



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
Τομέας Περιβαλλοντικής Υδραυλικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής (ΠΙ)
Εργαστήριο Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής

SCHOOL of ENVIRONMENTAL ENGINEERING
Division III: Environmental Hydraulics and Geoenvironmental Engineering –
Geoenvironmental Engineering Laboratory

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ
ΝΙΤΡΙΚΩΝ ΣΤΟΝ ΠΑΡΑΚΤΙΟ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΟΥ ΠΛΑΤΥ
ΠΟΤΑΜΟΥ ΣΤΟ ΝΟΜΟ ΡΕΘΥΜΝΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Θανάσης Δ. Δημητριάδης

Εξεταστική Επιτροπή
Καρατζάς Γεώργιος, Καθηγητής (επιβλέπων)
Παρανυχιανάκης Νικόλαος, Επίκουρος Καθηγητής
Δόκου Ζωή, Δρ.

Χανιά
Οκτώβριος 2013

αφιερώνεται στους γονείς μου,
Δημήτρη και Σοφία

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Δρ. Γεώργιο Π. Καρατζά, Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης για την πολύτιμη καθοδήγησή του και τη σημαντική συμβολή του στην εκπόνηση της διπλωματικής αυτής εργασίας.

Ακόμη, ευχαριστώ πολύ τον Δρ. Εμμανουήλ Βαρουχάκη και την Δρ. Ζωή Δόκου για τις πολύτιμες πληροφορίες που μου προσέφεραν.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος κ. Παρανυχιανάκη για τη συμμετοχή του στην Εξεταστική Επιτροπή.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον φίλο Παναγιώτη Κανέλλο για τη βοήθεια του στη μορφοποίηση της εργασίας αυτής και για τις παρατηρήσεις του και τον συμφοιτητή και φίλο Δημήτρη Ξυλά για τη αμέριστη συμπαράστασή του.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ένας από τους πολυτιμότερους θησαυρούς του πλανήτη είναι τα αποθέματα γλυκού νερού που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, αποθηκευμένα στους πόρους υπεδάφινων σχηματισμών. Καθώς το νερό είναι η βασικότερη προϋπόθεση για την ύπαρξη ζωής, τα υπόγεια νερά επηρεάζουν καθοριστικά τα οικοσυστήματα και τις δραστηριότητες του ανθρώπου σε όλα τα μήκη και τα πλάτη της γης. Η υπερβολική ζήτηση νερού κυρίως για την άρδευση και την ύδρευση έχουν οδηγήσει στην υπερεκμετάλλευση των υπόγειων υδατικών συστημάτων και την υποβάθμιση της ποιότητάς τους.

Οι συνέπειες που προκαλεί η μη βέλτιστη διαχείριση των υδατικών πόρων είναι τεχνικές και κοινωνικοοικονομικές. Κύριες συνέπειες είναι η μείωση της απόδοσης των υδροληπτικών έργων, η διεύδυση της θάλασσας σε παράκτιους υδροφορείς, η προβληματική ύδρευση και άρδευση λόγω ανεπάρκειας κάλυψης των απαιτήσεων.

Ο Πλατύς ποταμός της περιοχής της Αγίας Γαλήνης στο νομό Ρεθύμνου αποτελεί την κύρια πηγή για την κάλυψη των αναγκών σε νερό της περιοχής. Η κύρια πηγή νερού για την άρδευση των καλλιεργειών ελαιώνων είναι τα υπόγεια ύδατα, μέσω των υφιστάμενων γεωτρήσεων.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη του υπόγειου υδροφόρου συστήματος του Πλατύ ποταμού. Συγκεκριμένα γίνεται προσομοίωση της υπόγειας ροής και εξετάζονται σενάρια ρύπανσης του υδροφορέα για να προταθούν λύσεις για την ορθολογική του διαχείριση.

Η προσομοίωση της υπόγειας ροής και μεταφοράς μάζας στην περιοχή γίνεται με τη βοήθεια του μοντέλου PTC (PRINCETON TRANSPORT CODE). Το PTC είναι τρισδιάστατο μοντέλο προσομοίωσης της υπόγειας ροής με δυνατότητα συνδυασμού πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών, χρησιμοποιεί έναν ειδικό αλγόριθμο (splitting algorithm) που επιτρέπει τη διακριτοποίηση της υπό μελέτη περιοχής σε παράλληλα οριζόντια στρώματα. Το περιβάλλον του μοντέλου ARGUS ONE έχει δυνατότητα εισαγωγής ψηφιοποιημένων χαρτών και δημιουργίας δικτύων πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών.

