

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

**Μοντελοποίηση ροής υπογείων υδάτων και
μεταφορά ρύπου σε προσχωματικό παράκτιο
υδροφορέα της περιφέρειας Αττικής**

ΣΤΡΑΒΟΛΑΙΜΟΣ ΚΥΠΡΙΑΝΟΣ-ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

Εξεταστική επιτροπή

Γεώργιος Καρατζάς, Καθηγητής
Παρανυχιανάκης Νικόλαος, Επίκουρος Καθηγητής
Δρ. Βαρουχάκης Μανώλης

ΧΑΝΙΑ ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2017

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Γεώργιο Καρατζά για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας, την πολύτιμη βοήθεια του καθώς και την εμπιστοσύνη στο πρόσωπο μου.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κ. Εμμανουήλ Βαρουχάκη για την εξαιρετική συνεργασία, τις χρήσιμες συμβουλές του καθώς και για την συνεχή στήριξη κατά την διάρκεια της εκπόνησής της.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η σωστή διαχείριση των υδατικών πόρων παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην προστασία του φυσικού περιβάλλοντος. Η υπερεκμετάλλευση των υδατικών αυτών πόρων (επιφανειακή και υπόγεια) προκαλεί σημαντική μείωση των αποθεμάτων νερού. Μελετητές έχουν συμπεράνει ότι με τα χρόνια αυξάνεται σταδιακά η θερμοκρασία ενώ προβλέπουν να μειωθούν αισθητά οι ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις. Αρνητικές επιπτώσεις των μεταβολών της θερμοκρασίας και των βροχοπτώσεων παρατηρούνται παγκοσμίως τα τελευταία χρόνια. Γι' αυτό εφαρμόζονται αρκετά σχέδια προστασίας της ποιότητας και αύξησης της ποσότητας των υπόγειων υδάτων. Έτσι πλέον καθίσταται αναγκαία η προσομοίωση των ροών των υπόγειων υδάτων και των μαζικών μεταφορών για την αποτελεσματική προστασία, σχεδιασμό και διαχείριση των υδάτινων πόρων.

Στη παρούσα μελέτη πραγματοποιήθηκε προσομοίωση της υπόγειας ροής και της μεταφοράς μάζας νιτρικών αλάτων στην προσχωματική λεκάνη ενδιαφέροντος στο Δήμο Τροιζηνίας- Μεθάνων. Η βαθμονόμηση της ροής των υπόγειων υδάτων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση δεδομένων υδραυλικών υψών υπογείων υδάτων από 8 περιόδους. Για να αξιολογηθεί το μοντέλο εφαρμόστηκε μια στατιστική ανάλυση ευαισθησίας.

Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Visual Modflow. Αρχικά συγκεντρώθηκαν τα γεωγραφικά, γεωλογικά, υδρολογικά και κλιματολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής της Τροιζηνίας και στη συνέχεια διατυπώθηκε το υδρολογικό ισοζύγιο του υδροφορέα της υπό μελέτη περιοχής. Έπειτα κατασκευάστηκε το μοντέλο προσομοίωσης στον κώδικα Visual Modflow. Στα τελευταία κεφάλαια της παρούσας μελέτης παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και γίνεται σχολιασμός των αποτελεσμάτων αυτών και παραθέτονται προτάσεις για την εξοικονόμηση υπόγειου υδατικού δυναμικού στην περιοχή.

Συμπερασματικά μέσω της μεθόδου προσομοίωσης της υπόγειας ροής ενός υδροφόρου συστήματος έχουμε την δυνατότητα για έναν ολοκληρωμένο σχεδιασμό της βέλτιστης διαχείρισης των υδατικών πόρων.

ABSTRACT

Proper management of water resources plays a very important role in protecting the natural environment. Overexploitation of these water resources (surface and underground) causes a significant reduction in water reserves. It's also well known that there are negative effects of temperature and rainfall have been observed worldwide in recent years. So, it is now necessary to simulate groundwater flows and mass transport for the effective protection, planning and management of water resources.

In the present study simulation of the underground flow and mass transfer of nitrates was carried out in the alluvial basin of interest in the Municipality of Trizinia-Methana. The ground water flow calibration was performed using groundwater hydraulic ground data from 8 periods. In order to evaluate the model a statistical sensitivity analysis was applied.

The Visual Modflow model was used for the simulation. Initially the geographical, geological and hydrological characteristics of the area of Troizinias were gathered and then the hydrological balance of the aquifer of the studied area was formulated.

In conclusion, through the method of simulating the underground flow of an aquifer we have the possibility of an integrated planning of the optimal management of the water resources.

ΠΕΡΙΟΧΟΜΕΝΑ

1. <u>Εισαγωγή</u>	8
1.1 Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας.....	9
1.2 Θέση περιοχής μελέτης.....	9-10
2. <u>Βασικές έννοιες υδρογεωλογίας</u>	11
2.1 Υδρολογικός κύκλος.....	11-13
2.2 Υδρογεωλογική συμπεριφορά.....	14-17
2.3 Ταξινόμηση των υπογείων υδάτων.....	17-18
2.4 Υδροφορείς.....	19
2.4.1 Υδραυλικά χαρακτηριστικά των υδροφορέων...	20-23
2.5 Πηγές παρατηρήσεις και άντλησης.....	23-24
3. <u>Μελέτη της περιοχής</u>	24
3.1 Γενικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης.....	24
3.2 Περιβάλλον – Οικοσύστημα.....	25
3.3 Μετεωρολογικά χαρακτηριστικά.....	26
3.4 Γεωλογία- υδρογεωλογία της περιοχής.....	26-29
3.5 Νιτρική ρύπανση υπόγειων υδάτων.....	30-32
4. <u>Αριθμητική προσομοίωση της ροής στον υδροφορέα</u>	32
4.1 Γενικά.....	32-34
4.2 Κίνηση του υπογείου νερού.....	34
4.2.1 Νόμος του Darcy.....	35
4.3 Αντικειμενικός στόχος της προσομοίωσης της υπόγειας ροής....	36
4.4 Εννοιολογικό μοντέλο.....	37
4.5 Επιλογή κατάλληλου υπολογιστικού λογισμικού.....	38
4.6 Λογισμικό πακέτο Visual Modflow.....	38-50
4.7 Οριακές συνθήκες ροής.....	51-52
4.8 Σχεδιασμός και αναλυτική ανάπτυξη του μοντέλου προσομοίωσης	
4.8.1 Ανάλυση γεωμετρικών χαρακτηριστικών.....	54
4.8.2 Διαμόρφωση του μοντέλου προσομοίωσης σε περιβάλλον	
Visual Modflow με χρήση υπορουτίνων.....	55-62
4.8.3 Ρύθμιση του μοντέλου σε συνθήκες μόνιμης ροής.....	62-63
4.8.4 Μέθοδος παρεμβολής Kriging.....	63-67
4.8.5 Μεθοδολογία Cross Validation.....	68-73
4.9 Αποτελέσματα προσομοίωσης - σχολιασμός αποτελεσμάτων.	73
5. <u>Συμπεράσματα – Προτάσεις</u>	78-82
6. <u>Βιβλιογραφία</u>	83-84
7. <u>Διαδικτυακή Βιβλιογραφία</u>	86-86

Κατάλογος εικόνων

- Εικόνα (1) Γενικός Χάρτης της Τροιζηνίας (<http://www.koutouzis.gr/xartis.htm>)
- Εικόνα (2): Το νερό μεταφέρεται από την επιφάνεια προς την ατμόσφαιρα μέσω της εξάτμισης, η διαδικασία με την οποία αλλάζει το νερό από υγρό σε αέριο (Χρήστος Μακρόπουλος)
- Εικόνα (3): Απλοποιημένη γραφική απεικόνιση του υδρολογικού κύκλου (Μακρόπουλος και Κουτσογιάννης, 2016)
- Εικόνα (4) : Χαλαρός ψαμμίτης
- Εικόνα (5) : Συμπαγής Ψαμμίτης
- Εικόνα (6): Χαμηλότερο πορώδες
- Εικόνα (7): Υψηλότερο πορώδες
- Εικόνα (8) : Διάκενα : α) καλή διαβάθμιση υλικού με υψηλό πορώδες, β) φτωχή διαβάθμιση με μικρό πορώδες, γ) καλή διαβάθμιση σε πορώδη χαλίκια με υψηλό πορώδες, δ) καλή διαβάθμιση με παρουσία ορυκτής ύλης και μειωμένο πορώδες, ε) πορώδες από διάλυση, στ) πορώδες από ρηγμάτωση (Meinzer, 1923)
- Εικόνα (9) : Υπόγειοι υδροφορείς (Wikipedia Freeware)
- Εικόνα (10) Μόνιμη ροή για πηγάδι (Μ. Πανταζίδου 2013)
- Εικόνα (11) : Χάρτης Δρυόπης (Google Earth)
- Εικόνα (12) : Χάρτης Τραχείας (Google Earth)
- Εικόνα (13) : Χάρτης Τροιζήνας (Google Earth)
- Εικόνα (14) : (Γεωλογικός χάρτης Τροιζηνίας, Matiatos)
- Εικόνα (15): Τυπική μορφή κανάβου πεπερασμένων διαφορών (πήξη εικόνας : Λατινόπουλος & Θεοδοσίου, 2007)
- Εικόνα (16): Αρχικό menu του λογισμικού Visual Modflow
- Εικόνα (17): Γεωλογικός χάρτης Τροιζηνίας (Matiatos I.)
- Εικόνα (18): Πηγάδια παρατήρησης (Head Observation, Visual Modflow)
- Εικόνα (19): Πηγάδια παρατήρησης νιτρικών (Concentration Observation, Visual Modflow)
- Εικόνα (20) : Απεικόνιση υδραυλικού φορτίου (Constant Head, Visual Modflow)
- Εικόνα (21) : Απεικόνιση ρεμάτων της περιοχής μελέτης (Rivers, Visual Modflow)
- Εικόνα (22): Παράθυρο διαλόγου του Modflow στο οποίο προσδιορίζονται οι υδραυλικές αγωγιμότητες
- Εικόνα (23) : Απεικόνιση των απενεργοποιημένων κελιών στο μοντέλο των διαφορετικών τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας. (Visual Modflow)
- Εικόνα (24) : Παράθυρο εισαγωγής στοιχείων γεώτρησης παρατήρησης

(Ως παράδειγμα επιλέχθηκε το πηγάδι F28, Visual Modflow)

- **Εικόνα (25) :** Παρουσίαση πλευρική εισροής υδραυλικού φορτίου (Visual Modflow)
- **Εικόνα (26) :** Παράθυρο διαμόρφωσης της εντολής G.H.B. μέσω της επιλογής Assign (Visual Modflow)
- **Εικόνα (27) :** Παράθυρο διαλόγου του Modflow στο οποίο προσδιορίζονται οι υδραυλικές αγωγιμότητες
- **Εικόνα (28) :** Κύριο παράθυρο του Modflow στο οποίο προσδιορίζονται οι ζώνες της υδραυλικής αγωγιμότητας
- **Εικόνα (29) :** Πειραματικό ημιβαριόγραμμα πρότυπο βαριόγραμμα (Δήμου 2010)
- **Εικόνα (30):** Στάθμη υπογείου ύδατος μετά την μοντελοποίηση (Visual Modflow)
- **Εικόνα (31) :** Συγκέντρωση νιτρικών μετά την μοντελοποίηση (Visual Modflow)
- **Εικόνα (32) :** περιοχή Λεμονοδάσος Πόρου κοντά στην περιοχή μελέτης μας
(<http://www.porosrooms.com/images/poros/ekdromes/mapgalatas.jpg>)
- **Εικόνα (33) :** Ποτάμι Διαβολογέφυρου
(<http://www.poros.com.gr/diavologefiro/>)
- **Εικόνα (34) :** Κάτοψη περιοχής Διαβολογέφυρου (<https://troizinia.info>)

Κατάλογος Πινάκων

- Πίνακας (1) : Τιμές ολικού πορώδους
- Πίνακας (2) Τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητα (Καλλέργης, 1999)
- Πίνακας (3) Μονάδες μεταβλητών του μοντέλου προσομοίωσης
- Πίνακας (4) Δεδομένα υδραυλικής αγωγιμότητας
- Πίνακας (5) : Πηγάδια παρατήρησης ροής ύδατος
- Πίνακας (6): Πηγάδια παρατήρησης νιτρικών
- Πίνακας (7): αρχικών συνθηκών (Initial Heads)
- Πίνακας (8) : Παρατηρούμενη και προσομοιωμένη στάθμη υπογείων υδάτων (m) για την περίοδο βαθμονόμησης και την περίοδο επικύρωσης
- Πίνακας (9) : Παρατηρούμενες και προσομοιωμένες τιμές συγκέντρωσης νιτρικών (mg/l) για την περίοδο βαθμονόμησης
- Πίνακας (10): Σφάλμα και έλεγχος καλής προσαρμογής προσομοιωμένου επιπέδου υπογείων υδάτων στα σημεία παρατήρησης
- Πίνακας (11): Σφάλμα και έλεγχος καλής προσαρμογής προσομοιωμένου συγκέντρωσης νιτρικών σε σημεία παρατήρησης

1. Εισαγωγή

Το νερό με τη βοήθεια της ηλιακής ακτινοβολίας κυκλοφορεί μέσα στη φύση, τροφοδοτεί, συντηρεί και ενδυναμώνει τη ζωή, τη βιοποικιλότητα και τους οικοτύπους. Διατηρεί τα φυτικά και ζωικά κύτταρα και τη θερμοδυναμική απόδοση της βιολογικής μηχανής στα έμβια., Αποτελεί επίσης τον παγκόσμιο διαλύτη και αυτό γιατί ρέει επιφανειακά συνεισφέροντας στη μορφολογία της γης, διαπερνά το έδαφος, φτάνει στους υπόγειους υδροφορείς, επανέρχεται στην επιφάνεια όπου εξατμίζεται και επανέρχεται πάλι στη γη με τα κατακρημνίσματα και έτσι διαμορφώνει σε ένα βαθμό το περιβάλλον μας.

Ο πλανήτης αποτελεί ένα κλειστό σύστημα, αν εξαίρεση κάνεις την ενέργεια που δέχεται από το διάστημα ,κυρίως την ηλιακή επομένως το νερό αποτελεί ένα φυσικό πόρο ο οποίος είναι μη ανανεώσιμος. Σε τοπικό επίπεδο τα πράγματα αλλάζουν. Στην Ελλάδα για παράδειγμα όπου είναι μια χώρα η οποία έχει και ξηρές και υγρές περιόδους το νερό σε ετήσια βάση είναι ένας πόρος ανανεώσιμος δεδομένου ότι η υγρή περίοδος θα καλύψει τα ελλείματα από τη φυσική απώλεια η την κατανάλωση των υδάτων από τις ανθρώπινες δραστηριότητες.

Τις τελευταίες δεκαετίες έγινε αντιληπτό ότι η ανάπτυξη και τα παγκόσμια περιβαλλοντικά προβλήματα είναι άρρηκτα συνδεδεμένα μεταξύ τους. Το καθαρό νερό είναι ένα φυσικό αγαθό που εξυπηρετεί τις ανάγκες του κοινωνικού συνόλου, αλλά κοστίζει. Αλλά το νερό που σήμερα χρησιμοποιείται στη γεωργία είναι στην πλειονότητά του καθαρό ή σχεδόν καθαρό, όπως και το νερό που χρησιμοποιούν οι υδροβόρες βιομηχανίες. Το νερό είναι κοινωνικό αγαθό σε ανεπάρκεια, αφού τα αποθέματα σε γλυκό νερό είναι λιγότερα από το 1% του συνολικού όγκου νερού του πλανήτη μας. Από αυτή την ποσότητα περίπου το 98% βρίσκεται στα υπόγεια νερά και μόνο το 2% στην επιφάνεια. Οι ανάγκες όμως για νερό συνεχώς αυξάνονται. Στην καθημερινή όμως πρακτική υπάρχει σοβαρό πρόβλημα, αφού τα τελευταία είκοσι έτη παρατηρείται ευδιάκριτη τάση μείωσης των βροχοπτώσεων, τεράστιες αυξομειώσεις στις διαθέσιμες πηγές νερού σε ποσοτικά στοιχεία και ποιοτικά χαρακτηριστικά και απουσία ορθολογικής διαχείρισης των διαθέσιμων υδατικών πόρων.

1.1. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας

Τα τελευταία 30 χρόνια στην περιοχή της Τροιζήνας υπάρχει έντονος προβληματισμός για τα τεράστια προβλήματα που υπάρχουν στην περιοχή λόγω, κυρίως της εκτεταμένης ύπαρξης νιτρικών στον υδροφόρο ορίζοντα του κάμπου της, καθώς επίσης και στις εκτεταμένες διαρροές των πεπαλαιωμένων δικτύων και την υπεράντληση του υδροφόρου ορίζοντα από τις πολλές γεωτρήσεις. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αναφορά των γεωλογικών και υδρολογικών χαρακτηριστικών της περιοχής καθώς και η προσομοίωση του υπόγειου υδροφορέα με την χρήση του υπολογιστικού κώδικα Visual Modflow.

1.2. Θέση περιοχής μελέτης

Η επαρχία Τροιζηνίας καλύπτει το ανατολικό τμήμα της χερσονήσου Αργολίδας. Είναι περιοχή επιμήκης με πλάτος περίπου 8 χλμ. και μήκος 40 χλμ. και περιλαμβάνει την παραλιακή περιοχή που εκτείνεται νοτιοανατολικά της Παλαιάς Επιδαύρου μέχρι τον Γαλατά και τον Πόρο. Ακόμα περιλαμβάνει την ορεινή περιοχή στο εσωτερικό της χερσονήσου που εκτείνεται βορειοανατολικά των ορέων Δίδυμο (1110μ.) και Αδερές (786μ.). Η επαρχία βρισκόταν στον ίδιο χώρο με το αρχαίο ελληνικό κράτος της Τροιζηνίας από το οποίο πήρε και το όνομά της. Ο συνολικός υδροφόρος ορίζοντας είναι περίπου 84 km². Ο συνολικός πληθυσμός της επαρχίας Τροιζηνίας είναι 7.143 μόνιμοι κάτοικοι (απογραφή 2011). Περιλαμβάνει:

Α) τον Δήμο Πόρου με μόνιμο πληθυσμό 4.348 κατοίκους .
Β) τον Δήμο Τροιζήνας με μόνιμο πληθυσμό 6.507 κατοίκους. Σε αυτόν ανήκουν τα κάτωθι Δημοτικά διαμερίσματα:

- 1) Του Γαλατά με 2.707 μόνιμους κατοίκους,
- 2) της Τροιζήνας με 955 μόνιμους κατοίκους,
- 3) του Άνω Φαναριού με 387 μόνιμους κατοίκους,
- 4) της Δρυόπης με 1.320 κατοίκους,
- 5) του Καρατζά με 401 κατοίκους,
- 6) της Τακτικούπολης με 737 κατοίκους.

Η συνολική καλλιεργούμενη έκταση είναι 84848 στρέμματα εκ των οποίων αρδευόμενα είναι τα 22.441 στρέμματα. Η περιοχή δομείται κυρίως από φλύσχη και από ασβεστόλιθους της Υποπελαγονικής ζώνης. Στην κεντρική και ανατολική περιοχή που καλύπτεται από το όρος Αδερές κυριαρχεί ο φλύσχος. Στην δυτική και βόρεια περιοχή (όρος Δίδυμο – Μεγαλοβούνι), εμφανίζονται οι ασβεστόλιθοι του Μεσοζωικού. Στην περιοχή εμφανίζεται επίσης η σχιστοκερατολιθική διάπλαση και τα οφιολιθικά πετρώματα. Ανάμεσα στην Τακτικούπολη και στο όρος Αδερές έχει δημιουργηθεί ένα τεκτονικό βύθισμά το οποίο μεταγενέστερα πληρώθηκε από τεταρτογενείς αποθέσεις, σχηματίζοντας την πεδινή λεκάνη της Τροιζήνας, που έχει έκταση 25 τετρ. χλμ. και υψόμετρο 50 – 70 μέτρα.. Η λεκάνη αυτή βόρεια και σε μήκος άνω των 5 χλμ. εφάπτεται της θάλασσας, ενώ ανατολικά εκτείνεται μέχρι την περιοχή Πόρου – Γαλατά – Λεμονοδάσους. Μια δεύτερη μικρότερη λεκάνη έκτασης

περίπου 4 τετρ. χλμ. σχηματίζεται στις εκβολές του Μεγάλου Ρέματος, στην περιοχή του οικισμού Καλλονή.

Οι δύο προαναφερόμενες τεταρτογενείς λεκάνες παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον από υδρογεωλογική άποψη όπως και ο ορεινός ασβεστολιθικός όγκος της ΒΔ. Τροιζηνίας.



Εικόνα (1) Γενικός Χάρτης της Τροιζηνίας (Κουτουζής Β. 2016)

2. Βασικές έννοιες υδρογεωλογίας

2.1.Υδρολογικός κύκλος

Ο υδρολογικός κύκλος αρχίζει με την εξάτμιση του νερού από την επιφάνεια του ωκεανού. Το νερό στην ατμόσφαιρα βρίσκεται με τη μορφή υδρατμών και αφού υποστεί συμπύκνωση πέφτει στην επιφάνεια της γης σε υγρή (βροχή) ή στερεή μορφή (χαλάζι, χιόνι). Η υγρασία μεταφέρεται σε όλο τον κόσμο μέχρι να επιστρέψει στην επιφάνεια ως καταβύθιση. Μόλις φτάσει το νερό στο έδαφος, μπορεί να προκύψει μία από τις δύο μεθόδους 1) ένα μέρος του νερού μπορεί να εξατμιστεί στην ατμόσφαιρα ή 2) το νερό μπορεί να διεισδύσει στην επιφάνεια και να μετατραπεί σε υπόγεια ύδατα. Εξάτμιση είναι η διαδικασία μεταφοράς με τη μορφή υδρατμών, του νερού από την επιφάνεια της γης στην ατμόσφαιρα με κατανάλωση ηλιακής ενέργειας η οποία είναι απαραίτητη για την αλλαγή της φάσης του νερού από υγρή σε αέρια. Τα υπόγεια ύδατα είτε καταλήγουν προς τους ωκεανούς, τα ποτάμια και ρέματα, ή απελευθερώνονται πίσω στην ατμόσφαιρα μέσω της διαπνοής. Το υπόλοιπο του νερού που παραμένει στην επιφάνεια της γης είναι απορροή, η οποία εκβάλλει σε λίμνες, ποτάμια και ρέματα και μεταφέρεται πίσω στους ωκεανούς, όπου ο κύκλος αρχίζει ξανά .Κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την επιφανειακή απορροή είναι οι εξής:

1. **Κλιματικοί** (ένταση βροχοπτώσεων, υγρασία αέρα, άνεμοι, εξάτμιση)
2. **Γεωμορφολογικοί** (κλίση λεκάνης απορροής, υδρογραφική πυκνότητα)
3. **Λιθολογικοί** (είδος πετρωμάτων, περατότητα)
4. **Είδος της φυτοκάλυψης**

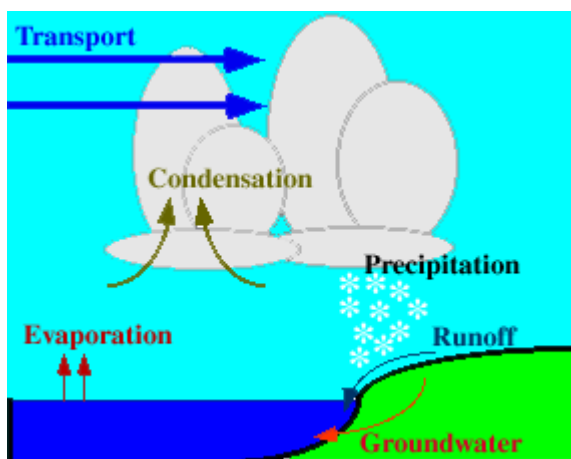
Η κατείσδυση αποτελεί τη σημαντικότερη διεργασία για τον καθορισμό της υδροοικονομίας μιας περιοχής γιατί συμβάλλει στην ανανέωση των αποθεμάτων των υπόγειων υδροφορέων. Αντιπροσωπεύει το μέρος εκείνο των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων που διαπερνά την επιφάνεια του εδάφους . Η ικανότητα κατείσδυσης (**infiltration capacity**) εξαρτάται κυρίως από:

- Την υγρασία του εδάφους
- Τη λιθολογία
- Την κλίση του εδάφους
- Τον τύπο του εδάφους
- Τη βλάστηση
- Την ένταση και κατανομή των βροχοπτώσεων

Συντελεστής κατείσδυσης θεωρείται το μέτρο της κατείσδυσης και εκφράζει το ποσοστό του νερού που κατεισδύει σε σχέση με την ολική βροχόπτωση. Οι τιμές του συντελεστή κατείσδυσης κυμαίνονται από 3% (φλύσχης, φυλλίτες, σχιστόλιθοι , γνεύσιοι , ηφαιστειακά πετρώματα) έως 60% (ανθρακικά πετρώματα).

Τέλος, το κλίμα και η γεωγραφική θέση της περιοχής είναι οι κύριες αιτίες για την ένταση και συχνότητα ενός υδρολογικού κύκλου. Ο χρόνος πραγματοποίησης του κύκλου δεν είναι σταθερός στη διάρκεια. Ο κύκλος μπορεί να συντομευθεί όταν τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα πέφτουν απευθείας στη θάλασσα/ λίμνες, οπότε δεν υπάρχει επιφανειακή απορροή.

Παρακάτω είναι μια κάθετη διατομή που συνοψίζει τις διεργασίες του υδρολογικού κύκλου .



Εικόνα (2): Το νερό μεταφέρεται από την επιφάνεια προς την ατμόσφαιρα μέσω της εξάτμισης, η διαδικασία με την οποία αλλάζει το νερό από υγρό σε αέριο (Μακρόπουλος 2016)

Όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα το συνολικό φαινόμενο της κυκλοφορίας και κατανομής του νερού στην ατμόσφαιρα και τη γη μπορεί να εκφρασθεί από τη σχέση:

$$P=R+E+I$$

Όπου:

P= τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα (**precipitation**)

E= η πραγματική εξατμισοδιαπνοή (**evapotranspiration**)

R= η επιφανειακή απορροή (**runoff**)

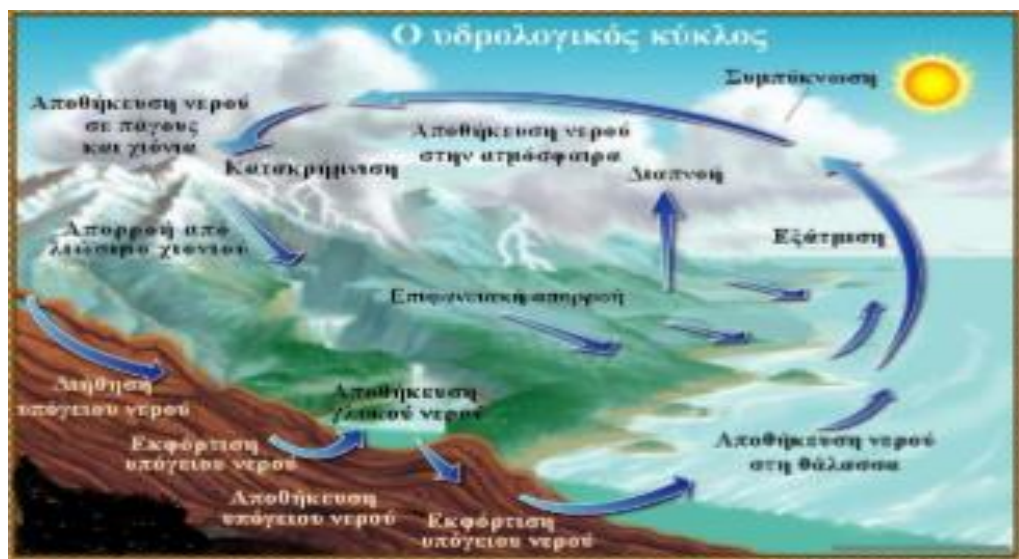
I= η κατείδυση (**infiltration**)

Είναι γνωστό ότι τα παραπάνω μεγέθη μπορούν να εκφραστούν σε ύψος νερού (mm) ή σε όγκο νερού (m³) ή σε ποσοστό επί τοις εκατό (%).

Όσο αναφορά την εξατμισοδιαπνοή είναι οι ποσότητες του νερού που επανέρχονται στην ατμόσφαιρα με την συνδυασμένη δράση της εξάτμισης και της διαπνοής. Εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως είναι:

- Θερμοκρασία εδάφους
- Αέρα
- Υγρασία εδάφους και αέρα
- Ταχύτητα ανέμου
- Βαρομετρική πίεση
- Ηλιακή ακτινοβολία
- Είδος χλωρίδας
- Πορώδες

Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή είναι ένας κλιματικός δείκτης και εκφράζει τη μέγιστη ποσότητα νερού που θα εξατμιζόταν ή διαπνεόταν από τα φυτά, αν τα αποθέματα ήταν αρκετά για να αναπληρώσουν τις απώλειες. Στην Ελλάδα η πραγματική εξατμισοδιαπνοή υπολογίζεται περίπου στο 70 με 85% του ετήσιου ύψους βροχόπτωσης, ενώ στις ορεινές περιοχές οι τιμές είναι έως 55%.



Εικόνα (3): Απλοποιημένη γραφική απεικόνιση του υδρολογικού κύκλου (Μακρόπουλος και Κουτσογιάννης, 2016)

2.2.Υδρογεωλογική συμπεριφορά

Το Πορώδες

Το πορώδες (n) ή ολικό πορώδες είναι ένα μέτρο των διακένων (πόρων, κενών, ρωγμών) που υπάρχουν σε ένα πέτρωμά ή έδαφος και εκφράζεται με το λόγο του συνολικού όγκου των διακένων (V_k) προς τον συνολικό όγκο του πετρώματος /εδάφους:

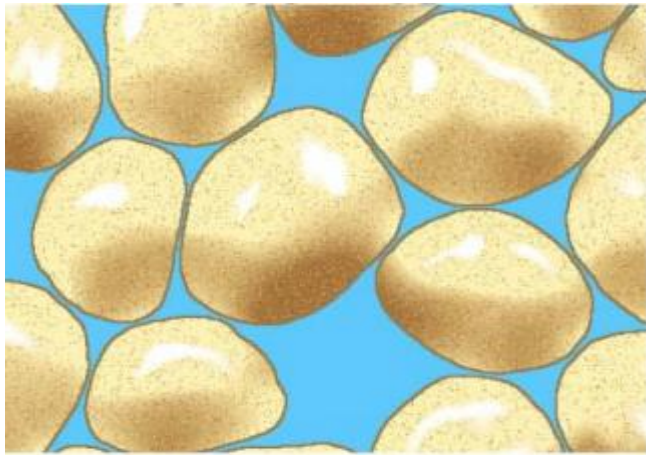
$$\text{Βολ: } n=V_k/V_{ολ}$$

Παρακάτω μπορούμε να παρατηρήσουμε όλες τις τιμές του ολικού πορώδες (Καλλέργη, 1999).

