο καιρός μπορεί να χαρακτηριστεί απρόβλεπτος με απότομες και ξαφνικές αλλαγές οποιαδήποτε στιγμή του χρόνου.



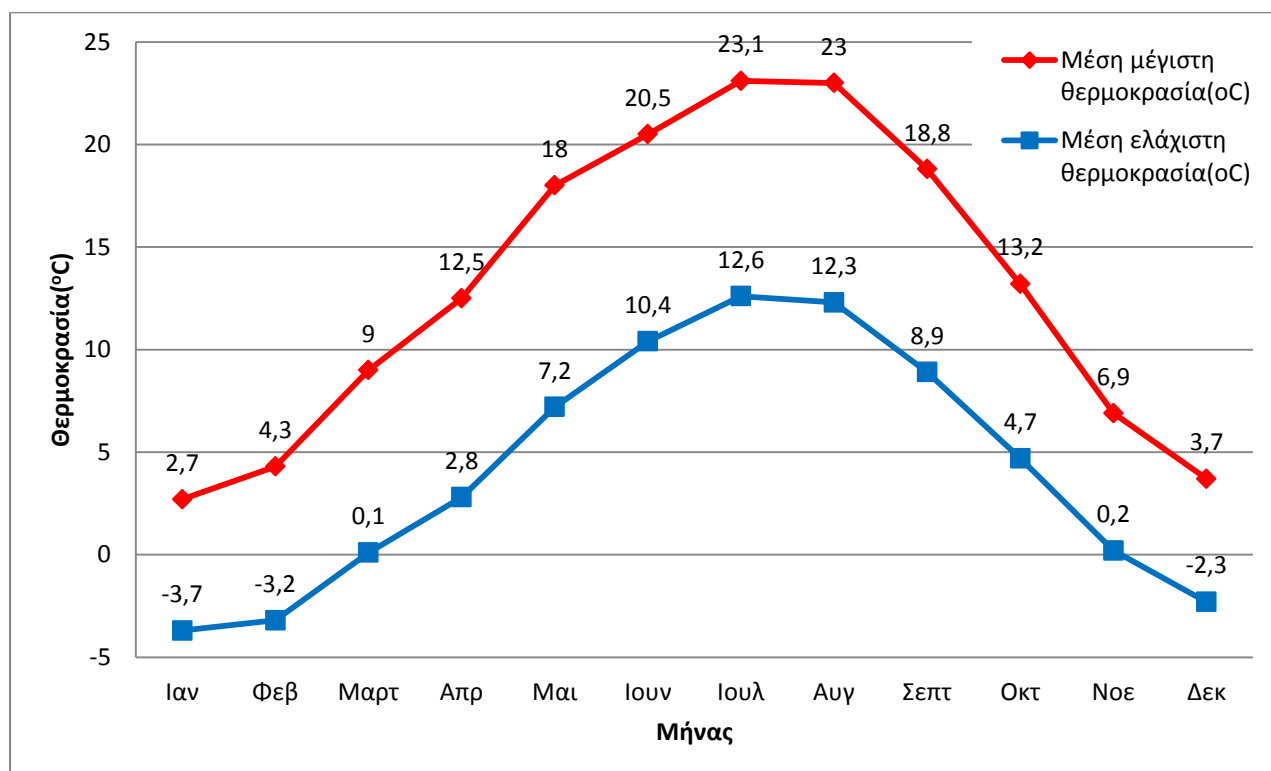
Εικόνα 29: Ανανεωμένος κλιματικός χάρτης της Ευρώπης κατά Κέππεν (Peel, Finlayson, and McMahon, 2007).

Για τα κλιματολογικά στοιχεία που παρατίθενται παρακάτω έχει χρησιμοποιηθεί ως πηγή ο Γερμανικός Μετεωρολογικός Οργανισμός (στα γερμανικά: Deutscher Wetterdienst, DWD) και η περίοδος αναφοράς είναι από το 1981 έως το 2010. Ο σταθμός μέτρησης ονομάζεται MUENCHEN-STADT (WST) με κωδικό 3379, υψόμετρο 515,2, Γεωγραφικό πλάτος 48° 10' και γεωγραφικό μήκος 11° 33'. Επιλέχθηκε αυτός ο σταθμός καθώς βρίσκεται στο κέντρο της περιοχής μελέτης και θεωρήθηκε ο ιδανικότερος για να δώσει μια γενική εικόνα των κλιματολογικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή μελέτης.

6.5.1 Θερμοκρασία

Το ετήσιο θερμοκρασιακό εύρος κυμαίνεται μεταξύ -4°C και 24°C. Μόνο σε εξαιρετικά σπάνιες περιπτώσεις η θερμοκρασία πέφτει κάτω από τους -12 °C ή ανεβαίνει πάνω από 29 °C. Κατά τη διάρκεια του χειμώνα, το θερμόμετρο συνήθως είναι υπό του μηδενός και χιονίζει συχνά, ενώ ο Ιανουάριος χαρακτηρίζεται ως ο ψυχρότερος μήνας με μέση θερμοκρασία 0,3 °C. Την άνοιξη η θερμοκρασία ανεβαίνει, ωστόσο μεταβάλλεται συχνά και παρατηρούνται συχνά βροχοπτώσεις. Το καλοκαίρι εκτείνεται γενικά από τέλη Μαΐου μέχρι και τον Αύγουστο με μέγιστες θερμοκρασίες πάνω από τους 20 °C. Ο πιο ζεστός μήνας θεωρείται ότι είναι ο Ιούλιος, με μέση θερμοκρασία 19,4 °C. Το φθινόπωρο η θερμοκρασία αρχίζει και πέφτει ξανά απότομα. Οι μέση θερμοκρασία ανά μήνα καθώς και ετησίως απεικονίζονται στον Πίνακα 6.2. Στην Εικόνα 30 υπάρχει διάγραμμα με τη μέση μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία ανά μήνα.

Σύμφωνα με τον επίσημο μετεωρολογικό σταθμό του Μονάχου, η μέγιστη θερμοκρασία που μετρήθηκε ποτέ είναι 37,1 °C στις 12 Αυγούστου το 2003, ενώ η ελάχιστη μετρήθηκε στις 21 Ιανουαρίου του 1942 και ήταν -30,5 °C.



Εικόνα 30: Μέσες μέγιστες και μέσες ελάχιστες θερμοκρασίες σε °C για την περιοχή μελέτης ανά μήνα. Πηγή: Γερμανική Μετεωρολογική Υπηρεσία, DWD(Deutscher Wetterdienst)

Πίνακας 6.2: Θερμοκρασία ανά μήνα και ετησίως για το Μόναχο σε °C. Χρονολογία αναφοράς: 1981-2010. Η θερμοκρασία είναι μετρημένη στα 2m πάνω από το έδαφος. Πηγή: Γερμανική Μετεωρολογική υπηρεσία, DWD (Deutscher Wetterdienst).

Μήνας	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαι	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπτ	Οκτ	Νοε	Δεκ	Ετήσια
Μέση Ημερήσια Θερμοκρασία, (°C)	0,3	1,4	5,3	9,4	14,3	17,2	19,4	18,9	14,7	10,1	4,4	1,3	9,7

Επίσης, για μια πιο ενδεικτική εικόνα του κλίματος στην περιοχή μελέτης, παρουσιάζονται ορισμένα στατιστικά σχετικά με τη θερμοκρασία στο Μόναχο. Στον Πίνακα 6.3 παρατίθεται ο μέσος όρος των μερών ανά μήνα όπου η μέγιστη θερμοκρασία είναι υπό του μηδενός. Στον Πίνακα 6.4 φαίνεται ο μέσος όρος ημερών ανά μήνα με ελάχιστη θερμοκρασία υπό του μηδενός. Στον Πίνακα 6.5 παρατίθεται ο μέσος όρος των ζεστών ημερών. Ζεστή ημέρα θεωρείται η μέρα κατά την οποία η μέγιστη θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη ή ίση με 25 °C. Στον Πίνακα 6.6 παρατίθεται ο μέσος όρος των μερών με μέγιστη θερμοκρασία μεγαλύτερη ή ίση από 30 °C (πολύ ζεστή ημέρα).

Πίνακας 6.3: Μέσος όρος ημερών ανά μήνα με μέγιστη θερμοκρασία μικρότερη του 0 °C. Χρονολογία αναφοράς:1981-2010. Πηγή: Γερμανική Μετεωρολογική υπηρεσία, DWD (Deutscher Wetterdienst).

Μήνας	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαι	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπτ	Οκτ	Νοε	Δεκ	Ετήσια
Μ.Ο. μερών με μέγιστη θερμοκρασία<0°C	8,3	5,7	1	0	0	0	0	0	0	0	1,5	6,2	22,8

Πίνακας 6.4: Μέσος όρος ημερών ανά μήνα με ελάχιστη θερμοκρασία υπό του μηδενός. Χρονολογία αναφοράς:1981-2010. Πηγή: Γερμανική Μετεωρολογική υπηρεσία, DWD (Deutscher Wetterdienst).

Μήνας	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαι	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπτ	Οκτ	Νοε	Δεκ	Ετήσια
Μ.Ο. μερών με ελάχιστη θερμοκρασία <0°C	20,5	17,3	9,9	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,4	9,1	18,3	78,1

Πίνακας 6.5: Μέσος όρος ημερών ανά μήνα με μέγιστη θερμοκρασία μεγαλύτερη ή ίση με 25 °C (ζεστή ημέρα). Χρονολογία αναφοράς:1981-2010. Πηγή: Γερμανική Μετεωρολογική υπηρεσία, DWD (Deutscher Wetterdienst).

Μήνας	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαι	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπτ	Οκτ	Νοε	Δεκ	Ετήσια
Μ.Ο. μερών με μέγιστη θερμοκρασία $25 \geq ^\circ\text{C}$	0	0	0	0	0,3	1,5	3,8	2,7	0,1	0	0	0	8,4

Πίνακας 6.6: Μέσος όρος ημερών ανά μήνα με μέγιστη θερμοκρασία μεγαλύτερη ή ίση με $30 ^\circ\text{C}$ («πολυ ζεστή ημέρα»). Χρονολογία αναφοράς:1981-2010. Πηγή: Γερμανική Μετεωρολογική υπηρεσία, DWD (Deutscher Wetterdienst).

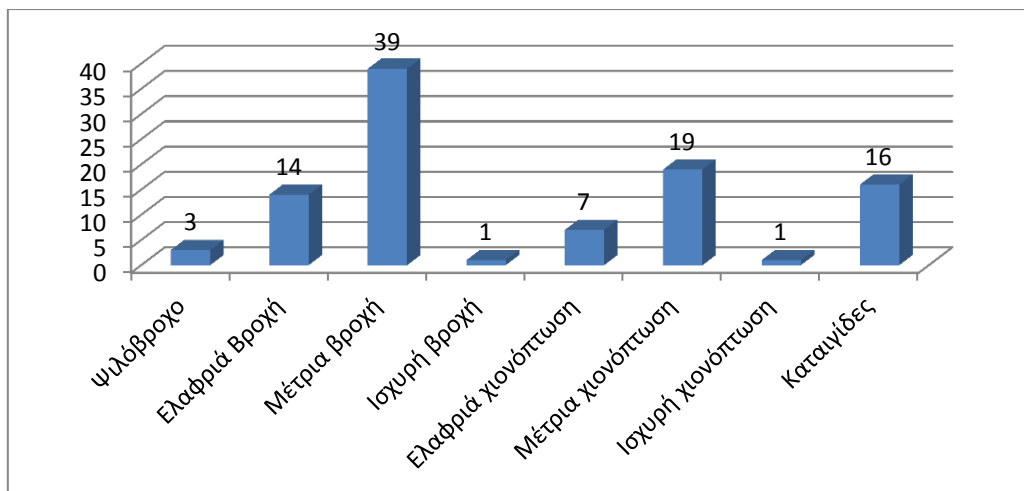
Μήνας	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαι	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπτ	Οκτ	Νοε	Δεκ	Ετήσια
Μ.Ο. μερών με μέγιστη θερμοκρασία $30 \geq ^\circ\text{C}$	0	0	0	0,5	4,1	9,2	14,7	13,5	4	0,4	0	0	46,3

6.5.2 Κατακρημνίσεις

Η μέση ετήσια βροχόπτωση στον Μόναχο είναι 944 mm. Μπόρες και καταιγίδες που λαμβάνουν χώρα στο τέλος της άνοιξης και κατά το καλοκαίρι προσδίδουν με διαφορά την μεγαλύτερη ποσότητα κατακρημνίσεων συγκριτικά με τους άλλους μήνες. Αυτό είναι λογικό καθώς είναι χαρακτηριστικό των περιοχών με υγρό ηπειρωτικό κλίμα. Ο Ιούλιος είναι ο πιο βροχερός μήνας με 122 mm κατακρημνίσεων. Ο μήνας με τη λιγότερη ποσότητα κατακρημνίσεων είναι ο Φεβρουάριος με 46 mm. Συνολικά, 129,4 μέρες το χρόνο είναι βροχερές. Βροχερή θεωρείται μια μέρα κατά την οποία έχουμε κατακρήμνιση τουλάχιστον 1mm. Οι περισσότερες βροχερές μέρες παρατηρούνται τον Αύγουστο με Ιούνιο με 13,8 κατά μέσο όρο, ενώ οι λιγότερες τον Φεβρουάριο (8,6). Η κατακρήμνιση σε mm και ο μέσος όρος των βροχερών ημερών ανά μήνα καθώς και ετήσια παρατίθενται στον Πίνακα 6.7, ενώ η συχνότητα με την οποία εμφανίζεται κάθε είδος κατακρήμνισης στην Εικόνα 31.

Πίνακας 6.7: Κατακρήμνιση σε mm ανά μήνα και ετησίως, μέσος όρος βροχερών μερών και υγρασία (%) για το Μόναχο. Βροχερή θεωρείται μια μέρα με κατακρήμνιση πάνω από 1mm. Χρονολογία αναφοράς:1981-2010. Πηγή: Γερμανική Μετεωρολογική υπηρεσία, DWD (Deutscher Wetterdienst).

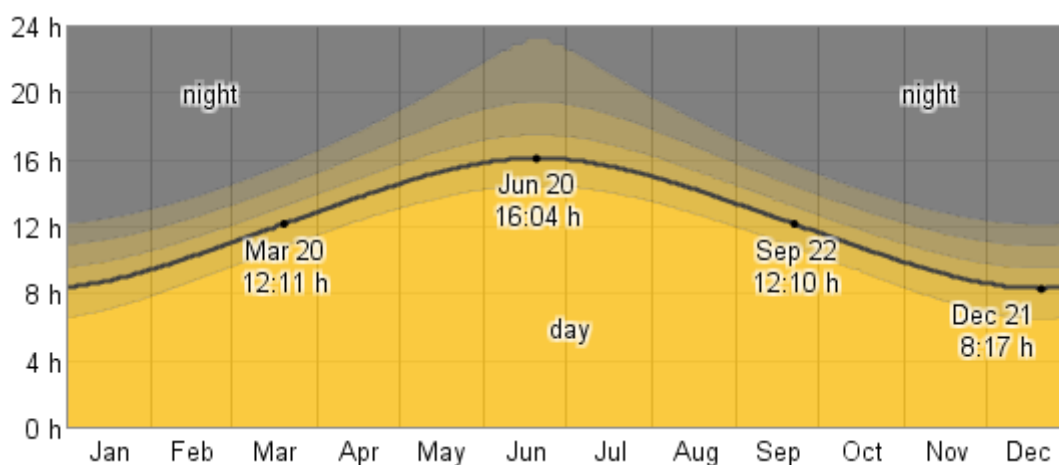
Μήνας	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαι	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπτ	Οκτ	Νοε	Δεκ	Ετήσια
Κατακρήμνιση, (mm)	48	46	65	65	101	118	122	115	75	65	61	65	944
Μέσος όρος βροχερών μερών	10	8,6	10,5	10,9	11,6	13,8	12	11,4	9,6	9,1	10,7	11,2	129,4
Υγρασία, %	83	83	77	72	73	73	73	75	78	82	86	86	78,4



Εικόνα 31: Σχετική συχνότητα είδους κατακρήμνισης κατά την διάρκεια ενός έτους. Πηγή: Μετεωρολογικός σταθμός Διεθνούς Αεροδρομίου Μονάχου.

6.5.3 Ηλιοφάνεια

Η διάρκεια της ημέρας διαφέρει σημαντικά κατά τη διάρκεια ενός έτους (Εικόνα 32). Η μικρότερη μέρα, την 21^η Δεκεμβρίου, διαρκεί 8 ώρες και 18 λεπτά, ενώ η μεγαλύτερη μέρα την 21^η Ιουνίου διαρκεί 16 ώρες και 5 λεπτά.



Εικόνα 32: Διάρκεια ημέρας και νύχτα κατά την διάρκεια του χρόνου στην περιοχή μελέτης.

Ετησίως 1777 ώρες ηλιοφάνειας υπάρχουν στο Μόναχο. Ανά μήνα οι ώρες ηλιοφάνειας αποτυπώνονται στον πίνακα 6.8.

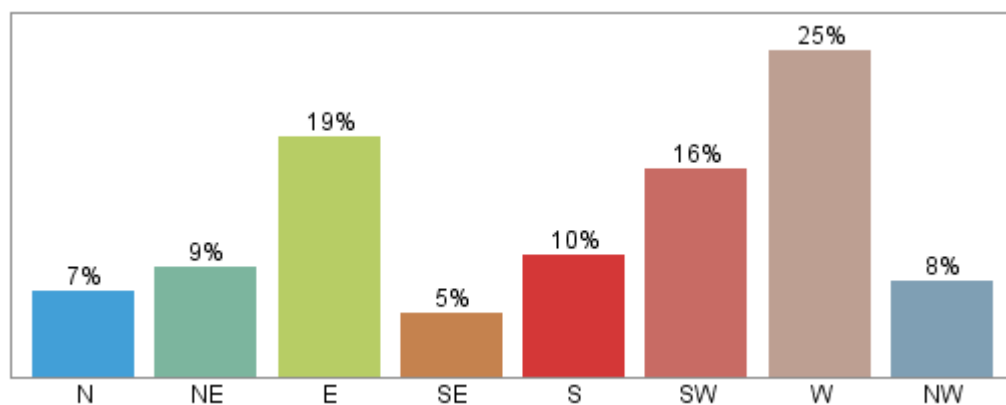
Πίνακας 6.8: Μέση διάρκεια ηλιοφάνειας ανά μήνα, καθώς και ετησίως, μετρημένη σε ώρες. Χρονολογία αναφοράς: 1981-2010. Πηγή: Γερμανική Μετεωρολογική υπηρεσία, DWD (Deutscher Wetterdienst).

Μήνας	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαι	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπτ	Οκτ	Νοε	Δεκ	Ετήσια
Μέση διάρκεια ηλιοφάνειας, h	79	96	133	170	209	210	238	220	163	125	75	59	1777

6.5.4 Άνεμοι

Οι τυπικές ταχύτητες του ανέμου στο Μόναχο κυμαίνονται από 1 mph έως 14 mph (ελαφρύ αεράκι μέχρι μέτριος άνεμος). Άνεμοι που ξεπερνάνε τα 28 mph αναπτύσσονται πολύ σπάνια.

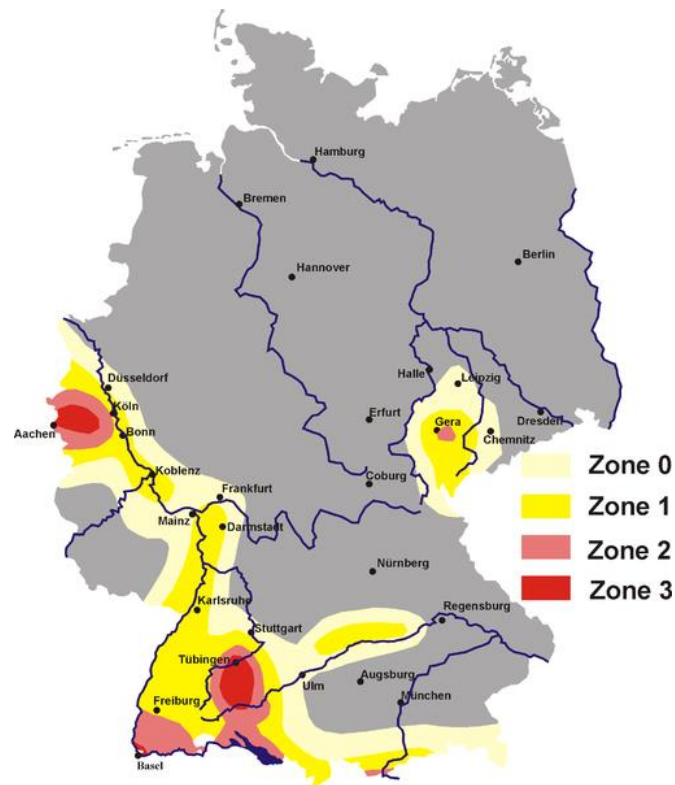
Όσο για την διεύθυνση στου ανέμου, η πιο συχνή είναι η δυτική (σε ποσοστό 25%), ενώ αντίθετα η πιο σπάνια είναι η νοτιοανατολική (5%), (Εικόνα 33).



Εικόνα 33: Η συχνότητα εμφάνισης ανέμων συγκεκριμένες διεύθυνσης. Πηγή: Μετεωρολογικός Σταθμός Αεροδρομίου Μονάχου.

6.6 ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑ

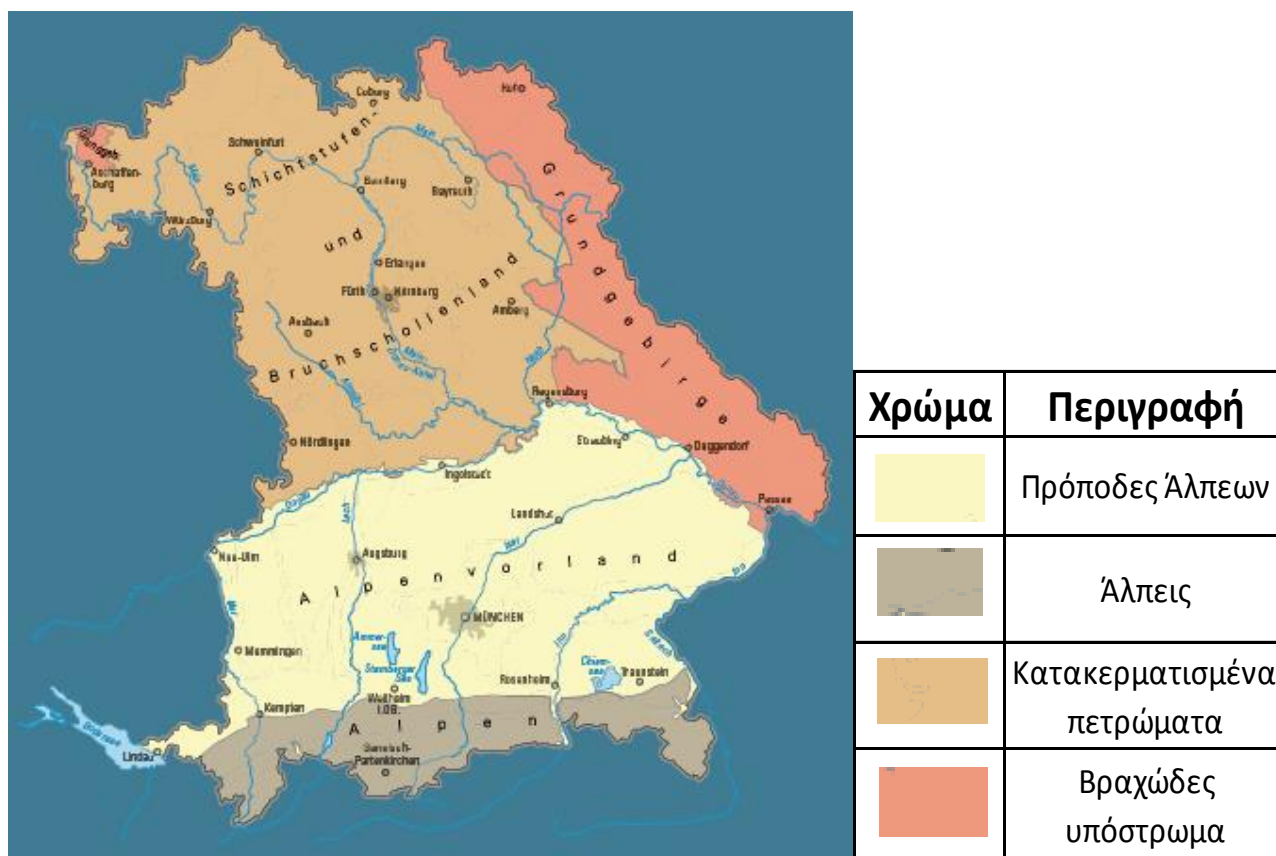
Ολόκληρη η Γερμανία, και κατ'επέκταση και η περιοχή μελέτης μας, βρίσκεται στην ευρωπαϊκή τεκτονική πλάκα. Δεν είναι σεισμογενής περιοχή, όπως φαίνεται και από την Εικόνα 34.



Εικόνα 34: Κατάταξη της Γερμανίας σε σεισμογενείς ζώνες, με την 3 να αποτελεί την πιο επικίνδυνη. Εδαφική επιτάχυνση ανά ζώνη: Ζώνη 3=0,8 m/s², ζώνη 2=0,6m/s², ζώνη 1=0,4 m/s², ζώνη 0=m/s².

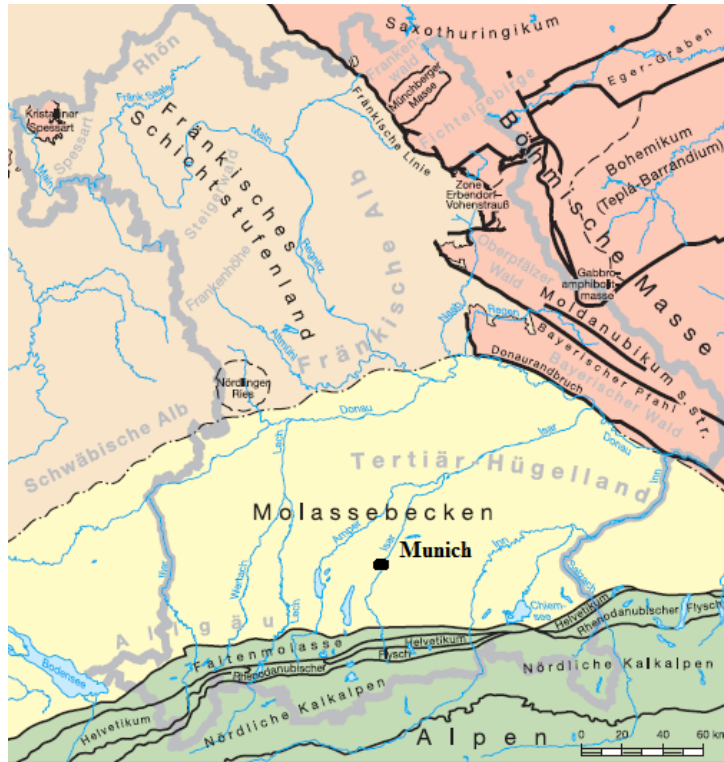
6.7 ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ

Η περιοχή μελέτης που εξετάστηκε (ευρύτερη περιοχή του Μονάχου) ανήκει, σύμφωνα με την γενική υδρογεωλογική κατανομή του χάρτη στην Εικόνα 35 στους πρόποδες των Άλπεων.