Με βάση τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της υπόγειας ροής προέκυψε ότι κατά την χειμερινή περίοδο λόγω του χαμηλού ρυθμού εκμετάλλευσης του υπόγειου υδροφορέα η στάθμη του ανυψώνεται αρκετά μέτρα πάνω από την επιφάνεια της

θάλασσας. Το γεγονός αυτό συντελεί στην διατήρηση των εκάστοτε υπόγειων υδάτινων αποθεμάτων κάθε χρόνο, αποκλείοντας παράλληλα την υφαλμύριση του υπόγειου υδροφορέα σε μεγάλο βαθμό, προστατεύοντας έτσι την ποιότητα των υπογείων νερών.

Στην περιοχή της Αγίας Γαλήνης η ζώνη ρύπανσης των νιτρικών δεν απλώνεται σημαντικά, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της μεταφοράς μάζας. Παρόλα αυτά μια μεγάλη συγκέντρωση λόγω και των ιδιαίτερων υδρογεωλογικών χαρακτηριστικών της περιοχής θα μπορούσε να προκαλέσει σημαντικά προβλήματα σε μεγάλη έκταση στο μέλλον, αν δεν τηρηθούν οι οδηγίες σχετικά με τη χρήση της βέλτιστης ποσότητας λιπασμάτων ανά καλλιέργεια.

ABSTRACT

One of the most valuable resources of the planet is the deposit of fresh water located beneath the ground surface, stored in subsurface formations. As water is the most important prerequisite for life, groundwater decisively affects ecosystems and human activities across the world. Excessive demand of water, mainly for irrigation and drinking uses, has led to the overexploitation of groundwater systems and to the deterioration of their quality.

The effects caused by suboptimal water management are technical and socioeconomic. Among its many effects are: the reduction of efficiency, the destruction of water exploitation projects, the increase in the cost of new construction projects, the seawater intrusion phenomenon, water and irrigation problems due to insufficient water quantities and quality deterioration.

Platys River, located in the prefecture of Rethymno is the main source of water of the Agia Galini region. The main source of water for irrigation purposes is groundwater. The pumping wells installed in the area are used mainly for the irrigation of olive trees.

The purpose of this work is to study the groundwater system at the Platys River basin. Specifically, the goal is the simulation of groundwater flow and mass transport of nitrate pollution in the area. Different scenarios are examined, in order to draw conclusions about the behavior of the aquifer and to propose solutions for rational management of water resources.

The flow and transport simulation is performed using the model PTC (PRINCETON TRANSPORT CODE). PTC is a three dimensional, finite element simulation model that uses a special algorithm (splitting algorithm) that allows the discretization of the study area in parallel horizontal layers. The environment of the model ARGUS ONE is capable of importing digitized maps and creating networks of finite elements and finite differences.

Based on the results of the simulation of groundwater flow, it is observed that during the winter the water level rises several meters above the sea level, mainly due to the low rates of aquifer exploitation. This helps to maintain the current groundwater deposits, while averting the saltwater intrusion and protecting the quality of groundwater reserves.

In the Agia Galini region, the pollution zone of nitrates is not significantly expanding, according to the mass transport simulation results. However, an increased concentration could potentially cause significant problems to a great extent in the future due to the unique hydrogeological characteristics of the area, if the recommended quantities of fertilizers to ensure sustainable development, are not taken into consideration.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	iv
ABSTRACT.....	vi
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΥΠΟΓΕΙΑ ΎΔΑΤΑ.....	1
1.1 Υπόγεια νερά και υδροφορείς.....	1
1.2 Βασικές αρχές αξιοποίησης υδατικών πόρων.....	3
1.3 Πηγές ρύπανσης.....	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΙΝΗΣΗΣ ΝΕΡΟΥ	6
2.1 Εισαγωγή	6
2.2 Ταξινόμηση μοντέλων υπόγειου νερού	8
2.3 Μεθοδολογία εφαρμογής των μοντέλων	10
2.4 Παράμετροι υπόγειων υδροφορέων.....	13
2.5. Το μαθηματικό πρόβλημα των υπόγειων νερών.....	15
2.5.1. Νόμος του Darcy.....	15
2.5.2. Εξίσωση συνέχειας	16
2.5.3 Αρχικές και οριακές συνθήκες.....	18
2.6 Μαθηματικά μοντέλα σε συνάρτηση με λογισμικό H/Y	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗΣ	21
3.1 Εισαγωγή	21
3.2 Μηχανισμός δημιουργίας υφαλμύρισης	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΡΥΠΑΝΣΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ ΜΕ ΝΙΤΡΙΚΑ.....	24
4.1 Εισαγωγή	24
4.2 Ο κύκλος του αζώτου.....	32
4.3 Νιτρικά (NO_3^-) και Νιτρώδη ιόντα (NO_2^-) στο φυσικό περιβάλλον.....	34
4.4 Πηγές και Επιδράσεις του αζώτου.....	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΟΙ ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ PTC (Princeton Transport Code) ΚΑΙ ΤΟΥ ARGUS ONE	37
5.1 Εισαγωγή	37
5.2 Η λύση του αλγορίθμου PTC.....	37
5.3 Οριακές και αρχικές συνθήκες για την υπόγεια ροή	39
5.4 Παράμετροι.....	39
5.5 Μεταφορά στο υπόγειο νερό	40
5.5.1 Οριακές και αρχικές συνθήκες του μοντέλου	40
5.6 Μοντελοποίηση της ροής στον υπόγειο υδροφορέα	41
5.6.1 Περιγραφή του μοντέλου “Argus ONE”	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	43
6.1 Ανάγλυφο και Γεωλογία	43
6.2 Κλίμα και Υδατικοί Πόροι.....	44