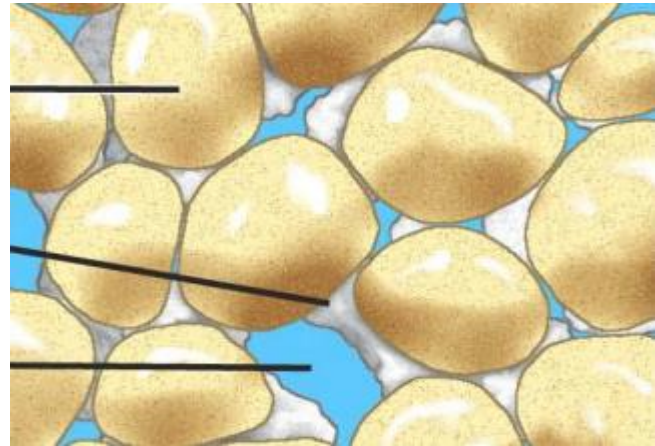
Προσχώσεις	Πορώδες (%)	Ιζηματογενή πετρώματα	Πορώδες (%)	Κρυσταλλικά πετρώματα	Πορώδες (%)
Μικρά χαλίκια	24-36	Ψαμμίτες	5-30	Ρωγματομένα	0-10
Μεγάλα χαλίκια	25-38	Ιλύολιθοι	21-41	Μη ρωγματομένα	0-5
Χονδρόκοκκη άμμος	31-48	Ασβεστόλιθοι	0-40	Βασάλτες	3-35
Λεπτόκοκκη άμμος	26-53	Καρστοποιημένοι ασβεστόλιθοι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

Πίνακας (1) : Τιμές ολικού πορώδες

Αν το πορώδες συνδέεται με % συμπίκνωσης τότε παρατηρούμε το παρακάτω φαινόμενο



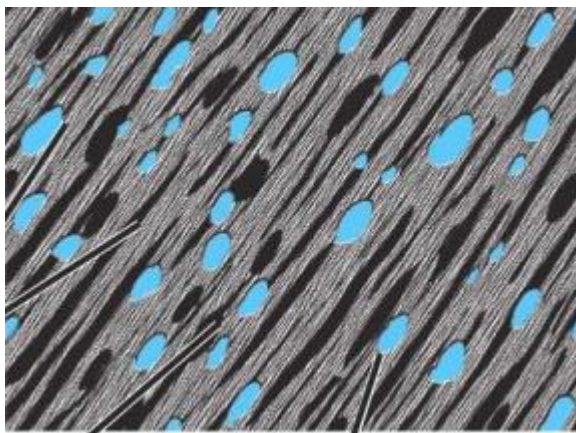
Εικόνα (4) : Χαλαρός ψαμμίτης



**Εικόνα (5) : Συμπαγής
Ψαμμίτης**

(Bill Dupre και Peter Copeland,2004)

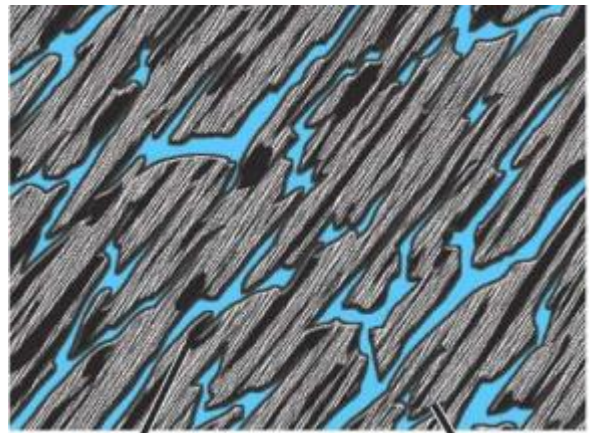
Ενώ αν το πορώδες συνδέεται με ρηγματώση παρατηρούμε την παρακάτω διαφορά :



Εικόνα(6): Χαμηλότερο πορώδες

(χωρίς ρηγματώση)

(Bill Dupre και Peter Copeland,2004)



**Εικόνα (7): Υψηλότερο
πορώδες**

(υψηλή ρηγματώση)

Το Ενεργό πορώδες

Το ενεργό πορώδες αναφέρεται στο πόσο των διάκενων που επικοινωνούν μεταξύ τους και επιτρέπουν την ροή του υπογείου νερού υπό την επίδραση της βαρύτητας ή της υδροστατικής πίεσης. Υπάρχουν και διάκενα τα οποία δεν συνεισφέρουν στη ροή αυτή και καταλαμβάνονται από νερό συγκράτησης . Στους κοκκώδεις σχηματισμούς το ενεργό πορώδες κυμαίνεται από 0-3 % (άργιλος) έως 20% (χαλίκια) . Το πορώδες χαρακτηρίζεται σαν πρωτογενές δηλ. το πορώδες που οφείλεται στα διάκενα που δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια σχηματισμού του πετρώματος και σαν δευτερογενές δηλ. το πορώδες που οφείλεται στα διάκενα που δημιουργήθηκαν λόγω τεκτονισμού, αποσάθρωσης, διάλυσης, δράσης του έμβιου κόσμου κ.ά. Το πρωτογενές πορώδες εξαρτάται από τη διάταξη, το μέγεθος και τη μορφή των κόκκων. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί ταξινομούνται ανάλογα με την δυνατότητα που παρέχουν στο νερό να διεισδύσει και να κινηθεί μέσα στη μάζα τους με την επίδραση της βαρύτητας σε δύο μεγάλες κατηγορίες τους :

1. Υδροπερατούς σχηματισμούς

Ονομάζονται οι γεωλογικοί σχηματισμοί που επιτρέπουν τη διείσδυση και κυκλοφορία του νερού διαμέσου της μάζας των και διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

➤ Μικροδιαπερατά

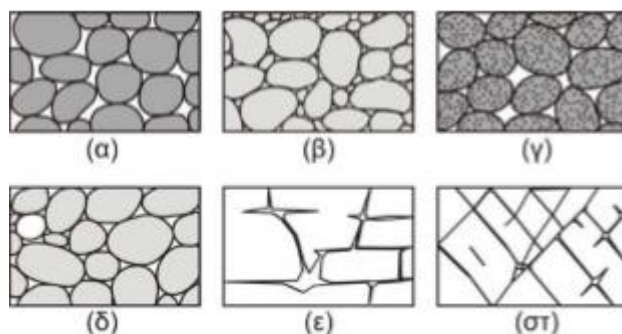
Τα οποία είναι χαλαρά υλικά (άμμος, χάλικες, κροκάλες) ή συμπαγή πετρώματα που η υδροπερατότητα τους οφείλεται στο πρωτογενές πορώδες.

➤ Μακροδιαπερατά

Πρόκειται για πετρώματα που η υδροπερατότητα τους οφείλεται στο δευτερογενές πορώδες.

2. Αδιαπέρατους σχηματισμούς

Είναι οι γεωλογικοί σχηματισμοί που δεν επιτρέπουν την κίνηση των νερών διαμέσου της μάζας των, υπό την επίδραση της βαρύτητας ή της υδροστατικής πίεσης. Παρακάτω φαίνεται η απεικόνιση των διάκενων αυτών.



Εικόνα (8) : Διάκενα : α) καλή διαβάθμιση υλικού με υψηλό πορώδες, β) φτωχή διαβάθμιση με μικρό πορώδες, γ) καλή διαβάθμιση σε πορώδη χαλίκια με υψηλό πορώδες, δ) καλή διαβάθμιση με παρουσία ορυκτής ύλης και μειωμένο πορώδες, ε) πορώδες από διάλυση, στ) πορώδες από ρηγμάτωση (Meinzer, 1923)

2.3. Ταξινόμηση των υπογείων υδάτων

Η ταξινόμηση των υπογείων υδάτων διακρίνεται σε 2 ζώνες:

- Ζώνη αερισμού (**Zone of aeration**)

Η συγκεκριμένη ζώνη αποτελείται από διάκενα, που κατέχονται μερικώς από νερό και μερικώς από αέρα. Η ροή στην ακόρεστη ζώνη είναι κυρίως κατακόρυφη ενώ η κίνηση μπορεί ανοδική ή καθοδική. Η συγκεκριμένη ζώνη υποδιαιρείται σε

1. **Υποζώνη** εδαφικού νερού μικρού πάχους ανάλογα με τον τύπο του εδάφους και τη βλάστηση όπου η υγρασία μεταβάλλεται ανάλογα με τους κλιματικούς παράγοντες.
2. **Ενδιάμεση ζώνη**, όπου το νερό συγκρατείται με υγροσκοπικές και τριχοειδείς δυνάμεις και από την οποία το νερό πρέπει να περάσει κινούμενο προς τη ζώνη κορεσμού.
3. **Τριχοειδή υποζώνη** με ύψος που μεταβάλλεται, αντιστρόφως ανάλογα με το μέγεθος των διάκενων . Η τριχοειδής ανύψωση (h_c) δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$h_c = \left(\frac{2\tau}{\varepsilon R} \right) * \sigma \nu \varphi$$

Όπου:

τ = επιφανειακή τάση

ε = το ειδικό βάρος του νερού

R = η ακτίνα του τριχοειδούς σωλήνα και

φ = η γωνία συνεπαφής ανάμεσα στα τοιχώματα του σωλήνα και το μηνίσκο.

Για καθαρό νερό στους 20°C το ύψος της τριχοειδούς ανύψωσης είναι $h_c = 0,153/R$
Στα αργιλώδη εδάφη το αναπτυσσόμενο δυναμικό από τριχοειδή φαινόμενα είναι μεγάλο σε αντίθεση με τα αμμώδη εδάφη στα οποία είναι ασήμαντο.

- Ζώνη κορεσμού ή κορεσμένη ζώνη (**Zone of saturation**)

Είναι η ζώνη όπου όλα τα διάκενα είναι γεμάτα νερό κάτω από υδροστατική πίεση. Είναι πολύ σημαντική ζώνη γιατί μπορεί να μας τροφοδοτήσει με νερό, καθώς θεωρείται το υδροφόρο στρώμα και η πάνω επιφάνεια της είναι η ελεύθερη επιφάνεια. Το επιφανειακό νερό με την επίδραση της βαρύτητας, της υδροστατικής πίεσης, των τριχοειδών δυνάμεων διεισδύει στο έδαφος διαμέσου των διακένων και κινείται προς την κορεσμένη ζώνη, εμπλουτίζοντας του υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες.

- Ακόρεστη ζώνη (**unsaturated zone**)

Η ακόρεστη ζώνη ή μερικά κορεσμένη ζώνη καταλαμβάνει το τμήμα μεταξύ της στάθμης του υπόγειου νερού και της επιφάνειας του εδάφους. Με εξαίρεση τμημάτων των τριχοειδών κροσσών, οι πόροι περιέχουν νερό και αέρα. Η ποσότητα του νερού σε ένα μερικώς κορεσμένο μέσο εκφράζεται με την περιεκτικότητα κατ' όγκο σε νερό (θ) και δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\theta = V_w / V_T$$

Όπου:

V_w = ο όγκος του νερού και

V_T = ο όγκος του μέσου

Ισχύει πως αν οι πόροι είναι πλήρως κορεσμένοι τότε ο περιεχόμενος όγκος νερού είναι ίσος με το πορώδες (n). Επομένως συμπεραίνουμε ότι στην ακόρεστη ζώνη το περιεχόμενο νερό κυμαίνεται μεταξύ $0 \leq \theta \leq n$

2.4. Υδροφορείς

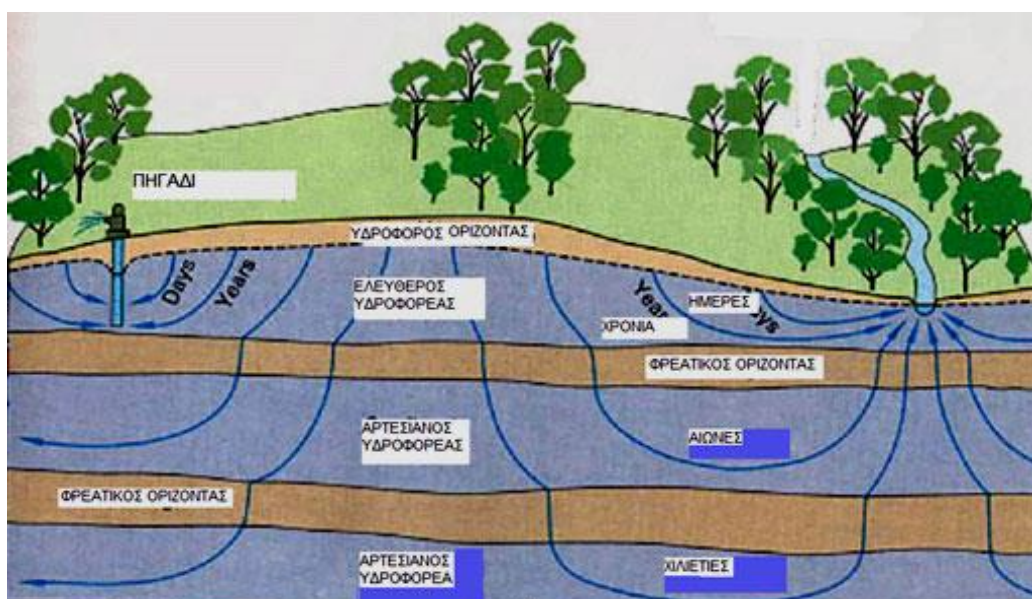
Υδροφορείς είναι οι γεωλογικοί σχηματισμοί που περιέχουν αρκετό κορεσμένο με νερό υλικό, ώστε να έχουν την δυνατότητα τροφοδοσίας πηγών ή γεωτρήσεων με μεγάλες ποσότητες νερού. Χαρακτηριστικό των υδροφορέων είναι η ικανότητα που έχουν να αποθηκεύουν και να μεταβιβάζουν νερό. Οι κυριότεροι τύποι υπόγειων υδροφορέων είναι:

- **Ελεύθεροι υδροφορείς**

Είναι οι υδροφορείς που έχουν ως κατώτερο όριο ένα αδιαπέρατο στρώμα ενώ ως ανώτερο όριο είναι η επιφάνεια του νερού. Στην ελεύθερη επιφάνεια των υπογείων νερών η υδροστατική πίεση είναι ίση με την ατμοσφαιρική. Υπάρχει αναλογία στην μεταβολή του ύψους του υδροφόρου ορίζοντα και στη μεταβολή του όγκου του ύδατος το οποίο είναι αποθηκευμένο στον υδροφόρο.

- **Περιορισμένοι υδροφορείς**

Είναι οι υδροφορείς όπου το νερό είναι εγκλωβισμένο ανάμεσα στα αδιαπέρατα στρώματα, ενώ η πίεση είναι μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής. Έτσι η πιεζομετρική επιφάνεια η οποία είναι η μια εικονική επιφάνεια και συμπίπτει με το επίπεδο της υδροστατικής επιφάνεια στον υδροφόρο, βρίσκεται πιο ψηλά από την βάση της αδιαπέρατης οροφής.



Εικόνα (9) : Υπόγειοι υδροφορείς

2.4.1 Υδραυλικά χαρακτηριστικά των υπογείων υδροφορέων

Τα πιο σημαντικά υδραυλικά χαρακτηριστικά των υπογείων υδροφορέων είναι τα εξής:

- **Υδραυλικό φορτίο (Hydraulic head)**

Η συνολική ενέργεια (**H**) είναι εκείνη που κινεί τα υπόγεια νερά η οποία ισούται με το άθροισμα της κινητικής, της δυναμικής και της υδροστατικής. Ο τύπος είναι εξής:

$$H=(P/\gamma)+z$$

Όπου:

P/γ : φορτίου πίεσης (pressure head), **P**: η υδροστατική πίεση, **γ**: το ειδικό βάρος του νερού ίσο με την πυκνότητα του επί την επιτάχυνση της βαρύτητας.
z : φορτίου ύψους.

Το φορτίο **H** αναφέρεται και ως πιεζομετρικό φορτίο ή πιεζομετρικό δυναμικό και ταυτίζεται με το απόλυτο υψόμετρο της στάθμης του υπόγειου νερού σε μια γεώτρηση ανοιγμένη σε ελεύθερο υδροφορέα. Η κίνηση του υπόγειου νερού σε ένα πορώδες μέσο οφείλεται στην υδροστατική πίεση και στη θέση του ως προς το επίπεδο αναφοράς. Η μεταβολή του υδραυλικού φορτίου ανά μονάδα μήκους κατά της διεύθυνση της υπόγειας ροής ονομάζεται υδραυλική κλίση και δίνεται από τη σχέση:

$$i=Dh/dl$$

Το υδραυλικό φορτίο **H** σε ένα σημείο του πορώδους μέσου πολλαπλασιασμένο με την επιτάχυνση της βαρύτητας **g**, δίνει το δυναμικό ροής **Φ** στο σημείο αυτό:

$$\Phi=Hg$$

Όπου :

Φ = είναι η ενέργεια ανά μονάδα μάζας και

H = είναι η ενέργεια ανά μονάδα βάρους

Το υδραυλικό φορτίο δεν μένει σταθερό, αλλά μειώνεται κατά την κίνηση του υπόγειου νερού λόγω απωλειών (τριβές)

- **Διαπερατότητα- Υδροπερατότητα (Permeability-Hydraulic conductivity)**

Η διαπερατότητα είναι μια σταθερά η οποία εξαρτάται μόνο από τα χαρακτηριστικά του πορώδους μέσου (το σχήμα, το μέγεθος) με διαστάσεις L^2 .

Ο συντελεστής υδροπερατότητας (k σε cm/sec) εκφράζει την ταχύτητα ροής του νερού σε θερμοκρασία 20°C δια μέσου διατομής πορώδους μέσου υπό την επίδραση μοναδιαίας υδραυλικής βαθμίδας και δίνεται από τον εξής τύπο:

$$k = K \cdot \mu \cdot \rho \cdot g$$

όπου:

k = η διαπερατότητα (m^2)

K = η υδραυλική αγωγιμότητα (m/s)

ρ = η πυκνότητα του ρευστού (kg/m^3)

μ = το ιξώδες του ρευστού ($kg/m \cdot s$)

g = η επιτάχυνση της βαρύτητας (kg/s^2)

Η υδραυλική αγωγιμότητα (K) είναι η έκφραση της δυσκολίας ή ευκολίας με την οποία ένα ρευστό ρέει δια μέσου των δομικών κενών ενός στερεού μέσου. Εκφράζεται σε μονάδες ταχύτητας και εξαρτάται από το πορώδες μέσο αλλά και από το ρευστό. Γενικά οι γεωλογικοί σχηματισμοί χαρακτηρίζονται ως:

- Πολύ υδροπερατοί όταν $k \geq 10^{-1}$ m/s
- Υδροπερατοί όταν $10^{-6} < k < 10^{-1}$ m/s
- Λίγο υδροπερατοί όταν $10^{-9} < k < 10^{-6}$ m/s
- Πρακτικά στεγανοί όταν $k \leq 10^{-9}$ m/s

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

Πίνακας (2) Τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας (Καλλέργης, 1999)

Η διαπερατότητα (**Ks**) συνδέεται με την υδραυλική αγωγιμότητα (**k**) με τη σχέση:

$$Ks = k\mu/\gamma$$

Όπου:

μ = το δυναμικό ιξώδες ($ML^{-1}T^{-1}=N.s/m^2$ ή poise $P=dyn.s/cm^2$)

γ = το ειδικό βάρος του ρευστού (N/m^3)

- **Μεταβιβαστικότητα (Transmissivity)**

Από θεωρία η μεταβιβαστικότητα ισούται με το γινόμενο της υδραυλικής αγωγιμότητας (**k**) επί το πάχος του υδροφόρου στρώματος (**D**):

$$T = k * D.$$

Επίσης εκφράζει τον όγκο νερού που περνά από μια μοναδιαία διατομή του στρώματος με υδραυλική κλίση ίση με την μονάδα και την επικράτηση του κινηματικού ιξώδους.

- **Αποθηκευτικότητα (Storativity)**

Συντελεστής αποθηκευτικότητας ή υδροχωρητικότητας (**S**) ορίζεται ως τον όγκο νερού που μπορεί να ληφθεί ή αποθηκευτεί από ένα κατακόρυφο πρίσμα ενός υδροφόρου στρώματος με μοναδιαία επιφάνεια ανά μονάδα μεταβολής του φορτίου. Ο τύπος είναι ο εξής:

$$S = \Delta V / (A * \Delta h)$$

Όπου ΔV είναι ο όγκος νερού που απελευθερώνεται από τη μονάδα οριζόντιας επιφάνειας **A**, εξαιτίας μοναδιαίας πτώσης (ή αύξησης) του φορτίου Δh .

Είναι γνωστό ότι ο συντελεστής αποθηκευτικότητας είναι καθαρός αριθμός και οι τιμές του στους ελευθέρους υδροφορείς κυμαίνονται από 1%-30%, ενώ στους υπό πίεση από 0,0001%-0,5%. Όπου η διαφορά αυτή οφείλεται στον διαφορετικό μηχανισμό απελευθέρωσης νερού από τα ανωτέρω είδη υδροφορέων. Στους υπό πίεση υδροφορείς η αφαίρεση ή η προσθήκη νερού οφείλεται κυρίως σε διόγκωση του νερού και συμπίεση του υδροφορέα και έτσι η **αποθηκευτικότητα** είναι συνάρτηση της ελαστικότητας του υδροφορέα. Άρα με πιο απλά λόγια για να πάρουμε σημαντικές ποσότητες από τα υπό πίεση υδροφόρα στρώματα απαιτούνται μεγάλες πτώσεις της πιεζομετρικής στάθμης και σε μεγάλη έκταση υδροφορέα. Ο τύπος λοιπόν στους υπό πίεση υδροφορείς είναι:

$$S=\gamma*D*(\alpha +\beta*S_y)$$

Όπου

γ =το ειδικό βάρος του νερού,

D = το πάχος του υδροφορέα

S_y =το ενεργό πορώδες

α = ο συντελεστής συμπίεστότητας του υδροφορέα και

β = ο συντελεστής συμπίεστότητας του νερού

2.5.Πηγάδια παρατηρήσεις και άντλησης

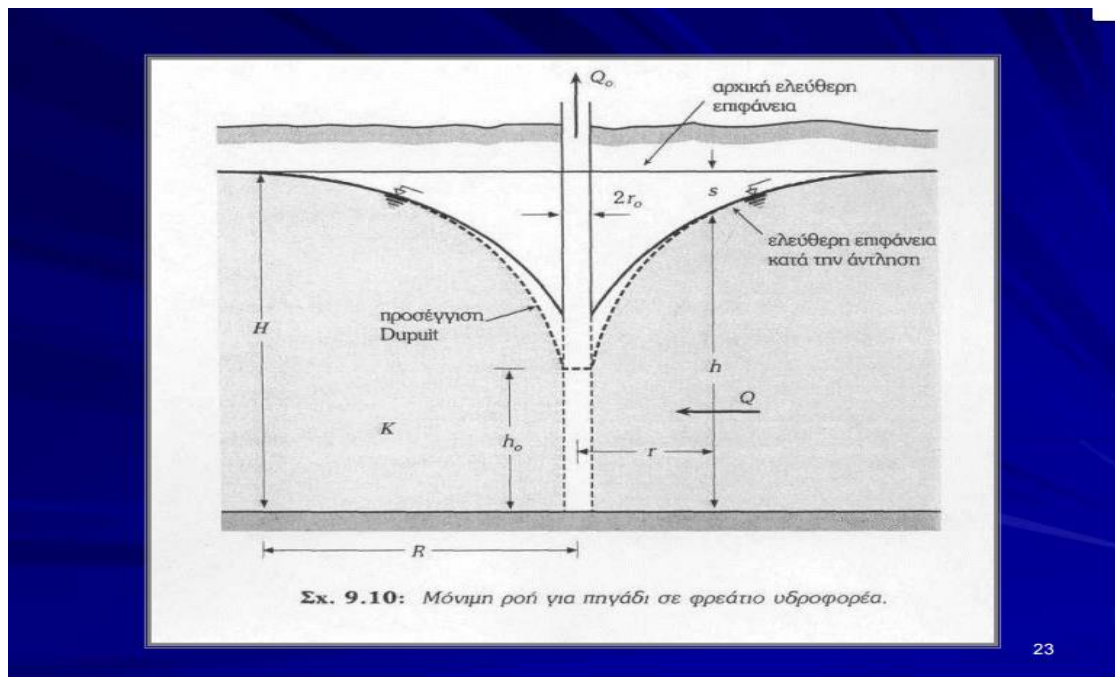
Για να μπορέσουμε να κάνουμε εκτίμηση των ιδιοτήτων του υδροφορέα T (ή K) και S (ή S_s) χρειάζεται να κάνουμε επί τόπου δοκιμαστική άντληση από υδρογεώτρηση και μέτρηση ορισμένων χαρακτηριστικών του συστήματος ροής. Προϋπόθεση βέβαια για την αξιόπιστη εκτίμηση είναι η ικανοποιητική προσέγγιση των πραγματικών συνθηκών του υδροφορέα από τις θεωρητικές υποθέσεις και τις οριακές συνθήκες με τις οποίες επιλύθηκε η εξίσωση ροής.

Η διαδικασία της δοκιμαστικής άντλησης περιλαμβάνει την άντληση δεδομένης παροχής από μια υδρογεώτρηση για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και την καταγραφή της στάθμης σε ένα ή περισσότερα πηγάδια παρατήρησης ,σε διάφορες χρονικές στιγμές.

Γενικά όσο περισσότερα πηγάδια παρατήρησης υπάρχουν, τόσο πιο αξιόπιστα και πιο αντιπροσωπευτικά είναι τα αποτελέσματα αλλά , φυσικά, τόσο μεγαλύτερο είναι το κόσμος της όλης επιχείρησης.

Τα δεδομένα που λαμβάνονται υφίστανται στη συνέχεια επεξεργασία, με βάση την οποία βρίσκονται οι ζητούμενες παράμετροι.

Ένα πηγάδι παρατήρησης αποτελείται από ένα διάτρητο σε όλο το μήκος του σωλήνα το οποίο δεν στεγανοποιείται ως προς τον υδροφορέα που τον περιβάλλει. Έτσι θεωρητικά τουλάχιστον το πηγάδι αυτό δεν προκαλεί κανένα εμπόδιο στην υπόγεια ροή.



Εικόνα (10) Μόνιμη ροή για πηγάδι (Μ. Πανταζίδου 2013)

3. Μελέτη της περιοχής

3.1 Γενικά χαρακτηριστικά περιοχής μελέτης

Από το 2011 και μετά με την εφαρμογή του προγράμματος Καλλικράτης έγινε συνένωση του Δήμου Τροιζηνίας και του Δήμου Μέθανων σε Δήμος Τροιζηνίας-Μέθανων και βρίσκεται στο νοτιοανατολικό άκρο του Νομού Αργολίδας απέναντι από τον Πόρο, είναι υποταγμένος γεωγραφικά στην Αργολίδα και διοικητικά στην Περιφέρεια Αττικής. Βορειοανατολικά, νοτιοανατολικά και νότια βρέχεται από το Σαρωνικό κόλπο, ενώ βορειοδυτικά οριοθετείται από την Αργολίδα, κυρίως με τις οροσειρές Ορθολιθι και Αδερες.

Διακρίνεται σε τρεις ζώνες:

- **Την ηπειρωτική περιοχή**, στην οποία υπάρχουν πολλοί λόφοι ενώ οι πεδιάδες της Τροιζηνίας και της Καλλονής συγκεντρώνουν το μεγαλύτερο μέρος της αγροτικής δραστηριότητας της Τροιζηνίας.
- **Το νησί του Πόρου**, που είναι το νησιωτικό τμήμα της επαρχίας και αποτελεί το κυρίως τουριστικό και διοικητικό κέντρο της, και
- **Τη χερσόνησο των Μεθάνων**, η οποία είναι γνωστή για τις ιαματικές πηγές της.

Σύμφωνα με την απογραφή του 2011 έχει πληθυσμό 7.143 κατοίκων και έδρα του είναι ο Γαλατάς.

3.2 Περιβάλλον - Οικοσύστημα της περιοχής

Το φυσικό περιβάλλον της Τροιζηνιας-Μεθάνων είναι πολύμορφο και εναλλάσσεται στις πεδινές και ημιορεινές περιοχές. Οι περιοχές δημιουργούν μικρούς ή μεγαλύτερους όρμους. Το οικοσύστημα είναι γεωργικό και οι δασικές εκτάσεις εκτείνονται στα ορεινά ενώ υπάρχει βλάστηση η οποία αναπτύσσεται στις όχθες των ρεμάτων. Κύριο χαρακτηριστικό των δασών είναι το χαλεπιο πευκη ενώ υπάρχουν πλατάνια και κυπαρίσσια.

Τα φρυγανινα οικοσυστήματα που αναπτύσσονται ανάλογα με τα λιθολογικά χαρακτηριστικά, για τα οποία θα μιλήσουμε πιο κάτω, είναι :

- **Φρύγανα με αστοιβη** , που κυρίως εμφανίζονται σε φλύσχη και βρίσκονται σε εγκαταλελειμμένες καλλιέργειες
- **Φρύγανα με θυμάρι** σε ασβεστολιθικά εδάφη, με μεγάλο ποσοστό χαλικιών και βράχων
- **Φρύγανα με αλογοθυμαρο** σε δυσπρόσιτους τόπους παλαιών καλλιεργειών.
- **Φρύγανα με ασφακα** σε βραχώδεις ασβεστολιθικές περιοχές με αρκετά μεγάλες κλίσεις.

Η χλωρίδα αποτελεί τη βάση των αυτότροφων οργανισμών της τροφικής αλυσίδας και από εκεί και πέρα οι καταναλωτές πρώτης, δεύτερης, τρίτης κ.ο.κ. τάξης, δηλαδή η παρουσία των ανώτερων ειδών, εξαρτάται από την παρουσία των κατώτερων ειδών και γενικότερα την ύπαρξη των κατάλληλων οικολογικών θώκων για την ανεύρεση τροφής και την αναπαραγωγή.