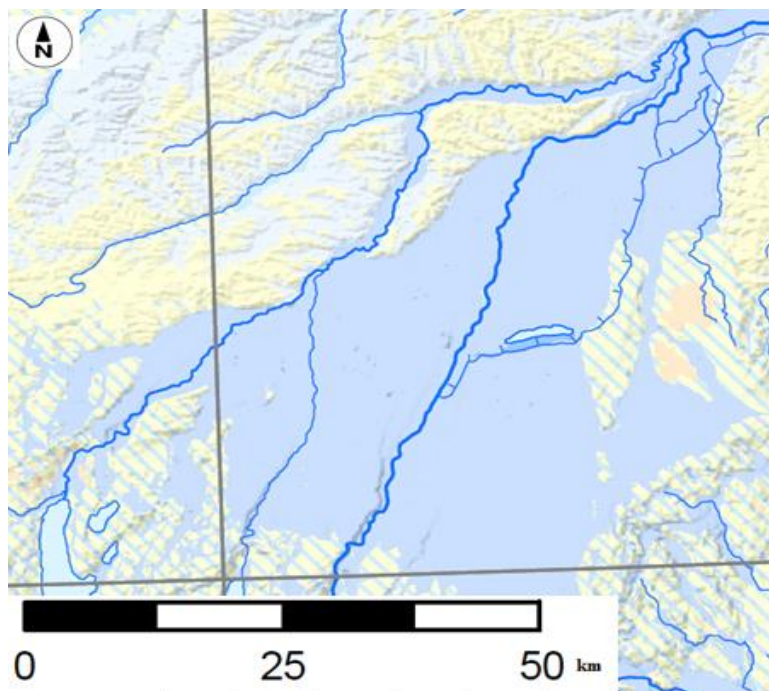
Εικόνα 35: Υδρογεωλογική κατανομή-υποπεριοχές Γερμανίας. Πηγή: Bavarian state office for Environment.

Περισσότερα από 600 εκατομμύρια χρόνια της ιστορίας της Γης είναι αποτυπωμένα στα πετρώματα της Βαυαρίας. Με βάση τα χαρακτηριστικά, τη διαστρωμάτωση και τις τεκτονικές ιδιότητες των πετρωμάτων της Βαυαρίας, μπορεί να διακριθούν οι εξής κύριες δομικές μονάδες: οι Άλπεις, η λεκάνη Μολάσσα (Molasse), η περιοχή cuesta καθώς και τα υπόγεια συμπλέγματα των ορεινών όγκων της Βοημίας (Εικόνα 36). Η περιοχή μελέτης ανήκει στη λεκάνη Μολάσσα (Molassebecken).



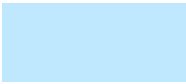
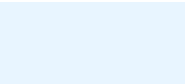


Εικόνα 36: Δομικές γεωλογικές περιοχές Βαυαρίας. Πηγή: Γεωλογική Υπηρεσία Βαυαρίας (bayerische geologisches landesamt)

Στην Εικόνα 37 απεικονίζεται ο υδρογεωλογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής με την διαπερατότητα του ανώτερου υδροφορέα. Στον πίνακα 6.9 υπάρχει υπόμνημα του χάρτη με το εύρος της διαπερατότητας και την μέση αγωγιμότητα, καθώς και τον συμβολισμό στον χάρτη. Η αγωγιμότητα, με εύρος από 0,65 m/d μέχρι 64,75m/d, προέκυψε από τη διαπερατότητα η οποία για τα πετρώματα της περιοχής χαρακτηρίζεται μέτρια έως χαμηλή.

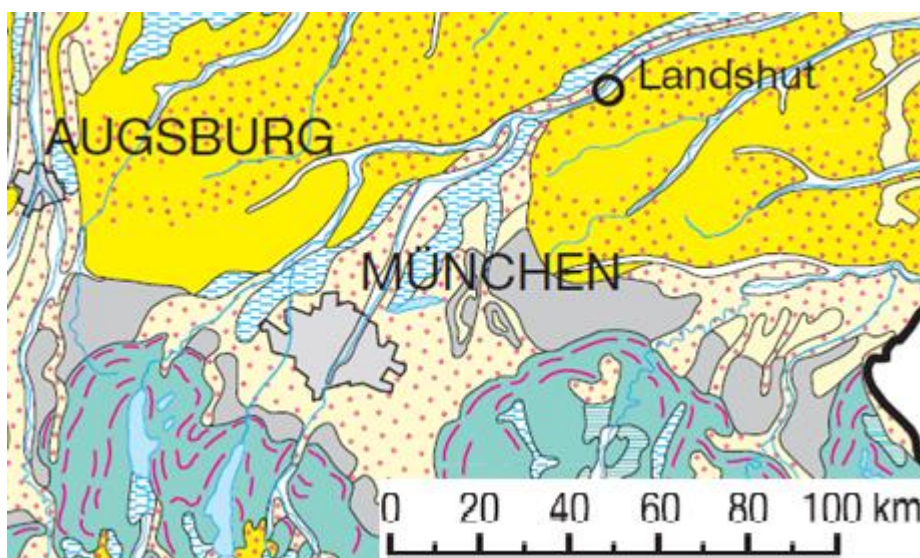


Εικόνα 37: Υδρογεωλογικός χάρτης με την διαπερατότητα του ανώτερου υδροφορέα της ευρύτερης περιοχής. Πηγή: Ομοσπονδιακό Ινστιτούτο Γεωεπιστημών και Φυσικών Πόρων της Γερμανίας (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe).

Πίνακας 6.9: Υπόμνημα του υδρολογικού χάρτη. Πηγή: Ομοσπονδιακό Ινστιτούτο Γεωεπιστημών και Φυσικών Πόρων της Γερμανίας (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe).

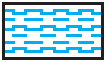






Συμβολισμός	Χαρακτηρισμός διαπερατότητας	Εύρος διαπερατότητας, cm^2	Μέση αγωγιμότητα, m/d
	Μέση	$10^{-3} > k > 10^{-4}$	64,75
	Μέτρια	$10^{-4} > k > 10^{-5}$	32,38
	Μέτρια μέχρι χαμηλή	$10^{-4} > k > 10^{-6}$	6,48
	Χαμηλή	$10^{-5} > k > 10^{-7}$	0,65

Τα πετρώματα που κυριαρχούν στην περιοχή μελέτης απεικονίζονται στον γεωλογικό χάρτη της περιοχής στην Εικόνα 38. Στον Πίνακα 6.10 υπάρχει υπόμνημα όπου γίνεται αντιστοίχιση του κάθε μοτίβου με το πέτρωμα που εκφράζει. Στην συνέχεια της εργασίας γίνεται εκτενέστερη αναφορά στα πετρώματα που αφορούν την περιοχή που ενδιαφέρει την παρούσα εργασία.



Εικόνα 38: Ο γεωλογικός χάρτης της περιοχής μελέτης Πηγή: Γεωλογική Υπηρεσία Βαυαρίας(bayerische geologisches landesamt).

Πίνακας 6.10: Υπόμνημα του γεωλογικού χάρτη της Εικόνας 38. Πηγή: Γεωλογική Υπηρεσία Βαυαρίας (bayerische geologisches landesamt).

Συμβολισμός	Πέτρωμα	Συμβολισμός	Πέτρωμα
Τεταρτογενής αποθέσεις(Quaternary)		Μολάσσαι(Molasse)	
	Τύρφη(Peat)		Άνω Μολάσσαι Γλυκού Νερού(Upper Freshwater Molasse)
	Ποτάμια χαλίκια και άμμος Πληστόκαινου εποχής(Pleistocene fluvial gravel and sand)		Άνω Θαλάσσια Μολάσσαι(Upper Marine Molasse)
	Νέες μορένες(New moraine)		Κατώ Θαλάσσια Μολάσσαι(Lower Marine Molasse)
	Παλαιές μορένες(Old moraine)		Κάτω Μολάσσαι γλυκού νερού(Lower Freshwater Molasse)

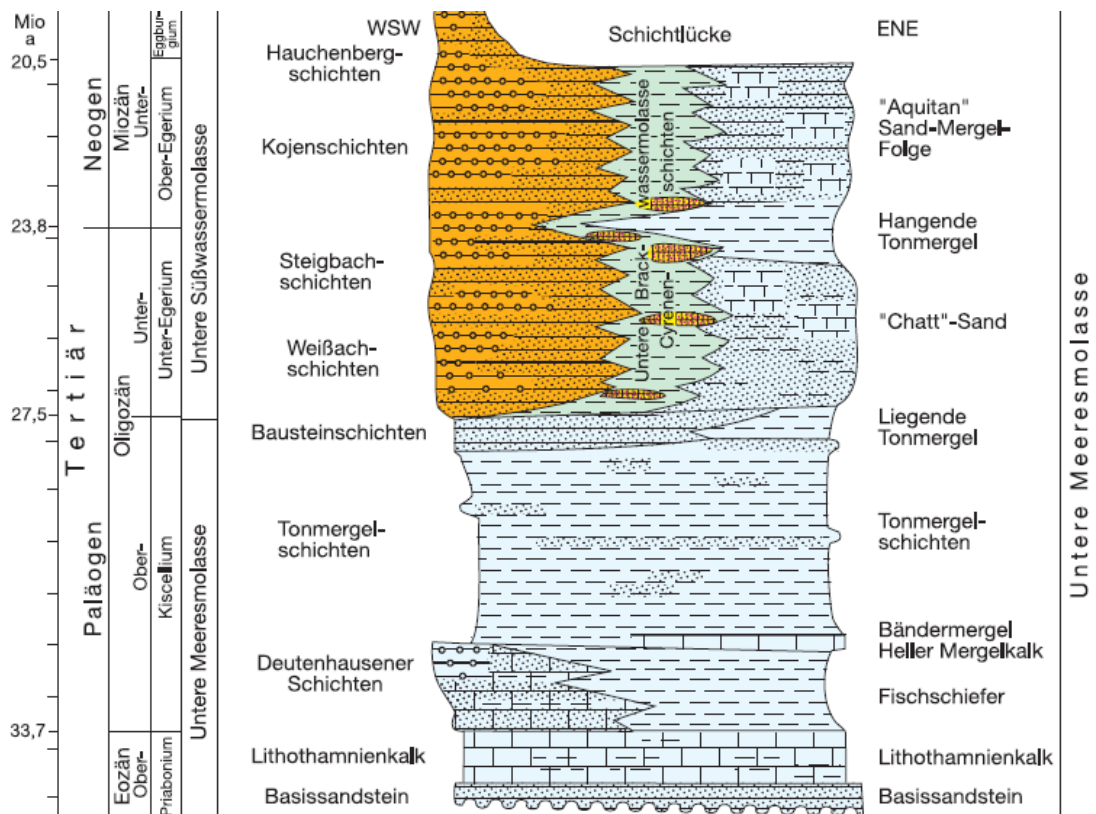
Όσον αφορά το υψόμετρο της περιοχής, αυτό κυμαίνεται μεταξύ 500 έως 750 μέτρα πάνω από το επίπεδο της θάλασσας.

6.7.1. Λεκάνη της Μολάσσας

Η λεκάνη Μολάσσαι (Molassebecken) βρίσκεται στους πρόποδες των Άλπεων και η βόρεια πλευρά της εκτείνεται ως τον ποταμό Δούναβη. Σχηματίστηκε κατά την Ολιγόκαινη και την Μειόκαινη εποχή λόγω θλίψης της Ευρωπαϊκής τεκτονικής πλάκας λόγω του βάρους από τις, σχηματιζόμενες εκείνη την εποχή, Άλπεις. Η λεκάνη αυτή δεχόταν εκείνη την εποχή όλα τα υλικά από τη διάβρωση και αποσάθρωση των αναδυόμενων Άλπεων. Τέτοια υλικά ήταν λεπτόκοκκα ιζήματα, ψαμμίτες, κροκαλοπαγή και μάργες τα οποία ενοποιήθηκαν από τότε. Η αλληλεπίδραση της διάθεσης των ιζημάτων, της καθίζησης της λεκάνης και της διακύμανσης του επιπέδου της θάλασσας που βρισκόταν εκείνη την εποχή στην περιοχή οδήγησαν σε εναλλαγές μεταξύ θαλάσσιου και χερσαίου περιβάλλοντος.

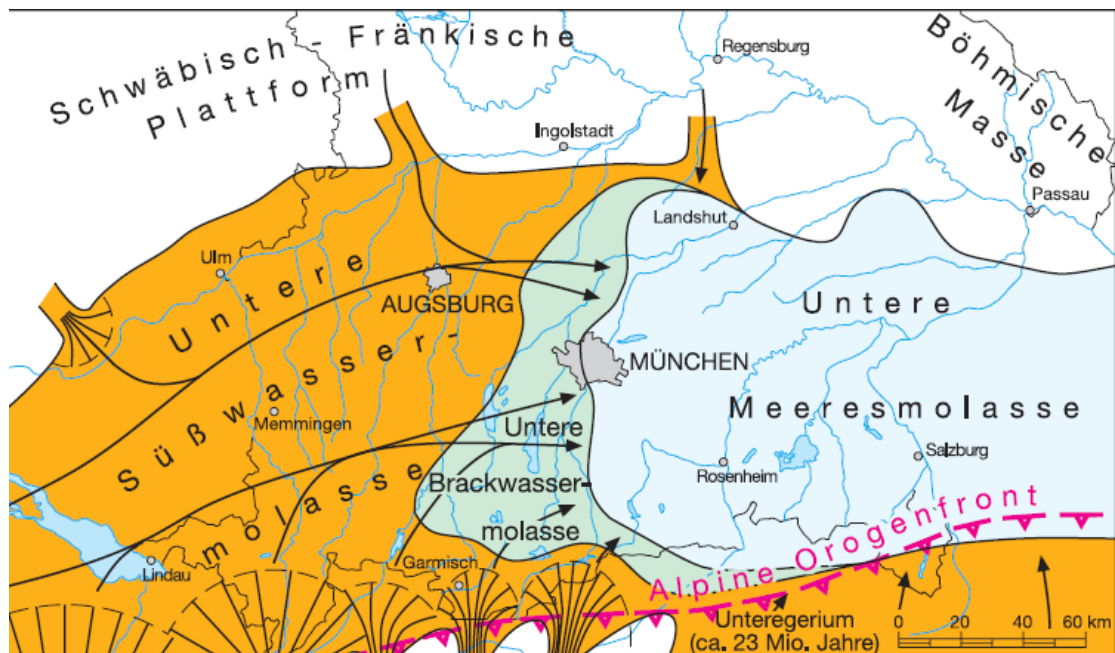
Το συνολικό πάχος της λεκάνης μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 6 km. Στρωματογραφικά χωρίζεται σε 4 ζώνες οι οποίες είναι (από τη βαθύτερη στην πιο κοντινή στην επιφάνεια):

- **Κάτω Θαλάσσια Μολάσσαι (αγγλικά: Lower Marine Molasse, γερμανικά: Untere Meeresmolasse).** Η ηλικία αυτής της ζώνης είναι 34-28 εκατ. χρόνια, δηλαδή από το πρώτο στάδιο της Ολιγόκαινης εποχής, κατά την Παλιογενή περίοδο. Αποτελείται από θαλάσσια άμμο, άργιλο και μάργες. Στα ανατολικά, ωστόσο, η εναπόθεση των, κατά κύριο λόγο, λεπτόκοκκων ιζημάτων και άμμου της κάτω θαλάσσιας Μολάσσας διήρκεσε ως και την αρχή της Μειόκαινης εποχής (23 εκατ. χρόνια και πλέον). Στην Εικόνα 39 φαίνεται η σύσταση αυτού του στρώματος κατά την πάροδο του χρόνου, καθώς και πως από 28 περίπου εκατομμύρια χρόνια και μετά αρχίζει να υπερισχύει το επόμενο στρώμα που απεικονίζεται με το πορτοκαλί στρώμα, η Κάτω Μολάσσαι Γλυκού Νερού.

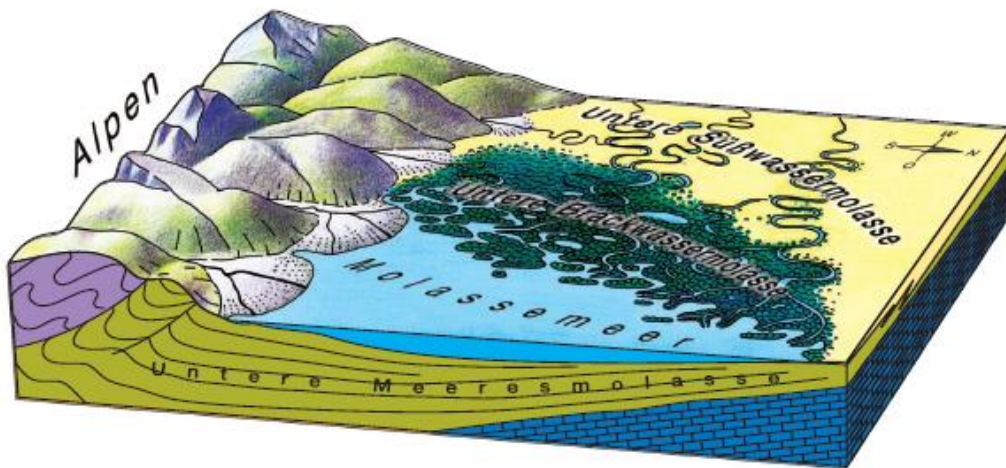


Εικόνα 39: Σύσταση στρώματος Κάτω Θαλάσσιας Μολάσσας με την πάροδο του χρόνου (ο χρόνος φαίνεται στα αριστερά της εικόνας). Πηγή: Γεωλογική Υπηρεσία Βαυαρίας (bayerische geologisches landesamt)

- Κάτω Μολάσσα γλυκού νερού (Αγγλικά: Lower Freshwater Molasse, Γερμανικά: Untere Süßwassermolasse).** Η ηλικία αυτού του στρώματος είναι από την δεύτερο στάδιο της Ολιγόκαινης εποχής (28-22 εκατομμύρια χρόνια) κατά την Παλαιογενή περίοδο όπου ξεκίνησε από τα δυτικά της λεκάνης εναπόθεση μεγάλων χαλικιών, χονδρόκοκκης άμμου και λεπτόκοκκων ιζημάτων. Ύστερα από μία ευστατική πτώση της στάθμης της θάλασσας σε συνδυασμό με μία τεκτονική ανύψωση, καθώς και την εναπόθεση των προαναφερθέντων υλικών, ο ωκεανός έπαψε να υφίσταται. Με αυτόν τον τρόπο σχηματίστηκε το στρώμα της Κάτω Μολάσσας γλυκού νερού. Στο υφάλμυρο νερό των παράκτιων περιοχών, σχηματίστηκε η Κάτω Μολάσσα υφάλμυρου νερού (Γερμανικά: Untere Brackwassermolasse). Από τα βαλτώδη δάση αυτής προέκυψαν τα κοιτάσματα άνθρακα της περιοχής τα οποία είχαν εξορυχθεί μέχρι το 1972. Η Εικόνα 40 και η Εικόνα 41 απεικονίζουν αυτά που περιγράφηκαν.



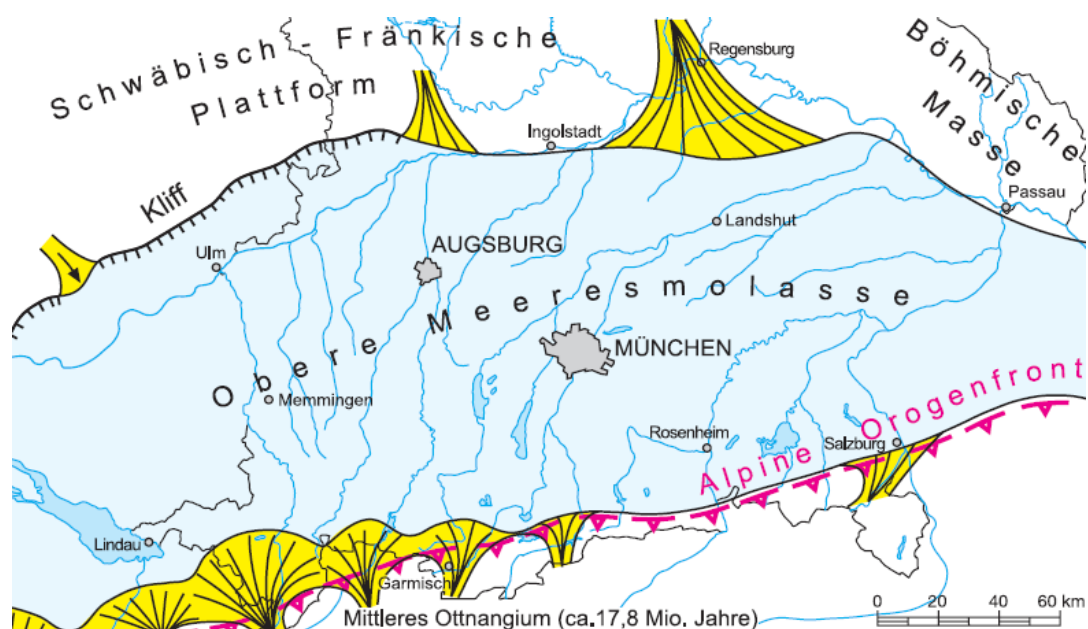
Εικόνα 40: Άποψη της λεκάνης της Μολάσσης 23 εκατομμύρια χρόνια πριν. Το στρώμα της Κάτω Θαλάσσιας Μολάσσης (Γερμανικά: Untere Meeresmolasse) έχει αρχίσει να εξαφανίζεται καθώς από τα δυτικά εμφανίζεται η Κάτω Μολάσσα γλυκού νερού (Γερμανικά: Untere Süßwassermolasse) που απεικονίζεται με το πορτοκαλί χρώμα. Εξαπλώνεται προς τα ανατολικά ώσπου αργότερα υπερκαλύπτει την Κάτω Θαλάσσια Μολάσσα (Untere Meeresmolasse) με το ανοικτό γαλάζιο χρώμα. Ενδιάμεσά τους η Κάτω Μολάσσα υφάλμυρο νερού (Untere Brackwassermolasse) με το σκούρο γαλάζιο χρώμα. Πηγή: Γεωλογική Υπηρεσία Βαυαρίας (bayerische geologisches landesamt)



Εικόνα 41: Η λεκάνης της Μολάσσης κατά το δεύτερο στάδιο της Ολιγόκαινης εποχής (περίπου 23 εκατ. χρόνια πριν). Πηγή: Γεωλογική Υπηρεσία Βαυαρίας (bayerische geologisches landesamt)

- **Άνω Θαλάσσια Μολάσσα** (Αγγλικά: Upper Marine Molasse, Γερμανικά: Obere Meeresmolasse. Κατά τις αρχές προς τα μέσα της Μειόκαινου εποχής (συγκεκριμένα 22 έως 16 εκατ. χρόνια πριν), ο ωκεανός πλημμύρισε τη λεκάνη για τελευταία φορά εξαιτίας μιας τεκτονικής καθίζησης. Έτσι σχηματίστηκε ένα ρηχό θαλάσσιο περιβάλλον από την πόλη Λυών της Γαλλίας μέχρι την Βιέννη. Σε αυτό το θαλάσσιο περιβάλλον διαμορφώθηκε η Άνω Θαλάσσια Μολάσσα. Σε αυτή έχουν εναποτεθεί λεπτόκοκκα ιζήματα, θαλάσσια άμμος,

άργιλος και μάργες και πολλά από αυτά έχουν έντονο πρασινωπό χρώμα εξαιτίας του ορυκτού γλαυκονίτη. Σε ορισμένα σημεία είναι διατηρημένες εγκοπές και τρύπες σε βράχους, σχηματισμένες από τα κύματα της εποχής αυτής. Στις παράκτιες περιοχές σχηματίστηκε η Άνω Μολάσσα υφάλμυρου νερού που αποτελείται από άμμο, λεπτόκοκκα ιζήματα και ασβεστόλιθους γλυκού νερού (Εικόνα 42).

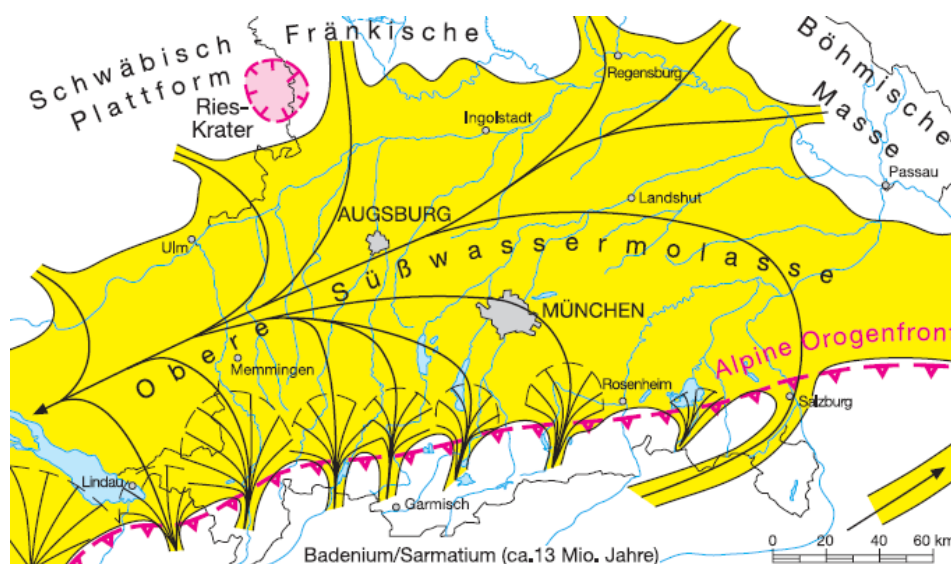


Εικόνα 42: Αποψη της λεκάνης της Μολάσσας 17,8 εκατ. χρόνια πριν. Η περιοχή έχει καταποντιστεί και ο ωκεανός έχει κυριαρχήσει. Την περίοδο αυτή διαμορφώθηκε η Άνω Θαλάσσιο Μολάσσα (Γερμανικά: Obere Meeresmolasse). Πηγή: Γεωλογική Υπηρεσία Βαυαρίας (bayerische geologisches landesamt)

- **Άνω Μολάσσα Γλυκού Νερού (Αγγλικά: Upper Freshwater Molasse, Γερμανικά: Obere Süßwassermolasse).** Αποτελεί την πιο επιφανειακή και, προφανώς, πιο σημαντική Μολάσσα της λεκάνης (Εικόνα 43). Η ηλικία του στρώματος αυτού υπολογίζεται από την μέση και προς το τέλος της Μειόκαινου εποχής (16-5 εκατ. χρόνια πριν). Μια τεκτονική ανύψωση ανάγκασε την θάλασσα να υποχωρήσει για μία τελευταία φορά. Αλλουβιανές αποθέσεις, μεταφέρθηκαν από τις Άλπεις μέσω ενός συστήματος ποταμών που είχαν κατεύθυνση προς την δύση (Εικόνα 44). Ανάλογα και με την μεταφορική ικανότητα κάθε ποταμού, οι αλλουβιανές αυτές αποθέσεις περιελάμβαναν ποτάμια άμμο και άργιλο, καθώς και κροκάλες. Σε διάφορα σημεία ενδιαφέρον παρουσιάζει η παρουσία ασβεστολιθικού πετρώματος που εκτινάχθηκε σε διάφορα μέρη ύστερα από την πρόσκρουση κομήτη στην περιοχή Nördlinger Ries στην δυτική Βαυαρία. Επίσης, πάλι σε τοπικό επίπεδο, εμφανίζονται στρώματα διογκωμένων αργιλικών ορυκτών (μπεντονίτη) που καταδεικνύουν την μεταφορά και την απόθεση ηφαιστειακής τέφρας από αέρος.