Να επισημάνουμε εδώ ότι η χλωρίδα της Τροιζηνιας είναι γνωστή στο Πανελλήνιο για τις αρωματικές και φαρμακευτικές της ιδιότητες.

Η πανίδα της Τροιζηνιας συναρτάται από το γεωλογικό υπόβαθρο. Αυτό είναι ασβεστολιθικό και η φυτική διάπλαση (πευκοδάση ή θαμνώνες) και οι εν γένει κλιματολογικές συνθήκες επιτρέπουν τη διαβίωση συγκεκριμένης ποικιλίας ειδών πανίδας. Η χαρακτηριστική πανίδα είναι λαγοί, αγριοκούνελα, χερσαίες χελώνες, ημερόβιες σαύρες, ασβοί, ποικιλία φιδιών, νυχτερίδες, ποντίκια, αρουραίοι, αλεπούδες

3.3 Μετεωρολογικά χαρακτηριστικά

Όσο αναφορά τα μετεωρολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής της Τροιζηνίας παρατηρείται ότι επικρατεί ένα εύκρατο και Μεσογειακό κλίμα με ήπιο και σχετικά υγρό χειμώνα, όπου τα ακραία καιρικά φαινόμενα (παγετός, ισχυροί άνεμοι κ.λπ.) είναι σπάνια.

Τα κύρια χαρακτηριστικά του κλίματος της Τροιζηνίας :

- Η μέση ετήσια βροχόπτωση που το ύψος της είναι περίπου από 400-600 mm.
- Ο ήπιος και γλυκός χειμώνας και το σχετικά ξηρό και ζεστό καλοκαίρι με μέσες θερμοκρασίες 9- 10°C και 27-28°C αντίστοιχα.
- Η μεγάλη ηλιοφάνεια.
- Οι μέτριας έντασης βόρειοι άνεμοι, που περιορίζουν σημαντικά την ατμοσφαιρική υγρασία.

Η υγρή περίοδος είναι από τον Νοέμβριο μέχρι τον Ιανουάριο, ενώ η περίοδος χαμηλότερη βροχόπτωση είναι μεταξύ Ιουνίου και Αυγούστου.

3.4 Γεωλογία- υδρογεωλογία της περιοχής

Η γεωλογία της περιοχής είναι πλούσια σε ηφαιστειακές δραστηριότητες οι οποίες έχουν προικίσει το έδαφος με μια ιδιαίτερη γραφική γεωμορφολογία κάνοντας το εξαιρετικά γόνιμο. Από γεωλογική-υδρογεωλογική άποψη ο υδροφορέας της Τροιζηνίας αποτελείται από χαλαρά ιζήματα των αργίλων, λάσπη, άμμο και βότσαλα. Η σύνθεση των ιζημάτων που υπερβαίνει τα 100 m σε πάχος είναι κατά κύριο λόγο προέλευσης ασβεστόλιθο και οφιολιθικά Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα το νότιο ορό του υδροφορέα , στην οροσειρά Αδερεις, υπάρχει φλύσχη ιζήματα εκατοντάδες μέτρα πάχους η οποία χαρακτηρίζεται κυρίως από την ιλύες, ψαμμίτες και μάργες. Μέσα στη φλύσχη υπάρχουν διαφορετικοί λιθολογικοί σχηματισμοί όπως ασβεστόλιθοι, σερπεντινίτες, οφιολιθικά πετρώματα. Το βορειοδυτικό τμήμα περιλαμβάνει τα ασβεστολιθικά βουνά Μεγαλοβούνι (860μ), Ασπροβούνι (851μ) και Ορθοβούνι (1103μ) που εκτείνονται μεταξύ Τραχείας και της παραλιακής περιοχής της Δρυόπης. Στο εσωτερικό αυτής της περιοχής σχηματίζεται η οφιολιθική λεκάνη του Καρατζά.

Το βόρειο και ανατολικό τμήμα της Τροιζηνίας περιλαμβάνει τις πλαγιές των Αδέρων (726μ) που εκτείνονται μέχρι την Τροιζήνα και τον Γαλατά και την λεκάνη της Τροιζηνίας , η οποία παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τον σκοπό της παρούσας μελέτης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα πολλών ερευνητικών εργασιών που έχουν δημοσιευθεί, η γεωλογική δομή της περιοχής είναι πολύπλοκη χωρίς να έχει διευκρινισθεί μέχρι σήμερα πλήρως. Στους γεωλογικούς χάρτες που καλύπτουν την περιοχή δεν γίνεται διάκριση των ζωνών με αποτέλεσμα να μην είναι σαφής η

θέση των οφιολίθων και η σχέση τους με τους ασβεστολιθικούς σχηματισμούς και με τον φλύσχη. Πάντως σε μελέτη του Υπουργείου Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων που εκπονήθηκε από τον μελετητή Κάρολο Μπεζέ (έτους 1999) κατά την οποία χαρτογραφήθηκε έκταση 50 τετρ. χλμ. στο ΒΔ τμήμα της Τροιζηνίας, αναφέρονται τα κάτωθι συμπεράσματα:

- Στο δυτικό τμήμα στην περιοχή Αγ. Ελένης και Καρατζά εμφανίζονται ασβεστόλιθοι επωθημένοι πάνω στους οφιολίθους.
- Νότια της Δρυόπης υπάρχει ο ορεινός όγκος του Μεγαλοβουνίου που αποτελείται από ασβεστόλιθους επωθημένους πάνω στους οφιολίθους σχηματίζοντας ένα μεγάλο αντίκλινο με άξονα ΒΔ-ΝΑ. Ο ορεινός όγκος προεκτείνεται νότια του Μαυροβουνίου σχηματίζοντας το βουνό Ορθολίθι, που αποτελείται επίσης από ασβεστόλιθους. Το βουνό αυτό σχηματίζει επίσης ένα αντίκλινο του οποίου η ανατολική πλευρά, προς το χωριό Καλλονή, καλύπτεται εντελώς από φλύσχη. Η περιοχή αυτή έχει διαβρωθεί και έχει σχηματισθεί η λεκάνη απορροής του Μεγάλου Ρέματος.

Σύμφωνα με τις εγκεκριμένες μελέτες του ΥΠΑΑΤ (Κάρου Μπεζέ 1999), αλλά και απόψεις άλλων γεωλόγων ερευνητών, το κεντρικό τμήμα της λεκάνης αυτής καλύπτεται από προσχώσεις των χειμάρρων. Μέσα στις προσχώσεις αυτές σχηματίζεται ελεύθερος υδροφόρος ορίζοντας που εκφορτίζεται υπογείως προς τον όρμο του Βιδίου και προς την πλευρά της λίμνης Ψήφτας. Ο υδροφόρος ορίζοντας της Τροιζήνας τροφοδοτείται από λεκάνη έκτασης 50, 16 τετρ. χλμ. Εξ' αυτών τα 18,5 τετρ. χλμ. είναι πεδινή έκταση. Υδρολογικά η λεκάνη τροφοδοσίας αποτελείται από τις λεκάνες των κάτωθι χειμάρρων:

- A) Του Διαβολογέφυρου,
- B) Του Κουμουνδούρου
- Γ) Της Κρύφτης
- Δ) Του Αγ. Κωνσταντίνου
- E) Της Ψήφτας.

Ο φυσικός εμπλουτισμός στην υπόψη λεκάνη γίνεται από την κατείσδυση του νερού των χειμάρρων στους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες.

Όσο αναφορά τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης μας στα ανατολικά η Τροιζηνία διασχίζεται από χειμάρρους που συγκεντρώνουν τα νερά της βόρειας πλαγιάς των Αδέρων. Οι ορεινές λεκάνες Διαβολογέφυρου, Κουμουνδούρου, Κρύφτης, Αγ. Κωνσταντίνου, τροφοδοτούν με τα νερά τους χειμάρρους που διαρρέουν το πεδινό τμήμα. και τελικά τα νερά εισέρχονται στην πεδιάδα της Τροιζήνας. Η λεκάνη της Τροιζήνας περιλαμβάνει την πεδινή περιοχή μεταξύ της λίμνης Ψήφτας και του όρμου του Βιδίου, και τις ημιορεινές περιοχές γύρω από την πεδινή λεκάνη που βρίσκονται βόρεια και νότια αυτής, δηλαδή την Τακτικούπολη και την Τροιζήνα. Στην λεκάνη της Τροιζήνας, ισχύουν οι ίδιες

παρατηρήσεις όπως και παραπάνω. Έχει δηλαδή παρατηρηθεί το ίδιο φαινόμενο υφαλμύρισης, ελήφθησαν τα ίδια προστατευτικά μέτρα, πλην όμως η κατάσταση δεν παρουσιάζει βελτίωση καθώς εκτός από τις αντλούμενες ποσότητες που προορίζονται για την άρδευση συνεχίζεται η απόληψη μεγάλων ποσοτήτων νερού για την ύδρευση της νήσου Ύδρας, του Δήμου Μεθάνων, των Δ.Δ. Τροιζήνας, Τακτικούπολης, του Δήμου Πόρου και επιπλέον από τη διείσδυση της θάλασσας στο Ρέμα Κουμουνδούρου, λόγω υψομετρικής διαφοράς. Στην ίδια περιοχή λόγω εφαρμογής δυναμικών καλλιεργειών παρατηρείται σημειακή εμφάνιση νιτρικών και νιτρωδών αλάτων. Ο φυσικός εμπλουτισμός στην υπόψη λεκάνη γίνεται από την κατείσδυση του νερού των χειμάρρων στους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες.

Παρακάτω βλέπουμε τους χάρτες των περιοχών Δρυόπης, Τραχείας και Τροιζήνας.



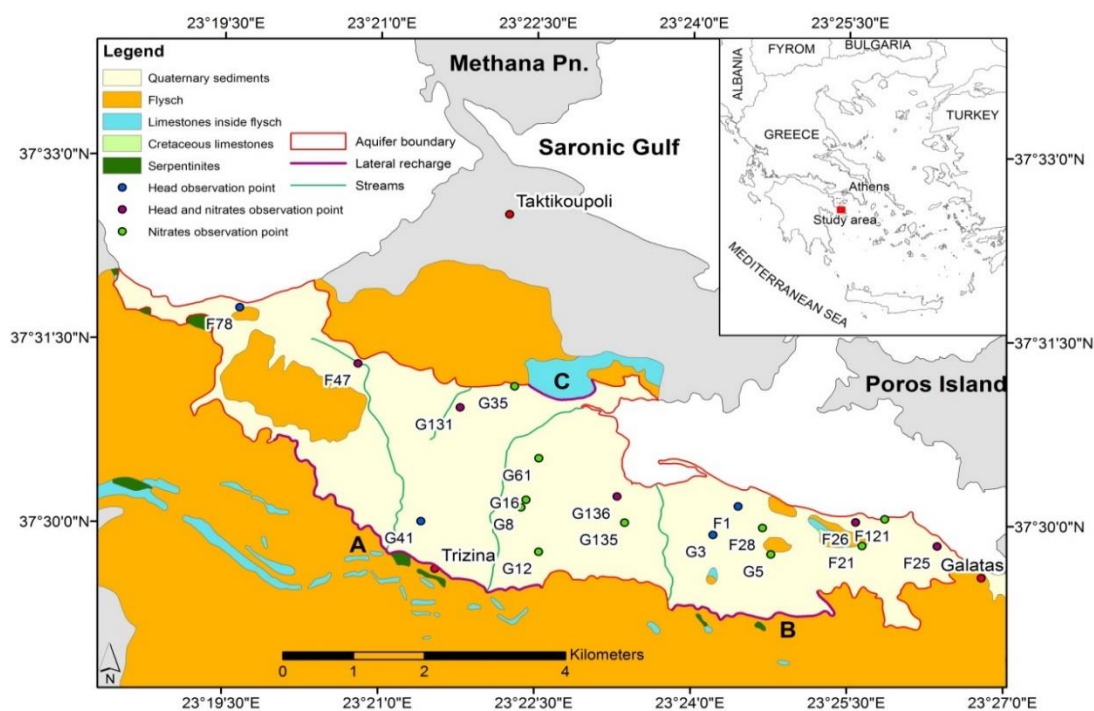
Εικόνα (11) : Χάρτης Δρυόπης (Google Earth)



Εικόνα (12) : Χάρτης Τραχείας (Google Earth)



Εικόνα (13) : Χάρτης Τροιζήνας (Google Earth)



**Εικόνα (14) Γεωλογικός χάρτης Τροιζηνίας
(Ματιάτος και Παπαδοπούλου 2012)**

Η ροή των υπόγειων υδάτων ξεκινά από νοτια-νοτιοδυτικά προς τα βορεια-βορειαανατολογικά και φτάνει μέχρι τον Σαρωνικό κόλπο και ανάμεσα στο Γαλατά και τον Πορο όπου και εκβαλουν. Υπάρχει συχνή χρήση λιπασμάτων στον υδροφορέα και υπερκμετάλευση των υπόγειων υδάτινων πόρων λόγω της μεγάλης καλλιεργητικής δραστηριότητας η οποία έχει μειώσει αισθητά την ποιότητα του νερού με αποτέλεσμα οι συγκεντρώσεις νιτρικών να υπερβαίνουν το όριο των 50 mg/l (οδηγία 98/83).

3.5 Νιτρική ρύπανση υπόγειων υδάτων

Στην εποχή που ζούμε, μια εποχή βιομηχανοποίησης και τουριστικής ανάπτυξης, η ανάγκη για χρήση των υδατικών πόρων έχει εκτοξευθεί στα ύψη. Δυστυχώς όμως παρατηρείται μεγάλη έλλειψη στα υδατικά αποθέματα στις παράκτιες μεσογειακές χώρες τα οποία δεν είναι ικανά να καλύψουν τις αναγκές που υπάρχουν με αποτέλεσμα, μέσω της υπεράντλησης να υποβαθμίζεται η ποιότητα των υπόγειων νερών. Μία τέτοια υποβάθμιση είναι η ρύπανση των υπόγειων νερών από υγρά και στερεά οικιακά απόβλητα, φυτογάρμακα και χημικά λιπάσματα.

Τα νιτρικά στα φυσικά ύδατα προέρχονται από γεωργικά εκμεταλλεύσιμες εκτάσεις και οι συγκεντρώσεις τους μπορεί να είναι σχετικά υψηλές εξαιτίας της μεγάλης ευκινησίας των ιόντων αυτών στο έδαφος. Τα νιτρώδη ιόντα αποτελούν ένα ενδιάμεσο στάδιο οξείδωσης των αζωτούχων ενώσεων από τη μορφή των αμμωνιακών προς τελικό προϊόν τα νιτρικά ιόντα. Στα φυσικά νερά η συγκέντρωση των νιτρώδων ιόντων είναι μηδενικής έως ελάχιστη. Σε μεγάλες συγκεντρώσεις μπορεί να προκαλέσουν μεθαιμοσφαιριναιμία και ιδιαίτερα στα βρέφη. Επίσης υψηλές ποσότητες νιτρικών ή νιτρώδων μπορεί να προκαλέσουν γαστρικά προβλήματα και υπάρχει η υποψία για αύξηση του κινδύνου για καρκίνο. Η διακύμανση της συγκέντρωσης των νιτρικών σε εποχή υψηλής στάθμης ανταποκρίνεται και στις μεταβολές του υδρολογικού κύκλου. Ισχυρές βροχοπτώσεις πιθανώς προκαλούν άμεση έκπλυση των νιτρικών ιδιαίτερα κατά του μήνες με το μεγαλύτερο ύψος βροχόπτωσης και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την υγρή περίοδο, οι συγκεντρώσεις των νιτρικών να είναι σε υψηλότερα επίπεδα από αυτές που καταγράφονται την ξηρή εποχή. Η αλόγιστη χρήση λιπασμάτων σε τοπικό επίπεδο έγινε αιτία εμφάνισης νιτρώδων, νιτρικών αλάτων και άλλων ρυπαντών στα υπόγεια και επιφανειακά νερά της περιοχής μελέτης μας. Η επιπρόσθετη ανάγκη για αναβάθμιση του βιοτικού επιπέδου της περιοχής έπαιξε σημαντικό ρόλο στην επιπλέον χρήση υδατικών πόρων. Η ρύπανση του υπόγειου νερού είναι θέμα υψίστης σημασίας και αυτό γιατί οι υδροφόροι αποτελούν σημαντική πηγή πόσιμου νερού και αφετέρου γιατί αν ένας υδροφορέας ρυπανθεί είναι εξαιρετικά δύσκολο να αποκατασταθεί.

Σύμφωνα με μελέτες η γεωργία είναι υπεύθυνη για το 50 % και παραπάνω του συνολικού ρυπαντικού φορτίου στο υδατικό περιβάλλον. Ένα λάθος που κάνουν πολλοί αγρότες είναι η υπερκατανάλωση λιπασμάτων. Εκτός από ότι αυξάνουν το κόστος παραγωγής, προκαλούν σημαντική περιβαλλοντική ζημία, αφού ρυπαίνουν το έδαφος αλλά και τα υπόγεια και επιφανειακά νερά. Τα νιτρώδη και νιτρικά άλατα είναι το χημικές ενώσεις του άζωτου με το οξυγόνο (NO_3^- ή NO_2^-) που συνδυάζονται με διάφορες άλλες οργανικές και ανόργανες ενώσεις. Όταν ληφθούν στο σώμα, τα νιτρικά μετατρέπονται σε νιτρώδη. Η ρύπανση του εδάφους δημιουργείται κυρίως από την χρήση ορισμένων τεχνικών της σύγχρονης γεωργίας όπως τα χημικά λιπάσματα και τα φυτοφάρμακα. Τα χημικά λιπάσματα αυξάνουν την παραγωγή σε μεγάλο βαθμό, αλλά περιέχουν ίχνη από τοξικά μέταλλα και μεταλλοειδή τα οποία παραμένουν στο έδαφος και συσσωρεύονται στους επιφανειακούς ορίζοντες, ιδιαίτερα στις περιοχές κοντά στις ρίζες. Ακόμα τα εδάφη

είναι εκτεθειμένα στους ρύπους που δημιουργούνται στην ατμόσφαιρα και οι οποίοι καταλήγουν σε αυτά με τις βροχές. Στη συνέχεια οι ρύποι που δημιουργούνται στο έδαφος καταλήγουν αργά ή γρήγορα στην υδατόσφαιρα και μέσω των επιφανειακών και υπόγειων νερών στις θάλασσες.

Οι συγκεντρώσεις των νιτρικών, εκφρασμένες σε άζωτο ($\text{NO}_3\text{-N}$) σε μη ρυπασμένα επιφανειακά νερά κυμαίνονται σε τιμές μικρότερες του 1 mg/L. Συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από 1 mg/L υποδηλώνουν ανθρωπογενείς επιδράσεις, όπως αστικά λύματα και απορροή από αστικές και γεωργικές εκτάσεις. Η νιτρορύπανση γεωργικής προέλευσης, είναι μια σημαντική αιτία ποιοτικής υποβάθμισης των υπόγειων νερών. Οι συγκεντρώσεις NO_3 - είναι μικρότερες όταν παρεμβάλλεται αργιλικό στρώμα στην ακόρεστη ζώνη και μειώνονται με το βάθος κάτω από τη στάθμη του υπόγειου νερού. Γενικά οι αβαθείς υδροφόροι ορίζοντες ρυπαίνονται από νιτρικά ιόντα σε μεγαλύτερο βαθμό από τους βαθύτερους υδροφόρους. Οι συγκεντρώσεις του νιτρικού αζώτου στους αγρούς που λιπαίνονται υπερβαίνουν τα 10 mg/L. Η υπερβολική λίπανση μπορεί να προκαλέσει την έκπλυση των νιτρικών στο υπόγειο νερό.

Η ρύπανση αυτή είναι άρρηκτα συνδεδεμένη και υποχρεωτικά συνυπάρχει με τη ρύπανση του εδάφους, παράμετρος που συνήθως αγνοείται όταν γίνεται λόγος για τη ρύπανση των υπόγειων νερών. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων, απόβλητα που περιέχουν τους επικίνδυνους για τη δημόσια υγεία ρύπους καταλήγουν στο έδαφος. Από εκεί, ανάλογα με τις φυσικοχημικές ιδιότητες του ρύπου αλλά και του εδάφους, εξαρτάται το αν και πότε οι απορροές θα φτάσουν στον υπόγειο υδροφόρο και σε ποια μορφή. Το σύστημα έδαφος – υπόγεια νερά είναι συνεπώς ενιαίο, ειδικά στην περίπτωση της ρύπανσης, και κατ' αυτόν τον τρόπο θα πρέπει να αντιμετωπίζεται. Συμπερασματικά, δεν μπορεί να γίνεται λόγος για ρύπανση υπόγειου υδροφόρου και παράλληλα να αγνοείται η ρύπανση του εδάφους και οι αλληλοεπιδράσεις ρύπου-εδάφους-νερού.

Οι πηγές ρύπανσης των υπόγειων υδροφορέων διαχωρίζονται σε σημειακές και μη σημειακές. Στην κατηγορία των σημειακών πηγών εντάσσονται οι ανεξέλεγκτες χωματερές, σταθμοί επεξεργασίας λυμάτων, βιομηχανίες, βιοτεχνίες, κτηνοτροφικές μονάδες, αστικά λύματα, φρεάτια κλπ. Οι μη σημειακές πηγές προέρχονται κυρίως από τη γεωργία, τη διάβρωση πετρωμάτων και την εισροή θαλασσινού νερού από υπεράντληση των παράκτιων υδροφορέων και είναι πιο δύσκολο να αντιμετωπιστούν οι επιπτώσεις τους. Η κύρια διαδικασία που προκαλεί την αύξηση νιτρικών στο υπόγειο νερό είναι η οξείδωση της αμμωνίας που προέρχεται από την ταχεία διήθηση ανόργανων λιπασμάτων που χρησιμοποιούνται σε καλλιεργούμενες εκτάσεις.

Όσο αναφορά τις επιπτώσεις που υπάρχουν στην υγεία χωρίζονται σε 2 κατηγορίες:

- Βραχυπρόθεσμες επιπτώσεις: Τα υπερβολικά επίπεδα νιτρικών αλάτων στο πόσιμο νερό έχουν προκαλέσει σοβαρές ασθένειες και μερικές φορές το θάνατο. Οι σοβαρές ασθένειες σε βρέφη οφείλονται στην μετατροπή των νιτρικών σε νιτρώδη από το σώμα, το οποίο μπορεί να επηρεάσουν την ικανότητα του

αίματος να μεταφέρει οξυγόνο στα παιδιά. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μια οξεία κατάσταση στην οποία η υγεία επιδεινώνεται ταχύτατα μέσα σε μια περίοδο λίγων ημερών. Τα συμπτώματα περιλαμβάνουν δυσκολία στην αναπνοή και κυανό χρώμα στο δέρμα.

- Μακροπρόθεσμες επιπτώσεις: Τα νιτρικά και τα νιτρώδη έχουν τη δυνατότητα να προκαλέσουν τις ακόλουθες συνέπειες από μια χρόνια έκθεση σε επίπεδα πάνω από τα μέγιστα επιτρεπτά : διούρηση, αύξηση αμυλωδών αποθέσεων και αιμορραγία της σπλήνας.

4. Αριθμητική προσομοίωση της ροής στον υδροφορέα

4.1 Γενικά

Στη περίπτωση προσομοίωσης της υπόγειας ροής σε ένα υδροφόρο σύστημα, επιβάλλεται η ορθή επιστημονικά κατασκευή ενός μοντέλου προσομοίωσης το οποίο θα αποδίδει αξιόπιστα αποτελέσματα καθώς και αντικειμενικά αποδεκτές λύσεις σε υποθετικά σενάρια μεταβολής των βασικών παραμέτρων. Με τον όρο μαθηματικό μοντέλο, εννοείται η όσο το δυνατόν πειστικότερη αποτύπωση του συνόλου των λειτουργιών ενός φυσικού συστήματος έτσι ώστε να γίνει δυνατή η απεικόνιση των βασικών λειτουργιών του φυσικού συστήματος, σε απλοποιημένη μορφή. Επίσης παρέχεται και η δυνατότητα μεταβολής των χαρακτηριστικών σχετικά με την ευαισθησία του πραγματικού συστήματος στις μεταβαλλόμενες παραμέτρους. Συγκεκριμένα για τα υπόγεια συστήματα , η ροή ύδατος στο εσωτερικό των υδροφορέων , περιγράφεται από ένα σύνολο διαφορικών εξισώσεων, οι οποίες βασίζονται στη αρχή διατήρησης της μάζας και διαφοροποιούνται ανάλογα με το είδος του υδροφορέα (εδafικό υλικό, υδραυλική αγωγιμότητα) καθώς και κατ' επέκταση τις συνθήκες ροής. Για πορώδη μέσα, η θεωρία της υπόγειας ροής ύδατος στηρίζεται στο νόμο του Darcy.

Για προβλήματα υπόγειας ροής αλλά και μεταφοράς ουσιών με ρυπαντικές και διαλυτικές ιδιότητες στο εσωτερικό υδροφορέων, τα μαθηματικά μοντέλα, αποτελούν την πλέον κατάλληλη μέθοδο επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν υδροφόρα φυσικά συστήματα . Αυτά τα μοντέλα κατά της επίλυση των διαφορικών εξισώσεων εφαρμόζουν την αναλυτική ή την αριθμητική μέθοδο επίλυσης ενώ χρησιμοποιούνται από ηλεκτρονικούς υπολογιστές, γεγονός το οποίο παρέχει τη δυνατότητα εξέλιξης και βελτίωσης τους παράλληλα με αυτήν των υπολογιστών.

Το σημαντικότερο πρόβλημα που παρουσιάζεται κατά την σύνταξη ενός μαθηματικού μοντέλου είναι η κατά προσέγγιση μεταφορά των δεδομένων από την κλίμακα του φυσικού συστήματος στην κλίμακα του μοντέλου. Ως αποτέλεσμα της προσέγγισης αυτής, τα εισαγόμενα στοιχεία, προέρχονται από εκτιμήσεις που συχνά απέχουν από την πραγματικότητα.

Οι λόγοι που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα μαθηματικό μοντέλο είναι οι εξής:

1. Η διερεύνηση, η επεξεργασία και η καταγραφή των μηχανισμών του δικτύου ροής γίνεται πιο εύκολη με την χρήση του σωστού μαθηματικού μοντέλου
2. Να χρησιμοποιηθεί ως μία πρώτη προσέγγιση για την ποιοτική εκτίμηση της πιθανότητας ρύπανσης και επιβάρυνσης του υδροφορέα.
3. Να διερευνηθεί το πλήθος των επιλύσεων που συμφωνούν με το προτεινόμενο εννοιολογικό μοντέλο
4. Να αποτελέσει υπόβαθρο για τον προσδιορισμό των αναγκών σε επιπλέον δεδομένα και μια βάση για επικαιροποίηση όταν νέα δεδομένα γίνουν διαθέσιμα.

Τα μοντέλα που κατασκευάζονται με σκοπό τη μελέτη της υπόγειας ροής σε υδροφορείς και ταυτόχρονα διακρίνονται από τη δυνατότητα απόδοσης υποθετικών μελλοντικών συνθηκών, κατατάσσονται σε τρεις βασικές κατηγορίες (Τάντος Β., 2006):

- **Μαθηματικά μοντέλα**

Τα μαθηματικά μοντέλα στοχεύουν στην προσομοίωση της κίνησης του υπόγειου ύδατος με χρήση και κατ' επέκταση επίλυση διαφορικών εξισώσεων. Η υδρολογία είναι ένας τομέας που χρησιμοποιεί αρκετά τα μαθηματικά μοντέλα. Οι βασικές διαφορικές εξισώσεις που επιλύουν είναι η εξίσωση (νόμος) του Darcy, η εξίσωση της συνέχειας, η εξίσωση ροής του νερού καθώς και η εξίσωση Laplace. Τέλος τα μαθηματικά μοντέλα θεωρούνται κατάλληλα για την επίλυση προβλημάτων που αφορούν υδροφορείς με φυσική γεωμετρία και με μεταβαλλόμενες παραμέτρους όπως για παράδειγμα το υδραυλικό φορτίο αλλά και το ρυθμό άντλησης από υδροληψίες.

- **Φυσικά μοντέλα**

Τα φυσικά μοντέλα λαμβάνουν χώρα σε εργαστηριακό περιβάλλον και αποτελούν κατά βάση μία αξιόπιστη αναπαράσταση των φυσικών λειτουργιών και φαινομένων ενός φυσικού συστήματος. Με τον τρόπο αυτό πραγματοποιείται η προσομοίωση του υπό μελέτη φυσικού συστήματος σε κλίμακα μικρότερη αυτής του φυσικού περιβάλλοντος. Στην πραγματικότητα όμως θα πρέπει να αναφερθεί ότι το βασικό μειονέκτημα των μοντέλων αυτών αποτελεί η γενίκευση των διαδικασιών και αποτελεσμάτων του μοντέλου.

- **Αναλογικά μοντέλα**

Τα αναλογικά μοντέλα αποτελούν εργαστηριακές προσομοιώσεις φυσικών συστημάτων, για τα οποία η αναλυτική επεξεργασία τους δεν είναι εύκολη. Η

προσομοίωση τους όμως βασίζεται σε μερικές διαφορικές εξισώσεις αλλά και σε οριακές συνθήκες οι οποίες χαρακτηρίζουν το φυσικό σύστημα. Γνωστότερα μοντέλα αυτού του είδους αποτελούν τα ηλεκτρικά ομοιώματα ενώ είναι αναγκαίο να αναφερθεί ότι τα τελευταία χρόνια τα αναλογικά μοντέλα έχουν ουσιαστικά αντικατασταθεί από τα κατά πολύ αποτελεσματικότερα μαθηματικά μοντέλα.