Εικόνα 43: Χαρακτηριστικό παράδειγμα εναλλαγών χαλικιών, άμμου και λεπτόκοκκων ιζημάτων στην Άνω Μολάσση Γλυκού Νερού. Πηγή: Γεωλογική Υπηρεσία Βαυαρίας (bayerische geologisches landesamt)

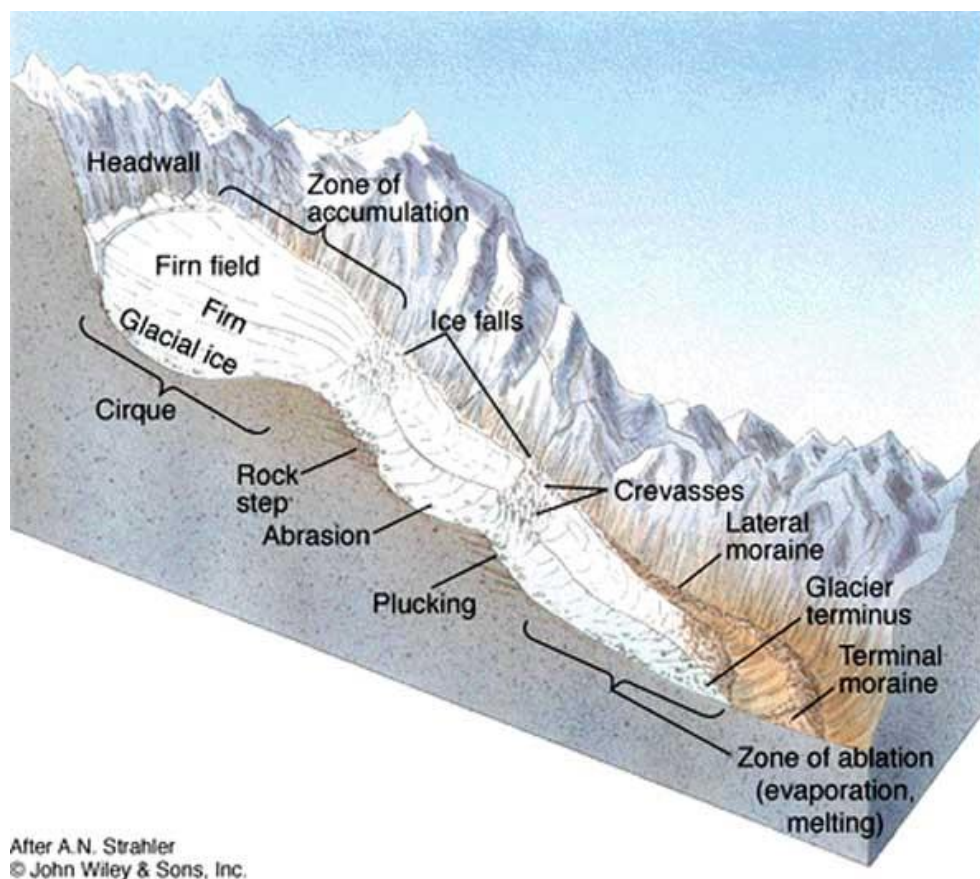


Εικόνα 44: Λεκάνη Μολάσσας πριν 12 εκατ. χρόνια. Η Άνω Μολάσση Γλυκού Νερού (Γερμανικά: Obere Süßwassermolasse) με το κίτρινο χρώμα έχει σχηματιστεί. Χαρακτηριστικές είναι οι διευθύνσεις των ποταμών προς τα δυτικά. Πηγή: Γεωλογική Υπηρεσία Βαυαρίας (bayerische geologisches landesamt).

6.7.2 Τεταρτογενή Ιζήματα

Κατά τη διάρκεια της Τεταρτογενούς περιόδου, η φάση των παγετώνων (glacial stages) με το κρύο και ξηρό κλίμα εναλλασσόταν με το ζεστό και υγρό κλίμα των μεσοπαγετώνων (interglacial stages). Μέχρι στιγμής είναι γνωστά 4 κύρια στάδια παγετώνων: Γκουντζ (Günz), Μίντελ (Mindel), Ρις (Riß) και Βουρμ (Würm). Η συσχέτιση με τα θαλάσσια ισοτοπικά στάδια (Marine Isotopic Stages, MIS) δεν έχει ολοκληρωθεί ακόμα. Κατά την διάρκεια των παγετώνων, κομμάτια πάγου από τις Άλπεις μετακινήθηκαν στους πρόποδες αποθέτοντας μορενικά υλικά και χαλίκια. Στην Εικόνα 45 απεικονίζεται ένας Αλπικός παγετώνας. Ο παγετώνας κατέχει μία κεκλιμένη κοιλάδα με απότομα

τοιχώματα σχήματος U. Η ζώνη τροφοδοσίας του παγετώνα βρίσκεται στο ανώτερο τμήμα του και καταλαμβάνει μια αμφιθεατρική λεκάνη (Βουβαλίδης, π.α.). Σε αυτή γίνεται η συγκέντρωση του χιονιού το οποίο συμπιέζεται και παγοποιείται. Η ροή του παγετώνα κάτω από το συσσωρευμένο χιόνι οδηγεί τον πάγο έξω από τη ζώνη τροφοδοσίας του, στη ζώνη κίνησης του παγετώνα. Λόγω της απότομης αύξησης της κλίσης του υποβάθρου που υπάρχει στη ζώνη κίνησης, ο πάγος επιταχύνει και στο πέρασμά του καταστρέφει τα πετρώματα της βάσης και των πλευρών του παγετώνα δημιουργώντας τους ρωγμές. Θραύσματα παρασύρονται και λόγω του βάρους και της κίνησης λειαίνουν το υπόβαθρο. Ο μεταφερόμενος πάγος, μαζί με τα θραύσματα των πετρωμάτων που μεταφέρει, καταλήγει τελικά στην ζώνη απόθεσης. Σε αυτήν ο παλιός πάγος εκτίθεται στην επιφάνεια του παγετώνα και η επιφάνειά του γίνεται τραχιά με πολλές ρωγμές. Όσο ο κατερχόμενος πάγος λιώνει, τόσο αυξάνεται και η απόθεση των διαβρωμένων υλικών (Βουβαλίδης, π.α.).

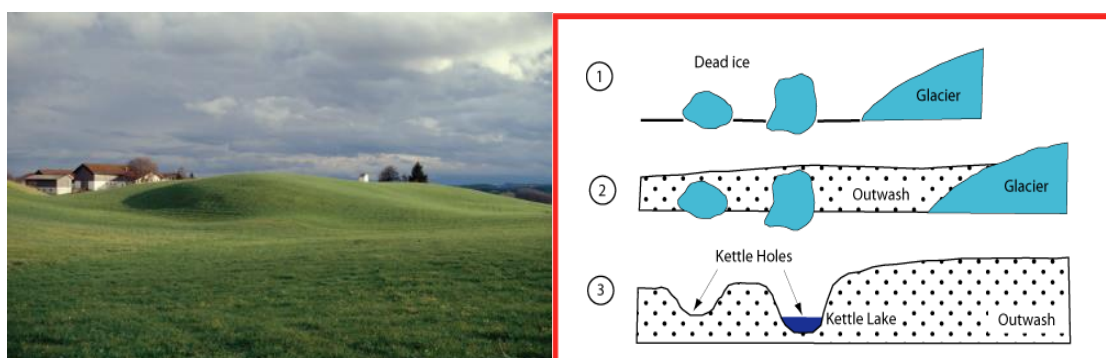


Εικόνα 45: Παγετώνας (Βουβαλίδης, π.α.).

Νέες και Παλαιές μορένες (New and Old moraine)

Στους βόρειους πρόποδες των Άλπεων οι παλαιές και οι νέες μορένες διαφέρουν ως προς το ανάγλυφο, την επίδραση που υπόκεινται από τις καιρικές συνθήκες και την επιφανειακή τους κάλυψη. Τόσο οι παλαιές, όσο και οι νέες μορένες αποτελούνται κυρίως από μη στρωματοποιημένα, αδιαχώριστα συσσωματώματα από άργιλο, λάσπη, άμμο, χαλίκια και πέτρες.

Οι νέες μορένες αποτέθηκαν κατά τη διάρκεια της τελευταίας παγετώδους φάσης (20.000 με 15.000 χρόνια πριν) και αποτελούν ένα τυπικό λοφώδες τοπίο από μορένες με προεξέχουσες κορυφές και λόφους σε σχήμα ανεστραμμένου κουταλιού (Drumlins), (Εικόνα 46). Χαρακτηριστικό τους, επίσης, είναι και πολλές μικρές συνήθως και ρηχές κοιλάδες (Kettle holes), μερικές από τις οποίες είναι πληρωμένες με νερό (Kettle Lakes), που δημιουργήθηκαν ύστερα από την τήξη μεγάλων κομματιών πάγου που αφού αποκολλήθηκαν από τον παγετώνα θάφτηκαν ολικώς ή μερικώς μέσα στο έδαφος (Εικόνα 46). Σε διάφορες περιπτώσεις τα κομμάτια πάγου που αποτέθηκαν και περιείχαν σημαντική ποσότητα χαλικιών και άμμου, μετά την τήξη του πάγου δημιούργησαν λόφους ή υψώματα με χαρακτηριστική μορφή (Kames). Πολλές φορές σχετίζονται με τις τρύπες που αναφέρθηκαν πιο πάνω και βρίσκονται ανάμεσά τους.

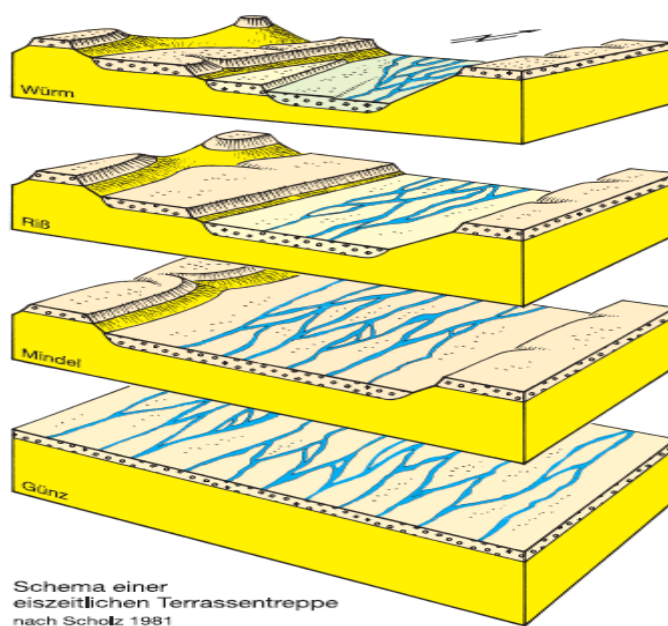


Εικόνα 46: Αριστερά εικονίζονται λόφοι τύπου Drumlin στην περιοχή μελέτης. Πηγή: Γεωλογική Υπηρεσία Βαυαρίας (bayerische geologisches landesamt). Δεξιά αναπαρίσταται ο τρόπος σχηματισμού των κοιλοτήτων ή λιμνών τύπου Kettle.

Οι παλαιές μορένες αποτέθηκαν πριν από 140.000 με 130.000 χρόνια. Βρίσκονται πιο βόρεια από τις νέες μορένες και χαρακτηρίζονται από πιο ομαλό ανάγλυφο. Διαδικασίες που αναφέρονται ως periglacial οδήγησαν στη διάβρωση του επιφανειακού εδάφους και τη συσσώρευση ιζημάτων στις εσοχές με αποτέλεσμα τρύπες τύπου kettle να έχουν γεμίσει πλήρως. Επομένως, στις παλαιές μορένες δεν υπάρχουν τόσες πολλές λίμνες σε αντίθεση με τις νέες μορένες. Έτσι οι σχηματισμοί των παλιών παγετώνων έχουν πλέον αλλοιωθεί.

Ποτάμια χαλίκια και άμμος Πλειστόκαινου εποχής

Βαθμίδες συμπλεγμάτων με μορφή σκαλιών (terrace) αποτελούμενων από χαλίκια και άμμο κυριαρχούν σε πολλές κοιλάδες ποταμών στην Βαυαρία σε διάφορα υψόμετρα. Αποθέσεις χαλικιών στους πρόποδες των Άλπεων έχουν συχνά προκληθεί λόγω της αυξημένης απόθεσης ιζημάτων από την τήξη των παγετώνων. Η συμβατική ταξινόμηση της Πλειοστόκαινου εποχής σε τέσσερις περιόδους παγετώνων προήλθε από την ακολουθία βαθμίδων εδάφους στην κοιλάδα του ποταμού Ίλερ (Iller). Χαλίκια και άμμος ποταμών της περιόδου αυτής αποτελούν σημαντικές πρώτες ύλες για κατασκευαστικές χρήσεις στην περιοχή. Η εικόνα 47 αποτελεί σχηματική απεικόνιση της μετάλλαξης των βαθμίδων σε μία κοιλάδα ενός ποταμού κατά την διάρκεια των τεσσάρων εποχών των παγετώνων. Ξεκινάει από την πιο παλιά εποχή (Würm) καταλήγοντας στην πιο πρόσφατη (Günz).



Εικόνα 47: Μετάλλαξη βαθμίδων κοιλάδας ποταμού στην διάρκεια των τεσσάρων εποχών των παγετώνων. Πηγή: Γεωλογική Υπηρεσία Βαυαρίας (bayerische geologisches landesamt)

Τύρφη (Peat)

Μετά το λιώσιμο των πάγων, εκτεταμένοι βάλτοι με τύρφη αναπτύχθηκαν στους πρόποδες των Άλπεων κυρίως λόγω της παρουσίας των υπόγειων υδάτων κοντά στην επιφάνεια (Εικόνα 48). Τύρφη ιδιαίτερα παχιά, μερικές φορές αρκετών μέτρων, εμφανίστηκε σε κοιλάδες ποταμών, σε περιοχές με χαλίκια και πρώην λεκάνες παγετώνων. Πολλές περιοχές βάλτων με τύρφη καταστράφηκαν τα τελευταία 200 χρόνια λόγω ξηρασιών, εξόρυξης της τύρφης ή από ισχυρούς ανέμους. Σε παλαιότερες εποχές η τύρφη χρησιμοποιούταν ως υλικό θέρμανσης. Σήμερα η τύρφη βρίσκει χρήση περιστασιακά σε κηπευτικούς και ιατρικούς σκοπούς.



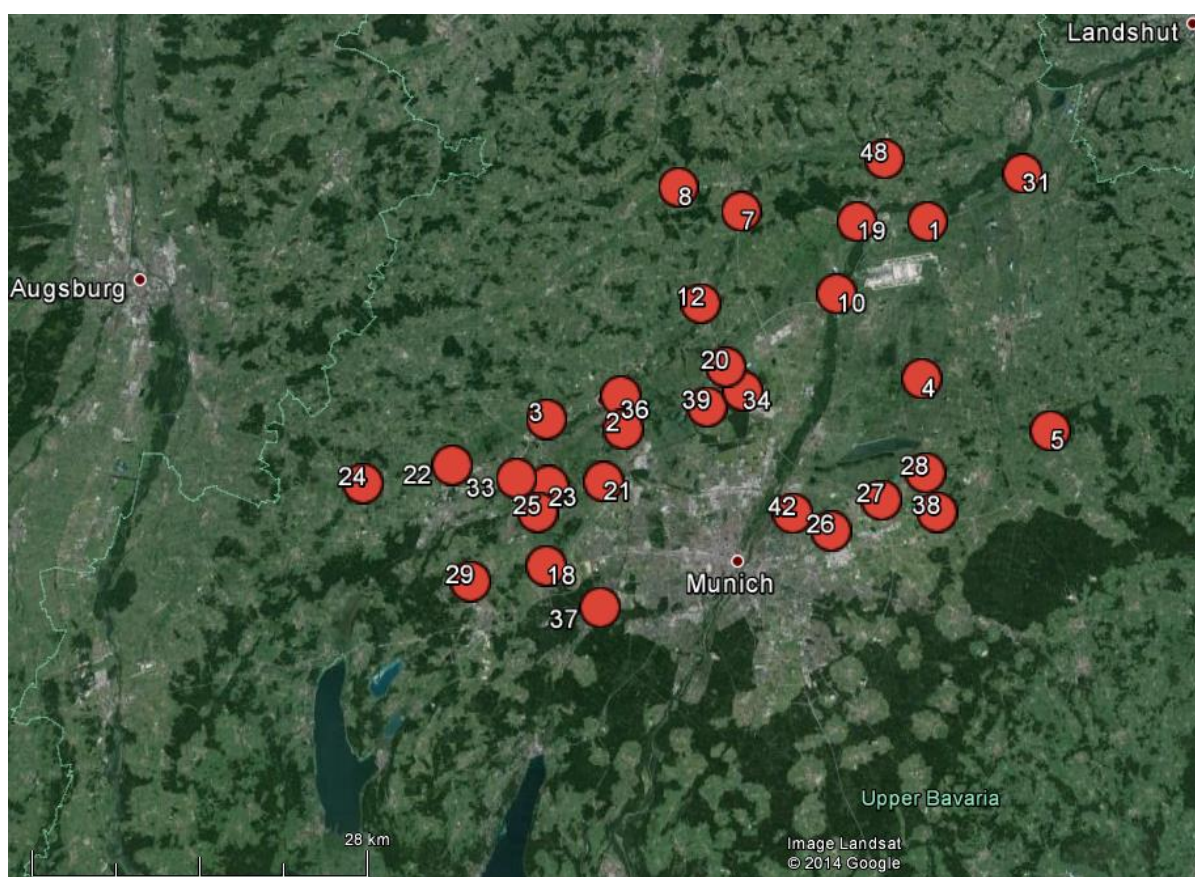
Εικόνα 48: Αριστερά, σε παλιό ορυχείο τύρφης διακρίνεται η εσωτερική δομή των βάλτων. Δεξιά, βαλτώδης βλάστηση από την οποία δημιουργείται η τύρφη απουσία αέρα. Πηγή: Γεωλογική Υπηρεσία Βαυαρίας (bayerische geologisches landesamt)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

7.1 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

7.1.1 Επιλογή δεδομένων εισαγωγής

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η ανάπτυξη των νευρωνικών δικτύων για την προσομοίωση της στάθμης υδροφορέα στην περιοχή μελέτης έγινε μέσω του αριθμητικού υπολογιστικού περιβάλλοντος MATLAB. Για το επίπεδο της στάθμης των υπογείων υδάτων χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από 30 πηγάδια παρατήρησης στάθμης υπόγειου ύδατος στον άνω υδροφορέα τα οποία εικονίζονται στην Εικόνα 49. Η επίσημη αρίθμηση που αντιστοιχεί σε κάθε πηγάδι παρατίθενται στον πίνακα 7.1. Λόγω του ότι μετράνε τη στάθμη στον άνω υδροφορέα ανταποκρίνονται και καταγράφουν σχετικά γρήγορα το βρόχινο νερό που διηθείται στο έδαφος, ανάλογα βέβαια με το πάχος και την διαπερατότητα του υπεδάφους σε κάθε πηγάδι, αλλά και την απόστασή τους από τον μετεωλογικό σταθμό, και κατά συνέπεια τη διαφοροποίηση του καιρού από αυτόν.



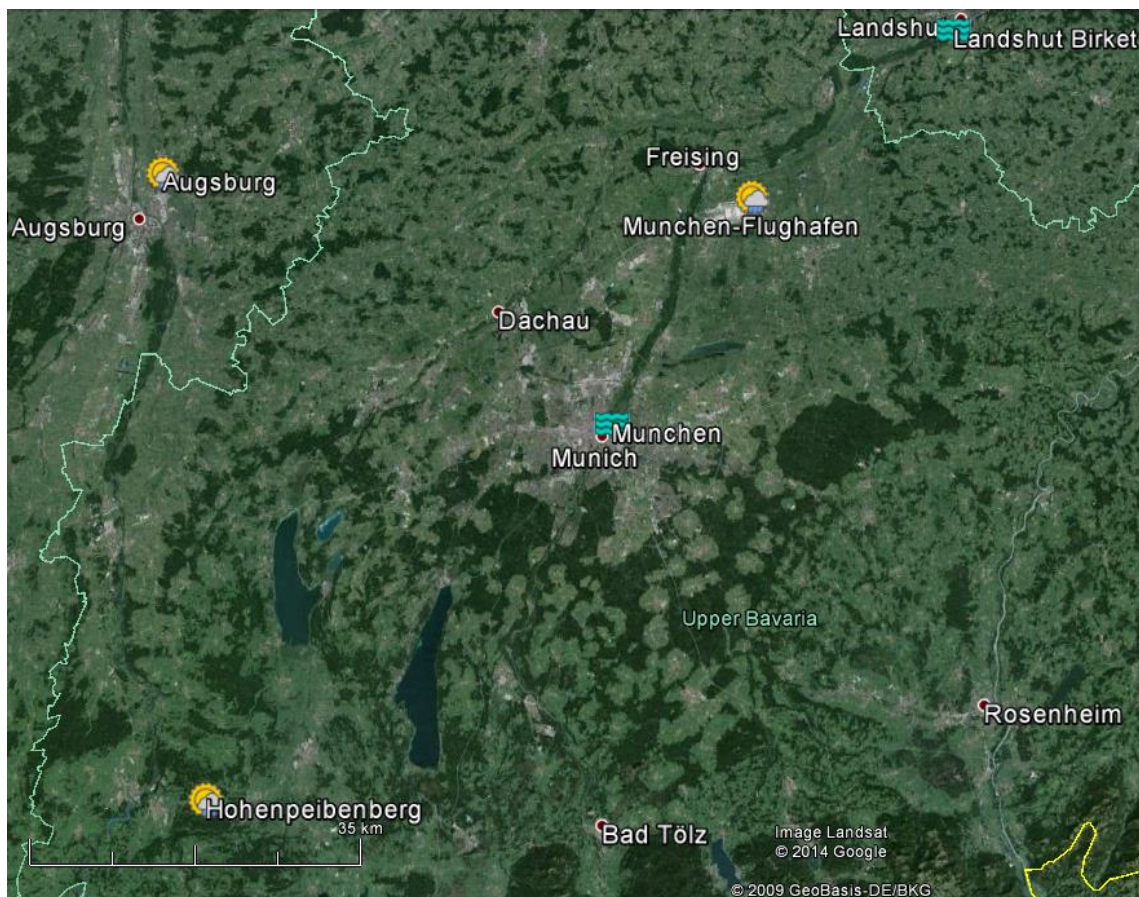
Εικόνα 49: Χρησιμοποιηθέντα πηγάδια παρατήρησης. Λήψη από Google Earth.

Πίνακας 7.1: Επίσημη αρίθμηση κάθε πηγαιδιού παρατήρησης. Πηγή: Bavarian State Office for Environment.

Επίσημη Αρίθμηση	Νέα αρίθμηση		Επίσημη Αρίθμηση	Νέα αρίθμηση
14114	1		16184	24
14116	2		16194	25
14117	3		16195	26
14118	4		16196	27
14126	5		16198	28
14134	7		16212	29
14135	8		16228	31
14138	10		16244	33
14140	12		16245	34
16008	18		16257	36
16117	19		16267	37
16118	20		16268	38
16247	21		16269	39
16144	22		16277	42
16168	23		16296	48

Επειδή το πεδίο παρατήρησης των πηγαδιών βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια, συνήθως έχουν στενή σχέση με το επίπεδο των επιφανειακών νερών. Για αυτόν το λόγο στη διαδικασία προσομοίωσης εξετάστηκε το επίπεδο νερού του μεγαλύτερου ποταμού της περιοχής, Ίζαρ(Isar), σε 2 σημεία παρατήρησης. Τα σημεία αυτά βρίσκονται το ένα στο Μόναχο (Συντεταγμένες: 11.59698, 48.146174) και το άλλο στην πόλη Landshut (Συντεταγμένες: 12.133589, 48.527743). Τόσο τα επίπεδα των επιφανειακών υδάτων, όσο και οι μετρήσεις των πηγαδιών παρατήρησης, έγιναν διαθέσιμα από το επίσημο γραφείο περιβάλλοντος της Βαυαρίας (Bavarian State Office for Environment).

Τα μετεωρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν έγιναν διαθέσιμα μέσω της Γερμανικής Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (Deutsche Wetterdienst-DWD). Αποτελούνταν από χρονοσειρές που περιείχαν ημερήσιες μετρήσεις για βροχόπτωση, χιονόπτωση, θερμοκρασία αέρα, σχετική υγρασία και ηλιοφάνεια. Επιλέχθηκαν 3 σταθμοί που βρίσκονται στην ευρύτερη περιοχή. Πρόκειται για τους σταθμούς Augsburg, Munchen-Flughafen και Hohenpeibenberg (Εικόνα 50). Για τα χρόνια που εξετάστηκαν, η ετήσια βροχόπτωση κυμαίνεται από 650mm έως 1000mm ανάλογα και από τον μετεωρολογικό σταθμό. Η μέση θερμοκρασία για τα 4 χρόνια της προσομοίωσης ήταν 8.3°C.



Εικόνα 50: Θέση μετεωρολογικών σταθμών και σημεία μέτρησης της στάθμης του ποταμού Τζαρ. Λήψη από Google Earth.

7.1.2 Επεξεργασία δεδομένων πριν την εισαγωγή στο ΤΝΔ

Η βροχόπτωση που κατεισδύει μέσω του εδάφους χρειάζεται, όπως είναι λογικό, κάποιο χρονικό διάστημα μέχρι να φτάσει στον υδροφόρο ορίζοντα. Αυτό εξαρτάται σε κάθε περιοχή από τη διαπερατότητα του εδάφους καθώς και το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα. Η χρονική αυτή καθυστέρηση (time lag) μεταξύ βροχόπτωσης και μεταβολής της στάθμης των υπόγειων υδάτων είναι απαραίτητο να υπολογιστεί προκειμένου να εισαχθεί η σωστή παράμετρος εισόδου. Η ίδια λογική ισχύει για τα επιφανειακά ύδατα και την χιονόπτωση.