4.2 Κίνηση του υπόγειου νερού

Η κίνηση των υπόγειων νερών ακολουθεί τους νόμους των Νευτώνειων ρευστών. Το νερό είναι Νευτώνειο ρευστό και αυτό σημαίνει ότι η διατμητική τάση (τ =δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας) είναι ανάλογη της βαθμίδας ταχύτητας (du/dy) και του δυναμικού ιξώδους (μ):

$$\tau = \mu(du/dy)$$

Η σχέση αυτή αποτελεί το νόμο της εσωτερικής τριβής (ιξώδες) του Νεύτωνα. Όπου ιξώδες είναι η αντίσταση ενός υγρού στη ροή και συσχετίζεται με τους διαμοριακούς δεσμούς. Η εσωτερική τριβή κατά την κίνηση του νερού, παράγει έργο το οποίο μετατρέπεται σε θερμότητα αυξάνοντας τη θερμοκρασία του νερού. Σε προβλήματα ροής , όπου αντεπιδρούν δυνάμεις αδράνειας και δυνάμεις τριβής εμφανίζεται ο λόγος του δυναμικού ιξώδους (μ) προς την πυκνότητα (ρ). Ο λόγος αυτός ονομάζεται κινηματικό ιξώδες και ο τύπος του είναι ο εξής:

$$\nu = \mu/\rho$$

όπου οι συντελεστές μ και ν μειώνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας και έχουν διαστάσεις :

$$\mu = L^{-1}M^{-1}T^{-1}$$

$$\nu = L^2M^0T^{-1}$$

Ένα υγρό είναι ιδανικό όταν $\mu=0$ (δεν εμφανίζει εσωτερική τριβή). Το νερό και τα υγρά γενικότερα εμφανίζουν μεγάλη αντίσταση σε κάθε μεταβολή του όγκου τους και για αυτό πρακτικά χαρακτηρίζονται σαν ασυμπίεστα. Οι δυνάμεις συνοχής (δυνάμεις μεταξύ ομοειδών μορίων) δίνουν στο νερό χαρακτηριστική επιφανειακή τάση, σχηματίζοντας σφαιρικές σταγόνες κατά την πτώση του. Ενώ οι δυνάμεις συνάφειας εμφανίζονται μεταξύ ετεροειδών μορίων δηλαδή μεταξύ του νερού και των στερεών σωμάτων με τα οποία έρχεται σε επαφή.

4.2.1 Νόμος του Darcy

Ο πιο θεμελιώδης νόμος της υδραυλικής των υπόγειων υδάτων, που διατυπώθηκε από τον Γάλλο μηχανικό Henry Darcy , αφορά στις εξισώσεις κίνησης και στη γενική του μορφή γράφεται ως εξής (Hernance ,1999):

$$Q=K*A*J$$

Όπου:

Q: η παροχή οποιασδήποτε υπόγειας ροής

K : Υδραυλική Αγωγιμότητα (m/sec)

J : Υδραυλική κλίση

A: το εμβαδόν διατομής του υδροφορέα μέσα από την οποία γίνεται η ροή.

- J είναι η υδραυλική κλίση και δίνεται από την εξίσωση:

$$J=\Delta\Phi/L$$

L : Μήκος (m)

Φ : Πιεζομετρικό φορτίο (σε ελεύθερο υδροφορέα συμβολίζεται ως h (m) δηλαδή το ύψος της υδραυλικής ροής στον υδροφορέα)

Στην περίπτωση τρισδιάστατης ροής σε ομογενές ισότροπο πορώδες μέσο, ο νόμος του Darcy, διατυπώνεται αναλυτικότερα ως εξής (Καρατζάς 2009) :

$$q_x=K*J_x=-K*(\partial\phi)/(\partial x)=n*V_x$$

$$q_y=K*J_y=-K*(\partial\phi)/(\partial y)=n*V_y$$

$$q_z=K*J_z=-K*(\partial\phi)/(\partial z)=n*V_z$$

n : Πορώδες

V: Ταχύτητα ρευστού

Κατά την επίλυση ασκήσεων σχετικά με την κίνηση των υπογείων υδάτων χρησιμοποιείται μια πιο αναλυτική και εφαρμόσιμη μορφή της εξίσωσης η οποία είναι η εξής :

$$Q = -K*(\Delta h/\Delta L)$$

Q: η παροχή (m³/s)

A: η επιφάνεια (m²)

K: η υδραυλική αγωγιμότητα (m/s)

Δh: η απώλεια φορτίου μεταξύ δύο θέσεων (m)

L: το μήκος της στήλης (m)

q : η ταχύτητα του Darcy ή ειδική παροχή (m/s)

Δh/ΔL: είναι η υδραυλική κλίση

Το αρνητικό πρόσημο υποδηλώνει ότι η κατεύθυνση της ταχύτητας ροής έχει αντίθετη φορά με την αύξηση του h.

4.3 Αντικειμενικός στόχος της προσομοίωσης της υπόγειας ροής

Η ανάλυση ενός φυσικού συστήματος αποσκοπεί κυρίως στη συστηματική οργάνωση και διεξοδική ανάλυση των σχετικών στοιχείων με το υπό μελέτη σύστημα και κατά συνέπεια στην καταλληλότερη εκμετάλλευση του πλήθους των πληροφοριών. Απώτερος στόχος, της ανάλυσης αυτής είναι η ορθολογική προσέγγιση των βασικών λειτουργιών του συστήματος καθώς και η αντικειμενικότερη διευθέτηση των παραμέτρων με κύριο γνώμονα την όσο πιο αξιόπιστη διατύπωση του εξεταζόμενου φυσικού συστήματος.

Δύο είναι οι βασικές μέθοδοι ανάλυσης συστημάτων, η προσομοίωση και η βελτιστοποίηση. Η προσομοίωση ως μέθοδος ανάλυσης ενός συστήματος αποτελεί ποσοτική μέθοδο που αναπαριστά τη συμπεριφορά του συστήματος. Η βελτιστοποίηση αποτελεί επίσης ποσοτική μέθοδο η οποία όμως αξιολογεί τις εναλλακτικές λύσεις ενός προβλήματος με αυτόματο τρόπο (Παππά Α., 2010). Ουσιαστικά αποσκοπεί στην εύρεση της βέλτιστης λύσης χωρίς δοκιμές με την απαίτηση όμως υπολογιστικού χρόνου. Στην περίπτωση της βελτιστοποίησης χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι βελτιστοποίησης εκ των οποίων οι πιο διαδεδομένοι είναι ο γραμμικός προγραμματισμός και ο δυναμικός προγραμματισμός.

Η μελέτη ενός υδροφόρου συστήματος με στόχο την προσομοίωση της υπόγειας ροής βασίζεται στον καθορισμό του συστήματος με την επιλογή των γεωγραφικών ορίων και τον προσδιορισμό των γεωμετρικών χαρακτηριστικών. Απαιτεί επιπλέον τη συλλογή των σχετικών γεωλογικών και υδρολογικών πληροφοριών καθώς και τον καθορισμό των φυσικών περιορισμών αλλά και τον καθορισμό του μεγέθους των βασικών φυσικών μεταβλητών (π.χ. υδραυλικό ύψος). Εν κατακλείδι, η επιστημονικά ολοκληρωμένη μελέτη απαιτεί το σχεδιασμό πιθανών μελλοντικών σεναρίων και την αξιολόγηση της αξιοπιστίας της διαδικασίας προσομοίωσης.

Σχετικά με το παρόν μοντέλο η κατασκευή ουσιαστικά αποσκοπεί στην όσο το δυνατόν αντικειμενικότερη αποτύπωση του φυσικού υδρολογικού συστήματος του υπόγειου υδροφορέα της λεκάνης ενδιαφέροντος και στη δημιουργία ενός υδρολογικού ισοζυγίου συνολικών εισροών και εκροών στο υδροφορέα, το οποίο εφόσον μεταβληθεί κατάλληλα, έχει την δυνατότητα να αποδώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα για πιθανές μελλοντικές συνθήκες της υπόγειας ροής στη λεκάνη.

Κατά την κατασκευή του προσομοιώματος απαραίτητη διαδικασία αποτέλεσε η κατάλληλη ρύθμιση των υδραυλικών παραμέτρων καθώς επίσης και η τελική βαθμονόμηση των δεδομένων με σκοπό τη ρεαλιστική απεικόνιση της υπόγειας ροής καθώς και της πιεζομετρίας στον υδροφορέα.

4.4 Εννοιολογικό μοντέλο

Η μετατροπή των υδρολογικών , υδρογεωλογικών και γεωλογικών χαρακτηριστικών του υπό μελέτη υδροφορέα σε μαθηματική μορφή αποδεκτή από το επιλεχθέν λογισμικό πακέτο και παράλληλα σε μορφή η οποία επιτρέπει την ποσοτική τους επεξεργασία , αποτελεί το βασικό στόχο υλοποίησης του εννοιολογικού μοντέλου.

Το θεωρητικό υπόβαθρο του εννοιολογικού μοντέλου περιλαμβάνει τις παραμετρικές σχέσεις που αναπαριστούν τις κύριες υδρολογικές διεργασίες. Φυσική συνέπεια της προσομοίωσης βάση του διαμορφωμένου εννοιολογικού μοντέλου, είναι η σχετικότητα της βαρύτητας και αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων , εφόσον οι παράμετροι θεωρούνται αντιπροσωπευτικές των μακροσκοπικών χαρακτηριστικών της υπό μελέτη περιοχής.

Τα υδρολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής περιλαμβάνουν παραμέτρους όπως η βροχόπτωση, η κατείσδυση υδάτων επιφανειακής απορροής, οι πλευρικές εισροές, η είσοδος ή η εκροή υδάτων λόγω αντίστοιχων πηγών καθώς και αντλητικές γεωτρήσεις. Τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής τα οποία εισάγονται στο μοντέλο είναι τα φυσικά και υδραυλικά όρια του υδροφόρου ορίζοντα καθώς και το είδος και η έκταση των διαφόρων σχηματισμών του υδροφορέα. Στα βασικά γεωλογικά χαρακτηριστικά τα οποία χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη του εννοιολογικού μοντέλου, παρατηρούμε το πάχος του υδροφορέα, την οριοθέτηση των αδιαπέρατων σχηματισμών και γενικότερα την κατανομή και διαμόρφωση των εκάστοτε υδροφόρων σχηματισμών στο εσωτερικό του υπό μελέτη υδροφορέα.

Στο εννοιολογικό μοντέλο ουσιαστικά αναπτύσσονται όλα τα βασικά χαρακτηριστικά και οι μηχανισμοί λειτουργίας των υδροφόρων σχηματισμών. Κατά συνέπεια βάση των διαθέσιμων στοιχείων εισάγονται οι υπολογισμένες τιμές των υδραυλικών παραμέτρων, όπως για παράδειγμα η τιμή της μεταβιβαστικότητας, της υδραυλικής αγωγιμότητας και της υδροχωρητικότητας. Τέλος είναι εξαιρετικά σημαντικό να αναφερθεί πως το εννοιολογικό μοντέλο, δύναται να παρουσιάσει με ικανοποιητική προσέγγιση τις συνθήκες ροής στον υδροφορέα, χωρίς όμως να καθίσταται εφικτή η απόλυτα αντικειμενική απεικόνιση των συνθηκών υδάτινης ροής που επικρατούν υπόγεια της υπό μελέτη λεκάνης

4.5 Επιλογή κατάλληλου υπολογιστικού μοντέλου

Το υπολογιστικό πακέτο visual Modflow αποτελεί έναν κώδικα μοντελοποίησης για τα επαγγελματικών προδιαγραφών τρισδιάστατα μοντέλα υπόγειας ροής τα οποία δύναται να περιλαμβάνουν και την περίπτωση μεταφοράς ρυπαντικών παραγόντων. Στο πακέτο αυτό περιλαμβάνονται τα λογισμικά Modflow, Modpath και MT3DMS. Το πακέτο Visual Modflow, παρουσιάστηκε αρχικά τον Αύγουστο του 1994 και επιπλέον χρησιμοποιείται και από την U.S.G.S (Αμερικάνικη Υπηρεσία Γεωλογικών Ερευνών) καθώς και από την U.S.E.P.A. (Αμερικάνικη Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος (Παππά Α., 2010).

Το μαθηματικό προσομοίωμα της περιοχής της Τροιζηνίας αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας το εμπορικό πακέτο Waterloo Hydro geologic Software Visual Modflow, με εφαρμογή μαθηματικού κώδικα πεπερασμένων διαφορών (Modflow). Το προσομοίωμα αναπαριστά την υπόγεια ροή και τα υδραυλικά φορτία στην κορεσμένη ζώνη του υδροφορέα της περιοχής σε συνθήκες σταθερής ροής (steady state flow), χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η συνεισφορά της εναποθηκευτικότητας.

Η συνεισφορά των επιφανειακών νερών και των υπόγειων πλευρικών τροφοδοσιών αναλύεται ξεχωριστά, ενώ δε λαμβάνονται υπόψη οι μηχανισμοί ροής στην ακόρεστη ζώνη. Ο υδροφορέας απεικονίζεται με ένα στρώμα με χαρακτηριστικά ελεύθερου υδροφόρου ορίζοντα. Κριτήριο σύγκλισης του προσομοιώματος σε επίλυση αποτελεί η διαφορά υπολογισμένων υδραυλικών φορτίων, μεταξύ δύο διαδοχικών δοκιμασιών- iterations.

4.6 Λογισμικό πακέτο Visual Modflow

Το πακέτο του Modflow αποτελεί ένα πρόγραμμα προσομοίωσης υδροφόρων συστημάτων και για την ορθή εφαρμογή του, είναι απαραίτητη η πλήρης γνώση των υδρολογικών, υδρογεωλογικών και υδραυλικών χαρακτηριστικών των υπό μελέτη υδροφόρων συστημάτων. Επίσης εκτελεί τις απαραίτητες λειτουργίες προσομοίωσης, οι οποίες στηρίζονται στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών.

Πιο αναλυτικά το Modflow της U.S.G.S. , δηλαδή της Αμερικανικής Υπηρεσίας Γεωλογικών Ερευνών, στην πραγματικότητα αποτελεί το πιο διαδεδομένο μοντέλο προσομοίωσης της ροής σε ένα πορώδες μέσο και βασίζεται στην αριθμητική επίλυση της διαφορικής εξίσωσης , η οποία προκύπτει από την εφαρμογή του νόμου Darcy και παράλληλα από την χρήση της εξίσωσης διατήρησης της μάζας.

Αναλυτικότερα, η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών αποτελεί μία από τις πιο αξιόπιστες υπολογιστικές τεχνικές επίλυσης μερικών διαφορικών εξισώσεων. Η μερική διαφορική εξίσωση, ορίζεται σε ένα σύνολο σημείων πεπερασμένου αριθμού (R_h) το οποίο αντικαθιστά το συνεχές πεδίο ορισμού R στο οποίο οριζόταν αρχικά. Παράλληλα το όριο S του αρχικού πεδίου ορισμού αντικαθίσταται από ένα πεπερασμένο αριθμό σημείων Sh . Για κάθε σημείο P του R_h διατυπώνεται μια

αλγεβρική εξίσωση που περιλαμβάνει την τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής στο σημείο P και σε γειτονικά σημεία του P. Η αλγεβρική εξίσωση ονομάζεται εξίσωση πεπερασμένων διαφορών και αποτελεί προσέγγιση της μερικής διαφορικής εξίσωσης στο σημείο P. Η μεθοδολογία διατύπωσης και η μορφή της αλγεβρικής εξίσωσης εξαρτώνται άμεσα από την εφαρμοζόμενη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών. Εάν υπάρχουν N σημεία στο Rh, προκύπτει ένα σύστημα N αλγεβρικών εξισώσεων με N αγνώστους. Εάν το σύστημα έχει μοναδική λύση, που συνήθως έχει, οι τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής που προκύπτουν θεωρούνται προσεγγιστικές σε σχέση με αυτές της αναλυτικής λύσης (Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, <http://www.mie.uth.gr>)

Η βασική εξίσωση πεπερασμένης διαφοράς που χρησιμοποιεί το Modflow (με σταθερή πυκνότητα του υγρού) είναι :

$$\sum Q_i = S_s \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \Delta V$$

όπου:

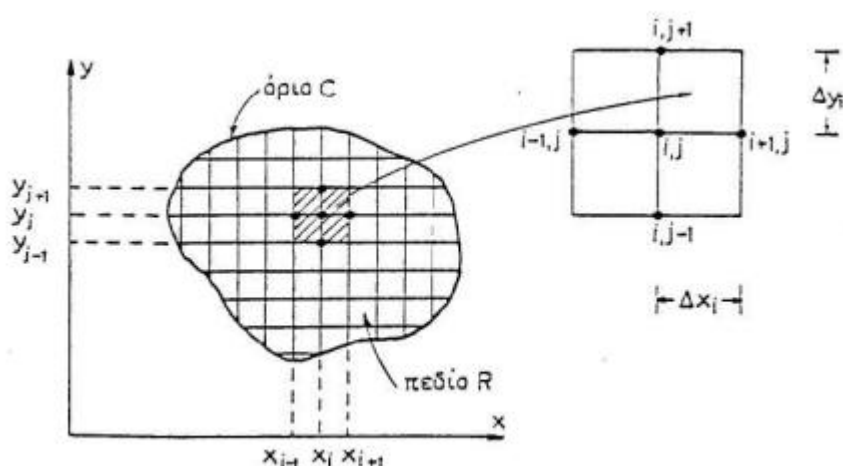
Ss: ειδική αποθηκευτικότητα του πορώδους υλικού (m^{-1})

Qi: ο συνολικός ρυθμός παροχής σε κάθε κυψελίδα (m^3/s)

ΔV : ο όγκος της κυψελίδας (m^3)

$\Delta \Phi$: η μεταβολή του υδραυλικού φορτίου για χρονικό διάστημα Δt (m).

Τα αποτελέσματα του προγράμματος είναι καναβικής μορφής τιμές υδραυλικού φορτίου (ή χημικής συγκέντρωσης) σε κάθε χρονικό βήμα που έχει επιλέξει ο χρήστης. Επίσης κάθε προσομοίωση συνοδεύεται από ένα αρχείο με στοιχεία υδατικού ισοζυγίου για το σύνολο των ενεργών κελιών



Εικόνα (15): Τυπική μορφή κανάβου πεπερασμένων διαφορών (Λατινόπουλος & Θεοδοσίου, 2007)

Στη γενική περίπτωση που το μέσο είναι ανομοιογενές και ανισότροπο η κίνηση του υπόγειου νερού περιγράφεται από την παρακάτω τρισδιάστατη εξίσωση με μερικές παραγώγους ((Anderson and Woessner, 1992):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

Όπου:

K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} : οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας κατά μήκος των x, y, z αξόνων συντεταγμένων, οι οποίες θεωρούνται ότι είναι παράλληλοι προς τους κύριους άξονες της υδραυλικής αγωγιμότητας (L T⁻¹)

h: το πιεζομετρικό φορτίο (L)

W: παροχή ανά μονάδα χρόνου, που προέρχεται από εισροές ή εκροές του νερού (T⁻¹)

S_s: ειδική αποθηκευτικότητα του πορώδους μέσου (1 L⁻¹)

t: ο χρόνος (T).

- Η παραπάνω εξίσωση ισχύει υπό την προϋπόθεση ότι οι κύριοι άξονες της υδραυλικής αγωγιμότητας ταυτίζονται με τους άξονες του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων (X, Y, Z) και είναι η εξίσωση στην οποία στηρίζεται το πρόγραμμα.
- Ο βασικός στόχος των μεθόδων πεπερασμένων διαφορών είναι να προσεγγισθούν οι μερικές παράγωγοι στη διαφορική εξίσωση που επιλύεται από αντίστοιχους όρους διαφορών. Η εξίσωση διαφορών που προκύπτει με τον τρόπο αυτό γράφεται για έναν πεπερασμένο αριθμό, χαρακτηριστικών σημείων του πεδίου, καταλήγοντας έτσι σε ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων που είναι δυνατό να λυθούν πιο εύκολα από ότι η αρχική διαφορική εξίσωση.
- Για να υλοποιηθεί η αριθμητική διακριτοποίηση της διαφορικής εξίσωσης πρέπει να διακριτοποιηθεί το πεδίο ροής. Αν λοιπόν στο επίπεδο x-y ορισθεί το πεδίο ροής ,R, με όριο του C η διακριτοποίηση γίνεται χαράζοντας ένα ορθογωνικό δίκτυο γραμμών , παράλληλων προς του δύο άξονες x και y, που ονομάζεται κάναβος . Οι άξονες συνήθως είναι παράλληλοι προς τις δύο κύριες διευθύνσεις της ροής ώστε να υπάρχει η δυνατότητα απλοποίησης των όρων των διαφορικών εξισώσεων.

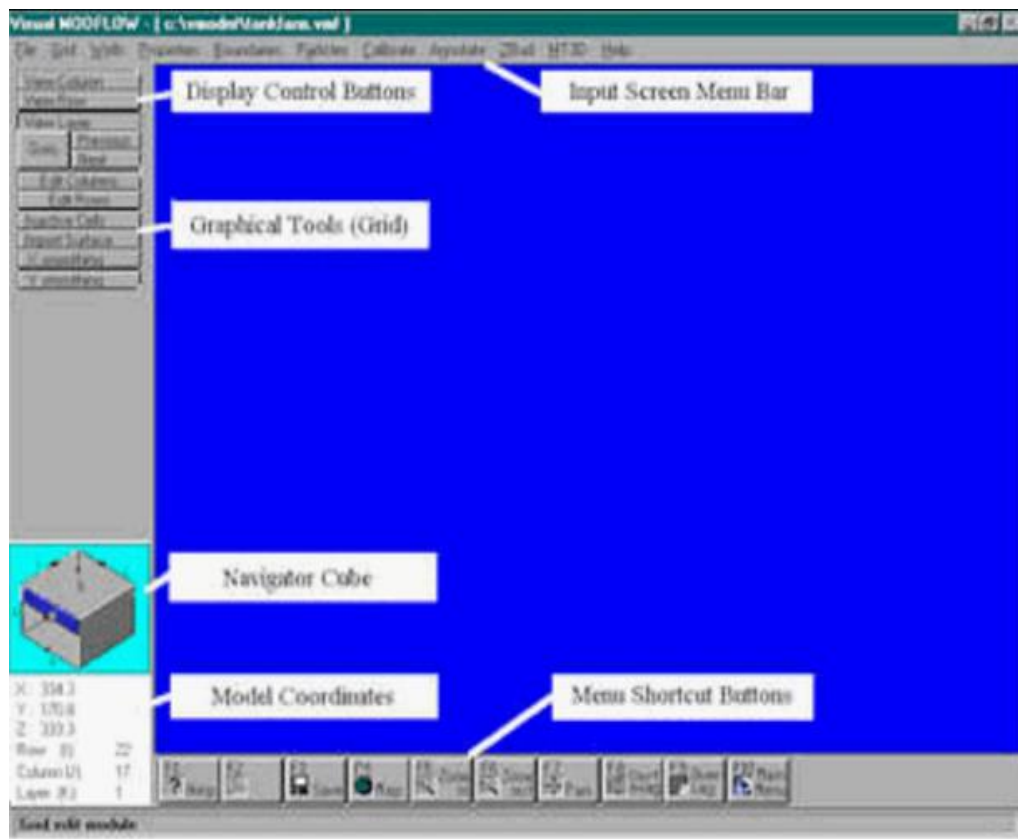
Ο κώδικας διέπεται από ένα σύνολο βασικών αρχών , οι οποίες αναφέρονται παρακάτω επιγραμματικά. Η σημαντικότερη αρχή του υπολογιστικού μοντέλου, είναι η δυνατότητα προσομοίωσης του υδροφόρου συστήματος για συνθήκες σταθερής κατάστασης (steady state case). Επιπλέον δεν παρατηρείται ροή, εκτός της

προκαθορισμένης οριοθέτησης του υπό μελέτη υδροφόρου συστήματος ενώ όπως έχει ήδη προαναφερθεί, το υπολογιστικό πακέτο, στηρίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών για το κέντρο κάθε κελιού του μοντέλου (Waterloo Hydrogeologic Inc.). Το μοντέλο κατά την προσομοίωση είναι δυνατόν να περικλείει διάφορους συνδυασμούς υδροφόρων συστημάτων, όπως για παράδειγμα ελεύθερα η περιορισμένα υδροφόρα συστήματα, ενώ το πορώδες μέσω το οποίο προσομοιώνεται μπορεί να είναι ομοιογενές η ανισότροπο. Τέλος κατά το σχεδιασμό του εννοιολογικού μοντέλου, στην περίπτωση συνδυασμού διαφορετικού είδους υδροφόρων στρωμάτων, το ανώτερο στρώμα συνίσταται να σχεδιάζεται ως ελεύθερο.

Οι βασικές παραδοχές που ισχύουν κατά την κατασκευή του μοντέλου προσομοίωσης βάση του Modflow, περιλαμβάνουν την περίπτωση, άπειρης έκτασης του υπό μελέτη υδροφόρου συστήματος αλλά και την περίπτωση των προκαθορισμένων ορίων του υδροφορέα. Ακόμη στην περίπτωση περιορισμένης διαθεσιμότητας των πρωτογενών μετρήσεων, χρησιμοποιούνται διάφορα εργαλεία τα οποία συνδυάζουν γεωλογικά και στατιστικά στοιχεία, που στηρίζονται στην εφαρμογή της μεθόδου της γραμμικής παρεμβολής. Ένα αξιοσημείωτο παράδειγμα τέτοιου είδους τεχνικής, αποτελεί η μέθοδος kriging, που εφαρμόζεται κατά τη σύνταξη χαρτών των οποίων βασικό χαρακτηριστικό είναι η απόδοση ισοϋψών ή ισοπιεζομετρικών γραμμών. Η μέθοδος αυτή συναντάται κυρίως ως υπορουτίνα διαφόρων προγραμμάτων όπως για παράδειγμα των Surfer και Grapher. Σχετικά με τις ιδιότητες του ύδατος το οποίο βρίσκεται σε κίνηση στο εσωτερικό του υδροφόρου συστήματος το οποίο προσομοιώνεται, ως βασικές παραδοχές λαμβάνονται η σταθερότητα της πυκνότητας του νερού, η τρισδιάστατη κίνηση του υπόγειου ύδατος αλλά και η ομοιόμορφη και ομοιογενής κατανομή των ιδιοτήτων του κάθε κελιού σε ολόκληρο το εσωτερικό της ίδιας της κυψελίδας (Waterloo Hydrogeologic Inc., 1995-2006).

Το ύψος της επιφάνειας του υπόγειου νερού, κατά τη χρήση του μοντέλου Modflow, υπολογίζεται στο κέντρο της κάθε κυψελίδας το οποίο ονομάζεται κόμβος. Τα χωρικά αυτά τμήματα, δηλαδή τα καθορισμένων διαστάσεων τετράγωνα ή ορθογώνια κελιά, διαμορφώνουν τη χωρική διακριτοποίηση του υδροφόρου συστήματος με το σχεδιασμό ενός δικτύου εφαπτόμενων κυψελίδων το οποίο παρουσιάζεται στο μοντέλο ως κάναβος. Το δίκτυο που έχει σχηματιστεί εμφανίζεται στο μοντέλο ως ένας *πίνακας* αποτελούμενος από παράλληλες γραμμές παράλληλες στήλες και εφαπτόμενα στρώματα. Οι κυψελίδες που δύναται να χρησιμοποιηθούν κατά την προσομοίωση, αναφέρονται ως ενεργές κυψελίδες καθώς στο εσωτερικό τους, πραγματοποιείται ροή υπογείου νερού (Τάντος Β., 2006). Πιο συγκεκριμένα, στα όρια του καθορισμένου υδροφορέα, παρατηρούνται ενεργά κελιά με αμετάβλητο υδραυλικό φορτίο (σταθερό φορτίο) αλλά και κελιά μηδενικής ροής (no flow cells) στα οποία δε λαμβάνει χώρα καμία εισροή νερού και κατά συνέπεια καμία υπόγεια ροή.

Κατά την είσοδο στον κώδικα Modflow, δίνεται στον χρήστη η δυνατότητα να επιλέξει από τον κύριο κατάλογο (main menu) τη δημιουργία ενός νέου μοντέλου (project) αλλά και το άνοιγμα ενός παλαιότερου ήδη αποθηκευμένου στη μνήμη του ηλεκτρονικού υπολογιστή. Οι άνωθεν επιλογές παρουσιάζονται στην ένδειξη **File**. Επιπλέον επιλογές του κύριου καταλόγου αποτελούν η ένδειξη **Input** με επιλογή της οποίας εισάγονται τα μεγέθη και τα είδη των βασικών υδρογεωλογικών παραμέτρων του φυσικού συστήματος και η ένδειξη **Setup** βάση της οποίας δύναται η αλλαγή βασικών χαρακτηριστικών του διαμορφωμένου μοντέλου, όπως για παράδειγμα ο απαιτούμενος χρόνος προσομοίωσης για την επίτευξη σταθερής κατάστασης (steady state simulation time) αλλά και ο τύπος ροής. Τέλος συναντάμε τις ενδείξεις **Run** και **Output** οι οποίες αφορούν την εκτέλεση της προσομοίωσης και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης αντίστοιχα. Το μοντέλο παρέχει και συμβουλευτική ένδειξη **Help** η οποία βοηθάει τον εκάστοτε χρήστη στην περίπτωση ελλιπούς κατανόησης των εντολών και των λειτουργιών (Waterloo Hydrogeologic Inc., 1995-2006).



Εικόνα (16): Αρχικό menu του λογισμικού Visual Modflow

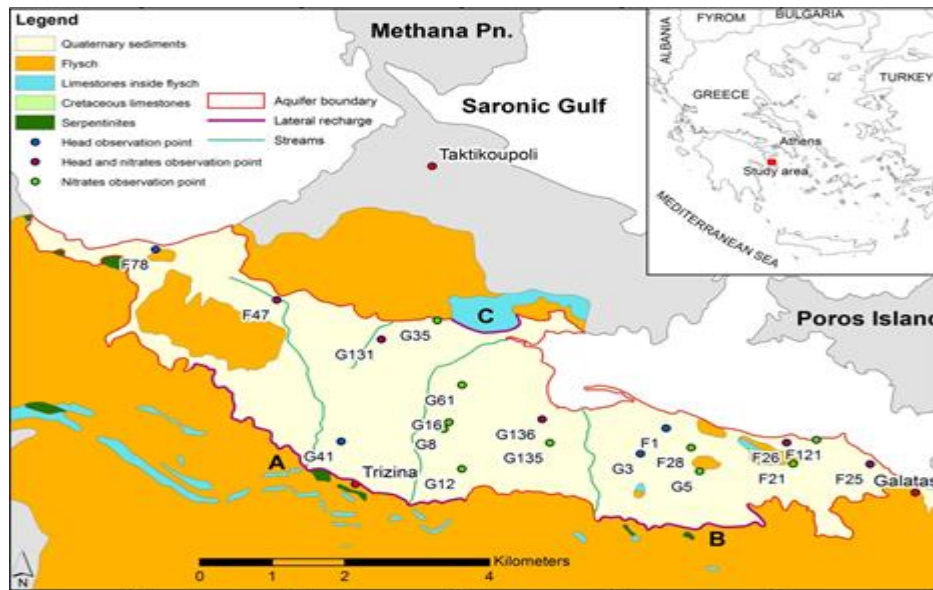
Ο κώδικας Modflow, όπως έχει προαναφερθεί περιλαμβάνει επιμέρους υπολογιστικά πακέτα τα οποία διαμορφώνονται στο εσωτερικό του μοντέλου σε μορφή λίστας, εκ των οποίων το κάθε ένα, εκτελεί μία συγκεκριμένη εργασία προσομοίωσης. Τα υπολογιστικά αυτά πακέτα αποτελούν ουσιαστικά τις

υπορουτίνες του συνολικού υπολογιστικού προγράμματος Modflow. Η εισαγωγή των απαραίτητων δεδομένων στο μοντέλο όπως για παράδειγμα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα τα υδραυλικά φορτία τα οποία διαμορφώνουν την κίνηση του υπόγειου ύδατος αλλά και επίσης οι αρχικές συνθήκες πιεζομετρίας στον υδροφορέα (αρχικά υδραυλικά φορτία-initial heads) γίνεται με τη χρήση των εν λόγω υπορουτίνων. Κατά την εφαρμογή του κώδικα Modflow σε μία περιοχή οι συχνά χρησιμοποιούμενες υπορουτίνες παρουσιάζονται και αναλύονται παρακάτω:

1. Πλευρική τροφοδοσία με σταθερό εξωτερικό ύψος ύδατος (G.H.B.)