Για την επίλυση αυτού του προβλήματος χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση γραμμικής συσχέτισης “corr” της Στατιστικής Εργαλειοθήκης (Statistics toolbox) που υπολογίζει τον συντελεστή συσχέτισης 2 χρονοσειρών. Συνοπτικά, ο συντελεστής συσχέτισης υπολογίστηκε για κάθε ένα από τα 30 πηγάδια παρατήρησης, και για τους 3 διαφορετικούς μετεωρολογικούς σταθμούς, με σκοπό να βρεθεί:

Α) η συσχέτιση της βροχόπτωσης με τη στάθμη των υπόγειων υδάτων. Η βροχόπτωση επηρεάζει θετικά τη μεταβολή της στάθμης των υπογείων υδάτων και για αυτό επιλέχθηκε, ως καταλληλότερη, η μεγαλύτερη θετική τιμή. Η διαδικασία έγινε από 0 έως 10 μέρες, χρονικό διάστημα αρκετό για εμφάνιση ανώτατου σημείου συσχέτισης δεδομένου του τύπου της εξεταζόμενης κατακρήμνισης και του είδους του εδάφους (μη καρστικό έδαφος). Επιλέχθηκαν 4

ημέρες με την μεγαλύτερη τιμή συσχέτισης. Παρόλα αυτά ο κανόνας αυτός ήταν ελαστικός καθώς προτιμούνταν συνεχόμενες μέρες.

Β) η συσχέτιση της χιονόπτωσης με τη στάθμη των υπόγειων υδάτων. Όπως και η βροχόπτωση, έτσι και η χιονόπτωση επηρεάζει θετικά τη μεταβολή της στάθμης και, επομένως, καταλληλότερη τιμή είναι η μεγαλύτερη θετική. Επιλέχθηκαν οι 3 συνεχόμενες μέρες που αθροιστικά έδιναν την μεγαλύτερη τιμή. Η διαδικασία έγινε από 0 έως 190 μέρες. Η μεγάλη διαφορά στο χρονικό διάστημα που εξετάστηκε συγκριτικά με την βροχόπτωση έχει ως εξήγηση ότι το χιόνι χρειάζεται κάποιο χρόνο μέχρι να λιώσει. Συνεπώς, η χρονική καθυστέρηση ενδέχεται να είναι αρκετά μεγάλη.

Γ) η συσχέτιση της στάθμης του ποταμού που διασχίζει την περιοχή με τη στάθμη των υπόγειων υδάτων. Στην περίπτωση αυτή, η στάθμη του ποταμού μπορεί να επηρεάσει είτε θετικά είτε αρνητικά την στάθμη των υπόγειων υδάτων. Για αυτό ως καταλληλότερη τιμή επιλέχθηκαν οι 2 συνεχόμενες μέρες έδιναν την μεγαλύτερη κατά απόλυτο τιμή συσχέτιση. Το χρονικό διάστημα που εξετάστηκε ήταν από -10 έως 10 μέρες. Σε περίπτωση που στόχος είναι η πρόβλεψη του υδραυλικού ύψους, και καθώς δεν θα υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις για στάθμη ποταμού, μπορεί να γίνει πρόβλεψη αρχικά για την στάθμη του ποταμού για τις επόμενες μέρες ώστε να βρεθεί η καλύτερη τιμή..

Ημέρα εκκίνησης/αναφοράς ήταν η 2/11/08. Ανάλογα σε πόσες μέρες υστέρησης(time lag) αντιστοιχεί η κατάλληλη τιμή σε κάθε περίπτωση, μετακινείται αντίστοιχα η χρονοσειρά της βροχόπτωσης/χιονόπτωσης/στάθμης ποταμού. Ενδεικτικό είναι το παράδειγμα της Εικόνας 51.

Χρονική Υστέρηση 0 μέρες				Χρονική Υστέρηση +1 μέρα				Χρονική Υστέρηση -1 μέρα			
HHC		Στάθμη Ποταμού		HHC		Στάθμη Ποταμού		HHC		Στάθμη Ποταμού	
k-1			k	k-1			k	k-1			
k			k+1	k		.	k+1	k			k
k+1		.			.	.	k+1				k+1
	
	
	
n-2			n-1	n-2			n-1	n-2			n-2
n-1			n	n-1			n	n-1			n-1

Εικόνα 51: Παράδειγμα μετακίνησης χρονοσειρών ανάλογα με τη χρονική υστέρηση.

7.1.3 Δεδομένα εισόδου

Για κάθε ένα πηγάδι παρατήρησης η επιθυμητή έξοδος της προσομοίωσης είναι η **διαφορά του υδραυλικού ύψους (Hydraulic Head Change, HHC) την ημέρα k**. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό χρησιμοποιήθηκαν ως είσοδοι οι εξής παράμετροι:

- Το υδραυλικό ύψος την ημέρα k-1
- Μέση ημερήσια θερμοκρασία την ημέρα k
- Σχετική υγρασία την ημέρα k

- Ωρες ηλιοφάνειας την ημέρα k
- Βροχόπτωση ύστερα από συσχέτιση
- Χιονόπτωση ύστερα από συσχέτιση
- Στάθμη ποταμού Ίζαρ ύστερα από συσχέτιση

Ο λόγος που χρησιμοποιείται ως επιθυμητή έξοδος η διαφορά στάθμης και όχι η στάθμη αυτή καθαυτή είναι γιατί σε περίπτωση χρησιμοποίησης της στάθμης ως έξοδο, θα υπήρχε μεγάλη συσχέτιση μεταξύ της στάθμης στα δεδομένα εισόδου και της τιμής εξόδου που θα μπορούσε να φτάσει ακόμα και το 0,998(Trichakis et al.,2009). Αυτό θα είχε σαν αποτέλεσμα το νευρωνικό δίκτυο να εστιάζει περισσότερο σε αυτή την παράμετρο και να υποτιμάει τις άλλες παραμέτρους. Το συνολικό βάρος αυτής της παραμέτρου θα ήταν πολύ μεγάλο, ενώ αντίθετα ελάχιστο για τις υπόλοιπες παραμέτρους και, προφανώς, θα είχαν πολύ μικρή επιρροή στην τιμή της εξόδου.

Επειδή η χρήση της χιονόπτωσης ήταν εξαρχής υπό αμφισβήτηση σχετικά με το αν συμβάλει θετικά ή αρνητικά στο αποτέλεσμα, εξετάστηκαν 2 διαφορετικές περιπτώσεις με τη μία να περιλαμβάνει τη χιονόπτωση ως είσοδο, ενώ η άλλη όχι. Σε πολλές περιπτώσεις δεν υπήρχε χιονόπτωση για πολλές συνεχόμενες μέρες. Έτσι, με το να είναι οι περισσότερες εισοδοί για το χιόνι μηδενικές, δεν ήταν εφικτό για το Νευρωνικό Δίκτυο να αφομοιώσει μια ακολουθία (pattern). Ως εκ τούτου, δημιουργήθηκαν 2 διαφορετικοί πίνακες εισόδου, 1 για κάθε περίπτωση.

Στην περίπτωση που η χιονόπτωση χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση, το κάθε σετ δεδομένων εισόδου ενός πηγαδιού περιείχε 13 παραμέτρους. Αυτές περιελάμβαναν 4 συσχετισμένες τιμές βροχόπτωσης 4 συνεχόμενων ημερών, 3 συσχετισμένες τιμές χιονόπτωσης 3 συνεχόμενων ημερών, 2 συσχετισμένες τιμές στάθμης ποταμού 2 συνεχόμενων ημερών, 1 τιμή σχετικής υγρασίας, 1 τιμή ηλιοφάνειας, 1 τιμή υδραυλικού ύψους.

Στην περίπτωση που η χιονόπτωση δεν χρησιμοποιήθηκε ως παράμετρος εισόδου, το κάθε σετ δεδομένων εισόδου ενός πηγαδιού αποτελούταν από 10 παραμέτρους. Αυτές ήταν οι ίδιες με την παραπάνω περίπτωση, πλην αυτών της χιονόπτωσης.

Η περίοδος η οποία εξετάστηκε ήταν διάρκειας 4 χρόνων και συγκεκριμένα από 2/11/2008 έως 27/10/2012 σχηματίζοντας για κάθε πηγάδι 1456 σετ δεδομένων, άρα για 1456 ημέρες. Δεδομένου ότι η προσομοίωση έγινε για 30 πηγάδια, για την περίπτωση που περιελάμβανε χιόνι δημιουργήθηκαν 30 πίνακες διαστάσεων 1456x13 για να εισαχθούν ως εισοδοί στα δίκτυα που διαμορφώθηκαν αργότερα, ενώ για την περίπτωση χωρίς το χιόνι οι πίνακες ήταν διαστάσεων 1456x10.

Το νευρωνικό δίκτυο χρειάζεται, επίσης, να δεχθεί ως είσοδο και τους επιθυμητούς στόχους της διαδικασίας. Ο επιθυμητός στόχος, όπως προαναφέρθηκε, είναι η διαφορά υδραυλικού ύψους κάθε μέρας. Συνεπώς, για κάθε πηγάδι κατασκευάστηκε πίνακας 1456x1 με την κάθε τιμή του πίνακα να αντιπροσωπεύει τη διαφορά υδραυλικού ύψους για κάθε μία από τις 1456 μέρες τις προσομοίωσης. Οι πίνακες αυτοί με τους επιθυμητούς στόχους χρησιμοποιήθηκαν αυτούσιοι και για τις 2 περιπτώσεις.

7.1.4 Διαμόρφωση του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου

Η αρχιτεκτονική ενός νευρωνικού δικτύου παίζει καθοριστικό ρόλο στην επιτυχία ή όχι μιας προσομοίωσης. Για αυτό για κάθε μία από τις δύο περιπτώσεις (με και χωρίς χιόνι) εξετάστηκαν 2 διαφορετικές αρχιτεκτονικές. Η μία αρχιτεκτονική αφορούσε 1 κρυφό επίπεδο και η άλλη αρχιτεκτονική περιείχε 2 κρυφά επίπεδα. Σύμφωνα με τον Fine (1999) ο αριθμός των κόμβων κάθε επιπέδου μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τον αριθμό των διαθέσιμων σετ δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα, ο αριθμός των συναπτικών βαρών ικανών να εκπαιδευτούν επαρκώς είναι το 1/3 του συνολικού αριθμού των σετ δεδομένων, που στην περίπτωση μας είναι 1456. Άρα ο αριθμός των συναπτικών βαρών που θα εκπαιδευτούν βγήκαν από την σχέση 6.1:

$$3 \cdot n = 1456 \Rightarrow n \cong 486 \quad (6.1)$$

Όπου:

n: τα συναπτικά βάρη που θα εκπαιδευτούν

1456: ο αριθμός των διαθέσιμων σετ δεδομένων

Ο αριθμός αυτός των συναπτικών βαρών θα είναι ο ίδιος και για τις δυο περιπτώσεις καθώς ο αριθμός των σετ δεδομένων είναι ο ίδιος.

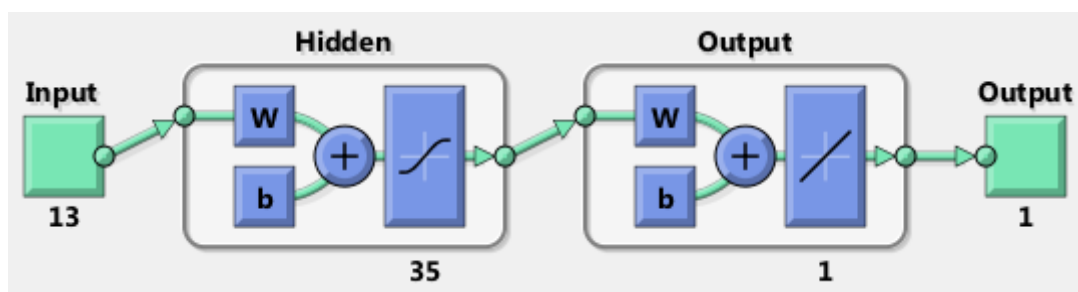
Περίπτωση με χιονόπτωση

- **1 κρυφό επίπεδο**

Ο αριθμός των παραμέτρων αποτελεί και τον αριθμό των αρχικών κόμβων που βρίσκονται στο επίπεδο εισόδου. Συνεπώς, εφόσον στην περίπτωση με τη χιονόπτωση οι παράμετροι είναι 13, τόσοι θα είναι και οι αρχικοί κόμβοι. Για την αρχιτεκτονική με το 1 κρυφό επίπεδο πρέπει να ισχύει η σχέση 6.2:

$$13 \cdot x + x = 486 \Rightarrow x = 35 \text{ κόμβοι} \quad (6.2)$$

Άρα για την περίπτωση με το χιόνι και με το ένα κρυφό επίπεδο, το κρυφό επίπεδο έχει 35 κόμβους (Εικόνα 52).



Εικόνα 52: Αρχιτεκτονική με 1 κρυφό επίπεδο, περίπτωση με χιονόπτωση.

- **2 κρυφά επίπεδα**

Ο αριθμός των αρχικών κόμβων είναι και εδώ 13. Για τα 2 κρυφά επίπεδα ισχύει η σχέση 6.3:

$$13 \cdot x + x \cdot y + y = 486 \quad (6.2)$$

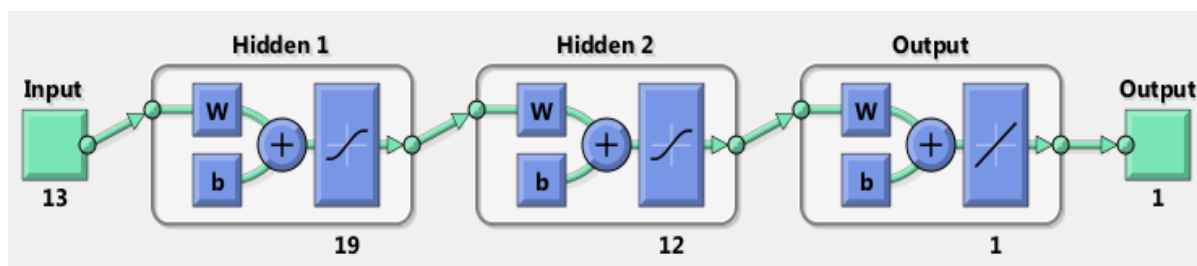
Όπου:

x: ο αριθμός των κόμβων του 1^{ου} κρυφού επιπέδου

y: ο αριθμός των κόμβων του 2^{ου} κρυφού επιπέδου

Έστω ότι $x=y$ από την σχέση 6.2 προκύπτει $x=y \cong 16$ κόμβοι. Ωστόσο, προτιμάται το επόμενο επίπεδο να έχει λιγότερους κόμβους από του προηγούμενο. Έτσι, χρησιμοποιώντας τη σχέση 6.2 και θέτοντας $x=19$ προέκυψε $y=12$.

Συνεπώς, για την περίπτωση με τη χιονόπτωση και με τα 2 κρυφά επίπεδα, το 1^ο κρυφό επίπεδο έχει 19 κόμβους και το 2^ο κρυφό επίπεδο 12 κόμβους (Εικόνα 53).



Εικόνα 53: Αρχιτεκτονική με 2 κρυφά επίπεδα, περίπτωση με χιονόπτωση.

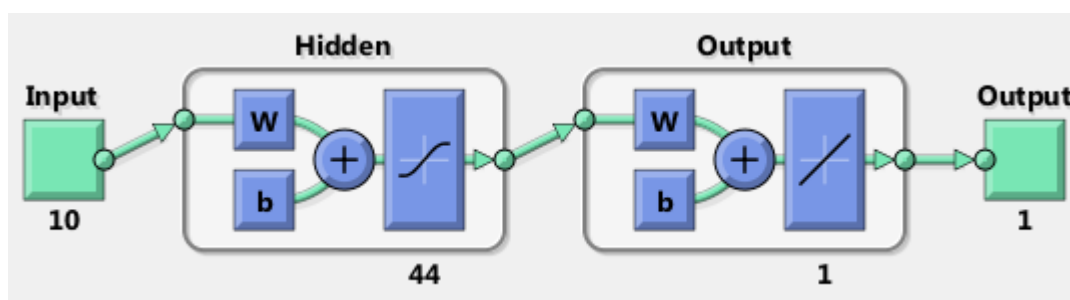
Περίπτωση χωρίς χιονόπτωση

- 1 κρυφό επίπεδο

Στην περίπτωση χωρίς τη χιονόπτωση έχουμε 10 παραμέτρους, συνεπώς 10 είναι και οι αρχικοί κόμβοι του επιπέδου εισόδου. Εδώ ισχύει η σχέση 6.3:

$$10 \cdot x + x = 486 \Rightarrow x \cong 44 \text{ κόμβοι} \quad (6.3)$$

Άρα για την περίπτωση χωρίς το χιόνι και με το 1 κρυφό επίπεδο, το κρυφό επίπεδο έχει 44 κόμβους (Εικόνα 54).



Εικόνα 54: Αρχιτεκτονική με 1 κρυφό επίπεδο, περίπτωση χωρίς χιονόπτωση.

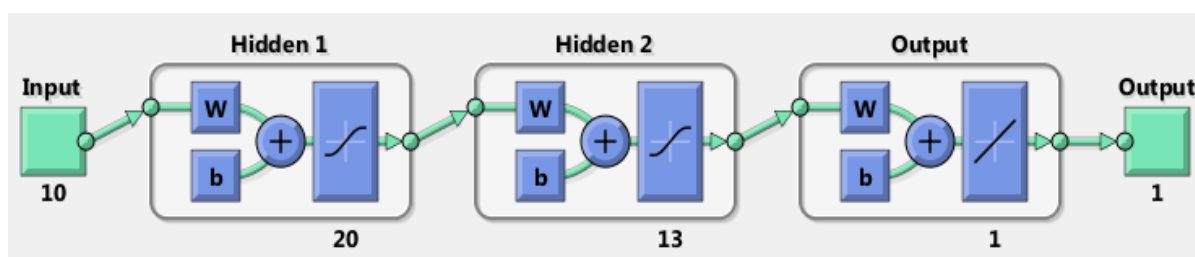
- **2 κρυφά επίπεδα**

Ο αριθμός των αρχικών κόμβων είναι και εδώ 10. Για τα 2 κρυφά επίπεδα ισχύει η σχέση 6.3:

$$10 \cdot x + x \cdot y + y = 486 \quad (6.4)$$

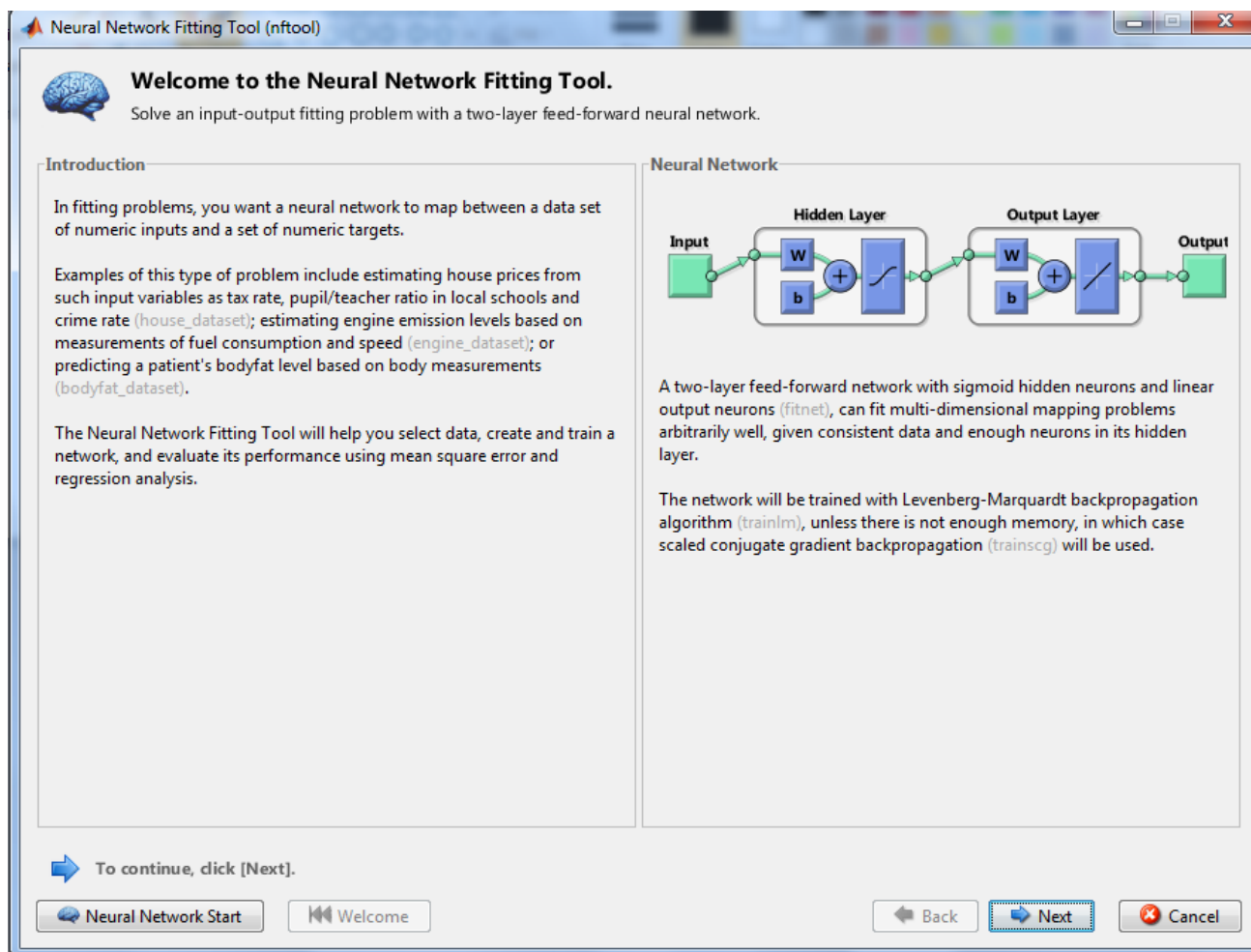
Έστω ότι $x=y$ από την σχέση 6.4 προκύπτει $x=y \cong 17$ κόμβοι. Ωστόσο, όπως προαναφέρθηκε, προτιμάται το επόμενο επίπεδο να έχει λιγότερους κόμβους από του προηγούμενο. Έτσι, χρησιμοποιώντας τη σχέση 6.4 και θέτοντας $x=20$ προέκυψε $y=13$.

Συνεπώς, για την περίπτωση χωρίς τη χιονόπτωση και με τα 2 κρυφά επίπεδα, το 1^ο κρυφό επίπεδο έχει 20 κόμβους και το 2^ο κρυφό επίπεδο 13 κόμβους (Εικόνα 55).



Εικόνα 55: Αρχιτεκτονική με 2 κρυφά επίπεδα, περίπτωση χωρίς χιονόπτωση.

Για τη δημιουργία του ΤΝΔ χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση nftool (Neural Network Fitting Tool) η οποία ανοίγει το παράθυρο της Εικόνας 56. Η συνάρτηση αυτή έχει ως προεπιλογή τη δημιουργία ενός πρόσω-τροφοδότησης νευρωνικού δικτύου με 1 κρυφό επίπεδο με σιγμοειδής κρυφούς νευρώνες και γραμμικούς νευρώνες εξόδου. Ο προεπιλεγμένος τύπος εκπαίδευσης είναι ο Levenberg-Marquardt που αποτελεί εκπαίδευση πίσω διάδοσης σφαλμάτων (back-propagation) και η προεπιλεγμένη εκτίμηση της απόδοσης γίνεται με το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (mean square error). Αυτές οι προεπιλεγμένες ρυθμίσεις ήταν και αυτές που εν τέλει χρησιμοποιήθηκαν, δηλαδή τα δίκτυα που δημιουργήθηκαν ήταν πρόσω-τροφοδότησης με εκπαίδευση μέσω αλγορίθμου Levenberg-Marquardt back propagation και εκτίμηση της απόδοσης μέσω μέσου τετραγωνικού σφάλματος.



Εικόνα 56: Παράθυρο εκκίνησης κατά την χρησιμοποίηση της συνάρτησης nftool. Λήψη από MATLAB.

Στο πρόγραμμα εισάγονται από τον χρήστη τα δεδομένα εισόδου (input data), που για κάθε ένα πηγάδι αποτελούσαν, όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, ένα πίνακα διαστάσεων 1456x13 (1456x10 για την περίπτωση χωρίς την χιονόπτωση). Επίσης, εισάγεται ο αντίστοιχος επιθυμητός στόχος που είναι ένας πίνακας διαστάσεων 1456x1.

Τα 1456 σετ δεδομένων διαχωρίζονται σε 3 κατηγορίες. Πραγματοποιήθηκαν ορισμένες δοκιμές σχετικά με τα ποσοστά των δειγμάτων που θα κατανεμηθούν σε αυτές τις κατηγορίες για την ελαχιστοποίηση του σφάλματος. Η 1^η κατηγορία προορίζει τα δεδομένα για την εκπαίδευση του δικτύου (training). Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το 80% των σετ δεδομένων. Ανάλογα με το σφάλμα που προκύπτει κατά την εκπαίδευση, το δίκτυο προσαρμόζεται κατάλληλα. Η 2^η κατηγορία προορίζει τα δεδομένα που ανήκουν σε αυτήν για την επιβεβαίωση (validation) της απόδοσης του δικτύου κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης. Το 10% επί του συνόλου των δεδομένων εντάχθηκαν σε αυτή την κατηγορία. Μέσω της επιβεβαίωσης επιτυγχάνεται η διακοπή της εκπαίδευσης σε περίπτωση που πάει να δημιουργηθεί το πρόβλημα του overfitting των δεδομένων εκπαίδευσης. Τη 3^η κατηγορία αποτελούν τα δεδομένα ελέγχου (testing). Αυτά δεν έχουν καμία επίδραση στην εκπαίδευση. Αποτελούν ένα ανεξάρτητο μέτρο ελέγχου της απόδοσης του δικτύου σε δεδομένα στα οποία το δίκτυο δεν έχει εκπαιδευτεί. Ο έλεγχος γίνεται τόσο κατά τη διάρκεια, όσο και μετά την

εκπαίδευση. Ο αριθμός των δεδομένων της 3^{ης} κατηγορίας είναι όσο το 10% του συνόλου των σετ δεδομένων. Ο διαχωρισμός των δεδομένων στις 3 κατηγορίες, έγινε με τυχαία διαλογή. Από τον χρήστη απλά επιλέχθηκε το κλάσμα δεδομένων που θα χρησιμοποιούσε κάθε κατηγορία.