Η υπορουτίνα G.H.B. , αποτελεί την πλευρική τροφοδοσία του υδροφορέα εφόσον προκαθοριστεί ένα σταθερό υδραυλικό ύψος στα όρια της περιοχής των ενεργών κυψελίδων του υπό εξέταση υδροφόρου συστήματος. Η χρήση του πακέτου G.H.B. (Groundwater Head Boundary), απαιτεί την επίλυση της εξίσωσης Dupuit , για την περιοχή του υδροφορέα που έχει επιλεγεί να τροφοδοτηθεί πλευρικά και κατά συνέπεια, τη γνώση σημαντικών υδραυλικών παραμέτρων όπως της υδραυλικής αγωγιμότητας αλλά επίσης και τη γνώση της κατεύθυνσης της ροής. Ουσιαστικά το πακέτο αυτό χρησιμοποιείται κυρίως για την προσομοίωση της υπόγειας υδραυλικής επικοινωνίας γειτονικών υδροφορέων. Η υδραυλική παροχή όπως είναι κατανοητό είναι αντιστρόφως ανάλογη της υδραυλικής αγωγιμότητας, της εκάστοτε περιοχής και επίσης ανάλογη με τη διαφορά των υδραυλικών υψών, ανάμεσα στην εξωτερική πηγή τροφοδοσίας και την εσωτερικά παρατηρούμενη στάθμη ύδατος σε κάθε σημείο ενδιαφέροντος του υδροφορέα. Ακόμα η υδραυλική αγωγιμότητα εξαρτάται σύμφωνα με την εξίσωση Dupuit, από τις διαστάσεις της περιοχής που τροφοδοτείται πλευρικά. Πιο συγκεκριμένα η αγωγιμότητα είναι ανάλογη του μήκους που παρατηρείται μεταξύ του εξωτερικού σημείου γνωστής στάθμης ύδατος και του εσωτερικού σημείου γνωστού υδραυλικού ύψους, αλλά και αντιστρόφως ανάλογη του πλάτους της πλευρικής εισαγωγής νερού.

Το συγκεκριμένο πακέτο, προσφέρει με τη σειρά του τη δυνατότητα διαμόρφωσης χρονικών περιόδων τροφοδοσίας και για να την ανάπτυξη του, απαιτεί τη γνώση της στάθμης ύδατος της εξωτερικής πηγής αλλά και τη γνώση της υδραυλικής αγωγιμότητας στην περιοχή ενδιαφέροντος. Για την περιοχή που μελετάμε γνωρίζουμε την πλευρικής εισροής από τον παρακάτω χάρτη τον οποίο είδαμε και στο κεφάλαιο 3.4 (Γεωλογικά-υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά) μόνο που τώρα τον χρειαζόμαστε για άλλο λόγο.



Εικόνα (17): Γεωλογικός χάρτης Τροιζηνίας (Matiatos και Papadopoulos 2012)

Από τον παραπάνω χάρτη παρατηρούμε ότι στα σύνορα της υπό εξέτασης περιοχής υπάρχουν 2 διαφορετικά χρώματα το κόκκινο και το μοβ. Το κόκκινο χρώμα υποδηλώνει το υδροφόρο οριζόντιο όριο ή υπόγειος υδροφορέας (Aquifer Boundary) ενώ το μοβ χρώμα υποδηλώνει το πλευρικό όριο (Lateral Boundary)

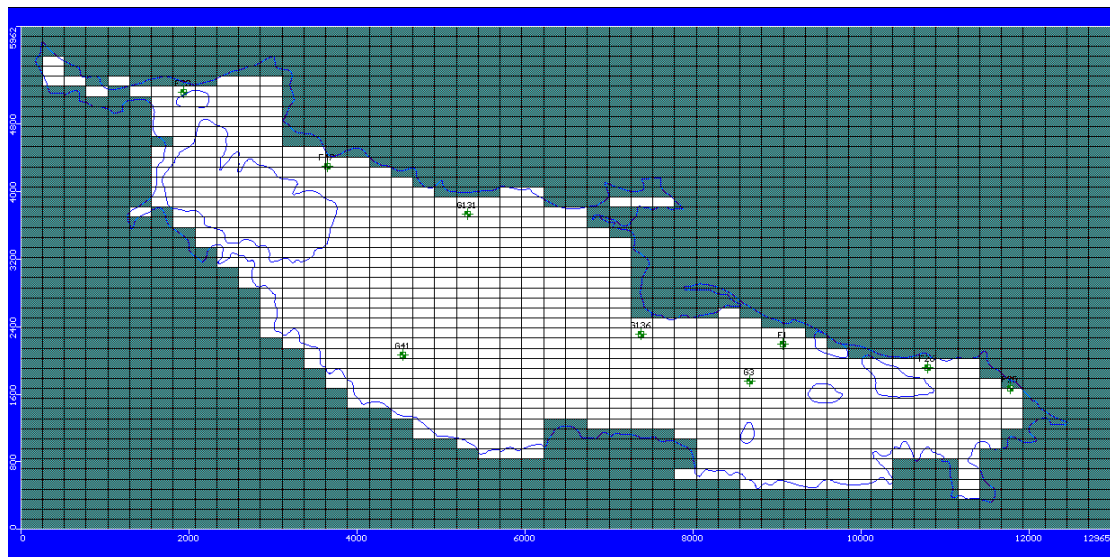
2. Εισαγωγή ύδατος με εμπλουτισμό (Recharge)

Ο εμπλουτισμός του υδροφορέα με χρήση αυτού του πακέτου, περιλαμβάνει κυρίως την κατείσδυση από τις ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις, την κατείσδυση επιφανειακά απορρεόντων υδάτων σε περιοχές γνωστού ποσοστού κατεισδύμενου ύδατος προερχόμενου από επιφανειακές απορροές, καθώς επίσης και την τροφοδοσία του υδροφορέα από εσωτερικές πηγές οι οποίες εμπλουτίζουν το σύστημα. Η κατείσδυση με τη χρήση αυτής της υπορουτίνας, μπορεί να σημειωθεί μόνο στο ανώτερο στρώμα του υδροφορέα. Σύμφωνα με το προαναφερθέν, ο εμπλουτισμός σημειώνεται στην επιφάνεια του εδάφους, όπως στην πραγματικότητα παρατηρείται κατά την κατείσδυση επιφανειακών υδάτων.

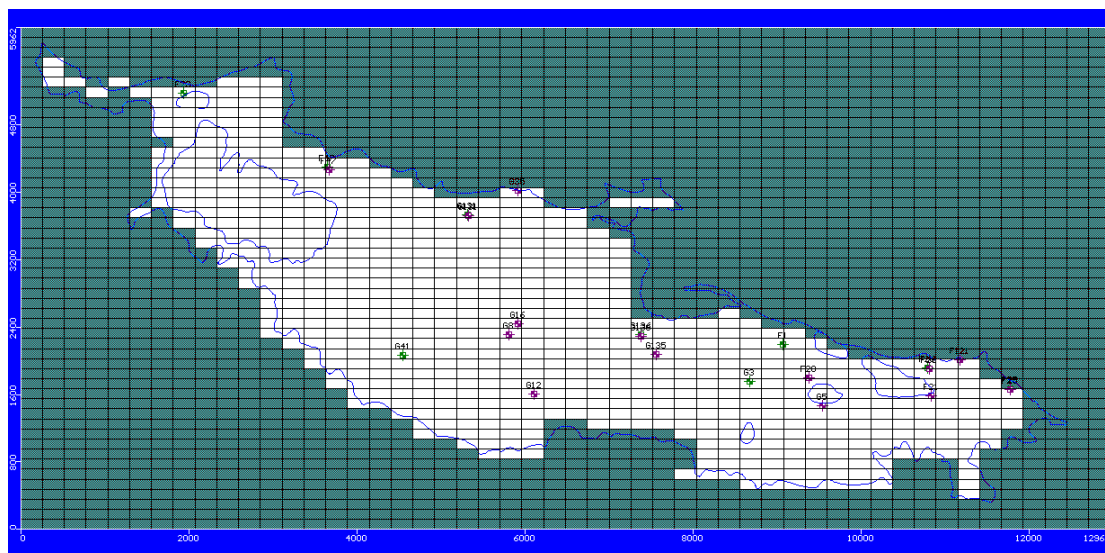
3. Γεωτρήσεις άντλησης, εμπλουτισμού και παρατήρησης (Pump-Observation Wells).

Η υπορουτίνα αυτή χρησιμοποιείται για την εισαγωγή δεδομένων γεωτρήσεων άντλησης (αρδευτικές, υδρευτικές) ή εμπλουτισμού σε έναν υδροφορέα. Η χρήση του πακέτου προσφέρει τη δυνατότητα καθορισμού συγκεκριμένων χρονικών περιόδων άντλησης ή εμπλουτισμού του υδροφορέα. Κατά τη χρήση του, η άντληση ύδατος είναι δυνατή με την προσθήκη αρνητικού πρόσημου στις εισαγόμενες τιμές παροχής των γεωτρήσεων, ενώ στον αντίποδα, οι θετικές εισαγόμενες τιμές υποδηλώνουν τον εμπλουτισμό του υδροφορέα. Τέλος είναι δυνατόν να απενεργοποιηθεί η διαδικασία άντλησης ή εμπλουτισμού οποιασδήποτε γεώτρησης για ορισμένο επιθυμητό χρονικό διάστημα, χωρίς να είναι απαραίτητη η απομάκρυνση της γεώτρησης (inactive well). Σχετικά με τις γεωτρήσεις παρατήρησης, είναι δυνατός ο καθορισμός της θεωρητικά απαιτούμενης στάθμης ύδατος σε συγκεκριμένα σημεία για τα οποία σύμφωνα με τα υπάρχοντα δεδομένα, η πιεζομετρία του υδροφορέα είναι γνωστή.

Όσο αναφορά την περιοχή μελέτης μας έχουμε μόνο πηγάδια παρατήρησης της υδραυλικής πίεσης και πηγάδια παρατήρησης των νιτρικών σε διάφορα σημεία έτσι ώστε να μπορούμε να βγάλουμε ολοκληρωμένο συμπέρασμα για την συμπεριφορά των υπόγειων υδάτων. Παρακάτω βλέπουμε τα πηγάδια μέσω του πακέτου Visual Modflow.



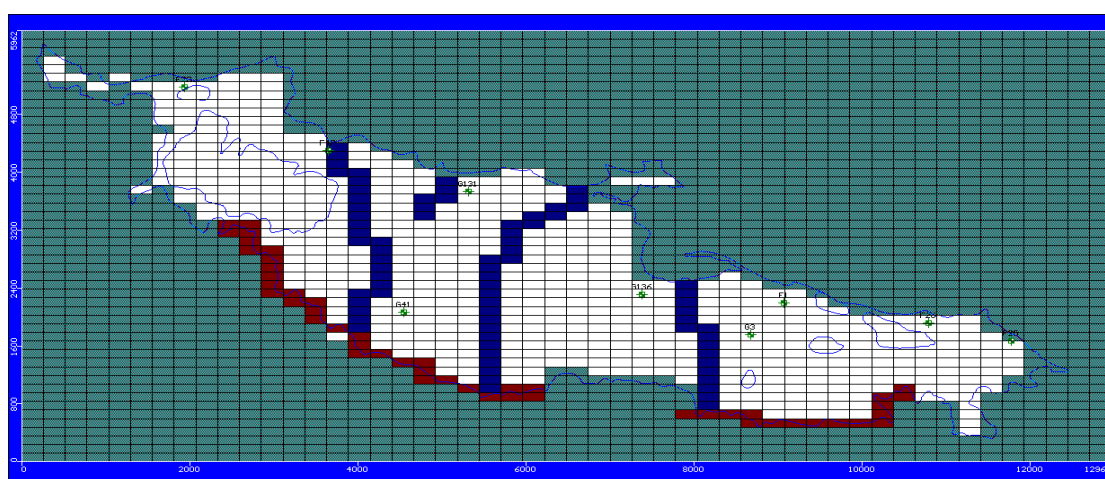
**Εικόνα (18): Πηγάδια παρατήρησης (Head Observation)
(Visual Modflow)**



Εικόνα (19): Πηγάρδια παρατήρησης νιτρικών (Concentration Observation, Visual Modflow)

4. Σταθερό υδραυλικό φορτίο (Constant Head).

Στο πακέτο αυτό παρατηρείται αμετάβλητη ποσότητα εισερχόμενου ύδατος κατά τη διάρκεια ολόκληρης της προσομοίωσης. Τα φορτία στα επιλεχθέντα ενεργά κελιά, παρουσιάζουν σταθερό υδραυλικό φορτίο από την έναρξη της προσομοίωσης έως και το πέρας της. Συγκεκριμένα κατά τη χρήση του μοντέλου και της υπορουτίνας **constant head**, προσφέρεται η δυνατότητα εισαγωγής σταθερού υδραυλικού ύψους κατά την έναρξη μίας χρονικής περιόδου αλλά και η δυνατότητα εισαγωγής σταθερού φορτίου στο πέρας της ίδιας χρονικής περιόδου.

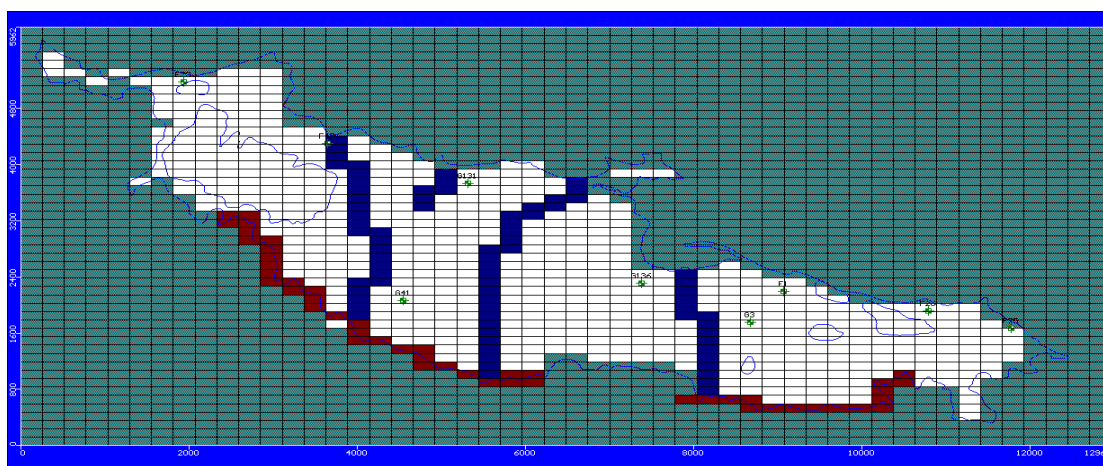


**Εικόνα(20) :Απεικόνιση υδραυλικού φορτίου (Constant Head)
(Visual Modflow)**

Στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε με κόκκινο χρώμα το υδραυλικό φορτίο που χρησιμοποιήσαμε στην υπορουτίνα (Constant Head) και μας υποδηλώνει το κομμάτι που είχαμε πλευρική εισροή στην περιοχή μελέτης μας.

5. Υδατορέματα (Rivers, streams)

Στην περίπτωση αυτή, τα υδατορέματα επηρεάζουν υδραυλικά τον υδροφορέα ή επηρεάζονται τα ίδια από τον υδροφορέα. Σύμφωνα με την υπορουτίνα αυτή, πραγματοποιείται προσομοίωση της υπόγειας ροής που λαμβάνει χώρα μεταξύ των ρεμάτων και του υδροφορέα. Ανάλογα με την υδραυλική κλίση που παρατηρείται μεταξύ του υδατορέματος και του υδροφόρου ορίζοντα σημειώνεται τροφοδοσία του υδροφόρου ορίζοντα από τα υδατορέματα ή ανάποδα, τροφοδοσία των ρεμάτων από τον υδροφόρο ορίζοντα.



**Εικόνα (21) : Απεικόνιση ρεμάτων της περιοχής μελέτης (Rivers)
(Visual Modflow)**

Στην παραπάνω εικόνα παρατηρούμε με μπλε χρώμα τις περιοχές (κουτάκια) που καταλαμβάνουν τα ποτάμια στην περιοχή μελέτης μας. Κατά την επεξεργασία πήραμε υπόψιν μας το ύψος του κάθε ρέματος γιατί όπως ήδη έχουμε αναφέρει παίζει σημαντικό ρόλο στις μετρήσεις των πηγαδιών.

6. Αρχικά υδραυλικά ύψη (Initial Heads)

Στην περίπτωση προσομοίωσης ενός συστήματος και εφόσον επιλεγθεί σταθερή κατάσταση (steady state), παρατηρείται ικανοποιητική αναπλήρωση του υδροφορέα με την προϋπόθεση ότι δε μεταβάλλονται σημαντικά τα αρχικά υδραυλικά φορτία. Επίσης προκειμένου να παρατηρηθεί ομαλή εξέλιξη της υπόγειας ροής κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης με αποφυγή μίας αρχικής αδικαιολόγητης απότομης πτώσης του μέσου υδραυλικού ύψους , κρίνεται απαραίτητη η επιλογή των αρχικών υψών του νερού στον υδροφορέα. Με τη χρήση της υπορουτίνας των αρχικών

υδραυλικών υψών και την κατάλληλη επιλογή της αρχικής στάθμης, αποφεύγεται οποιαδήποτε αναίτια αρχική πτώση ή ακόμα και αδικαιολόγητη άνοδος του υδροφόρου ορίζοντα κατά την έναρξη της προσομοίωσης.

7. Εξαγωγή αποτελεσμάτων (Output Control)

Το πακέτο αυτό, έχει τη δυνατότητα σύνδεσης με βοηθητικά προγράμματα γραφικής απεικόνισης των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Κατά βάση, στο πακέτο λαμβάνει χώρα ο καθορισμός της μορφής των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

Εκτός της αναφοράς των παραπάνω υπορουτίνων και των δυνατοτήτων τους, είναι εξαιρετικά σημαντικό να αναφερθεί πως ο κώδικας Modflow, παρέχει τη δυνατότητα καθορισμού χρονικών περιόδων στο εσωτερικό των υπορουτίνων και ορισμένων ανάλογων επιθυμητών υδραυλικών παραμέτρων (π.χ. μεταβολή παροχής αντλητικών γεωτρήσεων χρονικά αλλά όχι χρονική μεταβολή υδραυλικής αγωγιμότητας), με σκοπό το σχεδιασμό υποθετικών σεναρίων χρονικής μεταβολής των παραμέτρων αυτών.

Εν ολίγοις, όπως παρουσιάζεται και στην παρούσα διπλωματική η χρήση του μοντέλου Modflow παρέχει τη δυνατότητα σχεδιασμού και υλοποίησης υποθετικών σεναρίων. Τα υποθετικά σενάρια αποτελούν συνήθως μελλοντικές υποθέσεις οι οποίες αποσκοπούν στο να διερευνηθεί η ευαισθησία του μοντέλου στη μεταβολή βασικών ή μη παραμέτρων. Οι ενδεικτικότερες προς μεταβολή παράμετροι είναι οι παροχές άντλησης των γεωτρήσεων και η ποσότητα κατεισδυόμενου ύδατος βροχόπτωσης. Με τη χρήση τέτοιου είδους σεναρίων επιτρέπεται να μελετηθεί οποιαδήποτε υποθετική κατάσταση και να γίνει αξιόπιστη πρόβλεψη της εξέλιξης διαφόρων ανθρωπογενών αλλά και φυσικών φαινομένων. Παράδειγμα τέτοιων υποθετικών σεναρίων, αποτελούν, η σταδιακή αύξηση της παροχής των αντλήσεων λόγω αυξημένης απαίτησης αρδευτικού ή υδρευτικού ύδατος , η υφαλμύριση υπογείων υδάτων, η μείωση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων καθώς και η ρύπανση υπογείων υδάτων.

Είναι αρκετά σημαντικό να αναφερθεί ότι κατά την κατασκευή του μοντέλου, θα πρέπει να επιλεχθούν βασικές παράμετροι, οι οποίες θα παραμείνουν αναλλοίωτες κατά την διάρκεια της προσομοίωσης αλλά και κατά τη διάρκεια χρήσης των εκάστοτε υπορουτίνων για την εισαγωγή των απαραίτητων δεδομένων. Στα αρχικά κατασκευαστικά βήματα ενός Project σε Modflow περιβάλλον, χρησιμοποιούνται δύο βασικά πακέτα καθορισμού των αρχικών βασικών συνιστωσών, βάση των οποίων δομείται το υπό κατασκευή μοντέλο.

8. Βασικό πακέτο

Κατά την κατασκευή του μοντέλου, στο βασικό πακέτο δύναται να επιλεχθούν οι μονάδες μέτρησης των παραμέτρων που συναντώνται στο μοντέλο. Ακόμη το βασικό πακέτο περιλαμβάνει εντολές διαμόρφωσης του κανάβου (αριθμός στηλών, αριθμός γραμμών) καθώς και εντολές επιλογής του αριθμού των στρωμάτων του υδροφορέα. Επίσης γίνεται καθορισμός της χρονικής περιόδου προσομοίωσης αλλά και των οριακών συνθηκών σε κάθε κόμβο των κυψελίδων που διαμορφώνουν τον κανάβο της υπό μελέτη περιοχής. Κατά τη εμφάνιση των τριών πρώτων παραθύρων του βασικού πακέτου-όταν ξεκίνα η κατασκευή του μοντέλου, μπορούμε επιπλέον να επιλέξουμε τον τύπο υπόγειας ροής για την επιθυμητή προσομοίωση (**flow type**) από την ένδειξη **flow simulation**, την περίπτωση ύπαρξης μεταφερόμενης προσομοίωσης (**transport simulation**) όταν παρατηρείται μεταφορά ρύπου μέσω της υπόγειας ροής, καθώς επίσης και την επιθυμητή φωτογραφία της υπό εξέταση περιοχής (**bitmap**).

9. Κεντροβαρική διάταξη ροής

Κατά τη χρήση του πακέτου αυτού, εισάγονται πληροφορίες που αφορούν το μέγεθος της μεταβιβασιμότητας για την περίπτωση των περιορισμένων υδροφορέων καθώς και το μέγεθος της υδραυλικής αγωγιμότητας στην περίπτωση των ελεύθερων υδροφορέων. Ακόμη εισάγονται τιμές του συντελεστή εναποθηκευτικότητας και του ενεργού πορώδους.

Στην διαδικασία επίλυσης, το πρόγραμμα Modflow χρησιμοποιεί επαναληπτικές μεθόδους εκ των οποίων οι τέσσερις σημαντικότερες είναι οι ακόλουθες:

1. Υπό προϋποθέσεις επαναληπτική διαδικασία συζυγών κλίσεων P.C.G. (Preconditioned Conjugate Gradient).
2. Ισχυρά πεπλεγμένη διαδικασία S.I.P. (Strongly Implicit Procedure)
3. Διαδοχική υπερχαλάρωση S.O.R.(Successive Over Relaxation)
4. Μηχανή επίλυσης W.H.S. (Waterloo Hydrogeologic Software)

Το μοντέλο Modflow επιλύει αριθμητικά τη διαφορική εξίσωση της υπόγειας ροής (όπως αυτή έχει αναφερθεί σε προηγούμενη παράγραφο) με εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών (Finite Differences Method) (Hildebrand B.F., Cliffs, New Jersey, 1968). Η επίλυση πραγματοποιείται σε τρεις διαστάσεις και σε συνθήκες μόνιμης αλλά και μη μόνιμης ροής. Για την αποτελεσματική λειτουργία της παραπάνω διαδικασίας επίλυσης το υπολογιστικό πακέτο Modflow, χρησιμοποιεί διάφορα πακέτα επίλυσης (solver packages) εκ των οποίων τα βασικότερα είναι τα εξής :

- **WHS solver package**
- **PCG solver package**

Το μοντέλο το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της παρούσας μελέτης, είναι η έκδοση Visual του υπολογιστικού πακέτου Modflow, η οποία υποστηρίζει πλέον τις νέες μηχανές επίλυσης GMG και SAMG. Αυτές οι μηχανές επίλυσης είναι ταχύτερες κατά τρεις έως έντεκα ώρες από το βασικό πακέτο επίλυσης PCG, στην περίπτωση μεσαίου μεγέθους μοντέλου. Ακόμη έχει αποδειχθεί ότι τα πακέτα επίλυσης GMG και SAMG είναι ταχύτερα από την παραδοσιακή μηχανή επίλυσης PCG και για τα μεγάλα μοντέλα που περιέχουν συνολικό αριθμό κυψελίδων μεγαλύτερο του ενός εκατομμυρίου (Waterloo Hydrogeologic Inc., 1995-2006).

Τέλος το πρόγραμμα διαθέτει μια ρουτίνα ρύθμισης (calibration). Η ρουτίνα αυτή ονομάζεται PEST (**Parameter Estimation**) και αφορά μια διαδικασία γνωστή και ως *Αντίστροφο πρόβλημα *. Πρόκειται για μια διαδικασία που βασίζεται και αυτή στην μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, η οποία διεξάγει στατιστικά τεστ σε ένα εύρος τιμών που του ορίζει ο χρήστης για μία παράμετρο ή για ένα σύνολο παραμέτρων. Η ρουτίνα αυτή για δεδομένες τελικές συνθήκες (σημεία ελέγχου) προσδιορίζει την βέλτιστη στατιστικά αποδεκτή τιμή παραμέτρου, η οποία μπορεί να έχει αρχικές συνθήκες αυτές που του έχει δώσει ο χρήστης. Η διαδικασία μοιάζει πολύ με την διαδικασία δοκιμή-λάθος-δοκιμή, απλά σε κάθε βήμα διεξάγεται στατιστικός έλεγχος αποτελεσμάτων. Τελικά προκύπτει μια τιμή αποδεκτή από την ρουτίνα με διαστήματα εμπιστοσύνης και συντελεστή συσχέτισης.

Γενικά το μοντέλο παρέχει πολλά πλεονεκτήματα καθώς υποστηρίζεται και από το Αμερικάνικο Γεωλογικό Ινστιτούτο, ενώ συνοδεύεται από πλήρη εγχειρίδιο χρήσης από το 1983. Η χρήση του είναι διαδεδομένη παγκοσμίως , καθιστώντας το αξιόπιστο και τέλος διατίθενται δωρεάν εκδόσεις του σε παραθυρικό περιβάλλον windows. Στην παρούσα εργασία γίνεται χρήσης τέτοιας έκδοσης.

Όσο αναφορά τα μειονεκτήματα που υπάρχουν κατά τη χρήση του μοντέλου αυτού θα πρέπει να αναφερθεί αρχικά πως η αξιοπιστία της προσομοίωσης εξαρτάται από την ομοιογένεια του υδροφόρου συστήματος το οποίο προσομοιώνεται καθώς επίσης και από την αξιοπιστία των εισαγόμενων στοιχείων στο υπολογιστικό πακέτο. Οι υδρολογικές και υδραυλικές παράμετροι, το εισαγόμενο υδραυλικό φορτίο και οι οριακές συνθήκες παίζουν σημαντικό ρόλο στην εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων και αντικειμενικά αποδεκτών λύσεων στην περίπτωση επίλυσης προβλημάτων ρύπανσης ή προβλημάτων σταδιακής μεταβολής των υδρολογικών παραμέτρων. Ως αποτέλεσμα των προαναφερθέντων, η ενδεχόμενη αναξιόπιστία ενός εισαγόμενου στοιχείου δύναται να επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό το τελικό αποτέλεσμα της προσομοίωσης και είναι αρκετή να καταστήσει αναξιόπιστη ολόκληρη τη διαδικασία. Επίσης οι τιμές των ρυθμίσεων μπορεί να μην έχουν καμία σχέση με την πραγματικότητα, καθώς πρόκειται για μια μαθηματική επίλυση η οποία μόνο για τον χρήστη συμβολίζει κάτι. Επομένως ο χρήστης καλείται να δώσει μεγάλη σημασία σε όλα τα παραπάνω στοιχεία πραγματοποιώντας πριν την προσομοίωση μια διαδικασία που στη γλώσσα των μοντελιστών ονομάζεται Κατάστρωση Εννοιολογικού Μοντέλου.

4.7 Οριακές συνθήκες ροής

Η κατάλληλη επιλογή των οριακών συνθηκών αποτελεί βασική προϋπόθεση για την κατασκευή ενός αξιόπιστου μοντέλου το οποίο θα είναι ικανό να αποδώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα, αντιπροσωπευτικά των πραγματικών συνθηκών που επικρατούν στην υπό μελέτη περιοχή. Με την χρήση οριακών συνθηκών καθορίζουμε τη στάθμη ύδατος (εξαρτημένη μεταβλητή). Επίσης είναι δυνατόν να καθοριστεί επιπλέον και η παράγωγος της μεταβλητής αυτής δηλαδή η ροή ύδατος (**flux**) στην περιοχή μελέτης μας.

Θα πρέπει να επισημανθεί πως τα υδρογεωλογικά όρια των υδροφόρων συστημάτων σχηματίζονται από φυσικές παρουσίες οι οποίες ουσιαστικά καθορίζουν την έκταση αλλά και το βάθος του ενεργού τμήματος του υδροφορέα ενδιαφέροντος, ενώ ταυτόχρονα διαμορφώνουν και τις συνθήκες εμπλουτισμού του υδροφόρου ορίζοντα και κατά συνέπεια της υπόγειας ροής στο υδροφόρο σύστημα. Τέτοιου είδους φυσικά όρια αποτελούν τα αδιαπέρατα στρώματα καθώς επίσης και τα υπόγεια ή επιφανειακά υδρολογικά φαινόμενα όπως για παράδειγμα η ύπαρξη ενός ποταμού αλλά και η ύπαρξη υπόγειων ρηγμάτων Καρστικού ή μη χαρακτήρα.