Η δυνατότητα τροποποίησης του αλγορίθμου που προσφέρεται στο χρήστη επιτρέπει την αλλαγή αρκετών στοιχείων του δικτύου όπως για παράδειγμα την αλλαγή του αριθμού των επιπέδων και των κόμβων σε κάθε επίπεδο, των κλασμάτων διαχωρισμού των σετ δεδομένων στις 3 κατηγορίες, της συνάρτησης εκπαίδευσης και της συνάρτησης απόδοσης. Επίσης, μέσω της επιλογής εξαγωγής εκτελέσιμου κώδικα, έγινε εφικτή η τροποποίηση του αλγορίθμου και πιο συγκεκριμένα, η προσθήκη ενός επαναληπτικού βρόγχου έτσι ώστε με μία εκτέλεση να γίνεται τρέξιμο και για τα 30 πηγάδια.

7.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ PTC

7.2.1 Γενικές Παράμετροι Μοντέλου

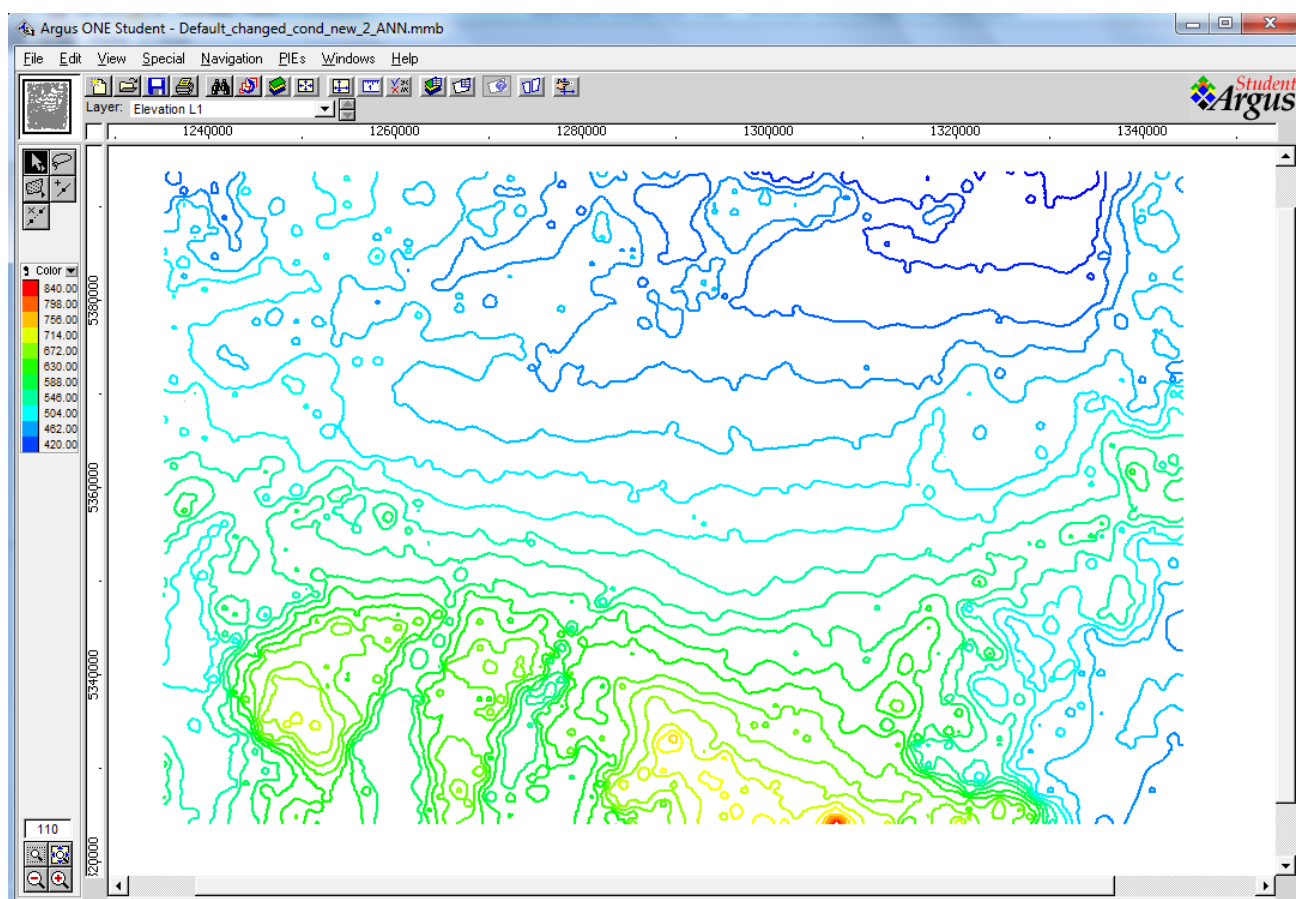
Ανοίγοντας τον πρόγραμμα Argus One, το επόμενο βήμα να ξεκινήσουμε την ανάπτυξη ενός μοντέλου PTC επιλέγοντας από το menu την καρτέλα «PIEs» και μετά την επιλογή «New PTC project». Στο παράθυρο που ανοίγει υπάρχουν 2 καρτέλες: η «General» και η «Stresses».

Στην καρτέλα «General» δίνεται η δυνατότητα για επιλογή του τύπου του πλέγματος που θα χρησιμοποιηθεί (τριγωνικό ή τετραγωνικό), το είδος του υδροφορέα (περιορισμένος ή ελεύθερος), ο αριθμός των οριζόντιων γεωλογικών επιπέδων που θα χωριστεί η περιοχή μελέτης, το κριτήριο σύγκλισης στη τιμή του υδραυλικού ύψους ώστε η κίνηση του υπόγειου νερού να θεωρηθεί ότι γίνεται σε σταθερή ροή. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε τριγωνικό πλέγμα καθώς προσφέρει μεγαλύτερη ακρίβεια από τον τετραγωνικό, ο υδροφορέας είναι ελεύθερος και υπάρχει ένα γεωλογικό στρώμα (layer). Επιπλέον αυτού του είδους το πλέγμα ανταποκρίνεται καλύτερα σε αναμοιόμορφες γεωμετρικές περιοχής μελέτης.

Στην καρτέλα «Stresses» εισάγονται παράμετροι ελέγχου της προσομοίωσης όπως είναι ο αριθμός των χρονικών περιόδων (Stresses), η χρονική διάρκεια αυτών, ο αριθμός των βημάτων που θα ακολουθηθεί σε κάθε περίοδο, ο αριθμός των βημάτων που θα παραχθούν τα αποτελέσματα, καθώς επίσης και οι εργασίες που θα εκτελεσθούν σε κάθε περίοδο. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, η προσομοίωση γίνεται για 4 περιόδους κάθε μία από τις οποίες έχει διάρκεια 90 ημερών και αντιστοιχεί σε μία εποχή (χειμώνας, άνοιξη, καλοκαίρι, φθινόπωρο).

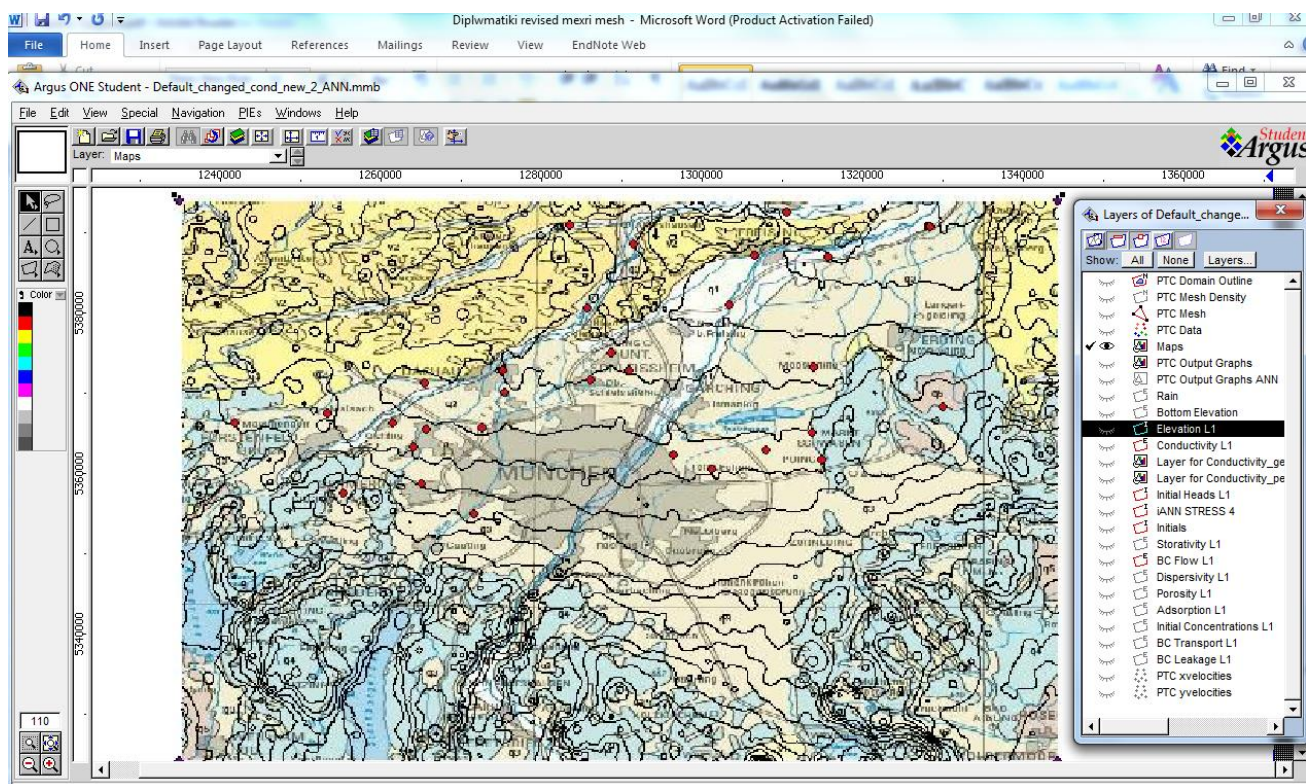
7.2.2 Εισαγωγή Ειδικών Παραμέτρων

Αρχικά, στο layer Elevation L1 έγινε η εισαγωγή ενός αρχείου shapefile με τα υψόμετρα της περιοχής μέσω την ακόλουθης σειράς επιλογών File->Import Elevation L1->Import Shapefile (Εικόνα 57). Το αρχείο αυτό περιελάμβανε τα υψόμετρα σε διάφορα σημεία, και ύστερα αφού εισήχθη στο πρόγραμμα, με γραμμική παρεμβολή δημιουργήθηκαν οι ισοϋψείς.



Εικόνα 57: Αρχείο τύπου Sharpefile με τα υψόμετρα της περιοχής μελέτης.

Στην συνέχεια, εισάγεται γεωλογικός χάρτης της περιοχής όπου απεικονίζεται και η θέση των πηγαδιών παρατήρησης που χρησιμοποιήθηκαν (Εικόνα 58). Στο layer με το όνομα «Maps» ακολουθήθηκε η σειρά File->Place Image. Ο χάρτης αυτός παρέχει πληροφορίες για τη γεωλογία της περιοχής και, κατά επέκταση, για την υδραυλική αγωγιμότητα. Η υδραυλική αγωγιμότητα έχει την ίδια τιμή στην x και την y διεύθυνση, ενώ στην διεύθυνση z ισούται μόνο με το 10% αυτών. Επίσης, στα σημεία που βρίσκονται τα πηγάδια παρατήρησης, εισήχθησαν σημειακά αρχικές συνθήκες στο layer «Initial Heads L1». Τα διαθέσιμα δεδομένα για τις μετρήσεις των πηγαδιών ξεκινούσαν τον Νοέμβριο του 2008. Έτσι, ο μέσος όρος του υδραυλικού ύψους του κάθε πηγαδιού για τον μήνα Νοέμβριο του 2008 εισήχθη ως αρχική συνθήκη (Πίνακας 7.2) και ο Δεκέμβριος του 2008 έγινε η αρχή της προσομοίωσης που, όπως προαναφέρθηκε, έγινε για τις 4 εποχές ενός έτους. Πιο συγκεκριμένα, το 1^ο Stress είναι για την περίοδο Δεκέμβριος 2008 μέχρι και Φεβρουάριο 2009, το 2^ο από Μάρτιο του 2009 έως και Μάιο του 2009, το 3^ο από Ιούνιο του 2009 ως και τον Αύγουστο του 2009 και το 4^ο και τελευταίο από Σεπτέμβριο του 2009 έως και Νοέμβριο του 2009.



Εικόνα 58: Γεωλογικός χάρτης της περιοχής μελέτης με τα πηγάδια να συμβολίζονται με τις κόκκινες κουκίδες Πηγή: Γεωλογική Υπηρεσία Βαυαρίας (bayerische geologisches landesamt).

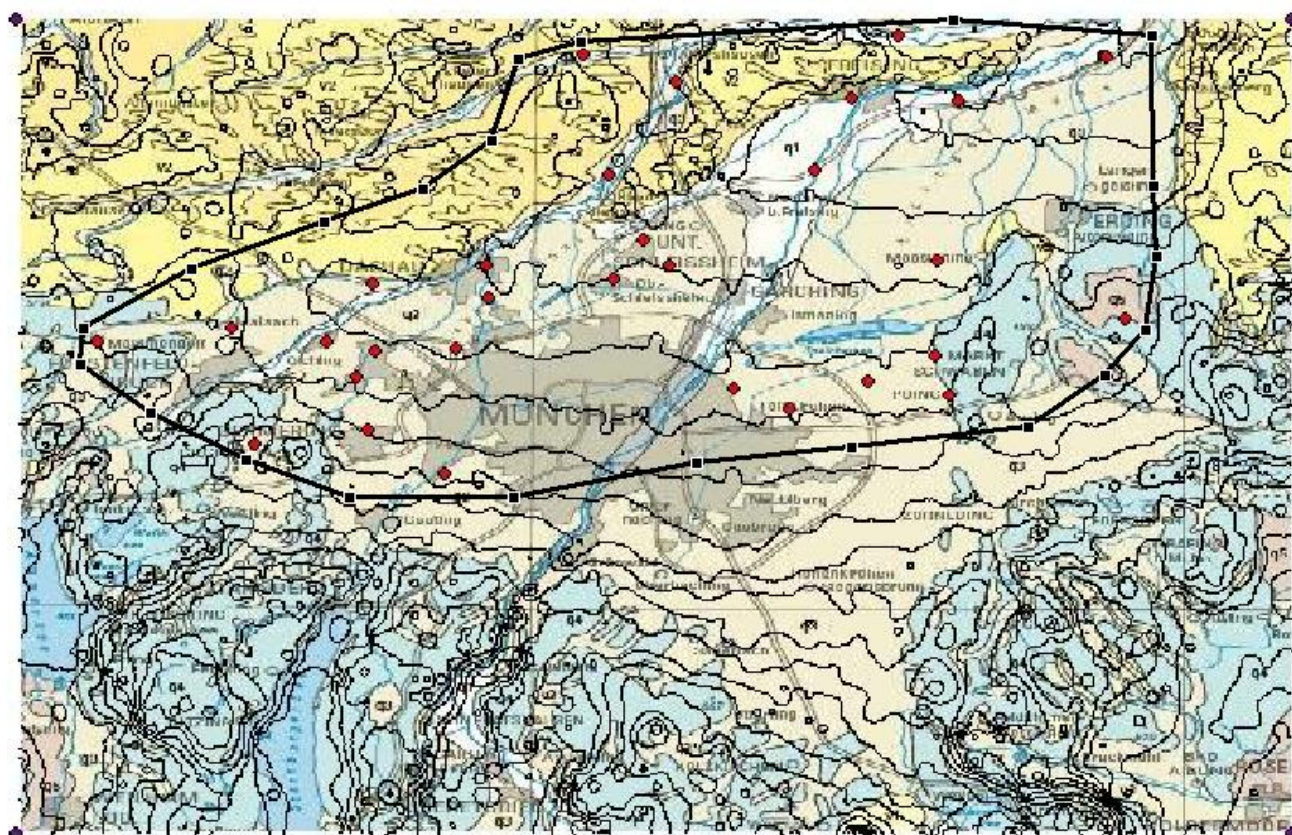
Και οι 2 χάρτες είναι προσαρμοσμένοι καταλλήλως έτσι ώστε να αλληλοεπικαλύπτονται.

Πίνακας 7.2: Αρχικά υδραυλικά ύψη. Τα υδραυλικά ύψη αυτά αποτελούν τον μέσο όρο των ημερήσιων μετρήσεων του Νοεμβρίου του 2008. Πηγή: Bavarian State Office for Environment.

Νέα αρίθμηση	Επίσημη Αρίθμηση	Μ.Ο. Υδραυλικού Ύψους Νοέμβριος 2008-Αρχικά Υδραυλικά ύψη, m	Νέα αρίθμηση	Επίσημη Αρίθμηση	Μ.Ο. Υδραυλικού Ύψους Νοέμβριος 2008-Αρχικά Υδραυλικά ύψη, m
1	1	432,277	16	24	529,969
2	2	482,537	17	25	513,464
3	3	488,409	18	26	513,328
4	4	471,635	19	27	505,560
5	5	498,501	20	28	499,652
6	7	444,468	21	29	544,392
7	8	448,209	22	31	418,828
8	10	453,071	23	33	501,813
9	12	457,918	24	34	469,797

10	18	530,263		25	36	474,899
11	19	442,303		26	37	531,534
12	20	467,661		27	38	511,213
13	21	498,550		28	39	476,108
14	22	509,685		29	42	506,667
15	23	503,608		30	48	424,910

Στο layer «PTC Domain Outline» προσδιορίστηκαν τα πλαίσια της περιοχής μελέτης. Αυτό πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με την υποκειμενική κρίση του χρήστη δημιουργώντας ένα πολύγωνο που περιέχει όλα τα πηγάδια παρατήρησης (Εικόνα 59).



Εικόνα 59: Όρια περιοχής μελέτης στο PTC.

Όσο για τον κάναβο, λόγω της έκδοσης για σπουδαστές (student version) που χρησιμοποιήθηκε, δεν ήταν δυνατή η δημιουργία παραπάνω από 2000 στοιχεία. Για αυτό η πυκνότητα πλέγματος ορίστηκε στα 2900 που ήταν η μέγιστη δυνατή για τη δημιουργία όσο το δυνατόν περισσότερων τριγώνων ικανοποιώντας ταυτόχρονα τον προαναφερθέντα περιορισμό. Στην συνέχεια, ο κάναβος δημιουργήθηκε στο layer «PTC Mesh» μέσω του εργαλείου magic wand.

Μια ακόμα παράμετρος που είναι απαραίτητη για την προσομοίωση είναι το νερό της βροχής που διηθείται μέσω του εδάφους στον υπόγειο υδροφόρο. Αντιπροσωπευτικός συντελεστής διήθησης της περιοχής επιλέχθηκε το 30% της βροχόπτωσης. Η διήθηση εισήχθηκε σε μέτρα ανά μέρα στο Layer «Rain». Τα δεδομένα για την βροχόπτωση που χρησιμοποιήθηκαν ήταν από τον μετεωρολογικό σταθμό του Μονάχου (Munchen-Flughafen) και έγιναν διαθέσιμα μέσω της Γερμανικής Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (Deutsche Wetterdienst-DWD). Η διήθηση, καθώς και άλλα στοιχεία για την βροχόπτωση σε κάθε περίοδο, βρίσκονται στον Πίνακα 7.3.

Πίνακας 7.3: Βροχόπτωση και διήθηση για κάθε περίοδο. Πηγή: Γερμανική Μετεωρολογική υπηρεσία, DWD (Deutscher Wetterdienst).

Περίοδος (Stress)	Σύνολο βροχόπτωσης, mm	Σύνολο βροχόπτωσης, m	Μέση βροχόπτωση ανά μέρα (m)	Διήθηση (m/d)
1	87,2	0,0872	0,0009689	0,0002907
2	192,8	0,1928	0,0021422	0,0006427
3	321	0,321	0,0035667	0,0010700
4	132,1	0,1321	0,0014678	0,0004403

Το πορώδες της περιοχής ορίστηκε 0,3 και εισήχθη στο layer «Porosity L1». Η αποθηκευτικότητα ορίστηκε 0,0001 και εισήχθη στο layer «Storativity L1».

7.3.3 Βαθμονόμηση

Κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης ο στόχος είναι η ελάχιστη δυνατή διαφορά του υδραυλικού ύψους μεταξύ των μετρημένων, στο πεδίο, τιμών και των αποτελεσμάτων του μοντέλου για την ίδια χρονική περίοδο. Επιλέχθηκε η χρήση οριακών συνθηκών 1^{ου} και 2^{ου} τύπου. Επρόκειτο για ένα ιδιαίτερα πολύπλοκο πρόβλημα καθώς η εξεταζόμενη περιοχή καταλάμβανε μια πολύ μεγάλη έκταση (περίπου 2400km²) και, επίσης, δεν υπήρχαν δεδομένα για τις αντλήσεις στην περιοχή μελέτης.

Η βαθμονόμηση έγινε χειροκίνητα με τη μέθοδο δοκιμής και σφάλματος και χρειάστηκε να γίνει μεγάλος αριθμός δοκιμών προκειμένου να προκύψει ένα ικανοποιητικό αποτέλεσμα. Σε κάθε δοκιμή, ανάλογα με το σφάλμα που υπήρχε, γίνονταν και κατάλληλες αλλαγές. Το υδραυλικό ύψος 5 πηγαδιών που βρίσκονταν κοντά στα όρια της περιοχής χρησιμοποιήθηκαν ως συνθήκες 1^{ου} τύπου (σταθερού υδραυλικού ύψους). Συνθήκες 2^{ου} τύπου (σταθερή ροή) χρησιμοποιήθηκαν τόσο στα όρια της περιοχής σαν κλειστά πλαίσια (είτε με θετική είτε αρνητική παροχή), όσο και εντός της περιοχής ως σημειακές αντλήσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

8.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

Ύστερα από κάθε προσομοίωση, το κάθε νευρωνικό δίκτυο εκτός από τις ζητούμενες εξόδους παρέχει στο χρήστη και 3 είδη σφάλματος προκειμένου να αξιολογήσει πόσο ικανοποιητικά ήταν τα αποτελέσματα. Πρόκειται για το σφάλμα εκπαίδευσης, το σφάλμα επιβεβαίωσης και το σφάλμα ελέγχου. Θα παρατεθούν παρακάτω πίνακες με το κάθε είδος σφάλματος και για τα 30 πηγάδια, καθώς και μέσοι όροι αυτών. Στον Πίνακα 8.1 βρίσκεται η επίδοση για την περίπτωση με την χιονόπτωση και το 1 κρυφό επίπεδο, στον Πίνακα 8.2 η περίπτωση με την χιονόπτωση και τα 2 κρυφά επίπεδα, στον πίνακα 8.3 η περίπτωση χωρίς την χιονόπτωση και με την αρχιτεκτονική του 1^{ος} κρυφού επιπέδου και , τέλος, στον Πίνακα 8.3 η περίπτωση χωρίς τη χιονόπτωση όπου χρησιμοποιήθηκαν 2 κρυφά επίπεδα.

Πίνακας 8.1: Επίδοση Νευρωνικού Δικτύου που χρησιμοποίησε την χιονόπτωση ως είσοδο και η αρχιτεκτονική του περιλαμβάνει 1 κρυφό επίπεδο.

Επίσημη Αρίθμηση	Νέα Αρίθμηση	Σφάλμα Εκπαίδευσης	Σφάλμα Ελέγχου	Σφάλμα Επιβεβαίωσης	Μ.Ο. Σφαλμάτων
14114	1	3,25E-04	6,75E-04	3,55E-04	4,52E-04
14116	2	5,12E-04	9,94E-04	6,90E-04	7,32E-04
14117	3	8,20E-04	6,24E-04	6,60E-04	7,01E-04
14118	4	9,86E-04	8,41E-04	8,89E-04	9,05E-04
14126	5	4,98E-04	5,92E-04	4,61E-04	5,17E-04
14134	6	5,39E-04	4,43E-04	4,90E-04	4,91E-04
14135	7	1,66E-03	2,36E-03	2,26E-03	2,09E-03
14138	8	1,43E-03	1,17E-03	1,73E-03	1,44E-03
14140	9	6,35E-04	6,03E-04	9,76E-04	7,38E-04
16008	10	8,38E-04	7,23E-04	1,17E-03	9,10E-04
16117	11	1,56E-03	1,74E-03	1,83E-03	1,71E-03
16118	12	7,04E-04	7,07E-04	8,99E-04	7,70E-04
16247	13	8,58E-04	7,84E-04	1,09E-03	9,12E-04
16144	14	2,67E-03	3,12E-03	3,22E-03	3,00E-03
16168	15	1,61E-03	2,11E-03	2,57E-03	2,10E-03
16184	16	8,81E-04	1,32E-03	1,71E-03	1,30E-03
16194	17	1,41E-03	1,87E-03	2,35E-03	1,88E-03
16195	18	8,75E-04	1,19E-03	1,47E-03	1,18E-03
16196	19	8,88E-04	1,22E-03	1,48E-03	1,20E-03
16198	20	8,56E-04	1,15E-03	1,42E-03	1,14E-03
16212	21	1,12E-03	1,41E-03	1,99E-03	1,51E-03
16228	22	7,49E-04	1,03E-03	1,36E-03	1,05E-03
16244	23	9,71E-04	1,33E-03	1,71E-03	1,34E-03
16245	24	9,12E-04	1,18E-03	1,47E-03	1,19E-03
16257	25	7,25E-04	9,79E-04	1,25E-03	9,84E-04

16267	26	8,94E-04	1,13E-03	1,43E-03	1,15E-03
16268	27	7,33E-04	9,44E-04	1,18E-03	9,53E-04
16269	28	6,73E-04	8,94E-04	1,12E-03	8,94E-04
16277	29	7,12E-04	9,13E-04	1,06E-03	8,94E-04
16296	30	1,33E-03	1,65E-03	1,62E-03	1,53E-03
Μ.Ο. Σφαλμάτων από όλα τα πηγάδια:					1,19E-03

Πίνακας 8.2: Επίδοση Νευρωνικού Δικτύου που χρησιμοποίησε την χιονόπτωση ως είσοδο και η αρχιτεκτονική του περιλαμβάνει 2 κρυφά επίπεδα.