Στην περίπτωση προσομοίωσης σε συνθήκες σταθερής κατάστασης (steady state case) η επιλογή των οριακών συνθηκών , αποκτά ακόμα μεγαλύτερη σημασία διότι το είδος της υπόγειας ροής και η πιθανότητα εμφάνισης σφάλματος στα αποτελέσματα της προσομοίωσης εξαρτώνται σε μεγαλύτερο πλεον βαθμό από την καταλληλότητα των οριακών συνθηκών που επιλέχθηκαν.

Οι οριακές συνθήκες που συναντώνται στα κλασσικά μοντέλα προσομοίωσης υπόγειας ροής είναι στο σύνολο τους τρεις και εκφράζονται σε μαθηματική μορφή (Παππά Α., 2010).

▪ Οριακή συνθήκη Dirichlet

Τα όρια καθορισμένου υδραυλικού ύψους 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 και λαμβάνει υπόψη την κάθετη μεταβολή του υδραυλικού ύψους ανάλογα με το βάθος.

▪ Οριακή συνθήκη Neumann

Το συγκεκριμένο όριο αναφέρεται στον καθορισμό της ροής (flux). Η συνθήκη καθορισμένης ροής επιλέγεται κατά μήκος μιας συνοριακής επιφάνειας που η ροή αποτελεί συνάρτηση του χρόνου και της θέσης. Στην περίπτωση ενός υδραυλικά αδιαπέρατου φράγματος η ροή τίθεται μηδενική.

▪ Οριακή συνθήκη Cauchy

Στην συνθήκη αυτή η ροή εξαρτάται από το υδραυλικό ύψος στα όρια. Συγκεκριμένα η ροή διαμέσου μιας οριακής επιφάνειας εξαρτάται από την εκάστοτε μεταβολή του υδραυλικού φορτίου, εγκάρσια της οριακής επιφάνειας. Η συνθήκη αποκαλείται και συνθήκη μεταβλητού φορτίου ή μικτού ορίου. Σχετικά με τον τελευταίο χαρακτηρισμό αυτός αποδίδεται λόγω της συσχέτισης της υπόγειας ροής με τις τιμές της στάθμης ύδατος στα όρια.

4.8 Σχεδιασμός και αναλυτική ανάπτυξη του μοντέλου προσομοίωσης

Για τον ολοκληρωμένο σχεδιασμό της προσομοίωσης, απαιτείται η εισαγωγή των ποσοτήτων του υδρολογικού ισοζυγίου του υδροφορέα της λεκάνης στο μοντέλο προσομοίωσης καθώς και η μετατροπή του μεγέθους των βασικών γεωμετρικών και υδραυλικών παραμέτρων σε μορφή αναγνωρίσιμη από το υπολογιστικό μοντέλο στο οποίο θα εισαχθούν. Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενες παραγράφους διαφορετικών κεφαλαίων, κατά την κατασκευή ενός μοντέλου προσομοίωσης, αρχικά επιλέγουμε βασικά χαρακτηριστικά του μοντέλου όπως για παράδειγμα τον τύπο ροής, το μέγεθος του κανάβου προσομοίωσης, τις μονάδες των μεταβλητών που χρησιμοποιεί το μοντέλο κ.α.. Οι επιλογές αυτές πραγματοποιούνται στα αρχικά παράθυρα που εμφανίζονται κατά την κατασκευή του μοντέλου και παραμένουν αμετάβλητες σε ολόκληρη τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Βασικά βήματα ανάπτυξης του μοντέλου, αποτελούν η ανάλυση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του υπό μελέτη υδροφορέα, η παρουσίαση και ανάλογη επεξεργασία του υδρολογικού ισοζυγίου και η κατάλληλη χρήση των υπορουτίνων του υπολογιστικού κώδικα για την εισαγωγή των απαραίτητων για την εκτέλεση της προσομοίωσης δεδομένων.

Σχετικά με το περιβάλλον εργασίας στο μοντέλο Visual Modflow, στον κύριο κατάλογο επιλογών, συναντάμε όπως έχει προαναφερθεί, την επιλογή εισαγωγής δεδομένων (**Input**) στην οποία περιέχονται οι υπορουτίνες, την επιλογή εκτέλεσης της προσομοίωσης (**Run**) στην οποία είναι δυνατόν να επιλέξουμε τη μηχανή επίλυσης που θα χρησιμοποιηθεί, την επιλογή εξαγωγής αποτελεσμάτων (**Output**) καθώς και την επιλογή (**Setup**) με την οποία διαμορφώνουμε τα βασικά χαρακτηριστικά της προσομοίωσης. Τέλος σημαντική παράμετρος κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης αποτελεί ο παράγοντας επίλυσης (**Multiplier**) που χρησιμοποιείται από την εκάστοτε μηχανή επίλυσης του υπολογιστικού μοντέλου. Ο παράγοντας αυτός καθορίζεται στην επιλογή εκτέλεσης της προσομοίωσης (**Run**).

Στα αρχικά στάδια κατασκευής του μοντέλου πραγματοποιήθηκαν τα παρακάτω κατά σειρά εμφάνισης στο περιβάλλον εργασίας του κώδικα:

- Άνοιγμα καινούργιου φακέλου στην επιφάνεια εργασίας.
- Άνοιγμα του προγράμματός Modflow και επιλογή New από την επιλογή File που εμφανίζεται πάνω στη γραμμή *εργαλείων*(**toolbar**) του μοντέλου.
- Δημιουργία νέου μοντέλου υδροφορέα (Create new model): Ορίζεται έτσι ένα νέο μοντέλο για την αναπαράσταση του υδροφορέα
- Επιλογή χρόνου προσομοίωσης για σταθερή κατάσταση (**Steady-State Simulation Time**): Πραγματοποιήθηκαν 2 εφαρμογές του μοντέλου Modflow, μια για το χειμώνα και μια για το καλοκαίρι. Η επιλογή αυτή έγινε έτσι ώστε να εξεταστεί η έκταση του προβλήματος μέσα σε ένα υδρολογικό έτος και την εξάπλωση αυτού από την χειμερινή στην καλοκαιρινή περίοδο. Η χειμερινή περίοδος είναι από τον Οκτώβριο μέχρι και τον Απρίλιο, ενώ η καλοκαιρινή ξεκινά από τον Μάιο και τελειώνει τον Σεπτέμβρη.
- Επιλογή των μονάδων των μεταβλητών (**Units**) : Συγκεκριμένα επιλέχθηκαν τα default. Όπως δηλαδή παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα:

Παράμετροι	Μονάδες
Μήκος	m
Χρόνος	day
Υδραυλική Αγωγιμότητα	m / sec
Παροχή	m ³ / sec
Εμπλουτισμός	mm / year
Μάζα	kg
Συγκέντρωση	mg / lit

Πίνακας (3) Μονάδες μεταβλητών του μοντέλου προσομοίωσης.

- Επιλέγουμε στον τύπο εκτέλεσης (**Run-Type**): Transient Flow , λόγω της ύπαρξης χρονικών περιόδων και μεταβλητών παραμέτρων σε αυτές (π.χ. υδραυλικών φορτίων).

Έτσι διαμορφώσαμε τα κύρια χαρακτηριστικά της προσομοίωσης και μετέπειτα θα χρησιμοποιήσουμε την επιλογή των εισαγόμενων παραμέτρων (**Input**) για την κατασκευή του μοντέλου.

4.8.1 Ανάλυση γεωμετρικών χαρακτηριστικών και χωρική διακριτοποίηση.

Για την ανάλυση και μετέπειτα εισαγωγή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του υδροφορέα στο μοντέλο προσομοίωσης, χρησιμοποιήθηκε το αρχικό πακέτο κατασκευής του μοντέλου. Στα πρώτα βήματα δημιουργίας του επιλέξαμε τα παρακάτω:

- Ορισμός διαστάσεων υδροφορέα (**Grid**)
 - 1) Στήλες κανάβου : (**Columns**) (**j**):50
 - 2) Γραμμές κανάβου: (**Rows**) (**i**):50
 - 3) Επίπεδα (**Layers**) : 1
 - 4) Τελικό βάθος του υδροφορέα (**Zmin**):-100 (m)
 - 5) Εναρκτήριο σημείο μετρήσεων υψομέτρου στον υδροφορέα (**Zmax**): 0(m)
- Επιλογή: **Import a site map** και από την ένδειξη Browse επιλέξαμε τον χάρτη geology_troizina.bmp .
- Επιλέγουμε **Layer Type : Unconfined** , μιας και γίνεται επεξεργασία ενός επιπέδου (1 Layer).
- Επιλέγουμε ως μονάδα υψομέτρου το μέτρο (Elevation units: **Meters**)

Τέλος όπως έχει προαναφερθεί η λεκάνη ενδιαφέροντος σύμφωνα με την παρούσα προσομοίωση παρουσιάζει μεγαλύτερη επιφάνεια κατείσδυσης ύδατος, άρα και μεγαλύτερο όγκο κατεισδυόμενου νερού.

4.8.2 Διαμόρφωση του μοντέλου προσομοίωσης σε περιβάλλον Visual Modflow με χρήση υπορουτίνων

Στην συγκεκριμένη παράγραφο αναπτύσσεται αναλυτικά η διαδικασία κατασκευής του μοντέλου προσομοίωσης με χρήσης των εντολών- υπορουτίνων του κώδικα Modflow. Οι υπορουτίνες που χρησιμοποιήθηκαν κατά σειρά είναι οι εξής:

1. Υδραυλική Αγωγιμότητα (**Hydraulic Conductivity**)
2. Γεωτρήσεις παρατήρησης βάθου στάθμης ύδατος (**Head Observation Wells**)
3. Αρχικά υδραυλικά ύψη (**Initial Heads**)
4. Πλευρικά εισρέον υδραυλικό φορτίο (**Groundwater Head Boundary**)
5. Εμπλουτισμός (**Recharge**)

Εδώ πρέπει να επισημάνουμε ότι είναι υποχρεωτικό να έχουμε ήδη διαμορφώσει το πλέγμα του κανάβου από την εντολή **Grid** όπως εξηγήσαμε στο παραπάνω κεφάλαιο.

1. Υδραυλική Αγωγιμότητα (**Hydraulic Conductivity**)

Οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας λήφθηκαν από προηγούμενη μελέτη στην ίδια περιοχή. Η υδραυλική αγωγιμότητα των σχηματισμών για τις κατευθύνσεις x και y είναι της ίδιας τάξης μεγέθους, ενώ για την κατεύθυνση z οι τιμές είναι ελαττωμένες κατά μια τάξης μεγέθους. Παρακάτω φαίνεται πως εισήχθησαν στο μοντέλο τα δεδομένα της υδραυλικής αγωγιμότητας.

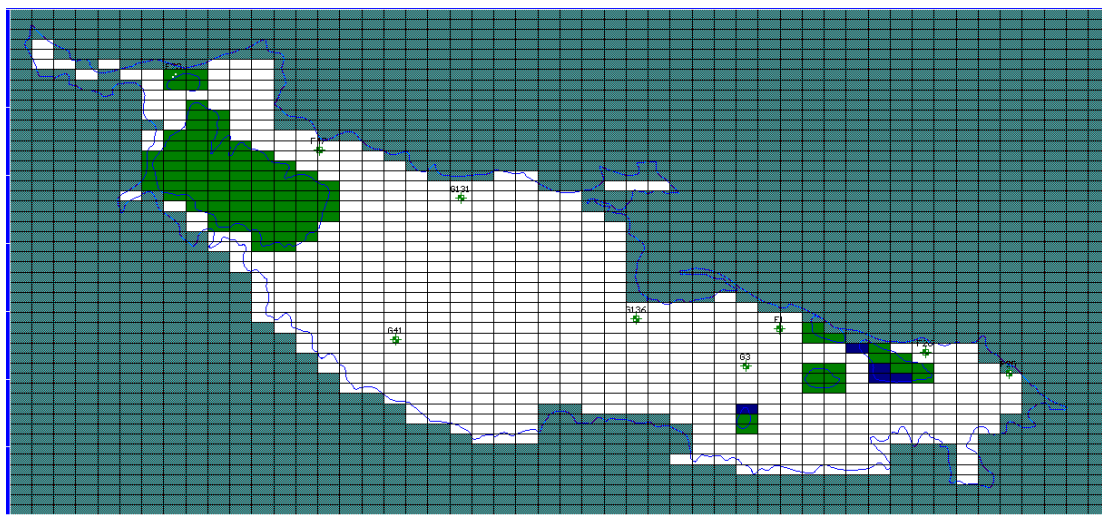
Γεωλογικοί Σχηματισμοί	K_x (m/s)	K_y (m/s)	K_z (m/s)
Τμήμα 1	0.001	0.001	0.0001
Τμήμα 2	0.0008	0.0008	0.00008
Τμήμα 3	0.0001	0.0001	0.00001

Πίνακας (4) Δεδομένα υδραυλικής αγωγιμότητας

Conductivity

	Zone	Kx [m/s]	Ky [m/s]	Kz [m/s]	Active	Distribution Array
	1	0.001	0.001	0.0001	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	2	0.0008	0.0008	0.00008	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	3	0.0001	0.0001	0.00001	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Εικόνα (22) : Παράθυρο διαλόγου του Modflow στο οποίο προσδιορίζονται οι υδραυλικές αγωγιμότητες



Εικόνα (23) : Απεικόνιση των απενεργοποιημένων κελιών στο μοντέλο των διαφορετικών τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας. (Visual Modflow)

2. Γεωτρήσεις παρατήρησης βάθους στάθμης ύδατος (**Head Observation Wells**)

Στην περιοχή μελέτης μας υπάρχουν 21 πηγάδια παρατήρησης του βάθους στάθμης ύδατος και νιτρικών. Συγκεκριμένα έχουμε 4 αποκλειστικά πηγάδια παρατήρησης των νιτρικών, 4 επίσης αποκλειστικά πηγάδια παρατήρησης της στάθμης ύδατος και 13 κοινά πηγάδια παρατήρησης. Παρακάτω φαίνονται πιο καθαρά ποια είναι τα πηγάδια αυτά.

- Όσο αναφορά την ροή του ύδατος τα πηγάδια παρατηρήσεις είναι τα εξής:

ID	TYPE	X	Y
F1	Well	447630.66000	4150790.00000
F2	Well	444862.64000	4157899.36000
F25	Well	450448.47000	4150186.00000
F26	Well	449295.19000	4150548.25000
F28	Well	441691.63000	4158963.26000
F47	Well	442255.41000	4152947.50000
F78	Well	440582.88000	4153797.50000
G131	Borehole	443700.59000	4152283.75000
G136	Borehole	445920.53000	4150939.50000
G3	Borehole	447275.75000	4150361.25000
G41	Borehole	443141.97000	4150569.50000
G12	Well	449672.98000	4157963.65000
G35	Well	451873.78000	4157963.23000
G5	Well	441278.96000	4156537.25000
G6	Well	447132.45000	4159963.74000
G8	Well	449635.75000	4152522.36000

Πίνακας (5) : Πηγάδια παρατήρησης ροής ύδατος

Οι τιμές **X** και **Y** είναι οι συντεταγμένες του εκάστοτε πηγαδιού στο χώρο και βρίσκονται πολύ εύκολα με την βοήθεια του κέρσορα στην κεντρική καρτέλα του προγράμματος Modflow, κάτω δεξιά.

- Όσο αναφορά τα πηγάδια παρατήρησης των νιτρικών φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

ID	TYPE	X	Y
F121	Well	449706.97000	4150595.00000
F2	Well	447041.44000	4150128.00000
F21	Well	449385.16000	4150193.25000
F25	Well	450448.47000	4150186.00000
F26	Well	449295.19000	4150548.25000
F28	Well	447976.41000	4150464.25000
F47	Well	442255.41000	4152947.50000
G12	Borehole	444808.53000	4150106.75000
G131	Borehole	443700.59000	4152283.75000
G135	Borehole	446026.09000	4150543.25000
G136	Borehole	445920.53000	4150939.50000
G16	Borehole	444632.34000	4150889.00000
G35	Borehole	444470.59000	4152602.75000
G5	Borehole	448092.78000	4150064.00000
G61	Borehole	444811.97000	4151315.75000
G8	Borehole	444559.84000	4150774.25000

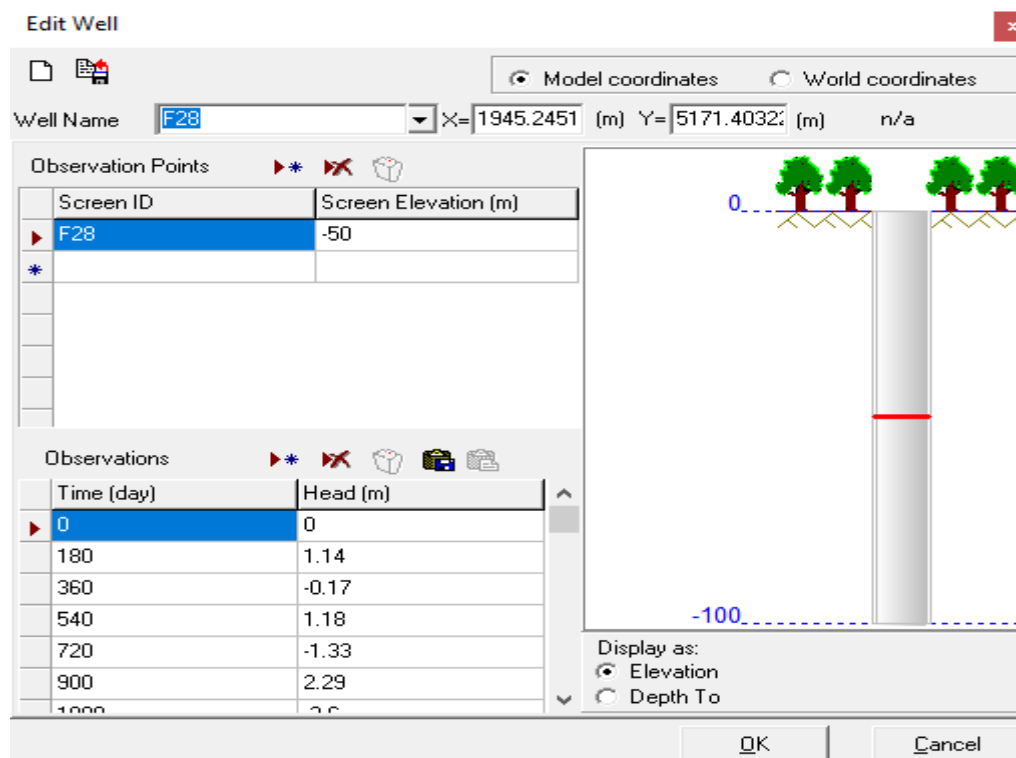
Πίνακας (6): Πηγάδια παρατήρησης νιτρικών

Και εδώ οι στήλες **X** και **Y** υποδηλώνουν τις συντεταγμένες των πηγαδιών στο χώρο και βρίσκονται με τον ίδιο τρόπο που εξηγήσαμε παραπάνω.

Κατά την εισαγωγή των παραπάνω στοιχείων στο περιβάλλον του μοντέλου, επιλέχθηκε η ένδειξη **Add Well** από την υπορουτίνα **Pump Wells** και σημειώθηκε στο χάρτη η θέση της κάθε γεώτρησης. Ταυτόχρονα με τον προσδιορισμό της θέσης της εκάστοτε γεώτρησης εμφανιζόταν το παράθυρο εισαγωγής των στοιχείων που αφορούσαν την αντίστοιχη γεώτρηση.

Για κάθε πηγάδι παρατήρησης επιλέχθηκαν τα επόμενα:

- Model Coordinates
- Display as: Elevation
- Screen ID:- 100m
- Screen Elevation:-50



Εικόνα (24) : Παράθυρο εισαγωγής στοιχείων γεώτρησης παρατήρησης (Ως παράδειγμα επιλέχθηκε το πηγάδι F28, Visual Modflow)

3. Αρχικά υδραυλικά ύψη (Initial Heads)

Τα αρχικά υδραυλικά ύψη στον υδροφορέα μελέτης αρχικά διαμορφώθηκαν σε ολόκληρη τη περιοχή, το οποίο είναι στα 5.11 μέτρα από την επιφάνεια του εδάφους. Αφού δημιουργήθηκε ολόκληρο το μοντέλο προσομοίωσης με τη βοήθεια των υπόλοιπων υπορουτίνων π.χ. G.H.B.

4. Πλευρικά εισρέον υδραυλικό φορτίο (Groundwater Head Boundary)

Στην περίπτωση εισαγωγής στο μοντέλο, των πλευρικών εισροών και της τροφοδοσίας λόγω των επιφανειακών απορροών, χρησιμοποιήθηκε η υπορουτίνα του κώδικα Modflow, **Groundwater Head Boundary (G.H.B.)**. Όπως έχει αναφερθεί απαιτείται να έχει γίνει η επίλυση της εξίσωσης Dupuit για την περιοχή του υδροφορέα που έχει επιλεγεί να τροφοδοτηθεί πλευρικά. Σύμφωνα με την εξίσωση αυτή, στην περίπτωση τροφοδοσίας ενός υδροφορέα από εξωτερική δεξαμενή ύδατος η διαφορά του τετραγώνου του υδραυλικού ύψους της εξωτερικής πηγής (π.χ. στάθμη ποταμιού) από το τετράγωνο του υδραυλικού φορτίου σε εσωτερικό σημείο του υδροφορέα είναι ανάλογη της ογκομετρικής παροχής της συνολικής υπόγειας εισροής ύδατος (Q) καθώς επίσης και της απόστασης μεταξύ της εξωτερικής

δεξαμενής και του επιλεγμένου εσωτερικού σημείου του υδροφορέα. Επιπλέον η προαναφερθείσα διαφορά τετραγώνων είναι αντιστρόφως ανάλογη της υδραυλικής αγωγιμότητας του τροφοδοτούμενου υδροφορέα.

Εξίσωση Dupuit (Καρατζάς, 2009)

$$\frac{Q}{\text{Πλάτος}} = \left(\frac{1}{2}\right) * K * \frac{h_1^2 - h_2^2}{L}$$

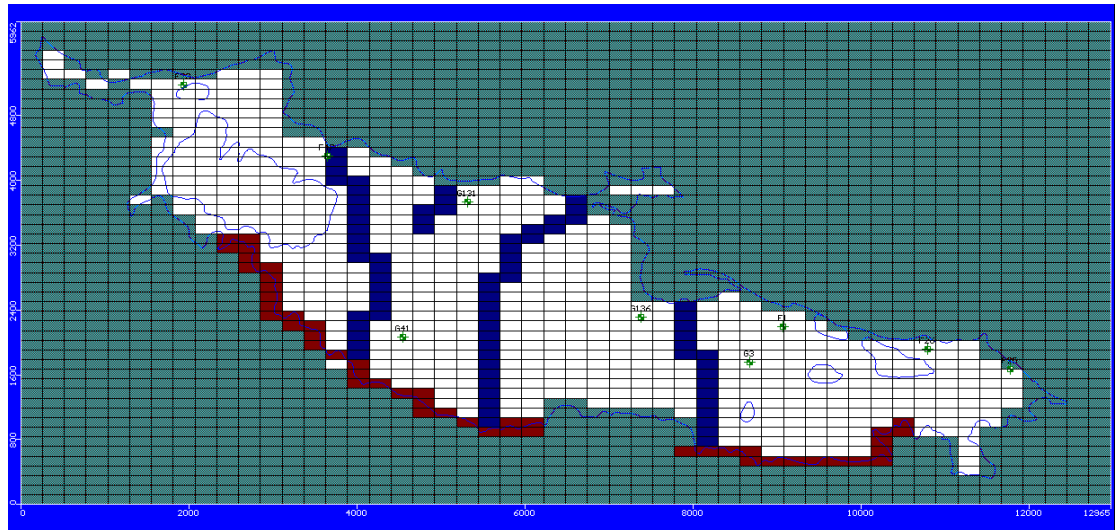
Σύμφωνα με την εξίσωση Dupuit είναι δυνατή η εύρεση του αρχικού υδραυλικού ύψους (h_1) το οποίο αντιστοιχεί στην εξωτερική δεξαμενή τροφοδοσίας, εφόσον είναι γνωστό το υδραυλικό ύψος στο εσωτερικό σημείο του τροφοδοτούμενου υδροφορέα (h_2). Για την επίλυση της εξίσωσης Dupuit είναι απαραίτητη η γνώση της αντίστοιχης υδραυλικής αγωγιμότητας στο τροφοδοτούμενο τμήμα (K) καθώς επίσης η γνώση της παροχής υπόγειας εισροής (Q), του πλάτους εισροής και του μήκους (L) μεταξύ των δύο υδραυλικών υψών. Σαφώς σύμφωνα με την εξίσωση σε διαφορετικές περιπτώσεις είναι δυνατός ο υπολογισμός άλλων παραμέτρων όπως για παράδειγμα της υδραυλικής αγωγιμότητας (K) εφόσον είναι γνωστά τα δύο υδραυλικά ύψη (h_1 , h_2) καθώς και οι υπόλοιπες μεταβλητές της εξίσωσης.

Όπως αναφέρθηκε για την εισαγωγή των απαραίτητων δεδομένων στην εντολή-υπορουτίνα G.H.B. κατά τη χρήση της για κάθε περιοχή επιβάλλεται η επίλυση της εξίσωσης Dupuit ως προς το αρχικό υδραυλικό ύψος (h_1). Η εξίσωση Dupuit, ως προς την παράμετρο (h_1) επιλύεται ως εξής:

Επίλυση ως προς h_1 :

$$h_1 = \left[2 * \frac{Q * L}{(\text{Πλάτος}) * K} + h_2^2 \right]^{1/2}$$

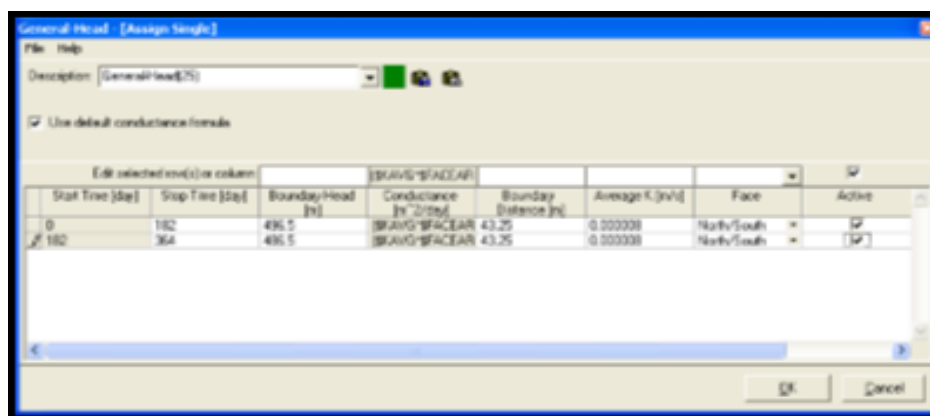
Επίσης είναι εξαιρετικά σημαντικό να αναφερθεί ότι στην περίπτωση επίλυσης της παραπάνω εξίσωσης η ογκομετρική παροχή ύδατος (Q) λάμβανε τιμή ανάλογη της συνολικής ποσότητας υπόγειας τροφοδοσίας που είχε θεωρηθεί αρχικά.



**Εικόνα (25) : Παρουσίαση πλευρική εισροής υδραυλικού φορτίου
(Visual Modflow)**

- Εισαγωγή στοιχείων στο μοντέλο

Με την επιλογή της εντολής **Assign** από τον κατάλογο της υπορουτίνας **G.H.B.**, στο μοντέλο Visual Modflow, δύναται η εισαγωγή όλων των προαναφερθέντων στοιχείων, όπως των αρχικών υδραυλικών υψών h_1 , των τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας της εκάστοτε περιοχής, των τιμών της μεταβλητής Boundary distance , της κατεύθυνσης υπόγειας εισροής ύδατος στον τροφοδοτούμενο υδροφορέα αλλά και των χρονικών περιόδων προσομοίωσης στον παρόν μοντέλο. Οι χρονικές περίοδοι του παρόντος μοντέλου, έχουν διαμορφωθεί όπως έχει ήδη αναφερθεί σε δύο εποχιακές περιόδους, τη χειμερινή και τη θερινή με χρονικό διάστημα 0 έως 180 μέρες και από 180 έως 360 μέρες αντίστοιχα (για τον κάθε χρόνο). Τέλος με την επιλογή Assign δύναται ο σχεδιασμός της λεπτής ζώνης τροφοδοσίας του υδροφορέα, η οποία βρίσκεται ενδιάμεσα στην εξωτερική πηγή και σε αυτόν. Στο ακόλουθο σχήμα παρατίθεται παράδειγμα παραθύρου εισαγωγής των απαραίτητων στοιχείων και συνολικής διαμόρφωσης της εντολής G.H.B.



Εικόνα (26) : Παράθυρο διαμόρφωσης της εντολής G.H.B. μέσω της επιλογής Assign (Visual Modflow)

5. Εμπλουτισμός (Recharge)

Όσο αναφορά τον εμπλουτισμό της περιοχής αυτός γίνεται κυρίως μέσω της κατείσδυση της βροχόπτωσης στον υδροφόρο. Από την μελέτη του Ματιάτου και με βάση τον πλησιέστερο μετεωρολογικό σταθμό του Πόρου υπολογίστηκε ότι η μέση ετήσια βροχόπτωση είναι 603 mm. Η υγρή περίοδος είναι μεταξύ Νοεμβρίου και Ιανουαρίου, ενώ η περίοδος με τις χαμηλότερες βροχοπτώσεις είναι μεταξύ Ιουνίου και Αυγούστου

4.8.3 Ρύθμιση του μοντέλου σε συνθήκες μόνιμης ροής

Κατά τη ρύθμιση του υπολογιστικού μοντέλου, αναζητούνται οι κατάλληλες τιμές των χαρακτηριστικών παραμέτρων και φορτιών του συστήματος, ούτως ώστε κατά την εκτέλεση του κώδικα, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης να προσεγγίζουν με αξιοπιστία τις δεδομένες τιμές των μεταβλητών κατάστασης, οι οποίες απεικονίζουν τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας του φυσικού συστήματος. Όσον αφορά τη μελέτη υπόγειων υδροφορέων, η ρύθμιση του μοντέλου, αποσκοπεί κυρίως στη διαμόρφωση της πιεζομετρίας του υδροφόρου συστήματος σύμφωνα με τα καθορισμένα κριτήρια βαθμονόμησης (Τάντος Β., 2006)

Η ρύθμιση ενός μαθηματικού μοντέλου, είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί μέσω δύο βασικών μεθόδων. Η πρώτη μέθοδος είναι η εκτέλεση αυτοματοποιημένης βελτιστοποίησης με χρήση των ανάλογων αλγορίθμων βελτιστοποίησης. Η δεύτερη μέθοδος είναι η διαδικασία της δοκιμής και σφάλματος. Στη παρούσα μελέτη η ρύθμιση πραγματοποιήθηκε με την εφαρμογή της 2^{ης} μεθόδου.

Η διαδικασία της δοκιμής και σφάλματος (**trial and error**) είναι μια δύσκολη και χρονοβόρα διαδικασία μοντελοποίησης του υπόγειου υδροφόρου καθώς πραγματοποιείται ένας μεγάλος αριθμός επιλύσεων μέχρι να επιτευχθεί ικανοποιητική συμφωνία ανάμεσα στις τιμές του πεδίου και στις τιμές του μοντέλου. Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου αυτής εξαρτάται σημαντικά από τον επιθυμητό βαθμό αξιοπιστίας των εξαγόμενων στοιχείων καθώς και από την ικανότητα

λεπτομερούς και αντικειμενικά αποδεκτής εφαρμογής της προαναφερθείσας τεχνικής από τον εκάστοτε μελετητή. Επιπρόσθετα η μέθοδος αυτή παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι δεν απαιτεί τη χρήση πρόσθετου λογισμικού εκτός αυτής του ίδιου του μοντέλου προσομοίωσης. Η μέθοδος δοκιμής σφάλματος έχει εφαρμοστεί αρκετές φορές στο παρελθόν ωστόσο παρουσιάζει μειονεκτήματα έναντι των αυτοματοποιημένων μεθόδων ρύθμισής. Για παράδειγμα σε πολλές περιπτώσεις παρουσιάζει το πρόβλημα μη μοναδικότητα της λύσης, βάση της οποίας κατά τη ρύθμιση του μοντέλου, διαπιστώνεται από το μελετητή η ύπαρξη δύο ή περισσότερων διαφορετικών μεταξύ τους σετ δεδομένων εισόδου, μέσω των οποίων επιτυγχάνονται οι στόχοι της βαθμονόμησης.

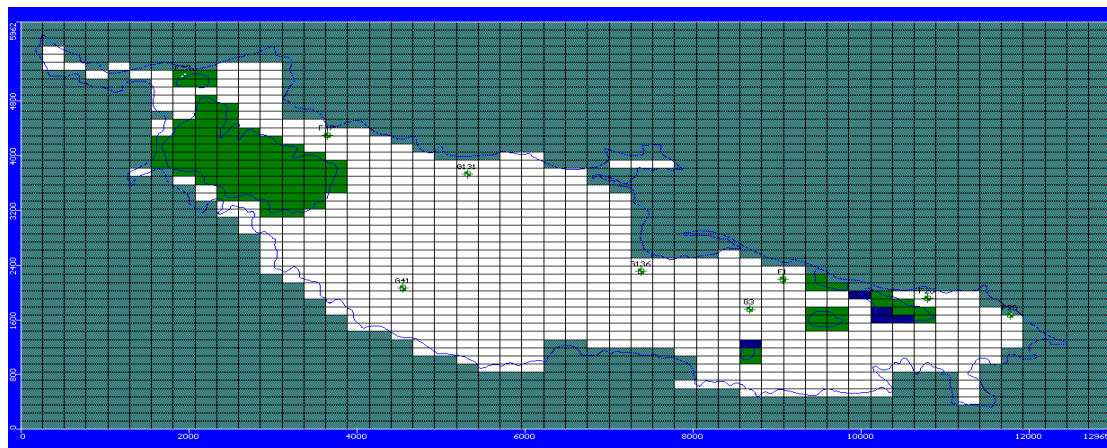
Για τις αυτοματοποιημένες μεθόδους βελτιστοποίησης είναι γνωστό ότι βασίζονται σε αλγόριθμους οι οποίοι αναζητούν το βέλτιστο σύνολο παραμέτρων για την επιθυμητή ρύθμιση του μοντέλου προσομοίωσης. Ο εν λόγω αλγόριθμος βασίζεται σε παραλλαγές της Gauss-Newton και η κλασσικότερη αυτοματοποιημένη ρύθμιση ενός μοντέλου υπόγειας ροής και είναι η διαδικασία P.EST (**Model-Independent Parameter Estimation**).

Όσο αναφορά την βαθμονόμηση του παρόντος μοντέλου λαμβάνονται οι παρακάτω τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας:

Conductivity						
	Zone	Kx [m/s]	Ky [m/s]	Kz [m/s]	Active	Distribution Array
	1	0.001	0.001	0.0001	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	2	0.0008	0.0008	0.00008	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	3	0.0001	0.0001	0.00001	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Εικόνα (27) : Παράθυρο διαλόγου του Modflow στο οποίο προσδιορίζονται οι υδραυλικές αγωγιμότητες

Οι ζώνες που φαίνονται στην παραπάνω εικόνα διακρίνονται καλύτερα στην εικόνα που ακολουθεί και έχουν να κάνουν με τις περιοχές όπου η αγωγιμότητα είναι διαφορετική



Εικόνα (28) : Κύριο παράθυρο του Modflow στο οποίο προσδιορίζονται οι ζώνες της υδραυλικής αγωγιμότητας

4.8.4 Μέθοδος παρεμβολής Kriging

Στη διεθνή βιβλιογραφία οι γραμμικές μέθοδοι βέλτιστης παρεμβολής αναφέρονται ως **BLUE (Best Linear Unbiased Estimation)**. Η πιο γνωστή μέθοδος που έτυχε γενικής αποδοχής και έχει πλήρη θεωρητική τεκμηρίωση και επιβεβαίωση μέσα από ποικίλες εφαρμογές είναι η μέθοδος Kriging.

1. **Best (βέλτιστος)** με την έννοια ότι έχει το ελάχιστο μέσο τετραγωνικό σφάλμα δηλαδή η αναμενόμενη τετραγωνισμένη διαφορά μεταξύ της εκτίμησης $X^*_\lambda(S_v)$ και την πραγματικής τιμής $X_\lambda(S_v)$, $E[X^*_\lambda(S_v) - X_\lambda(S_v)]^2$ είναι η ελάχιστη για όλους τους πιθανούς εκτιμητές.
2. **Linear (γραμμικός)** σχηματίζεται δηλαδή με γραμμική ζύγιση των διαθέσιμων δειγμάτων.
3. **Unbiased (αμερόληπτος)**, αφού ισχύει η συνθήκη της αμεροληψίας η οποία καθορίζει το αναμενόμενο σφάλμα $E[X^*_\lambda(S_v) - X_\lambda(S_v)]$ ίσο με μηδέν.

Τα κύρια πλεονεκτήματα της μεθόδου Kriging είναι :

- Η στατιστική ποιότητα των προβλέψεων της (π.χ. έλλειψη εξαρτήσεων) και
- Η ικανότητα της να προβλέπει τη χωρική κατανομή της αβεβαιότητας.

Το εργαλείο του Kriging προσαρμόζει μια μαθηματική συνάρτηση σε ένα συγκεκριμένο αριθμό σημείων ή σε όλα τα σημεία μέσα σε μια συγκεκριμένη ακτίνα, για να προσδιορίσει την εκτιμώμενη τιμή σε κάθε ζητούμενο σημείο. Η τεχνική του Kriging θεωρεί ότι η απόσταση ή κατεύθυνση μεταξύ σημείων μέτρησης αντιπροσωπεύει μια χωρική συσχέτιση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξηγήσει μεταβλητές στην επιφάνεια.

Εάν σε μια περιοχή έχουμε τιμές μιας μεταβλητής σε διάφορα σημεία, γενικά με τυχαία διάταξη στο χώρο, μπορούμε να προσδιορίσουμε το ημιμεταβλητόγραμμα της μεταβλητής αυτής και κατόπιν να εκτιμήσουμε την τιμή της σε κάθε άλλο σημείο του χώρου, όπου δεν έχει μετρηθεί, με τη μέθοδο Kriging. Το όνομα της μεθόδου δόθηκε προς τιμή του Νοτιοαφρικάνου μεταλλειολόγου μηχανικού D.G.Krige, που είναι πρωτοπόρος στην εφαρμογή στατιστικών μεθόδων στη διερεύνηση των κοιτασμάτων ορυκτών.

Ο προσδιορισμός των τιμών της μεταβλητής σε σημεία που δεν έχουν γίνει μετρήσεις μπορεί να γίνει και με άλλες μεθόδους όπως η γραμμική ή πολυωνυμική παρεμβολή στον χώρο. Το Kriging όμως παρουσιάζει μερικές βέλτιστες, από στατιστική άποψη, ιδιότητες, από τις οποίες οι δύο σημαντικότερες είναι η αποφυγή

της μεροληπτικής εκτιμήσεως στην περίπτωση συσσωρεύσεως σημείων με μετρήσεις σε ορισμένες θέσεις και η εκτίμηση σε κάθε σημείο, του μέτρου του σφάλματος ή της αβεβαιότητας για την επιφάνεια που υπολογίστηκε.

Το Kriging λειτουργεί με τον υπολογισμό ενός βέλτιστου συνδυασμού σταθμικών συντελεστών (βαρών), με βάση την πληροφορία που περιέχεται στον ημιμεταβλητόγραμμα. Εφόσον το ημιμεταβλητόγραμμα είναι συνάρτηση της αποστάσεως, οι σταθμικοί συντελεστές μεταβάλλονται σύμφωνα με τη γεωμετρική κατανομή των σημείων των μετρήσεων στο χώρο.

Οι προσεγγίσεις που αφορούν την εφαρμογή της μεθόδου σε χωροχρονικές διαστάσεις αντανακλούν διαφορετική συμπεριφορά του προσομοιωμένου φαινομένου στη διάσταση του χρόνου. Ο χρόνος αντιμετωπίζεται είτε ως μια πρόσθετη διάσταση με γεωμετρική ή ζωνώδη ανισοτροπία, είτε ένας συνδυασμός μεταξύ των συναρτήσεων συσχέτισης χώρου και χρόνου με τη χωροχρονική υπόθεση στασιμότητας.

Η μέθοδος Kriging βασίζεται στην υπόθεση πως η παράμετρος που πρέπει να εκτιμηθεί δύναται να υποστεί μεταχείριση ως μια τοπική μεταβλητή. Μια τοπική μεταβλητή είναι μια μεταβλητή ενδιάμεση μιας πραγματικά τυχαίας μεταβλητής και μιας απόλυτα μιας απόλυτα αιτιοκρατικής μεταβλητής. Ουσιαστικά αυτό σημαίνει ότι η τοπική μεταβλητή μεταβάλλεται με ένα συνεχή τρόπο από μια περιοχή στην επόμενη και συνεπώς τα σημεία τα οποία βρίσκονται σε κοντινή απόσταση έχουν ένα συγκεκριμένο βαθμό χωρικής συσχέτισης, ενώ τα σημεία τα οποία βρίσκονται σε μεγαλύτερη απόσταση είναι στατιστικά ανεξάρτητα (Davis, 1986).

Μία από τις παραλλαγές των τεχνικών Kriging που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία είναι το Κανονικό Kriging (**Ordinary Kriging**): Το Κανονικό Kriging αναφέρεται στη χωρική εκτίμηση σύμφωνα με τις ακόλουθες προϋποθέσεις των Cressie (1993) και Wackernagel (2003) :

- Η μέση τιμή του πεδίου θεωρείται σταθερή στη γειτονιά του σημείου εκτίμησης αλλά η τιμή της μπορεί να μεταβάλλεται από γειτονιά σε γειτονιά, σε αυτή την περίπτωση θεωρείται ότι η μέση τιμή είναι άγνωστη.
- Η εκτιμώμενη συγκέντρωση στο σημείο εκτίμησης εκφράζεται ως ένα γραμμικός συνδυασμός των τιμών των γειτονικών σημείων. Οι γραμμικοί συντελεστές (παράμετροι) του κανονικού Kriging προσδιορίζονται από το βέλτιστο τύπο ημιβαριογράμματος χρησιμοποιώντας ένα κριτήριο βελτιστοποίησης με βάση την ελαχιστοποίηση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος.
- Η μέση τιμή των εκτιμήσεων είναι ίση με την μέση τιμή του τυχαίου πεδίου. Συνεπώς το κανονικό Kriging είναι ένας βέλτιστος γραμμικά αμερόληπτος τρόπος εκτίμησης.

Θεωρείται ότι οι εκτιμήσεις αποτελούν ένα γραμμικό, με βάρη συνδυασμό των παρατηρούμενων τιμών των περιφερियोποιημένων μεταβλητών, που παίρνει τη μορφή:

$$V(S_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i V(S_i)$$

Όπου :

$V(S_0)$ = Η εκτιμηθείσα τιμή στη Θέση s_0 .

$V(S_i)$ = Η παρατηρηθείσα τιμή στο σημείο s_i .

λ_i = Τα βάρη που αντιστοιχούν σε κάθε σημείο του δείγματος s_i , δηλαδή εξαρτώνται από τη θέση τους σε σχέση με την υπό εκτίμηση θέση s_0 .

Τα βάρη λ_i επιλέγονται έτσι ώστε η εκτίμηση $V(S_0)$ να τηρεί τον όρο της μη προκατάληψης ότι η εκτιμηθείσα διακύμανση είναι μικρότερη από κάθε άλλο γραμμικό συνδυασμό των παρατηρούμενων τιμών.

Λόγω της απαίτησης για μη προκατάληψη και επειδή η αναμενόμενη τιμή είναι γραμμικός τελεστής, ισχύουν:

$$E[V(S_0) - V(S_0)] = 0 \Rightarrow \mu_{s_0} - \sum_{i=1}^n \lambda_i \mu_{s_0} = 0$$

Επειδή η μέση τιμή είναι σταθερή, η απαίτηση για μη προκατάληψη σημαίνει ότι :

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$

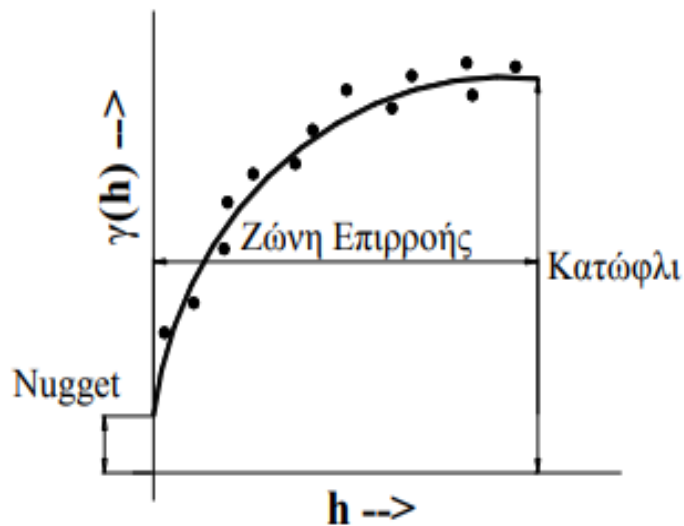
Το πρώτο βήμα στη συνήθη τεχνική Kriging είναι η κατασκευή του βαριογράμματος από το σύνολο των διεσπαρμένων σημείων που πρόκειται να υποστούν την παρεμβολή. Ένα βαριόγραμμα αποτελείται από δύο μέρη: το πειραματικό και το πρότυπο βαριόγραμμα.

Σε ένα πειραματικό βαριόγραμμα, στον οριζόντιο άξονα τοποθετούνται οι ευκλείδειες αποστάσεις μεταξύ ζευγών σημείων πειραματικών μετρήσεων στην ίδια γειτονιά (χωρικά βήματα). Στον κάθετο άξονα τοποθετείται η διασπορά διαφοράς των σημείων αυτών ή αλλιώς ημιδιακύμανση (semi variance) που δίνεται από τον τύπο:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N [z(x_i) - z(x_i + h)]^2$$

Όπου:

- N είναι ο αριθμός των σημείων δειγματοληψίας της μεταβλητής Z που απέχουν μεταξύ του απόσταση h , η οποία είναι γνωστή και ως χωρικό βήμα (lag distance).
- $\sum_{i=1}^N$ = το άθροισμα για όλα τα ζευγάρια των παρατηρούμενων σημείων που απέχουν μεταξύ τους.



Εικόνα (29) : Πειραματικό ημιβαριόγραμμα πρότυπο βαριόγραμμα (Δήμου 2010)

Παραπάνω παρουσιάζεται η εικόνα του πειραματικού βαριόγραμματος με ένα πρότυπο βαριόγραμμα που συσχετίζει με καλύτερο τρόπο τα δεδομένα.

4.8.5 Μεθοδολογία Cross Validation

Η μέθοδος Cross Validation είναι μια τεχνική η οποία μπορεί να εκτιμάει τις άγνωστες τιμές του μοντέλου. Η γενική ιδέα αυτής της μεθόδου είναι πως έχουμε n παρατηρήσεις και κάθε φορά αφήνει έξω μια παρατήρηση χρησιμοποιώντας τις υπόλοιπες $n-1$ παρατηρήσεις. Η διαδικασία της διασταυρωμένης επιβεβαίωσης χρησιμοποιείται σε μικρά σύνολα δεδομένων και συντελεί στην επιλογή του βέλτιστου θεωρητικού βαριογράμματος που προσαρμόζει καλύτερα τα δεδομένα. Η επιλογή του στατιστικού σφάλματος είναι σημαντική και απαιτείται διεξοδική διαδικασία αξιολόγησης.

Όπως είναι γνωστό ένας άλλος προσδιορισμός του σφάλματος είναι η μέθοδος Cross Validation. Σε αυτήν μια τιμή αφαιρείται από το δείγμα και η αναμενόμενη τιμή αφαιρείται από την πραγματική. Οι μετρήσεις που επιτρέπουν την άμεση σύγκριση της ικανότητας του μοντέλου να αναπαραγάγει παρατηρήσεις χρησιμοποιούνται στην ανάλυση αυτή, προκειμένου να αποτελέσουν ένα χρήσιμο σημείο αναφοράς για την ακρίβεια των μοντέλων. Οι προβλεπόμενες τιμές αρχικά συγκρίνονται με τα αντίστοιχα μετρούμενα με τη χρήση κλασσικών μέτρων παγκόσμιας απόδοσης που ποσοτικοποιούν το σφάλμα πρόβλεψης.

Τέλος προκειμένου να αξιολογηθούν τόσο τα χωρικά μοντέλα όσο οι μεθόδους εκτίμησης (Kriging) γίνεται σύγκριση των παρακάτω παραμέτρων μέτρησης σφάλματος:

- **Μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE):**

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |Pi - Oi|}{N}$$

Το μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE) είναι η ποσότητα φυσικού σφάλματος σε μια περίοδο μέτρησης.

- **Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE)**

Χρησιμοποιείται συχνά για να επισημάνει την διαφορά μεταξύ των τιμών που προβλέπονται από ένα μοντέλο και των τιμών που παρατηρούνται σε σχέση με τις πραγματικές τιμές των μετρήσεων.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Pi - Oi)^2}{N}}$$

- **Προκατάληψη (The Bias)**

Είναι η διαφορά μεταξύ των εκτιμώμενων και των πραγματικών τιμών σε ένα μόνο σημείο. Παίρνει θετική αρνητική ή μηδενική τιμή. Το σημάδι της μέσης προκατάληψης δείχνει εάν η συγκεκριμένη μέθοδος υποτιμάται ή υπερεκτιμά (θετική προκατάληψη) τα δεδομένα. Τα σφάλματα χαμηλής μεροληψίας σημαίνουν ακριβέστερες εκτιμήσεις. Είναι ένα συστηματικό (ενσωματωμένο) σφάλμα που οδηγεί σε απόκλιση στις εκτιμήσεις των παραμέτρων του πληθυσμού που οφείλονται σε ελαττωματικό σχεδιασμό ή/ και ανεπαρκή εκτέλεση της διαδικασίας δειγματοληψίας. Η προκατάληψη δεν είναι αποτέλεσμα του μεγέθους του δείγματος και συνεπώς η αύξηση του μεγέθους του δείγματος δεν θα μειώσει την μεροληψία στις εκτιμήσεις.

$$\text{Bias} = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)}{N}$$

Όπου:

O_i= τα παρατηρούμενα δεδομένα

P_i= προβλέψεις

N= ο αριθμός των μετρηθέντων ζευγών

Γενικά θέλοντας να έχουμε μια εικόνα για την ποσοτική μέτρηση του σφάλματος θα επιλέξουμε τις **MAE**, **RMSE** και **Bias**. Ως βέλτιστη τιμή έχουμε το 0. Το **RMSE** είναι συνήθως μεγαλύτερο από το **MAE** και όσο μεγαλύτερες είναι οι διαφορές μεταξύ των δύο αυτών τόσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των ακραίων τιμών στα δεδομένα. Βέβαια υπάρχουν επίσης ποσοτικοί δείκτες που μας βοηθούν να συμπεράνουμε αν ένα μοντέλο είναι ικανό να αναπαραγάγει τις παρατηρήσεις και να δικαιολογήσει την καλή προσαρμογή σε αυτό. Μια από αυτές είναι η απόδοση μοντέλου Nash Sutcliffe (**NSE**), η οποία παρατίθεται παρακάτω.

Απόδοση μοντέλου Nash Sutcliffe (NSE)

Ο συντελεστής αποδοτικότητας Nash-Sutcliffe (NSE) είναι ένας κανονικοποιημένος στατιστικός δείκτης που καθορίζει το μέτρο της ποιότητας του μοντέλου σε σχέση με την αντιπροσωπευτικότητα της διακύμανσης των δεδομένων (Nash and Sutcliffe, 1970). Η απόδοση του Nash-Sutcliffe μπορεί να κυμαίνεται από $-\infty$ έως το 1. Με 1 να είναι η βέλτιστη τιμή. Τιμές μεγαλύτερες του 0.65 θεωρούνται γενικά ως αποδεκτά επίπεδα απόδοσης, ενώ οι τιμές < 0.0 δείχνουν ότι η μέση τιμή των δεδομένων που παρατηρήθηκαν είναι ένας καλύτερος προγνωστικός δείκτης από τις προσομοιωμένες τιμές του μοντέλου, οι οποίες αποδεικνύουν πολύ κακή απόδοση. Ο τύπος του Nash-Sutcliffe (NSE) δίνεται παρακάτω:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}$$

Τροποποιημένος συντελεστής απόδοσης μοντέλου (E')

Ο τροποποιημένος συντελεστής απόδοσης μοντέλου (E') είναι ένα αδιάστατο μέτρο το οποίο κυμαίνεται από το $-\infty$ έως το 1 παίρνοντας ως καλύτερη τιμή το 1 και αξιολογεί το επίπεδο διακύμανσης που εξηγείται από το μοντέλο. Όσο αναφορά τις αρνητικές τιμές, ο παρατηρούμενος μέσος όρος είναι ένας καλύτερος προγνωστικός παράγοντας από το μοντέλο (Calzolari και Ungaro, 2012)

$$E' = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |O_i - P_i|}{\sum_{i=1}^N |O_i - \bar{O}|}$$

Τροποποιημένος δείκτης συμφωνίας (IoA)

Όσο αναφορά τον τροποποιημένο δείκτη συμφωνίας (IoA) ισχύει επίσης ότι είναι και αυτός ένα μέτρο χωρίς διάσταση. Ο συγκεκριμένος κυμαίνεται όμως, μεταξύ 0 και 1 με βέλτιστη τιμή στο 1 (Calzolari και Ungaro, 2012).

$$IoA' = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |O_i - P_i|}{\sum_{i=1}^N (|P_i - O| + |O_i - O|)}$$

Συντελεστής συσχέτισης του Pearson (R)

Ο συντελεστής συσχέτισης του Pearson είναι η συνδιακύμανση των δύο μεταβλητών που διαιρούνται με το προϊόν των τυπικών αποκλίσεων. Η μορφή του ορισμού περιλαμβάνει το μέσο όρο του προϊόντος των τυχαίων μεταβλητών προσαρμοσμένων κατά μέσον όρο. Ο συντελεστής αυτός υποδεικνύει τη δύναμη και την κατεύθυνση μιας γραμμικής σχέσης μεταξύ δύο μεταβλητών (για παράδειγμα την έξοδο μοντέλου και τις παρατηρούμενες τιμές). Ο συσχετισμός είναι (Tichy, 1993):

- +1 = στην περίπτωση μιας τέλεια αυξανόμενης γραμμικής σχέσης
- -1 = στην περίπτωση μιας φθίνουσας γραμμικής σχέσης και
- $-1 < r < +1$ = υποδεικνύουν το βαθμό της γραμμικής σχέσης μεταξύ των δεδομένων μοντέλου και παρατηρήσεων.
- < 0.70 = μια τέτοια τιμή δηλώνει μια σημαντική συσχέτιση.

Ο τύπος του συντελεστή συσχέτισης του Pearson είναι:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N [O_i - \bar{O}_i][P_i - \bar{P}_i]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N [O_i - \bar{O}_i]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N [P_i - \bar{P}_i]^2}}$$

71

Δείκτης αξιοπιστίας (RI)

Η αξιοπιστία θεωρητικά ορίζεται ως η πιθανότητα επιτυχίας ως συχνότητα αποτυχιών ή ως προς τη διαθεσιμότητα ορίζεται η πιθανότητα που προέρχεται από την αξιοπιστία, τη δυνατότητα δοκιμής και τη δυνατότητα συντήρησης. Η ευελιξία, η συντηρησιμότητα και η συντήρηση συχνά ορίζονται ως μέρος της *μηχανής αξιοπιστίας* στα προγράμματα αξιοπιστίας. Η αξιοπιστία διαδραματίζει καίριο ρόλο στη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας των συστημάτων. Γενικά ο δείκτης αξιοπιστίας (**RI**) ποσοτικοποιεί τον μέσο παράγοντα με τον οποίο οι προβλέψεις μοντέλου διαφέρουν από τις παρατηρήσεις. Βέλτιστη τιμή του **RI** θα πρέπει να είναι κοντά στον 1 (Leggett and Williams, 1981).

Ισχύει ότι:

$$\text{Reliability} = 1 - \text{Probability of Failure}$$

$$RI = \exp \sqrt{\int_{i=1}^N \frac{[\log(\frac{O_i}{P_i})]^2}{N}}$$

Συνάρτηση κόστους

Η συνάρτηση κόστους (χ^2) είναι ένα μέτρο της αναντιστοιχίας των δεδομένων μοντέλου, συνήθως με τη μορφή διαφοράς μεταξύ των δεδομένων μοντέλου και παρατήρησης, κλιμακούμενα με διακύμανση δεδομένων. Μετράει τη διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων του μοντέλου και των μετρήσεων παρατήρησης. Οι τιμές πρέπει να είναι μικρότερες του 1 έτσι ώστε το μοντέλο να έχει καλές πιθανότητες προγνωστικής ικανότητας (Hold et al., 2005).

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(Pi - Oi)^2}{N * \sigma^2}$$

4.9 Αποτελέσματα προσομοίωσης - σχολιασμός αποτελεσμάτων

Στη παρούσα εργασία η οποία μελετά την περιοχή της Τροιζήνας έγινε εφαρμογή του μοντέλου προσομοίωσης. Η εξίσωση ροής των υπόγειων υδάτων επιλύθηκε χρησιμοποιώντας αλγόριθμο Modflow υπό συνθήκες ροής μη σταθερής κατάστασης και για συνολικό χρόνο προσομοίωσης 1245 ημερών (από 1/4/2005 έως 1/9/2008). Όπου η περίοδος προσομοίωσης χωρίστηκε σε οκτώ (8) περιόδους. Τα υδραυλικά ύψη του Απριλίου 2005 (1/4/2005) θεωρήθηκαν ως αρχικές συνθήκες όπου οι τιμές φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα(6). Η βαθμονόμηση του μοντέλου έγινε με βάση δεκαέξι (16) σημεία παρατήρησης όπου οι τιμές νιτρικών στα υπόγεια ύδατα ήταν διαθέσιμες και φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα(8).. Ως εκ τούτου, η αξιολόγηση της αξιοπιστίας μοντέλου μεταφοράς μαζικής μεταφοράς επικεντρώνεται μόνο στην ακρίβεια της βαθμονόμησης.

Heads (m)	Observed head
F1	0.85
F2	1.20
F25	0.78
F26	1.01
F28	1.14
F47	1.98
G12	1.25
G131	2.87
G136	0.91
G3	1.08
G35	2.18
G5	3.26
G6	0.48
G8	0.32
F78	0.51

G41	5.10
-----	------

Πίνακας (7): αρχικών συνθηκών (Initial Heads)

73

Observation Point	Observed	Simulated MODFLOW	Observed	Simulated MODFLOW
	(4/2008)	(4/2008) Valid.	(9/2008)	(9/2008) Valid.
F1	0.71	0.86	0.09	0.64
F25	0.66	1.08	0.18	1.06
F26	0.98	1.38	0.69	1.36
F47	1.77	1.00	-0.58	-0.28
G131	0.19	-2.23	-2.00	-2.77
G136	0.45	-0.50	-2.32	-0.64
G3	0.83	0.55	-0.60	-0.08
F78	0.19	-0.69	-2.36	-0.89
G41	4.78	5.16	2.23	2.07

Πίνακας (8) : Παρατηρούμενη και προσομοιωμένη στάθμη υπογείων υδάτων (m) για περίοδο επικύρωσης

Observation point	Observed	Simulated MT3DMS
	(4/2008)	(4/2008) Valid.
F2	62.0	61
F21	62.0	61.1
F25	37.0	39.1
F26	24.8	21.8
F121	155.0	156
G5	24.0	25.4
G12	93.0	96
G16	62.0	63.12
G61	80.6	81.4
G131	93.0	90.5

Observation point	Observed	Simulated MT3DMS
G136	112.0	108.5

Πίνακας (9) : Παρατηρούμενες και προσομοιωμένες τιμές συγκέντρωσης νιτρικών (mg/l) για την περίοδο επικύρωσης

74

Όπως μπορούμε εύκολα να παρατηρήσουμε από τους παραπάνω Πίνακες οι παρατηρούμενες είναι πολύ κοντά στις προσομοιωμένες όσο αναφορά τα νιτρικά. Έτσι συμπεραίνουμε ότι υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των τιμών αυτών. Στην συνέχεια έγινε στατιστική ανάλυση για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας των δύο αλγορίθμων υπογείων υδάτων. Στον παρακάτω πίνακα (10) παρουσιάζονται τα σφάλματα του αριθμητικού μοντέλου όσον αφορά τη βαθμονόμηση για τα υδραυλικά ύψη στα σημεία παρατήρησης και αντίστοιχα για τη συγκέντρωση των νιτρικών οι επιδόσεις παρουσιάζονται στο πίνακα (11).