Επίσημη Αρίθμηση	Νέα Αρίθμηση	Σφάλμα Εκπαίδευσης	Σφάλμα Ελέγχου	Σφάλμα Επιβεβαίωσης	Μ.Ο. Σφαλμάτων
14114	1	3,73E-04	3,67E-04	3,44E-04	3,61E-04
14116	2	6,08E-04	4,18E-04	5,68E-04	5,31E-04
14117	3	8,11E-04	5,77E-04	9,23E-04	7,70E-04
14118	4	8,28E-04	5,98E-04	9,71E-04	7,99E-04
14126	5	5,05E-04	3,69E-04	6,17E-04	4,97E-04
14134	6	6,45E-04	5,44E-04	5,54E-04	5,81E-04
14135	7	2,00E-03	1,73E-03	2,43E-03	2,06E-03
14138	8	1,11E-03	1,05E-03	1,62E-03	1,26E-03
14140	9	6,55E-04	5,63E-04	1,20E-03	8,07E-04
16008	10	7,08E-04	5,33E-04	1,08E-03	7,75E-04
16117	11	1,42E-03	1,62E-03	1,80E-03	1,61E-03
16118	12	7,14E-04	6,71E-04	1,13E-03	8,40E-04
16247	13	8,11E-04	7,24E-04	1,12E-03	8,84E-04
16144	14	1,85E-03	2,95E-03	3,41E-03	2,73E-03
16168	15	1,39E-03	2,82E-03	1,65E-03	1,95E-03
16184	16	8,79E-04	1,99E-03	1,16E-03	1,34E-03
16194	17	1,36E-03	2,52E-03	1,40E-03	1,76E-03
16195	18	9,69E-04	2,11E-03	1,28E-03	1,45E-03
16196	19	8,59E-04	1,95E-03	1,12E-03	1,31E-03
16198	20	7,94E-04	1,82E-03	9,98E-04	1,21E-03
16212	21	1,08E-03	2,08E-03	1,21E-03	1,46E-03
16228	22	7,24E-04	1,67E-03	9,36E-04	1,11E-03
16244	23	9,58E-04	1,80E-03	1,26E-03	1,34E-03
16245	24	9,05E-04	1,72E-03	1,11E-03	1,25E-03
16257	25	6,66E-04	1,52E-03	8,57E-04	1,01E-03
16267	26	8,81E-04	1,64E-03	1,07E-03	1,20E-03
16268	27	7,05E-04	1,46E-03	8,47E-04	1,00E-03
16269	28	6,62E-04	1,42E-03	8,36E-04	9,74E-04
16277	29	7,06E-04	1,49E-03	8,36E-04	1,01E-03
16296	30	1,22E-03	1,90E-03	1,42E-03	1,51E-03
Μ.Ο. Σφαλμάτων από όλα τα πηγάδια:					1,18E-03

Πίνακας 8.3: Επίδοση Νευρωνικού Δικτύου που δεν χρησιμοποίησε τη χιονόπτωση ως είσοδο και η αρχιτεκτονική του περιλαμβάνει 1 κρυφό επίπεδο.

Επίσημη Αρίθμηση	Νέα Αρίθμηση	Σφάλμα Εκπαίδευσης	Σφάλμα Ελέγχου	Σφάλμα Επιβεβαίωσης	Μ.Ο. Σφαλμάτων
14114	1	4,01E-04	4,65E-04	4,65E-04	4,44E-04
14116	2	5,20E-04	7,93E-04	3,90E-04	5,68E-04
14117	3	7,31E-04	6,67E-04	5,18E-04	6,39E-04
14118	4	9,23E-04	7,17E-04	6,83E-04	7,75E-04
14126	5	5,29E-04	4,62E-04	4,31E-04	4,74E-04
14134	6	4,60E-04	3,97E-04	4,44E-04	4,33E-04
14135	7	1,94E-03	1,44E-03	1,48E-03	1,62E-03
14138	8	1,33E-03	1,06E-03	1,44E-03	1,28E-03
14140	9	6,87E-04	7,58E-04	6,51E-04	6,99E-04
16008	10	6,94E-04	6,88E-04	7,65E-04	7,16E-04
16117	11	1,48E-03	1,22E-03	1,31E-03	1,34E-03
16118	12	7,15E-04	6,93E-04	7,86E-04	7,31E-04
16247	13	8,92E-04	8,31E-04	1,01E-03	9,12E-04
16144	14	1,82E-03	1,60E-03	2,79E-03	2,07E-03
16168	15	1,90E-03	1,94E-03	1,65E-03	1,83E-03
16184	16	1,08E-03	7,64E-04	8,23E-04	8,88E-04
16194	17	1,90E-03	2,06E-03	1,33E-03	1,76E-03
16195	18	1,03E-03	7,09E-04	7,19E-04	8,20E-04
16196	19	1,04E-03	7,44E-04	7,55E-04	8,46E-04
16198	20	9,93E-04	7,07E-04	7,05E-04	8,02E-04
16212	21	1,19E-03	9,48E-04	8,98E-04	1,01E-03
16228	22	9,10E-04	6,47E-04	6,88E-04	7,48E-04
16244	23	1,15E-03	8,48E-04	1,03E-03	1,01E-03
16245	24	1,06E-03	7,96E-04	9,09E-04	9,23E-04
16257	25	8,10E-04	5,67E-04	6,54E-04	6,77E-04
16267	26	9,88E-04	7,42E-04	8,27E-04	8,52E-04
16268	27	8,30E-04	5,87E-04	6,70E-04	6,96E-04
16269	28	8,52E-04	6,22E-04	7,06E-04	7,26E-04
16277	29	8,37E-04	6,27E-04	7,61E-04	7,42E-04
16296	30	1,17E-03	1,08E-03	1,03E-03	1,09E-03
Μ.Ο. Σφαλμάτων από όλα τα πηγάδια:					9,38E-04

Πίνακας 8.4: Επίδοση Νευρωνικού Δικτύου που δεν χρησιμοποίησε την χιονόπτωση ως είσοδο και η αρχιτεκτονική του περιλαμβάνει 2 κρυφά επίπεδα.

Επίσημη Αρίθμηση	Νέα Αρίθμηση	Σφάλμα Εκπαίδευσης	Σφάλμα Ελέγχου	Σφάλμα Επιβεβαίωσης	Μ.Ο. Σφαλμάτων
14114	1	3,46E-04	4,89E-04	5,21E-04	4,52E-04

14116	2	6,20E-04	4,46E-04	1,22E-03	7,62E-04
14117	3	7,42E-04	6,21E-04	7,32E-04	6,98E-04
14118	4	8,32E-04	6,77E-04	7,87E-04	7,66E-04
14126	5	4,94E-04	3,93E-04	4,97E-04	4,61E-04
14134	6	4,78E-04	4,73E-04	4,70E-04	4,74E-04
14135	7	1,88E-03	1,70E-03	1,95E-03	1,85E-03
14138	8	1,26E-03	9,84E-04	1,17E-03	1,14E-03
14140	9	7,38E-04	4,43E-04	7,71E-04	6,51E-04
16008	10	7,75E-04	4,93E-04	7,60E-04	6,76E-04
16117	11	1,28E-03	9,94E-04	1,28E-03	1,19E-03
16118	12	7,33E-04	4,46E-04	9,68E-04	7,16E-04
16247	13	7,82E-04	5,15E-04	9,90E-04	7,62E-04
16144	14	1,19E-03	7,80E-04	1,97E-03	1,31E-03
16168	15	1,59E-03	1,12E-03	2,11E-03	1,61E-03
16184	16	9,91E-04	4,92E-04	1,70E-03	1,06E-03
16194	17	1,60E-03	1,17E-03	2,00E-03	1,59E-03
16195	18	9,45E-04	5,15E-04	1,40E-03	9,55E-04
16196	19	9,82E-04	5,49E-04	1,51E-03	1,01E-03
16198	20	9,48E-04	5,48E-04	1,40E-03	9,66E-04
16212	21	1,13E-03	6,75E-04	1,45E-03	1,09E-03
16228	22	8,60E-04	4,54E-04	1,27E-03	8,61E-04
16244	23	1,00E-03	5,30E-04	1,45E-03	9,95E-04
16245	24	9,62E-04	5,51E-04	1,36E-03	9,58E-04
16257	25	7,68E-04	4,13E-04	1,12E-03	7,66E-04
16267	26	9,73E-04	5,99E-04	1,33E-03	9,68E-04
16268	27	8,21E-04	5,01E-04	1,15E-03	8,24E-04
16269	28	7,64E-04	4,50E-04	1,07E-03	7,60E-04
16277	29	7,52E-04	4,12E-04	1,16E-03	7,74E-04
16296	30	1,19E-03	9,73E-04	1,50E-03	1,22E-03
Μ.Ο. Σφαλμάτων από όλα τα πηγάδια:					9,44E-04

Στον συγκεντρωτικό Πίνακα 8.5 καταγράφεται, πέρα από το μέσο σφάλμα, το μικρότερο και το μεγαλύτερο σφάλμα που παρατηρήθηκε στα πηγάδια.

Πίνακας 8.5: Μέσο, μικρότερο και μεγαλύτερο mse σφάλμα για κάθε περίπτωση προσομοίωσης.

	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΧΙΟΝΟΠΤΩΣΗ		ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΧΩΡΙΣ ΧΙΟΝΟΠΤΩΣΗ	
	1 κρυφό επίπεδο	2 κρυφά επίπεδα	1 κρυφό επίπεδο	2 κρυφά επίπεδα
Μέσο σφάλμα	1,19E-03	1,18E-03	9,38E-04	9,44E-04
Ελάχιστο σφάλμα	4,52E-04	3,61E-04	4,44E-04	4,52E-04
Μέγιστο σφάλμα	3,00E-03	2,73E-03	1,62E-03	1,85E-03

Τα αποτελέσματα του πίνακα 8.5 επιβεβαίωσαν την αρχική εκτίμηση ότι η χιονόπτωση δεν βοηθάει στην καλύτερη επίδοση του νευρωνικού δικτύου. Οι περιπτώσεις που δεν περιελάμβαναν την χιονόπτωση είχαν αρκετά καλύτερα αποτελέσματα. Όσον αφορά τις 2 διαφορετικές αρχιτεκτονικές για την προσομοίωση χωρίς την χιονόπτωση, παρατηρήθηκε ότι η αρχιτεκτονική με το 1 κρυφό επίπεδο είχε ελαφρώς καλύτερο αποτέλεσμα με μέσο σφάλμα $9,38 \cdot 10^{-4}$ έναντι μέσου σφάλματος $9,44 \cdot 10^{-4}$ που είχε η αρχιτεκτονική με τα 2 κρυφά επίπεδα. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι σε ενδεχόμενη επανάληψη της προσομοίωσης, τα αποτελέσματα και το σφάλμα σε κάθε περίπτωση θα ήταν διαφορετικό. Αυτό οφείλεται στη στοχαστικότητα του μοντέλου και πιο συγκεκριμένα στο γεγονός ότι ο διαχωρισμός των σετ δεδομένων για την εκπαίδευση, την επιβεβαίωση και τον έλεγχο γίνεται με τυχαία διαλογή. Η διαφορά μεταξύ των περιπτώσεων με την χιονόπτωση και αυτής χωρίς την χιονόπτωση είναι τέτοια που επιτρέπει το συμπέρασμα ότι ο συνυπολογισμός της χιονόπτωσης δεν βοηθάει. Ωστόσο, όταν δεν χρησιμοποιείται η χιονόπτωση τα αποτελέσματα για τις 2 αρχιτεκτονικές είναι αρκετά κοντά με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η ακριβής εκτίμηση σχετικά με το ποια αρχιτεκτονική δίνει καλύτερα αποτελέσματα. Για αυτό θα παρουσιαστούν διαγράμματα και για τις 2 αρχιτεκτονικές που δεν συνυπολόγισαν την χιονόπτωση.

Για την καλύτερη παρουσίαση των αποτελεσμάτων δημιουργήθηκαν 3 ομάδες πηγαδιών ανάλογα με το σφάλμα εκπαίδευσης. Η ομάδα 1 περιελάμβανε τα πηγάδια με το υψηλότερο σφάλμα εκπαίδευσης, δηλαδή την χειρότερη επίδοση, η ομάδα 2 τα πηγάδια με χαμηλότερο σφάλμα εκπαίδευσης από αυτό των πηγαδιών της ομάδας 1 και, τέλος, τα πηγάδια με το χαμηλότερο σφάλμα εκπαίδευσης, δηλαδή την καλύτερη επίδοση, σχημάτισαν την ομάδα 3. Για κάθε ομάδα επιλέχθηκε ένα αντιπροσωπευτικό πηγάδι.

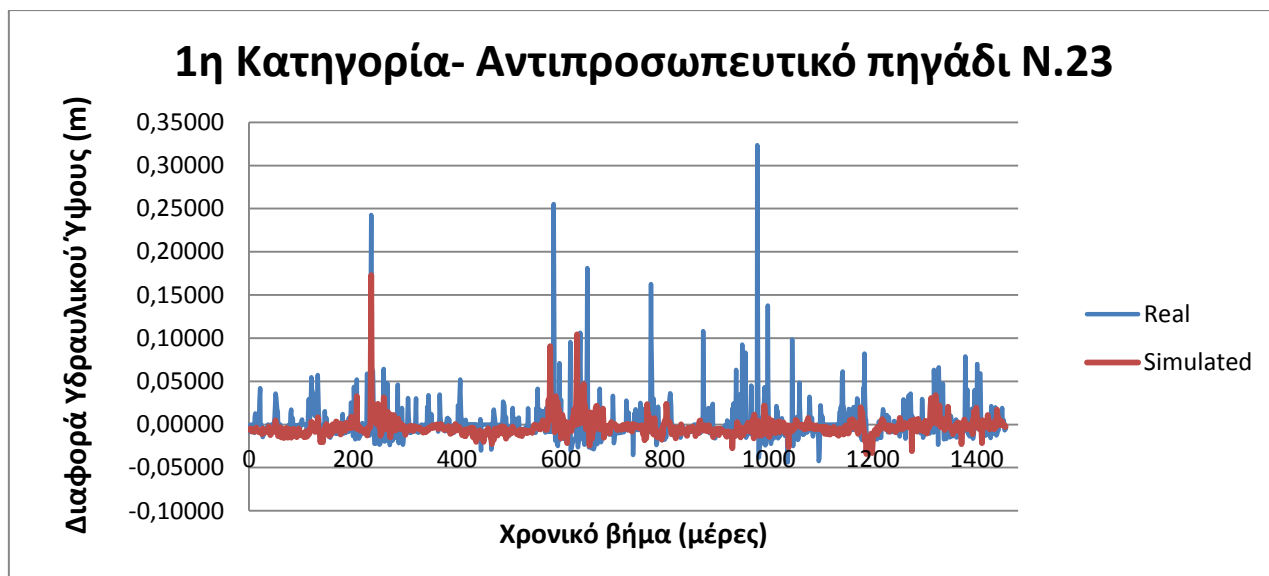
Παρουσίαση αποτελεσμάτων περίπτωσης χωρίς την χιονόπτωση και με τα 2 κρυφά επίπεδα

Τα αντιπροσωπευτικά πηγάδια που επιλέχθηκαν ήταν για την ομάδα 1 το πηγάδι 23, για την ομάδα 2 το πηγάδι 25 και για την ομάδα 3 το πηγάδι 6. Για τα αντιπροσωπευτικά πηγάδια στον πίνακα 8.6 παρουσιάζονται οι ελάχιστες, μέσες και μέγιστες διαφορές μεταξύ των παρατηρούμενων στο πεδίο διαφορών υδραυλικού ύψους και αυτών που προέκυψαν από την προσομοίωση. Στην Εικόνα 60 υπάρχουν διαγράμματα με τις πραγματικές και τις προσομοιωμένες διαφορές υδραυλικού ύψους (Hydraulic Head Change, HHC).

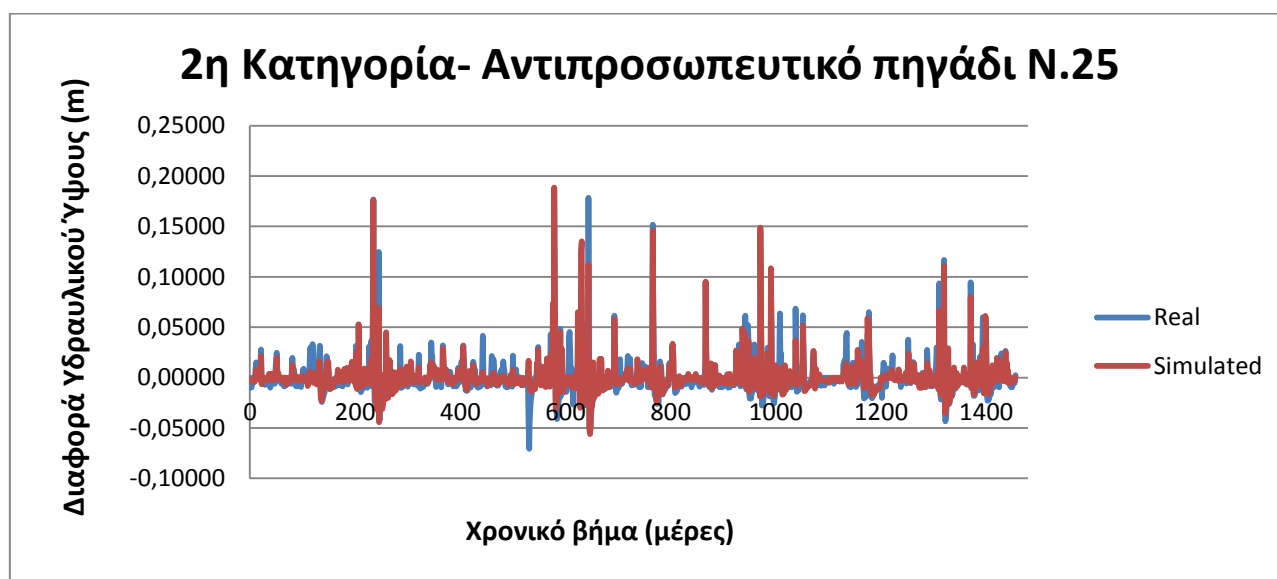
Πίνακας 8.6: Απόλυτη διαφορά πραγματικής και προσομοιωμένης διαφοράς υδραυλικού ύψους(HHC). (Περίπτωση χωρίς χιονόπτωση-2 κρυφά επίπεδα).

Απόλυτη διαφορά πραγματικής από προσομοιωμένη διαφορά υδραυλικού ύψους.	Αντιπροσωπευτικά πηγάδια		
	Ομάδα 1 (πηγάδι N.23)	Ομάδα 2 (πηγάδι N.25)	Ομάδα 3 (πηγάδι N.6)
Μέση	1,30E-02	5,57E-03	6,38E-03
Ελάχιστη	1,65E-06	3,09E-06	6,44E-06
Μέγιστη	3,20E-01	6,95E-02	1,05E-01

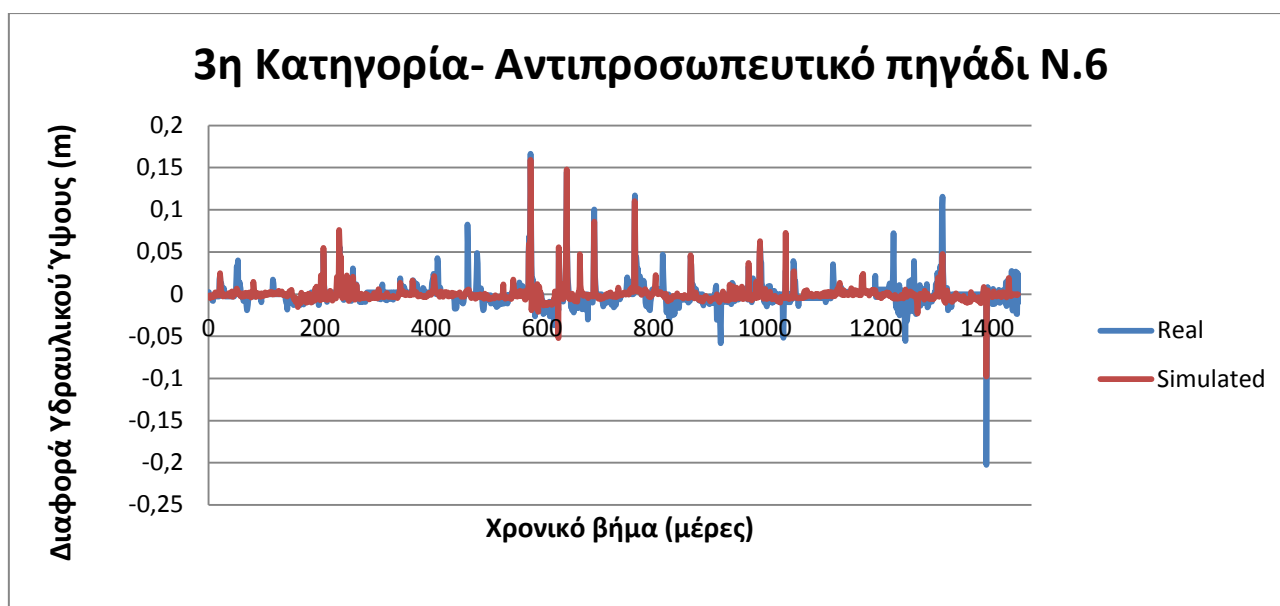
α)



β)



γ)

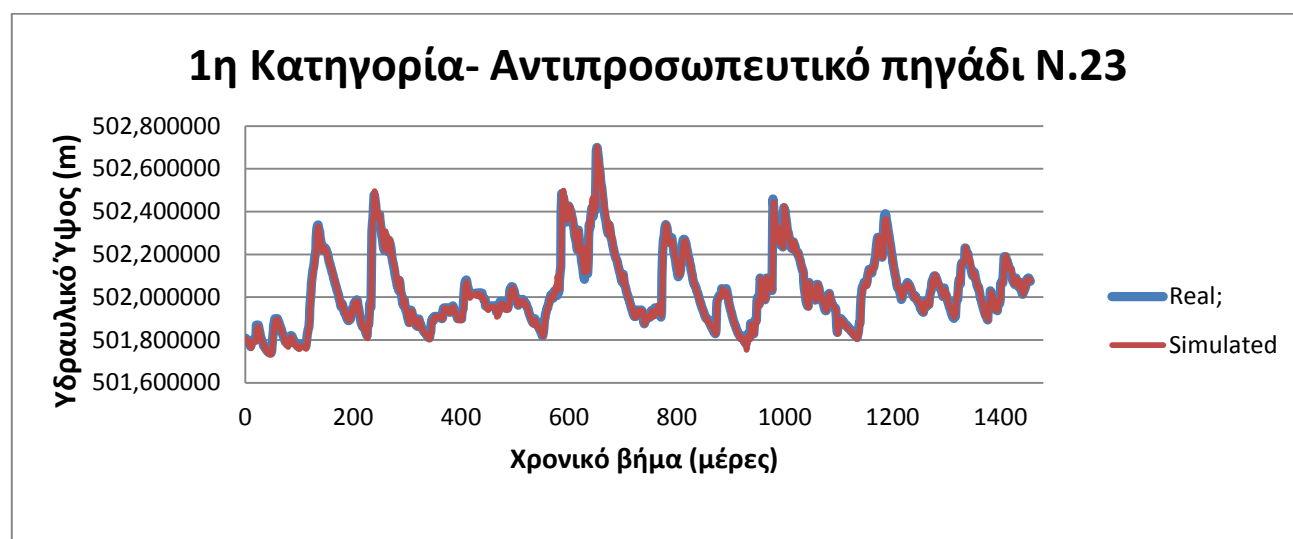


Εικόνα 60: Η πραγματική και η προσομοιωμένη Διαφορά Υδραυλικού Ύψους για τα αντιπροσωπευτικά πηγάδια (Περίπτωση χωρίς χιονόπτωση-2 κρυφά επίπεδα).

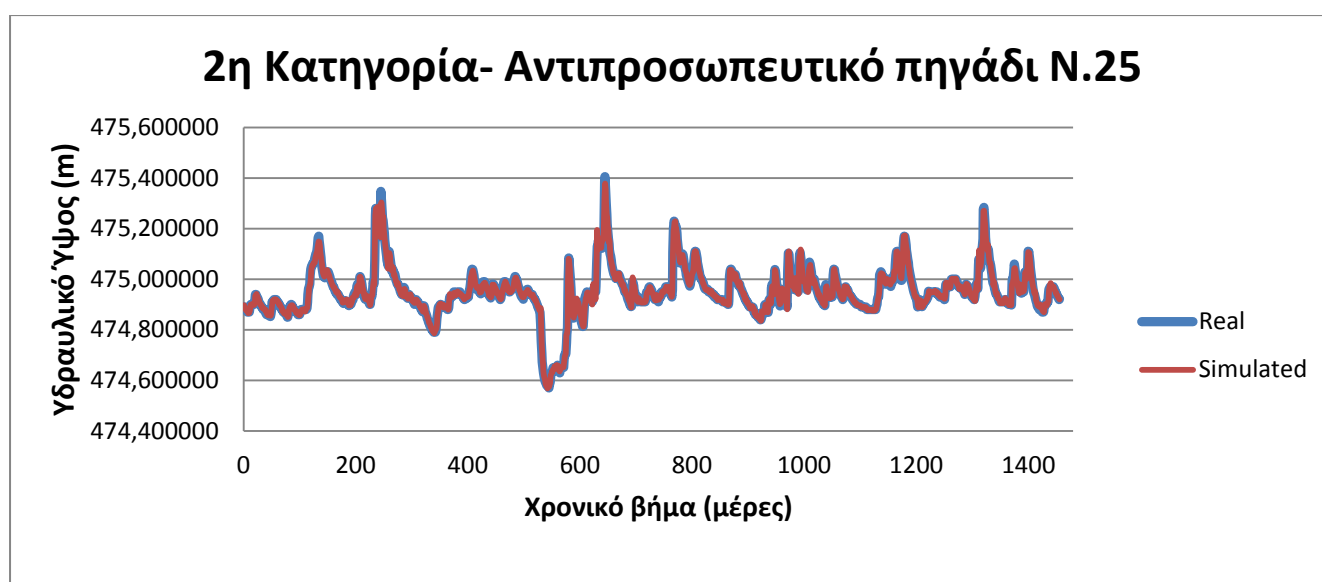
Παρατηρείται ότι η γενική τάση της διαφοράς υδραυλικού ύψους περιγράφεται αρκετά καλά, ειδικά στις ομάδες 2 και 3 αν και υπάρχουν κάποιες υπερεκτιμήσεις και υποεκτιμήσεις. Ορισμένες απότομες αλλαγές που οφείλονται είτε στην ξαφνική διακοπή ή αλλαγή μιας άντλησης, είτε σε ακραία καιρικά φαινόμενα (π.χ. παρατεταμένη ξηρασία, ασυνήθιστα μεγάλη ποσότητα βροχόπτωσης) δεν προσομοιώθηκαν καλά στα πηγάδια της ομάδας 1. Στις άλλες ομάδες οι απότομες αυτές αλλαγές προσομοιώθηκαν καλύτερα.

Στην Εικόνα 61 παρατίθενται διαγράμματα με το πραγματικό και το προσομοιωμένο υδραυλικό ύψος (Hydraulic Head, HH). Το προσομοιωμένο Υδραυλικό Ύψος προέκυψε προσθέτοντας την προσομοιωμένη διαφορά στάθμης στην πραγματική στάθμη της προηγούμενης μέρας.