Groundwater level	
Statistical measures	MODFLOW
<i>MAE</i> (m – least possible)	0.72
<i>RMSE</i> (m – least possible)	0.88
<i>Bias</i> (m – least possible)	-0.24
<i>NSE</i> (>0.65 excellent, 1 optimal)	0.76
<i>E'</i> (1 optimal)	0.71
<i>IoA'</i> (1 optimal)	0.78
<i>R</i> (1 or -1 optimal)	0.88
<i>RI</i> (1 optimal)	1.09
χ^2 (less than 1, close to 0)	0.15

Πίνακας (10): Σφάλμα και έλεγχος καλής προσαρμογής προσομοιωμένου επιπέδου υπογείων υδάτων στα σημεία παρατήρησης

Nitrate mass concentration	
Statistical measures	MODFLOW-MT3DMS
<i>MAE</i> (mg/l – least possible)	0.85
<i>RMSE</i> (mg/l – least possible)	1.05
<i>Bias</i> (mg/l – least possible)	0.07
<i>NSE</i> (>0.65 excellent, 1 optimal)	0.96
<i>E'</i> (1 optimal)	0.97
<i>IoA'</i> (1 optimal)	0.94
<i>R</i> (1 or -1 optimal)	0.96
<i>RI</i> (1 optimal)	1.06
χ^2 (less than 1, close to 0)	0.025

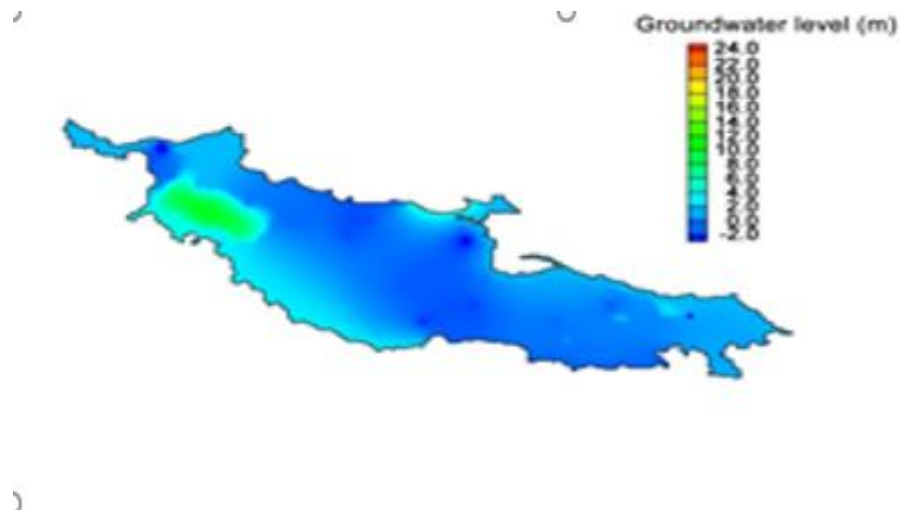
Πίνακας (11): Σφάλμα και έλεγχος καλής προσαρμογής προσομοιωμένου συγκέντρωσης νιτρικών σε σημεία παρατήρησης

Από τα νούμερα στους παραπάνω πίνακες και συγκεκριμένα από τον πίνακα που αφορά τα νιτρικά συμπεραίνουμε ότι το πρόγραμμα παρέχει εξαιρετικά αποτελέσματα βαθμονόμησης σχετικά με την προσομοίωση μεταφοράς νιτρικών μάζας. Οι δείκτες είναι όλοι πολύ κοντά στις βέλτιστες τιμές. Επίσης στα υδραυλικά ύψη (πίνακας 8) παρατηρείται εξίσου ικανοποιητική προσέγγιση αποτελεσμάτων έχοντας τις τιμές πολύ κοντά στα επιθυμητικά νούμερα.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ροής των υπόγειων υδάτων μπορούμε να πούμε ότι πετύχανε σημαντική ακρίβεια και αυτό γιατί οι δείκτες προσαρμογής είναι σε πολύ καλή συμφωνία με τις επιθυμητές τιμές. Επίσης τα μέτρα σφάλματος είναι αρκετά χαμηλά.

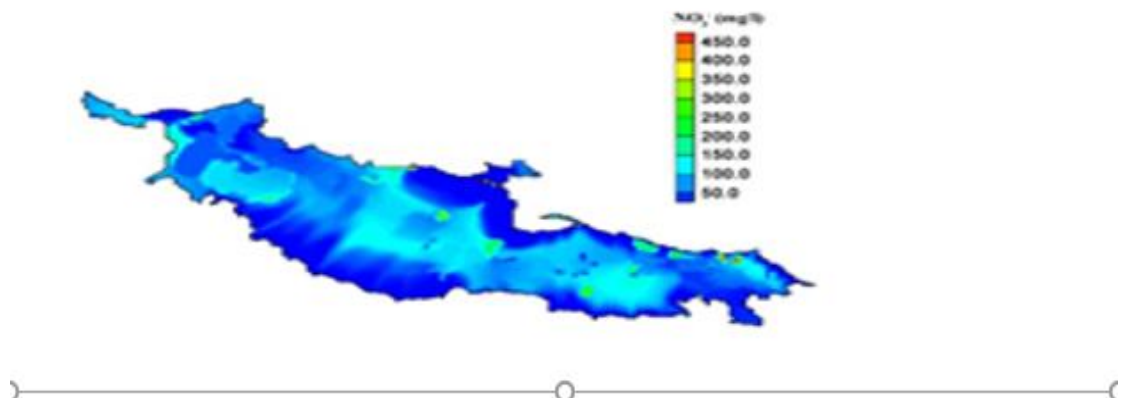
Η δυνατότητα εκτενής ανάλυσης , που σου δίνει η εφαρμογή πολλών μέτρων απόδοσης βοηθά τους διαμορφωτές να αποφασίζουν με βεβαιότητα το καλύτερο μοντέλο που εκτελείται.

Παρακάτω έχουμε τα αποτελέσματα της μοντελοποίηση σε χάρτες από το οποίο μπορούμε να βγάλουμε σημαντικά συμπεράσματα όσο αναφορά την συμπεριφορά των υπόγειων υδάτων καθώς και τις τιμές υδραυλικών υψών και συγκέντρωσης νιτρικών στην περιοχή μελέτης μας.



76

**Εικόνα (30): Στάθμη υπογείου ύδατος μετά την μοντελοποίηση
(Visual Modflow)**



**Εικόνα (31) : Συγκέντρωση νιτρικών μετά την μοντελοποίηση
(Visual Modflow)**

Από τις παραπάνω εικόνες που εξάγουμε συμπεραίνουμε ότι σε μερικά σημεία της περιοχής μας παρατηρούνται χαμηλές στάθμες στα υδραυλικά ύψη (Εικόνα 30) ενώ από την Εικόνα (31) παρατηρούμε ότι σε συγκεκριμένες περιοχές υπάρχει υψηλή συγκέντρωση νιτρικών

77

5. Συμπεράσματα – προτάσεις

Για τον υδροφόρο ορίζοντα της Τροιζήνας επιλέχθηκε το μοντέλο προσομοίωσης υπόγειων υδάτων και νιτρικών μεταφορών μάζας Modflow με πεπερασμένη διαφορά

Με την χρήση του μοντέλου προσομοίωσης Modflow είχαμε την δυνατότητα να συμπεράνουμε σημαντικά πράγματα. Κύριο συμπέρασμα είναι ότι οι προσομοιωμένες τιμές των υδραυλικών υψών και των συγκεντρώσεων μάζας νιτρικών συμπίπτουν αρκετά με τις παρατηρούμενες τιμές. Επιπροσθέτως η στατιστική απεικόνιση του αριθμητικού αλγορίθμου μας υπογραμμίζει ότι ο αλγόριθμος Modflow προσφέρει πολύ καλή πρόβλεψη υδραυλικών υψών. Όπως και για την συγκέντρωση νιτρικών η στατιστική ανάλυση έδειξε ότι οι προβλέψεις συμπίπτουν αρκετά με τις παρατηρούμενες τιμές. Έτσι υπογραμμίζεται η αξιοπιστία του προγράμματός προσομοίωσης. Αυτό μπορούμε να το συμπεράνουμε εύκολα από τους δείκτες οι οποίες είναι στο βέλτιστο επιθυμητό αριθμό. Η κατανομή της συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων ακολουθεί περίπου την διακύμανση της πιεζομετρικής στάθμης λόγω της αυξημένης γεωργικής δραστηριότητας που υπάρχει.

Στην περιοχή της λεκάνης της Τροιζήνας από τα στοιχεία των γενομένων μελετών προκύπτει ότι η ποσότητα του νερού που αντλείται και η ποσότητα νερού που χάνεται καθότι απορρέει στην θάλασσα, αθροιστικά, είναι μεγαλύτερη από την

συνολική ποσότητα νερού που εισρέει στην υπόψη λεκάνη. Αποτέλεσμα αυτού είναι η ποσοτική και ποιοτική υποβάθμιση των υπόγειων υδροφόρων της περιοχής, λόγω ελλειμματικού υδατικού ισοζυγίου. Αυτό άλλωστε φαίνεται καθαρά και από την Εικόνα (30) όπου διακρίνεται αισθητά υψηλή πτώση στα επίπεδα υπόγειων υδάτων σε συγκεκριμένα σημεία της περιοχής μελέτης μας.

Εντατικές καλλιέργειες υπάρχουν σε όλη την περιοχή της Τροιζηνίας σχεδόν, κυρίως στην παραλιακή ζώνη όπως φαίνεται και από την Εικόνα (31). Στην Ελλάδα και την ΕΕ από το νόμο τα όρια για τα νιτρικά άλατα (NO_3^-) στο πόσιμο νερό είναι 50 mg/L και για τα Νιτρώδη άλατα (NO_2^-) 0,5 mg/L σε συμμόρφωση προς την οδηγία 98/83/ΕΚ. Οι συναρμόδιες αρχές εξασφαλίζουν ότι ισχύει το εξής:

$$\frac{[\text{Νιτρικά}]}{50} + \frac{[\text{Νιτρώδη}]}{3} < 1$$

Όπου οι αγκύλες είναι η συγκέντρωση σε mg/l

Λύση στο εν' λόγω πρόβλημα μπορεί να αποτελέσει ο Τεχνητός εμπλουτισμός των υπόγειων υδροφορέων της περιοχής αυτής. Όπως προαναφέραμε ,στο κεφάλαιο 3 και συγκεκριμένα στην ενότητα 3.4, φυσικός εμπλουτισμός γίνεται από την κατείδυση του νερού των απορρεόντων χειμάρρων (Διαβολογέφυρου, Κουμουन्दούρου, Κρύφτης, Αγ. Κωνσταντίνου, Ψήφτας), κατά την διάρκεια που το νερό αυτό διασχίζει τμήμα της πεδιάδας μέχρι να καταλήξει στην θάλασσα. Στις περιπτώσεις όμως πλημμυρικών φαινομένων, μεγάλη ποσότητα νερού καταλήγει στην θάλασσα χωρίς να προλαβαίνει να κατεισδύει, και χάνεται ανεκμετάλλευτο.

Επομένως γίνεται απαραίτητος ο τεχνητός εμπλουτισμός στην περιοχή της Τροιζηνίας και αυτό γιατί υπάρχουν σημαντικά πλεονεκτήματα τα οποία είναι τα εξής:

1. Αντιμετωπίζεται η εξάντληση του υπόγειου υδροφορέα που προκαλείται από την εντατική εκμετάλλευση του.
2. Δημιουργούνται υπόγεια υδατικά αποθέματα κατά τις βροχερές περιόδους, που θα αξιοποιηθούν σε περιόδους λειψυδρίας.
3. Αντιμετωπίζεται το φαινόμενο της υφαλμύρωσης του υδροφόρου ορίζοντα της περιοχής.
4. Παρεμποδίζεται πιθανή καθίζηση των εδαφών, η οποία είναι δυνατόν να προκληθεί από την υπεράντληση των υπόγειων υδροφόρων.
5. Αποφυγή πλημμυρικών φαινομένων.
6. Αξιοποιούνται οι χειμερινές απορροές οι οποίες καταλήγουν στην θάλασσα καθώς δεν προλαβαίνουν να κατεισδύσουν.

Όσο αναφορά τις προτάσεις :

- Υπάρχει μεγάλο πρόβλημα από την υπερεκμετάλλευση των υπόγειων υδάτων. Γι' αυτό τον λόγο είναι σημαντικό να επιβληθεί ένα πρόγραμμα άρδευσης κατά το οποίο θα χάνεται όσο γίνεται μικρότερη ποσότητα νερού, είτε από εξάτμιση είτε από κακή ανθρώπινη διαχείριση. Όσο αναφορά την εξάτμιση, μπορεί να αποφευχθεί αυτό το πρόβλημα αν επιβληθεί πχ η άρδευση να γίνεται το βράδυ.
- Δημιουργία δύο δεξαμενών συγκέντρωσης νερού κοντά στις υδρευτικές γεωτρήσεις, οι οποίες θα συνδέονται με τα υδρευτικά δίκτυα που λειτουργούν αυτή την στιγμή προς ύδρευση όλων των Δημοτικών διαμερισμάτων της επαρχίας Τροιζηνίας και Μεθάνων, με ελεύθερη ροή λόγω της εξασφαλισμένης υψομετρικής διαφοράς. Για να υλοποιηθεί όμως αυτός ο τρόπος ύδρευσης προτείνουμε να δημιουργηθεί διαδημοτική Εταιρεία ύδρευσης της επαρχίας Τροιζηνίας και Μεθάνων με συγκεκριμένη ευέλικτη νομική μορφή. Το συνολικό κόστος για την γεωφυσική έρευνα στην οροσειρά των Αδέρων, την ανόρυξη των υδρευτικών γεωτρήσεων, την εκπόνηση των απαραίτητων περιβαλλοντικών μελετών, την κατασκευή δεξαμενών ύδρευσης και την σύνδεση με τα δίκτυα ύδρευσης, εκτιμάται προσεγγιστικά σε 2.000.000 €.
- Μία άλλη πρόταση που μπορούμε να δώσουμε είναι αυτή της αλλαγής του τρόπου άρδευσης. Καταρχάς μιλάμε για τις περιοχές του Πόρου και κυρίως για το Λεμονοδάσος, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (650στρ.) και στο αντίστοιχο Λεμονοπεριβόλου Τροιζηνίας (1200στρ.). Μια επιλογή είναι η άρδευση με σταγόνες για την αποφυγή της σπατάλης του νερού. Αυτό για να γίνει προϋποθέτει 2 βασικούς παράγοντες. Ο πρώτος είναι να ανακαινιστούν τα δίκτυα και ο δεύτερος να εκσυγχρονιστούν σε δίκτυα κλειστού τύπου που θα λειτουργούν υπό πίεση. Η προβλεπόμενη συνολική δαπάνη ανακαίνισης του έργου, εκτιμάται σε 300.000 €.



Εικόνα (32) : περιοχή Λεμονοδάσος Πόρου κοντά στην περιοχή μελέτης μας

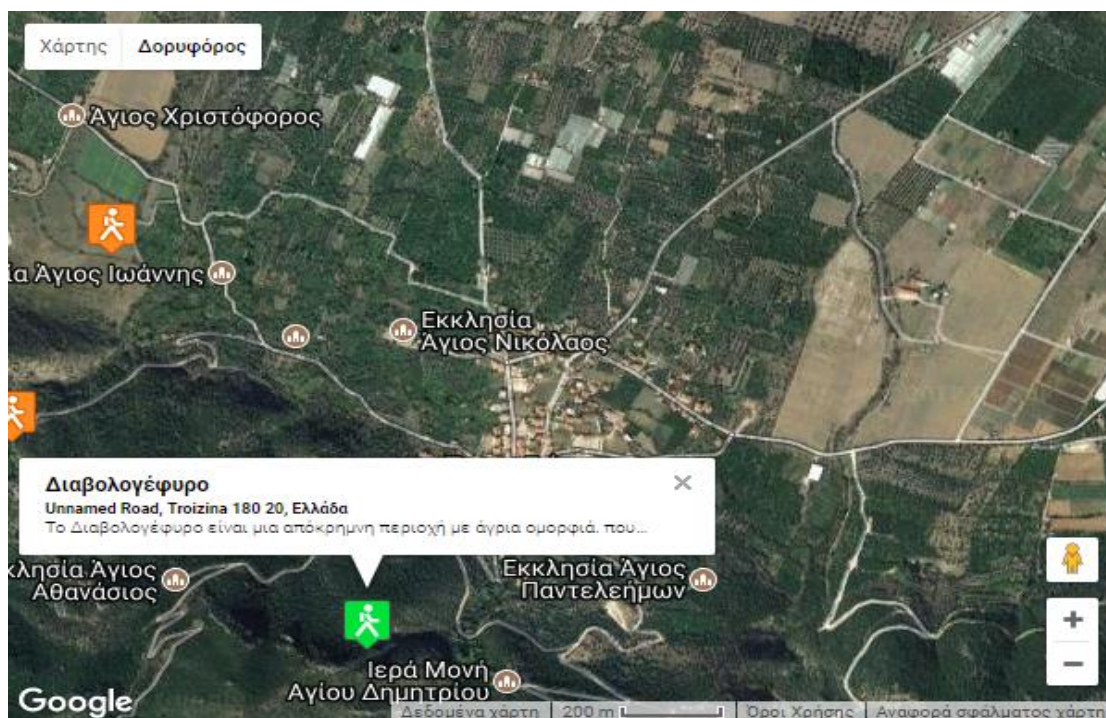
(<http://www.porosrooms.com/images/poros/ekdromes/mapgalatas.jpg>)

- Να πιστέψουν οι παραγωγοί ότι <προσέχουμε και προσπαθούμε για να έχουμε>. Αυτό προϋποθέτει να γίνει σωστή και σοβαρή ενημέρωση του προβλήματος, έτσι ώστε να ευαισθητοποιηθεί ο καθένας που έχει αγροτική καλλιέργεια στην περιοχή της Τροιζηνίας. Για την ενημέρωση των αγροτών πρέπει να ενεργηθεί σημαντικά και στοχευμένα ο Δήμος Τροιζήνας μέσω προγραμμάτων ή παρουσιάσεων για την σημασία του νερού γενικά και φυσικά για το σοβαρό πρόβλημα της περιοχής. Επιπλέον, πρέπει να είναι ενήμεροι σχετικά με την κείμενη νομοθεσία και τους εθνικούς και κοινοτικούς κανονισμούς, να κατανοούν τις οικονομικές διαστάσεις.
- Εμπλουτισμό των υπογείων υδροφόρων οριζόντων του Δήμου Τροιζήνας από τις απορροές του Διαβολογέφυρου κατά τους χειμερινούς μήνες. Διαβολογέφυρο είναι μια περιοχή λίγο πάνω από την Τροιζηνία. Έχει έντονη και πλούσια βλάστηση και υπάρχει ένα ποτάμι που κατεβαίνει από τα βουνά. Για το σκοπό αυτό θα χρησιμοποιηθούν οι υπάρχουσες δεξαμενές άρδευσης.

80



Εικόνα (33) : Ποτάμι Διαβολογέφυρου
(<http://www.poros.com.gr/diavologefiro/>)



Εικόνα (34) : Κάτοψη περιοχής Διαβολογέφυρου
(<https://troizinia.info> , Google Earth 2017)

- Μείωση τροφοδότησης των υδρευτικών αναγκών της Ύδρας από την περιοχή της Τροιζήνας. Έτσι θα εξοικονομηθεί αρκετή ποσότητα νερού για τις ανάγκες της υπάρχουσας περιοχής.
- Ακόμα μια λύση είναι η αναδάσωση της οροσειράς Αδέρεις η οποία θα κρατούσε τις βροχές στην περιοχή.
- Όσο αναφορά την νιτρική ρύπανση στην περιοχή της Τροιζηνίας υπάρχει ήδη η Οδηγία 91/676/ΕΟΚ για την προστασία των υδάτων από τη νιτρορύπανση γεωργικής προέλευσης. Η οποία εναρμονίστηκε στη εθνική νομοθεσία από την ΚΥΑ 16190/1335/97 (ΦΕΚ 519 Β/25-6-97): Μέτρα και όροι για την προστασία των νερών από τη νιτρορύπανση γεωργικής προέλευσης. Το πρόγραμμα αυτό λέει τα εξής: Περιλαμβάνει τις περιόδους κατά τις οποίες θα απαγορεύεται η διασπορά στο έδαφος ορισμένων τύπων λιπασμάτων, τη χωρητικότητα των δοχείων αποθήκευσης κοπριάς, τον περιορισμό της ποσότητας λιπάσματος που επιτρέπεται να διασπείρεται στο έδαφος. Τα μέτρα αυτά εξασφαλίζουν ότι, για κάθε γεωργική ή κτηνοτροφική μονάδα, η ποσότητα κόπρου που προστίθεται κάθε χρόνο στο έδαφος, είτε από ανθρώπους είτε από τα ίδια τα ζώα, δεν υπερβαίνει μια καθορισμένη ποσότητα ανά εκτάριο και θεσπίζουν κώδικες ορθής γεωργικής πρακτικής.
- Όπως αναφέραμε και στην ενότητα 3.5 η νιτρική ρύπανση των υπόγειων υδάτων είναι μια σοβαρή αιτία υποβάθμισης τους. Οπότε για να γίνει αποκατάσταση πρέπει να εφαρμοστούν οι εξής τεχνικές αντιμετώπισης:

1. Αρχικά για την πρόληψη-μείωση πρέπει να γίνεται έλεγχος χρήσης λιπασμάτων. Αφορά στον έλεγχο της χρήσης λιπασμάτων σε γεωργικές καλλιέργειες, έτσι ώστε να μην χρησιμοποιούνται μεγάλες ποσότητες θρεπτικών αλάτων αζώτου και φωσφόρου οι οποίες δεν μπορούν να απομοιωθούν από τα φυτά (εφαρμογή κώδικα ορθής γεωργικής πρακτικής στη χρήση λιπασμάτων).
2. Και έπειτα η σημαντική μείωση της εφαρμοζόμενης ποσότητας λιπασμάτων έτσι ώστε να πέσουν αισθητά οι τιμές των νιτρικών ιόντων στην περιοχή της Τροιζηνίας. Δηλαδή η φυσική απονίτρωση, σύμφωνα με τον Κώδικα Ορθής Γεωργικής Πρακτικής (Kariotis et al., 2001). Οι κώδικες ορθής γεωργικής πρακτικής (ΚΥΑ 16190/1335/97, ΦΕΚ 519Β/25-6-1997) αποβλέπουν στη μείωση της νιτρορύπανση γεωργικής προέλευσης και περιλαμβάνουν κανόνες σχετικά με τις χρονικές περιόδους κατά τις οποίες δεν ενδείκνυται η διασπορά λιπασμάτων στο έδαφος, τη διασπορά λιπασμάτων σε επικλινή ή σε κορεσμένα εδάφη, κοντά σε υδάτινα ρεύματα κ.λπ. Επιπλέον περιλαμβάνουν την κατάρτιση σχεδίων λίπανσης ανά αγρόκτημά, την τήρηση αρχείων για τη χρήση των λιπασμάτων και τη διαχείριση της χρήσης γης. Σύμφωνα με τους Λαμπράκη κ.ά (1998), Voudouris et al. (2004) ο χρόνος απορρύπανσης από νιτρορύπανση, μετά την πλήρη διακοπή της λίπανσης, σε ελεύθερους υδροφόρους ορίζοντες από διάφορες περιοχές της Πελοποννήσου ανέρχεται σε 16-60 χρόνια.
3. Ονομαστικά κάποιες άλλες τεχνικές είναι η **Ιοντοανταλλαγή** , η **Ηλεκτροδιάλυση** , η **Χημική απονίτρωση** με αργίλιο και η **Βιολογική απονίτρωση** με χρήση μικροοργανισμών.

6. Βιβλιογραφία

Ελληνική Βιβλιογραφία

Καρατζάς Γ. Διδακτικές σημειώσεις Ροή Υπογείων Υδάτων και Μεταφορά Ρύπων- Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος Πολυτεχνείο Κρήτης 2009.

Κουτσογιάννης Δ. (1997) *Στατιστική Υδρολογία*: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

Κουτσογιάννης Δ. και Ξανθόπουλος Α. (1998) *Τεχνική υδρολογία* , Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

Καλλέργης Γ. 1999, Εφαρμοσμένη Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία, Έκδοση Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας 2^η Έκδοση.

Καλλέργης Γ. Εφαρμοσμένη- Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία , 2^η Έκδοση, Τόμος 2^{ος}, 2000.

Παπανικολάου Δ. (1986). *Γεωλογία της Ελλάδας*. Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα

Παπαϊωάννου Α. : *Χημική Ανάλυση σε Εμφιαλωμένα Νερά*

Τσακίρης Γ., 1995, Υδατικοί πόροι: Τεχνική Υδρολογία, Εκδόσεις Συμμετρία

Ψαρροπουλου Ε. (2010) Μαθηματικό Μοντέλο Προσομοίωσης την νιτρικής ρύπανσης στον Προσχωματικό Υδροφόρο της Παραλιακής ζώνης Κορινθίας, Διδακτορική Διατριβή , Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος

Γιαννόπουλος Γ. (2011) : *Προσομοίωση της υπόγειας ροής στην προσχωματική λεκάνη Βιάννου Ηρακλείου Κρήτης και εξέταση σεναρίων μεταβολής υδροληπτικών και βροχομετρικών συνθηκών με χρήση του μοντέλου Visual Modflow*, Διπλωματική εργασία, Τμήμα μηχανικών Περιβάλλοντος

Γυφτουλας Α. (2014) : *Διερεύνηση των Υπογείων Ροών και Διάχυσης Ρύπων στο Φρεάτιο Υδροφορέα της Λεκάνης των Ψαχνών (Κεντρική Εύβοια) με Εφαρμογή του Μοντέλου Modflow.*, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Στουρνάρας Γ. Κ. : Υδάτινοι Πόροι, Υπόγεια νερά και περιβάλλον

Δερματάς Δ, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ. : *Ρύπανση του εδάφους και των Υπόγειων Υδροφορέων*, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος

Σκρούτσος Ε. Γεωλογική Χαρτογράφηση και Ασκήσεις υπαίθρου, Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα

Αγγλική Βιβλιογραφία

Visual Modflow help manual, Waterloo Hydrogeologic

Fetter C.W, 1998, Contaminant Hydrology (2nd Edition), Prentice Hall

Varouchakis E., 2015, Integrated Water Resources Analysis at Basin Scale: A Case Study in Greece, American Society of Civil Engineers,
DOI:10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000966

Hildebrand B. F., Finite- Difference Equations and Simulations, Section 2.2, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1968

Murray S. Klamkin (1987), Mathematical Modelling

Wikipedia (2017)

Almasri M.N. and Kaluarachchi J.J. (2007) *Modeling nitrate contamination of groundwater in agricultural watersheds*, Journal of Hydrology, 343, pp. 211-229.

Bear J., (1972) *Dynamics of fluids in porous media*, American Elsevier p.c.

Matiatos L., Varouchakis E. A. and Papadopoulou M.P.: *Statistical sensitivity analysis of multiple groundwater mass transport models*

Davis J.C., 1998, Statistics and data analysis in geology.

Freeze R. A., Cherry J. A. (1979), “Groundwater”, Prentice Hall, NJ, USA

84

7. Διαδικτυακή βιβλιογραφία

- <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.532.2506&rep=rep1&type=pdf>
- <https://www.hydrol-earth-syst-sci-discuss.net/10/C3817/2013/hessd-10-C3817-2013-supplement.pdf>
- <http://ebooks.edu.gr/modules/ebook/show.php/DSGL-C117/130/944,3458/>
- http://new.ims.forth.gr/water/sites/new.ims.forth.gr.water/files/papers/Ypogeia_nera_kai_perivallon.pdf

- http://www.bankofgreece.gr/BoGDocuments/EMEKA_Stamatis_21_3_2012.pdf
- www.agiosathanasios.org
- http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg887e/PDF/XYTA_1.pdf
- https://eclass.duth.gr/modules/document/file.php/OPE02163/%CE%A5%CE%A6%CE%A0_%CE%9A%CE%B5%CF%86.%206%CE%BF_Y%CF%80%CF%8C%CE%B3.%CE%BD%CE%B5%CF%81%CF%8E%CE%BD.pdf
- <http://www.mie.uth.gr>
- <https://www.waterloohydrogeologic.com/visual-modflow-flex-tutorials>
- <http://users.auth.gr/vmarios/courses/GeoStat.pdf>
- https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/2527/1/Nikolakopoulos_Chapter_10.pdf
- <https://www.analyticsvidhya.com/blog/2015/11/improve-model-performance-cross-validation-in-python-r/>
- <http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0174202>
- https://en.wikipedia.org/wiki/Nash%E2%80%93Sutcliffe_model_efficiency_coefficient
- <https://www.adv-geosci.net/5/89/2005/adgeo-5-89-2005.pdf>
- https://en.wikipedia.org/wiki/Pearson_correlation_coefficient
- <http://mymethana.gr/?q=node/2335>
- https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%95%CF%80%CE%B1%CF%81%CF%87%CE%AF%CE%B1_%CE%A4%CF%81%CE%BF%CE%B9%CE%B6%CE%B7%CE%BD%CE%AF%CE%B1%CF%82
- http://eclass.uth.gr/eclass/modules/document/file.php/MHXC151/Diafaneies%20paradoxeon/Diafaneies_Porodes_Peratotita.pdf
- <http://www.wwf.gr/sustainable-economy/clean-energy/climate-change>
- <http://www.poros.com.gr/diavologefiro/>
- [file:///D:/Acer/Downloads/EL_0005_0206_SPE_EL_O%20\(1\).pdf](file:///D:/Acer/Downloads/EL_0005_0206_SPE_EL_O%20(1).pdf)
- http://www.kee.gr/perivallontiki/teacher4_5.html
- <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:31991L0676:EL:HTML>

- <http://www.ypeka.gr/LinkClick.aspx?fileticket=6gJKlQHLbaU%3D&tabid=250&language=el-GR>
- <http://www.koutouzis.gr/xartis.htm>