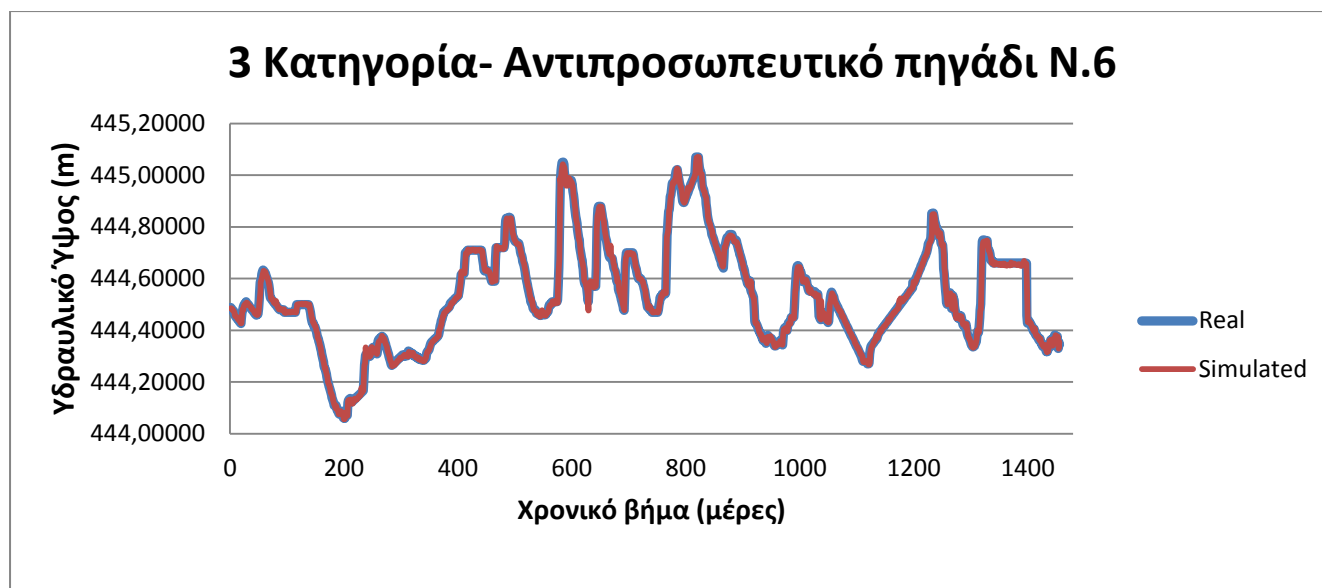
α)



β)



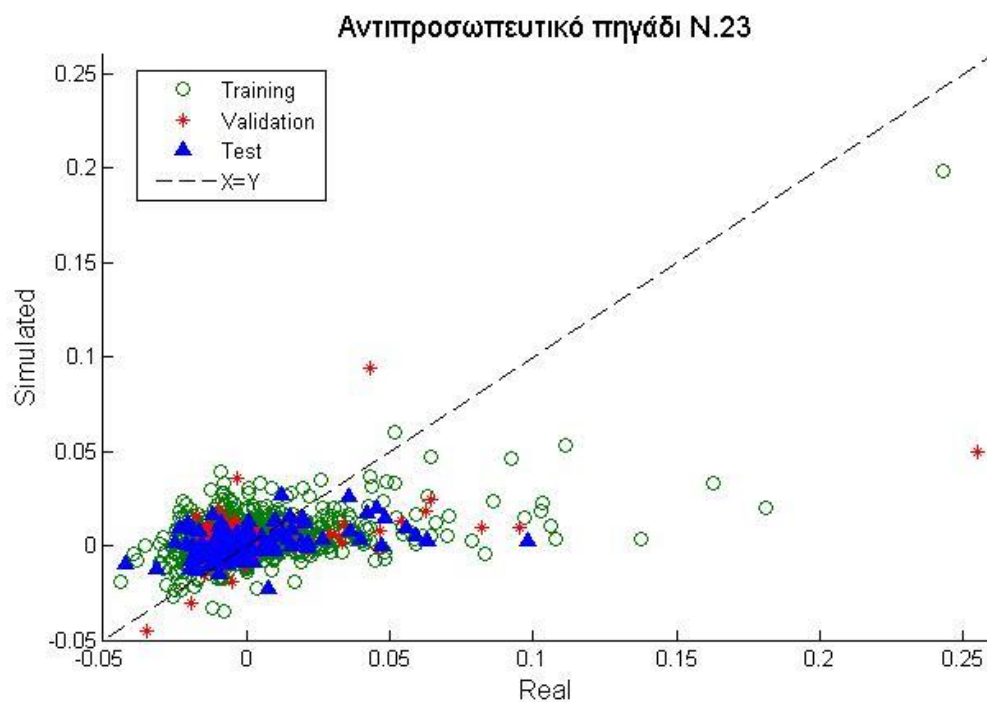
γ)



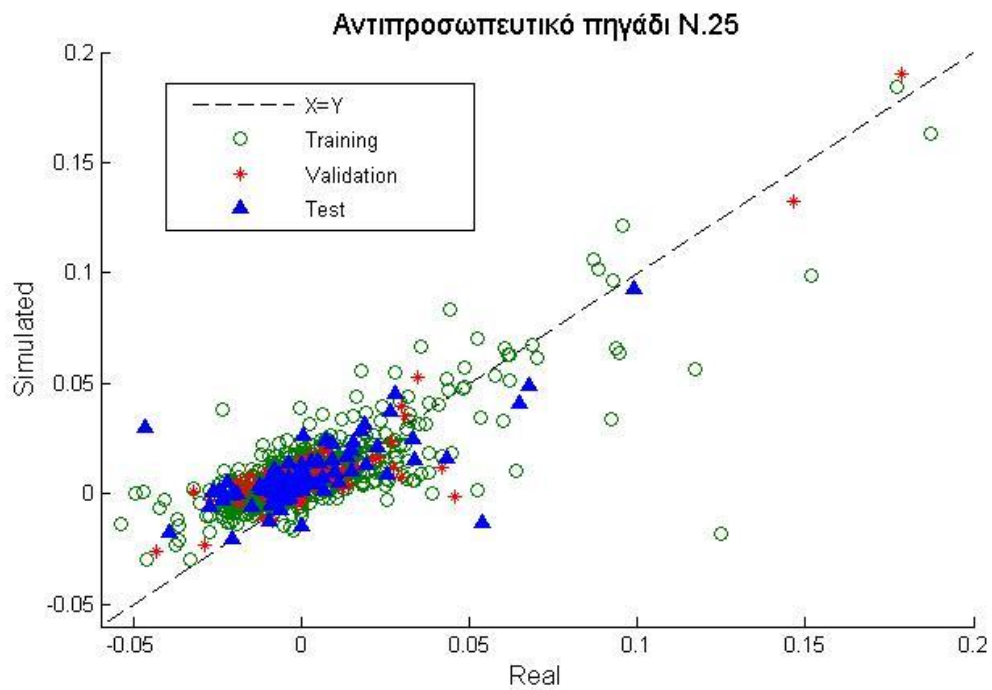
Εικόνα 61: Πραγματικό και προσομοιωμένο Υδραυλικό ύψους για τα αντιπροσωπευτικά πηγάδια της κάθε ομάδας. (Περίπτωση χωρίς χιονόπτωση-2 κρυφά επίπεδα).

Στην Εικόνα 62 παρουσιάζεται η συσχέτιση των εξόδων του νευρωνικού δικτύου σε σχέση με τους επιθυμητούς στόχους για την εκπαίδευση, την επιβεβαίωση και τον έλεγχο. Στην περίπτωση απόλυτης ακρίβειας, δηλαδή οι έξοδοι να είναι και οι στόχοι του δικτύου, θα έπρεπε όλοι οι έξοδοι να συμπίπτουν πάνω στην γραμμή των 45° που σχηματίζεται.

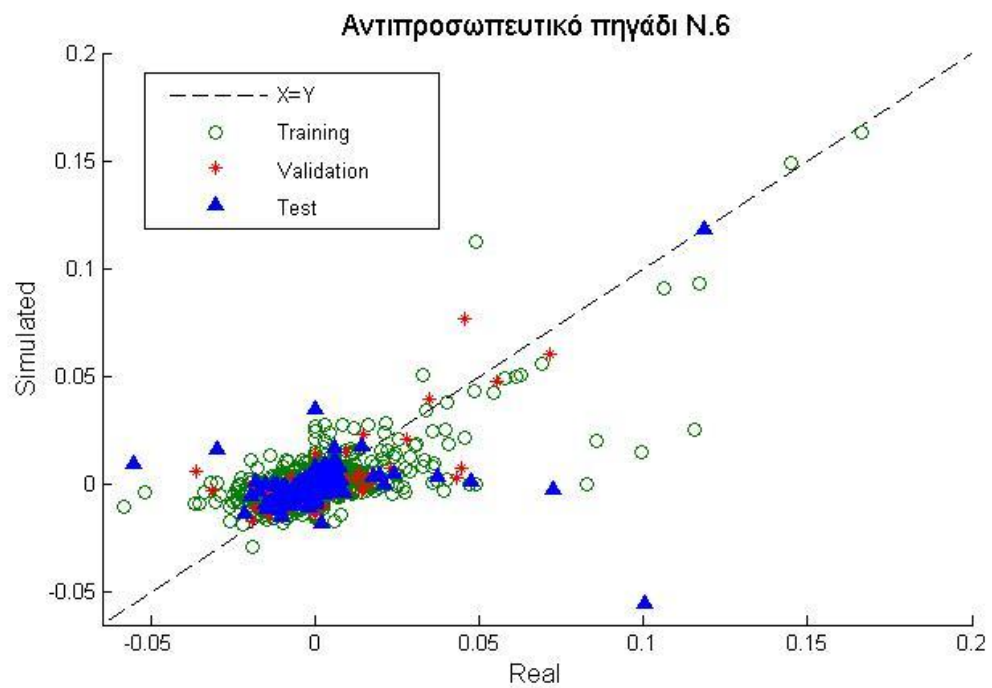
α)



β)



γ)



Εικόνα 62: Συσχέτιση εξόδων νευρωνικού δικτύου με επιθυμητούς στόχους για τις 3 ομάδες.

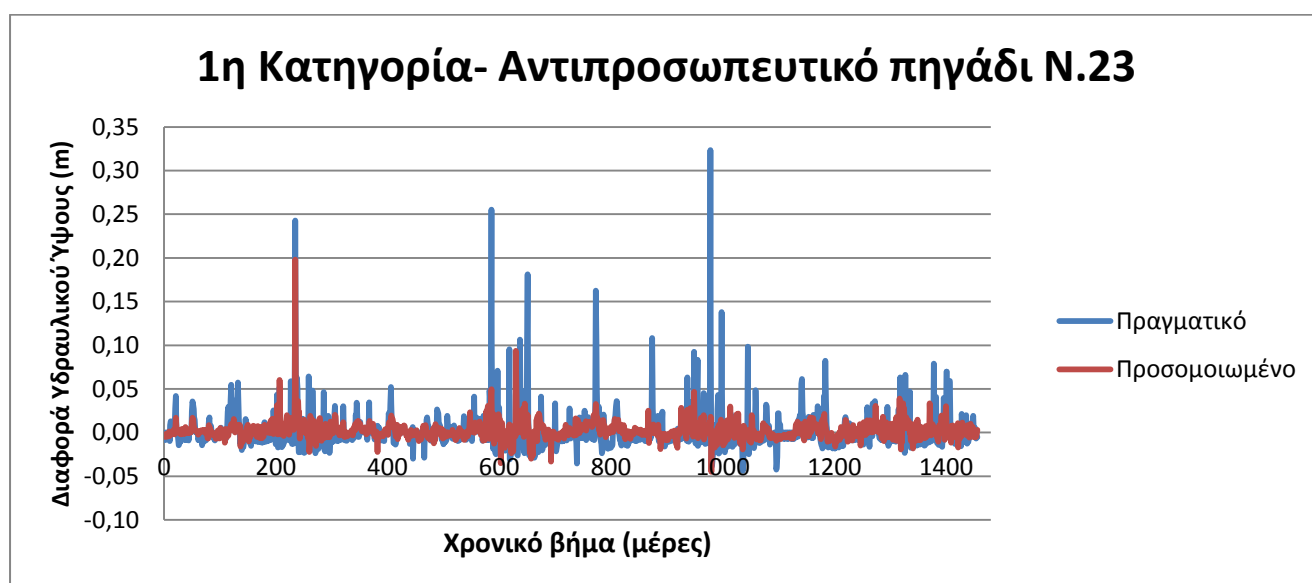
Παρουσίαση αποτελεσμάτων περίπτωσης χωρίς την χιονόπτωση και με το 1 κρυφό επίπεδο

Τα αντιπροσωπευτικά πηγάδια αυτής της αρχιτεκτονικής ήταν τα ίδια με την προηγούμενη αρχιτεκτονική πράγμα που εξηγείται από τα παραπλήσια αποτελέσματα που απέδωσαν (για την ομάδα 1 το πηγάδι 23, για την ομάδα 2 το πηγάδι 25 και για την ομάδα 3 το πηγάδι 6). Για τα αντιπροσωπευτικά πηγάδια στον πίνακα 8.7 παρουσιάζονται οι ελάχιστες, μέσες και μέγιστες διαφορές μεταξύ των παρατηρούμενων στο πεδίο διαφορών υδραυλικού ύψους και αυτών που προέκυψαν από την προσομοίωση. Στην Εικόνα 63 υπάρχουν διαγράμματα με τις πραγματικές και τις προσομοιωμένες διαφορές υδραυλικού ύψους (Hydraulic Head Change, HHC).

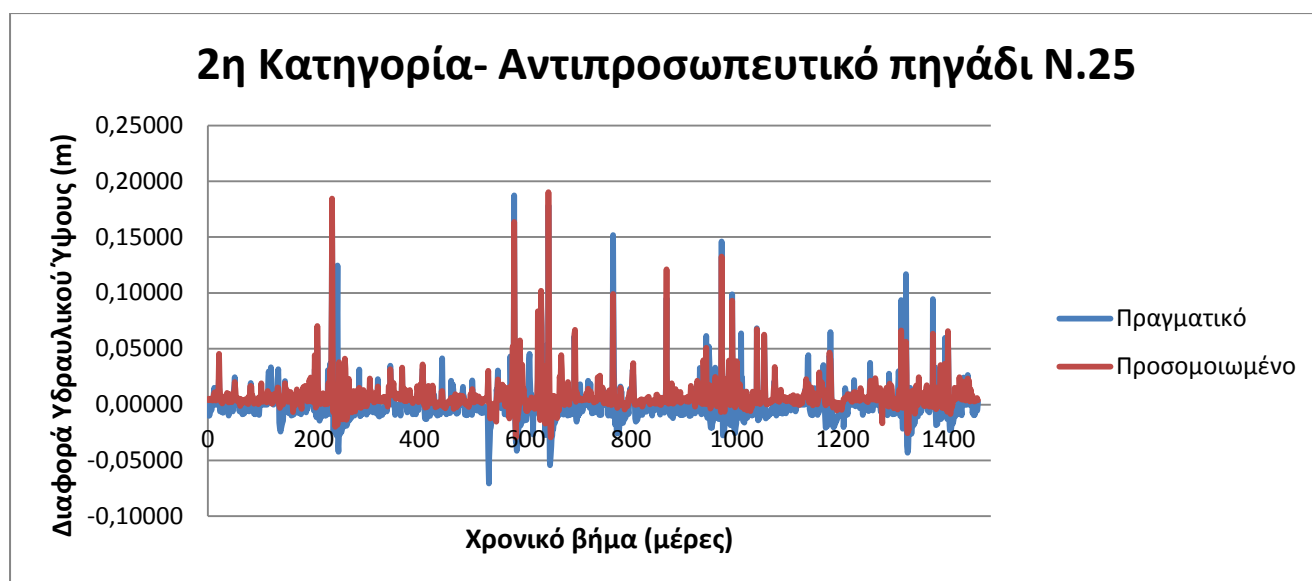
Πίνακας 8.7: Απόλυτη διαφορά πραγματικής και προσομοιωμένης διαφοράς υδραυλικού ύψους(HHC). (Περίπτωση χωρίς χιονόπτωση-1 κρυφό επίπεδο).

Απόλυτη διαφορά πραγματικής από προσομοιωμένη διαφορά υδραυλικού ύψους.	Αντιπροσωπευτικά πηγάδια		
	Ομάδα 1 (πηγάδι N.23)	Ομάδα 2 (πηγάδι N.25)	Ομάδα 3 (πηγάδι N.6)
Μέση	1,23E-02	9,86E-03	6,69E-03
Ελάχιστη	9,71E-06	1,09E-05	3,45E-06
Μέγιστη	3,15E-01	1,43E-01	1,72E-01

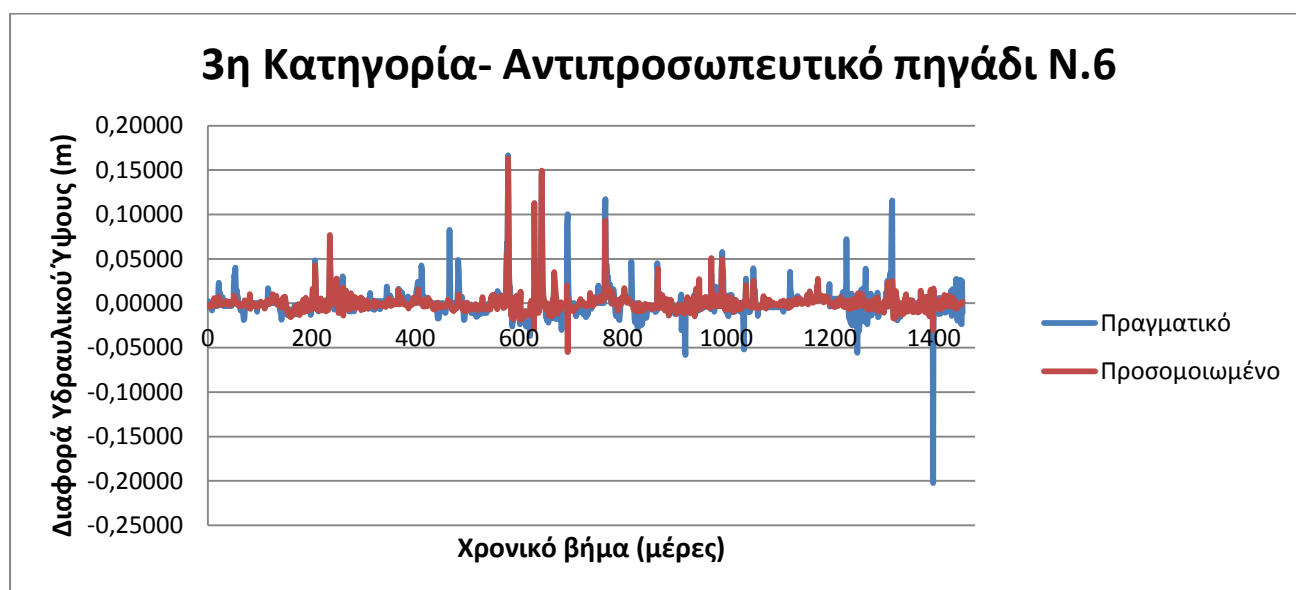
α)



β)



γ)

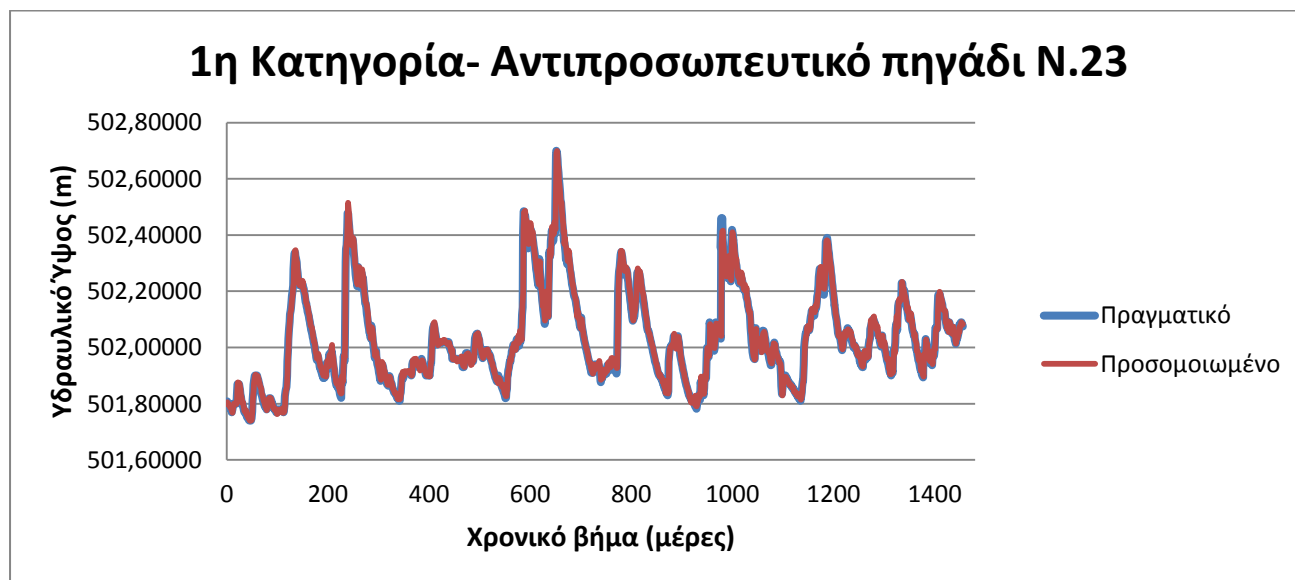


Εικόνα 63: Η πραγματική και η προσομοιωμένη Διαφορά Υδραυλικού Ύψους για τα αντιπροσωπευτικά πηγάδια (Περίπτωση χωρίς χιονόπτωση-1 κρυφό επίπεδο).

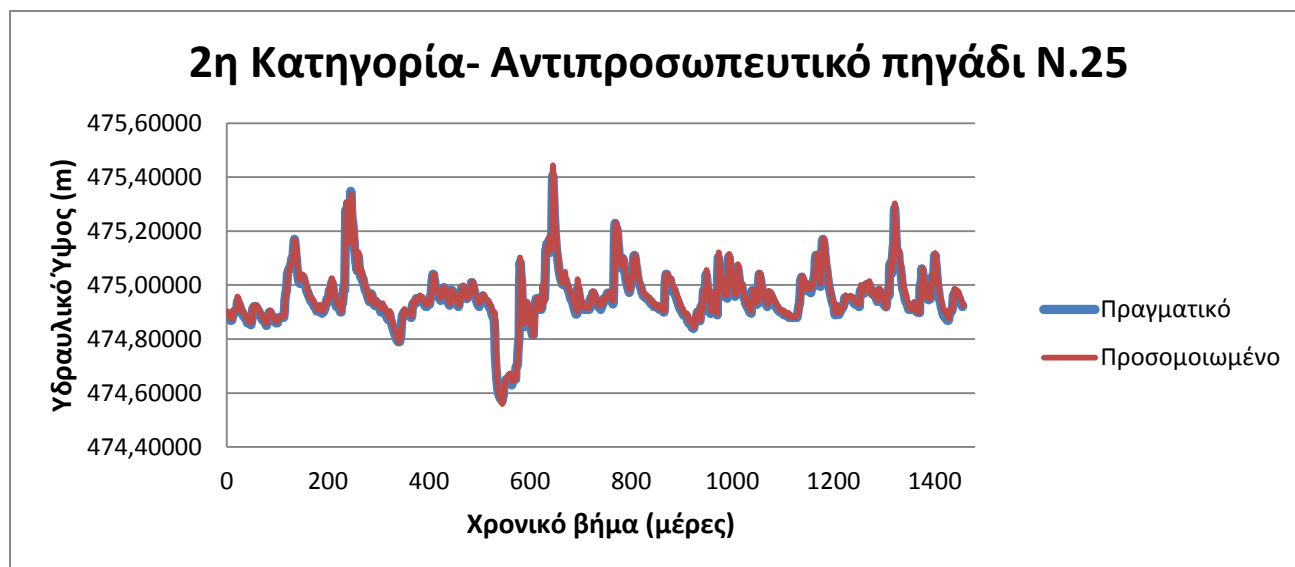
Όπως και στην προηγούμενη αρχιτεκτονική παρατηρείται ότι η γενική τάση της διαφοράς υδραυλικού ύψους περιγράφεται αρκετά καλά, ειδικά στις ομάδες 2 και 3 αν και υπάρχουν κάποιες υπερεκτιμήσεις και υποεκτιμήσεις. Ορισμένες απότομες αλλαγές που οφείλονται είτε στην ξαφνική διακοπή ή αλλαγή μιας άντλησης, είτε σε ακραία καιρικά φαινόμενα (π.χ. παρατεταμένη ξηρασία, ασυνήθιστα μεγάλη ποσότητα βροχόπτωσης) δεν προσομοιώθηκαν καλά στα πηγάδια της ομάδας 1. Στις άλλες ομάδες οι απότομες αυτές αλλαγές προσομοιώθηκαν καλύτερα.

Στην Εικόνα 64 παρατίθενται διαγράμματα με το πραγματικό και το προσομοιωμένο υδραυλικό ύψος (Hydraulic Head, HH). Το προσομοιωμένο Υδραυλικό Ύψος προέκυψε προσθέτοντας την προσομοιωμένη διαφορά στάθμης στην πραγματική στάθμη της προηγούμενης μέρας.

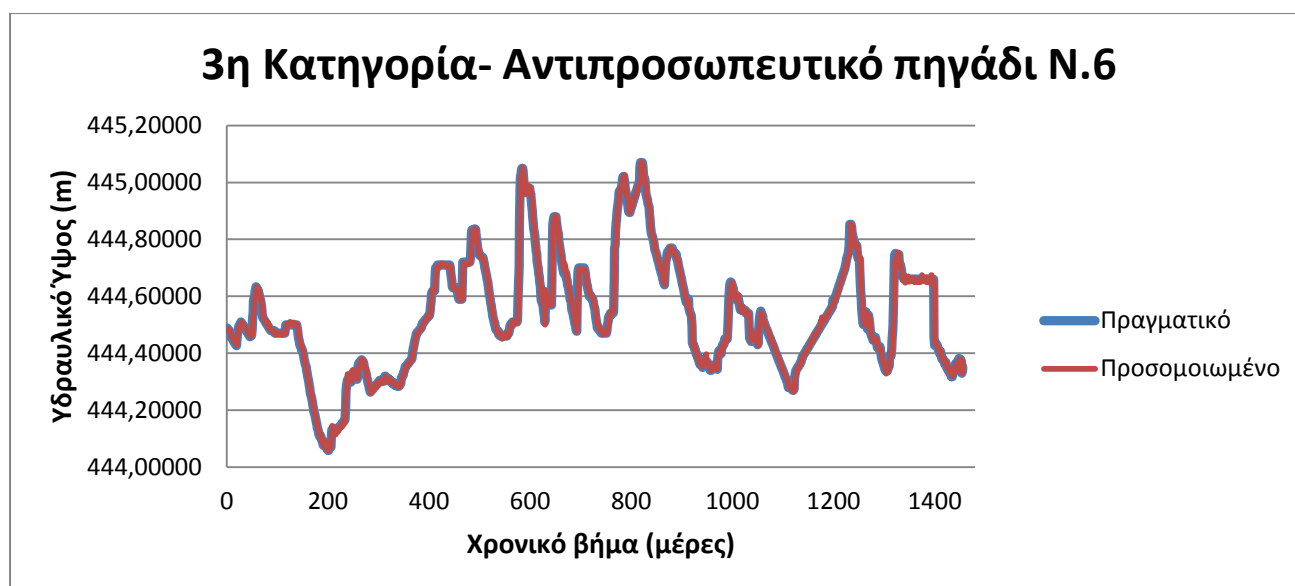
α)



β)



γ)

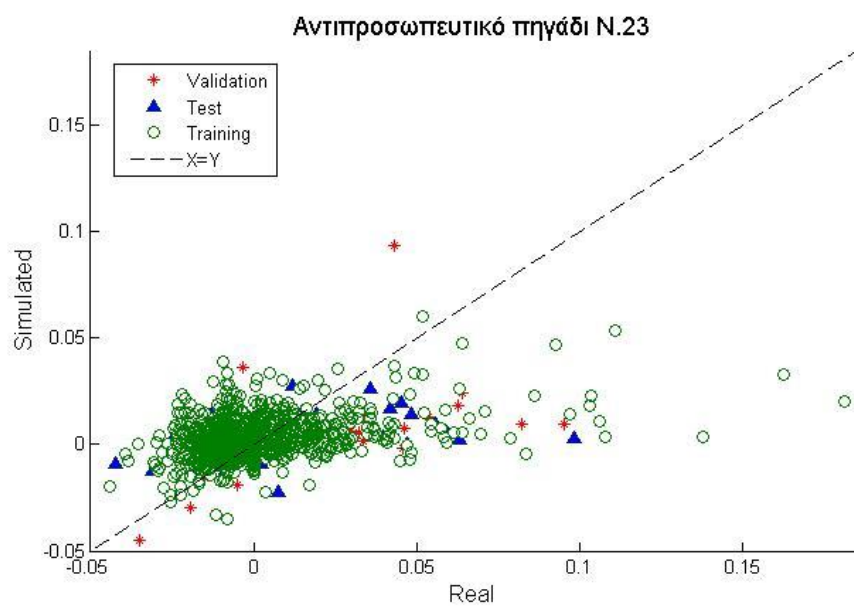


Εικόνα 64: Το πραγματικό και το προσομοιωμένο Υδραυλικό Ύψος για τα αντιπροσωπευτικά πηγάδια. (Περίπτωση χωρίς χιονόπτωση-1 κρυφό επίπεδο).

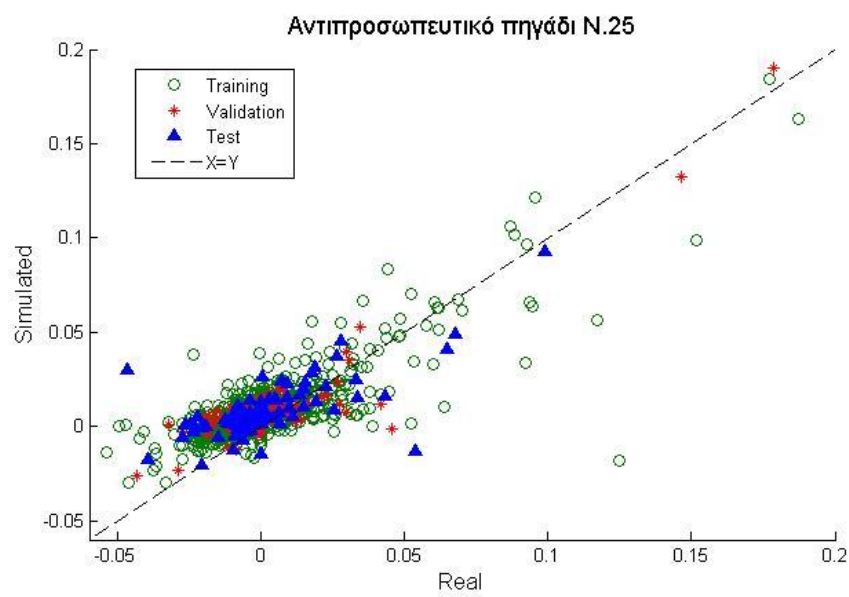
Οι διαφορές μεταξύ πραγματικού και προσομοιωμένου Υδραυλικού Ύψους είναι αρκετά μικρές. Αν και όσον αφορά την διαφορά υδραυλικού ύψους υπάρχουν ορισμένες μικρές μεν, αισθητές δε, αποκλίσεις, παρατηρείται ότι όταν χρησιμοποιείται αυτή για τον υπολογισμό του Υδραυλικού Ύψους έχουμε μια εξομάλυνση και συρρίκνωση των αποκλίσεων. Γενικά μπορούμε να πούμε ότι η προσομοίωση είχε αρκετά καλά αποτελέσματα, ιδίως για τα πηγάδια των ομάδων 2 και 3.

Στην Εικόνα 65 παρουσιάζεται η συσχέτιση των εξόδων του νευρωνικού δικτύου σε σχέση με τους επιθυμητούς στόχους για την εκπαίδευση, την επιβεβαίωση και τον έλεγχο

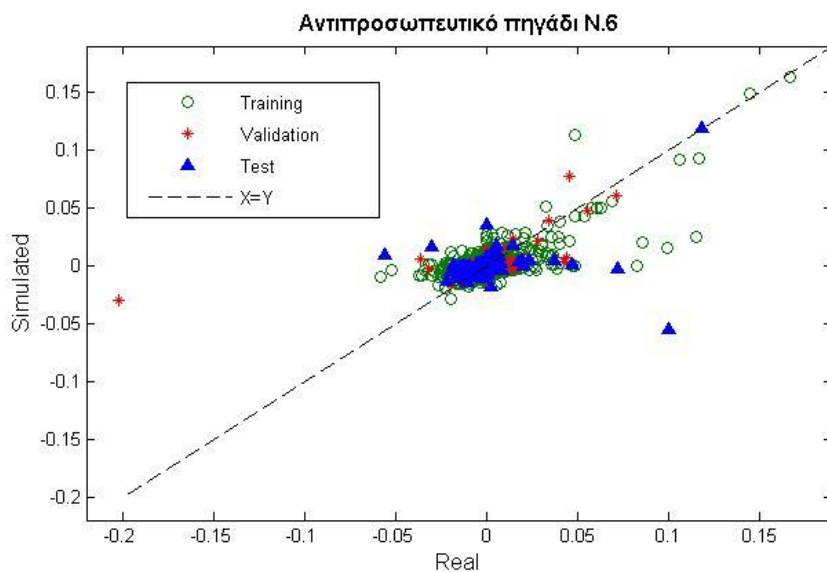
α)



β)

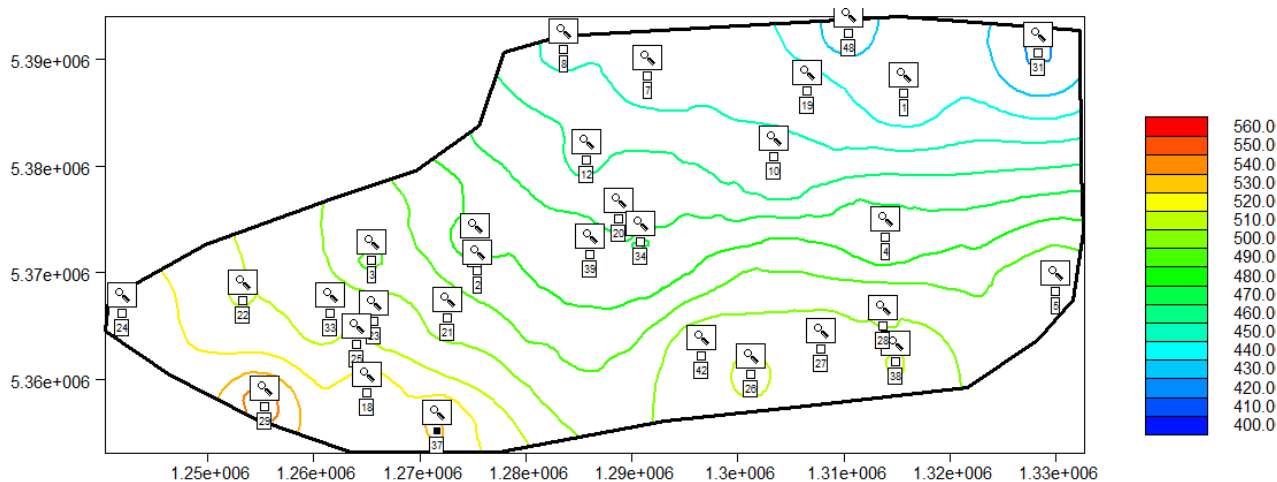


γ)



Εικόνα 65: Συσχέτιση εξόδων νευρωνικού δικτύου με επιθυμητούς στόχους για τις 3 ομάδες.

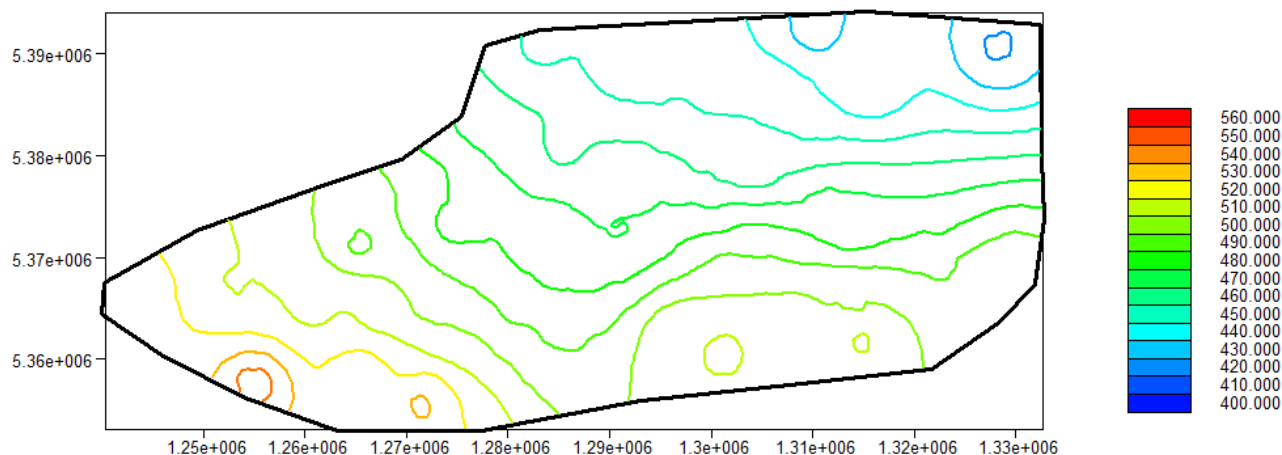
Στη συνέχεια, το προσομοιωμένο Υδραυλικό Ύψος των 30 πηγαδιών εισήχθη στο PTC και με την μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής δημιουργήθηκε χάρτης ισοϋψών υδραυλικών υψών για την περίοδο που συμπίπτει με την 4^η περίοδο (Stress) του PTC, δηλαδή για την 25^η Νοεμβρίου 2009, έτσι ώστε να μπορεί να γίνει η σύγκριση (Εικόνα 66).



Εικόνα 66: Ισοϋψείς υδραυλικών υψών στο PTC μετά από εισαγωγή των αποτελεσμάτων του νευρωνικού δικτύου για την περίπτωση χωρίς χιονόπτωση και με 1 κρυφό επίπεδο. Ημερομηνία: 25/11/2009 (Τέλος 4ου Stress PTC).

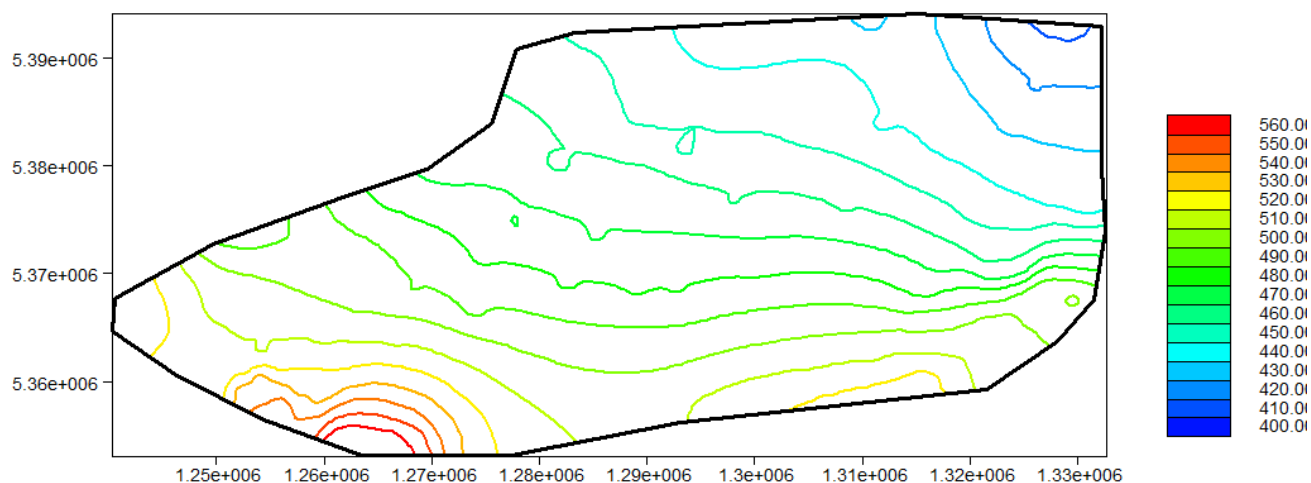
8.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ PTC

Τα αρχικά υδραυλικά πριν την έναρξη της προσομοίωσης απεικονίζονται στην Εικόνα 67 και δημιουργήθηκαν με χρήση γραμμικής παρεμβολής.



Εικόνα 67: Αρχικά υδραυλικά ύψη.

Ύστερα από το 4^ο stress, στο τέλος δηλαδή της προσομοίωσης (25/11/2009), τα υδραυλικά ύψη φαίνονται στην Εικόνα 68.



Εικόνα 68: Τα υδραυλικά ύψη μετά το τέλος της προσομοίωσης, δηλαδή μετά από ένα χρόνο.

Παρατηρείται ότι η κύρια φόρτιση γίνεται από νότια και, κυρίως, νότιο-δυτικά της περιοχής μελέτης όπου και βρίσκονται οι Άλπεις. Εκεί έχουμε και τις μεγαλύτερες ποσότητες βροχοπτώσης και χιονόπτωσης με το μέγιστο υδραυλικό ύψος να φτάνει τα 560 m. Η εκφόρτιση γίνεται στα βόρεια της περιοχής και με κλίση προς τα ανατολικά με το ελάχιστο υδραυλικό ύψος να κυμαίνεται γύρω στα 410 m. Σε σχέση με το μέγεθος της περιοχής που καταλάμβανε πολύ μεγάλη έκταση,

καθώς και την έλλειψη στοιχείων αντλήσεων στην περιοχή, η προσομοίωση κρίνεται ικανοποιητική. Στα περισσότερα σημεία όπου βρίσκονται τα πηγάδια παρατήρησης η διαφορά του προσομοιωμένου από το πραγματικό υδραυλικό ύψος κυμαίνεται από 0 ως 3 μέτρα. Η μέγιστη απόκλιση ήταν 5,5 μέτρα αλλά αυτό έγινε σε μόνο 3 από τα 30 πηγάδια παρατήρησης. Για τον έλεγχο απόδοσης της προσομοίωσης του PTC εξετάστηκαν 3 δείκτες. Ο Nash-Sutcliffe ο οποίος είναι 0,98, ο Mean Absolute Relative Error (MARE) με τιμή 0.0062 και ο Mean Absolute Error (MAE) με τιμή 3 m. Τα αποτελέσματα αυτά χαρακτηρίζουν την προσομοίωση ως ικανοποιητική. Όσον αφορά τις ταχύτητες ροής είναι ιδιαίτερα υψηλές γεγονός που δικαιολογείται από τις πολλές αντλήσεις που υπάρχουν στην περιοχή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9^ο: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην προσομοίωση με τα Νευρωνικά Δίκτυα εξετάστηκαν 2 διαφορετικές περιπτώσεις. Η μία περιελάμβανε ως παράμετρο εισόδου την χιονόπτωση, ενώ η άλλη όχι. Δημιουργώντας και εκπαιδεύοντας δίκτυα και για τις 2 περιπτώσεις, προέκυψε ότι οι περιπτώσεις που δεν περιελάμβαναν την χιονόπτωση είχαν αισθητά καλύτερα αποτελέσματα. Παρόλο που κάθε χρόνο παρατηρείται χιονόπτωση στην περιοχή μελέτης, οι μέρες που συμβαίνει αυτό σε σχέση με αυτές που δεν συμβαίνει, είναι ελάχιστες. Έτσι, με το να είναι μηδέν αρκετές τιμές που χρησιμοποιήθηκαν ως εισοδοί δεν παρεχόταν η δυνατότητα στο δίκτυο να αφομοιώσει κάποιο επαναλαμβανόμενο πρότυπο (pattern).

Όσο για τις αρχιτεκτονικές των δικτύων, εξετάστηκε για κάθε περίπτωση μία αρχιτεκτονική με 1 κρυφό επίπεδο και μια αρχιτεκτονική με 2 κρυφά επίπεδα. Σε κάθε μία από τις 2 περιπτώσεις (με και χωρίς χιονόπτωση) τα αποτελέσματα της αρχιτεκτονικής με τον ένα κρυφό επίπεδο ήταν καλύτερα από αυτά με τα 2 κρυφά. Η διαφορές μεταξύ των αρχιτεκτονικών, όμως, ήταν ελάχιστες και συγκεκριμένα της τάξεως του 10^{-5} . Αξίζει να αναφερθεί ότι δεν πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας καθώς πραγματοποιήθηκε ένα τρέξιμο σε κάθε αρχιτεκτονική. Σε ενδεχόμενη επανάληψη της εκπαίδευσης τα αποτελέσματα ενδέχεται να είναι διαφορετικά όσον αφορά την τάξη του σφάλματος απόδοσης, ωστόσο, η μη βελτίωση της απόδοσης με την χρησιμοποίηση του χιονιού είναι δεδομένη καθώς υπάρχει μεγάλη διαφορά με την περίπτωση όπου δεν χρησιμοποιείται.

Συγκρίνοντας τα 2 μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν, τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα και το PTC, για την προσομοίωση του υπόγειου ύδατος βγαίνουν χρήσιμα συμπεράσματα. Τα Νευρωνικά Δίκτυα προσφέρουν πολύ μεγάλη ακρίβεια στην προσομοίωση σε συγκεκριμένα σημεία που ήταν τα πηγάδια παρατήρησης στην παρούσα περίπτωση. Η ακρίβεια είναι άκρως ικανοποιητική με σφάλμα της τάξεως από 10^{-3} έως 10^{-4} . Ωστόσο, όταν δεν απαιτείται μόνο σημειακή αλλά χωρική προσομοίωση η ακρίβεια μειώνεται καθώς εξαρτάται από την μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής που θα χρησιμοποιηθεί. Ακόμα και τότε όμως, η προσομοίωση μπορεί να χαρακτηριστεί πετυχημένη.

Όσον αφορά το PTC, παρουσιάζει αντίθετα χαρακτηριστικά από τα Νευρωνικά. Όταν πρόκειται για σημειακή προσομοίωση τα αποτελέσματα του δεν είναι πολύ ακριβή. Πρέπει να σημειωθεί, όμως, ότι στο PTC δίνουμε ως είσοδο μόνο αρχικά υδραυλικά ύψη αντίθετα με τα νευρωνικά δίκτυα όπου έχουν ως είσοδο το υδραυλικό ύψος της προηγούμενης ημέρας (προσομοιωμένο ή πραγματικό). Το σφάλμα στην συγκεκριμένη εφαρμογή ήταν συνήθως έως 3 μέτρα, με μέγιστο σφάλμα 5,5 μέτρων. Ωστόσο, το PTC δίνει πολύ καλή γενική εικόνα του επιπέδου του υπόγειου νερού σε μια μεγάλη περιοχή. Εμφανίζει επιτυχώς το συνολικό ισοζύγιο, την συνολική ισορροπία του νερού. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η διαδικασία της βαθμονόμησης αποτελεί μια ιδιαίτερος δύσκολη και χρονοβόρα διαδικασία.

Η επιλογή του πιο κατάλληλου μοντέλου για εφαρμογή μεταξύ αυτών των 2, πρέπει να γίνει με βάση τα παρακάτω κριτήρια:

1. **Τον επιθυμητό στόχο.** Σε περίπτωση που ο στόχος είναι η σημειακή προσομοίωση επιλέγεται η χρήση Νευρωνικών Δικτύων. Σε αντίθετη περίπτωση, δηλαδή για χωρική προσομοίωση, ενδείκνυται η χρήση του μοντέλου PTC.
2. **Τα διαθέσιμα δεδομένα.** Τα δεδομένα που απαιτούνται για την προσομοίωση αποτελούν το μεγαλύτερο πλεονέκτημα για τα Νευρωνικά Δίκτυα και το κύριο μειονέκτημα για το PTC. Τα Νευρωνικά Δίκτυα δεν απαιτούν γεωλογικές και υδρογεωλογικές ιδιότητες του φυσικού συστήματος για να προσομοιώσουν έναν υπόγειο υδροφόρο. Λόγω της φύσης τους και της δομής τους μπορούν να ξεπεράσουν προβλήματα προσομοίωσης του ακριβή μηχανισμού του φυσικού συστήματος και με την χρήση μόνο υδρολογικών και μετεωρολογικών παραμέτρων να δώσουν αξιόλογα αποτελέσματα. Έτσι, η χρήση τους είναι εύκολη και γρήγορη. Από την άλλη, το PTC απαιτεί γεωλογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης όπως η αγωγιμότητα του εδάφους και το πορώδες. Δεδομένα σαν αυτά δεν είναι διαθέσιμα για όλες τις περιοχές, ενώ σε περιοχές που είναι διαθέσιμα δεν είναι πάντα ιδιαίτερα ακριβή και αξιόπιστα. Σε περίπτωση που γίνει προσπάθεια για τον προσδιορισμό αυτών των χαρακτηριστικών, απαιτείται χρονοβόρα και ακριβή διαδικασία.
3. **Εξέταση ή όχι διαφορετικών σεναρίων.** Σε περίπτωση που επιθυμείται η εξέταση σεναρίων που περιλαμβάνουν μεταβολή κάποιων παραμέτρων όπως η αύξηση/μείωση της θερμοκρασίας, της βροχόπτωσης, της άντλησης κλπ., τα Νευρωνικά παρουσιάζουν ανελαστικότητα. Τα ήδη δημιουργημένα δίκτυα μπορούν να προσομοιώσουν το υδραυλικό ύψος μόνο αν η παράμετρος που αλλάζει χρησιμοποιείται ήδη ως παράμετρος εισόδου. Σε αντίθετη περίπτωση πρέπει να γίνει συλλογή καινούργιων χρονοσειρών και να επαναληφθεί η κατασκευή και εκπαίδευση του δικτύου. Όσον αφορά το PTC, σε περίπτωση πετυχημένης βαθμονόμησης, η εξέταση διαφορετικών σεναρίων είναι εφικτή και εύκολη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10^ο: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Διεθνής βιβλιογραφία

ASCE Task Committee on Application of Artificial Neural Networks in Hydrology, 2000. Artificial Neural Networks in Hydrology. I: Preliminary Concepts, in Journal of Hydrologic Engineering. 115-123.

Kasiviswanathan, K.S. and K.P. Sudheer, 2013. Quantification of the predictive uncertainty of artificial neural network based river flow forecast models. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. 27(1): 137-146.

Hagan, M. T., M. Menhaj, 1994. "Training feedforward networks with the Marquardt algorithm", IEEE Trans. Neural Netw.

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

Villars, M., M. Gerath, and D. Galya, 1993. Review of mathematical models for health risk assessment: III. Chemical concentrations in surface water, groundwater and soil. Environmental Software. 8(3): p. 135-155.

Bender, S., F. Einsiedl, and S. Wohnlich, 2001. Scheme for development of monitoring networks for springs in Bavaria, Germany. Hydrogeology Journal. 9(2): p. 208-216.

Heinrichs, G. and P. Udluft, 1999. Natural arsenic in Triassic rocks: A source of drinking-water contamination in Bavaria, Germany. Hydrogeology Journal. 7(5): p. 468-476.

Blomenhofer, A., and KLIWA Team, 2012. Landesanstalt für Umwelt, Auswirkungen des Klimawandels auf Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz: Untersuchungen auf Grundlage von WETTREG2003- und WETTREG2006- Klimaszenarien; KLIWA-Projekt B 3.3.1 Simulation der Grundwasserneubildung mit regionalen Klimaszenarien.: Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg.

Fine, T.L., 1999. Feedforward Neural Network Methodology. Springer.

Anderson, M.P., and Woessner, W.W., 1992. Applied groundwater modeling, simulation of flow and advective transport. Academic Press, New York

Krose, B. and Van der Smagt, P. (1996). An introduction to neural networks, University of Amsterdam.

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.

Ελληνική βιβλιογραφία

Τσακίρης, Γ., 1995. Συμμετρία «Υδατικοί Πόροι: Ι. Τεχνική Υδρολογία».

Μαθιουδάκης, Ε. Σημειώσεις μαθήματος Επιστημονικός Προγραμματισμός Πολυτεχνείου Κρήτης.

Καρατζάς, Γ., 2003. Σημειώσεις μαθήματος Ροής Υπογείων Υδάτων και Μεταφοράς Ρύπων της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος Πολυτεχνείου Κρήτης.

Αντωνόπουλος, Βασίλης, Γεωπονίας, Τμήμα, και Θεσσαλονίκης, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο. (n.d.). Ποιότητα Νερού και Ρύπανση Υδατικών Πόρων.

Βουδούρης, Κ., 2009. Υδρογεωλογία Περιβάλλοντος. Υπόγεια Νερά και Περιβάλλον, Εκδόσεις Τζιόλα.

Μήτρακας, Μ., 2001. Ποιοτικά χαρακτηριστικά και επεξεργασία νερού. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα.

Καλλέργης, Γ. Α., 1999. Εφαρμοσμένη Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία, Έκδοση Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας.

Σκιτζί, Ε., 2010. Μεταπτυχιακή Διατριβή: Προσομοίωση παροχών καρστικών πηγών με χρήση νευρωνικών δικτύων.

Διαδικτυακές πηγές

<http://www.mathworks.com/>

<http://water.usgs.gov/edu/watercyclegreek.html>

<http://www.nid.bayern.de/>

<http://www.lfu.bayern.de/index.htm>

<http://geoportal.bayern.de/geoportalbayern/anwendungen/Suche/q=GIS/>

<http://www.bgr.bund.de>

<http://www.geoshop-hannover.de/>

<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2266878/>

<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2002WR001541/full>

<http://www.uni-erlangen.org/university/region/>

<http://www.dwd.de/>

<http://www.molasse.net/>

http://www.water.ca.gov/groundwater/groundwater_basics/hydrologic_cycle.cfm

http://en.wikipedia.org/wiki/Hydrological_modelling

<http://en.wikipedia.org/wiki/Munich>

<http://kyocp.wordpress.com/2012/04/25/groundwater/>

www.eng.auburn.edu

<http://www.bayern.de/English-.594/index.htm>