6.2.1 Επιφανειακά νερά	46
6.2.2 Υπόγεια νερά	47
6.3 Γεωργική κατάσταση	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 - ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ	
ΝΙΤΡΙΚΩΝ ΣΤΟΝ ΥΠΟΓΕΙΟ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ	48
7.1 Μοντελοποίηση της ροής του υπόγειου υδροφορέα.....	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	
8.1 Ανακεφαλαίωση και επιμέρους συμπεράσματα	64
8.2 Προτάσεις - Μέτρα	66
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	67

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΥΠΟΓΕΙΑ ΎΔΑΤΑ

1.1 Υπόγεια νερά και υδροφορείς

Το νερό που υπάρχει στη φύση και που χρησιμοποιείται από τον άνθρωπο για διάφορες χρήσεις, για ύδρευση πόλεων και χωριών, για άρδευση καλλιεργούμενων εδαφών και για τη βιομηχανία, βρίσκεται σε δύο μορφές: σαν επιφανειακό και σαν υπόγειο νερό. Επιφανειακό είναι το νερό των λιμνών και των ποταμών, ενώ υπόγειο νερό είναι αυτό που κινείται και αποθηκεύεται μέσα στο έδαφος και ειδικότερα στους πόρους των εδαφών που για το λόγο αυτό λέγονται και υδροφορείς (Καραγιάννης, 2003).

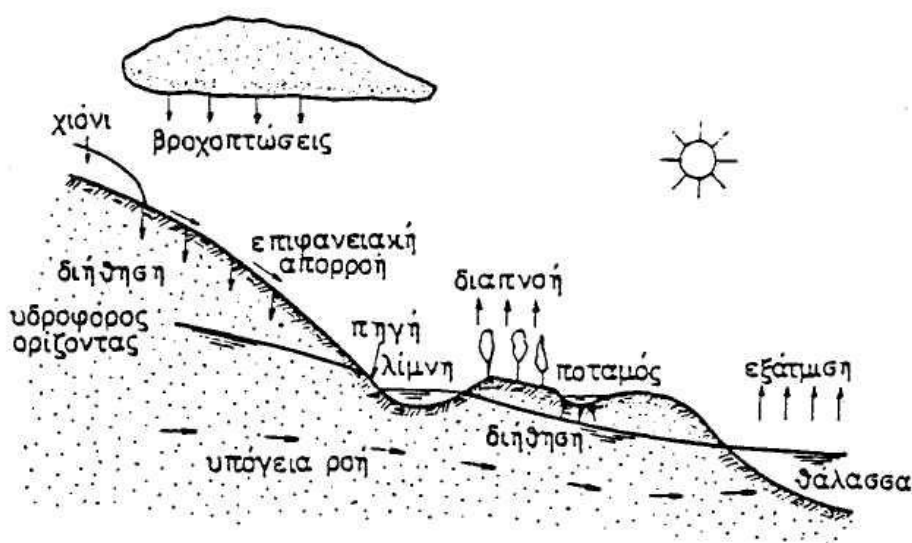
Το νερό είναι ένα από τα μεγαλύτερα αγαθά που προσφέρει η φύση και είναι απαραίτητο στοιχείο ζωής στον άνθρωπο, τα ζώα και τα φυτά. Από μια πρώτη εκτίμηση, η συνολική ποσότητα νερού ίση με $1.370 \times 10^{15} \text{ m}^3$ που υπάρχει στη γη φαίνεται ότι είναι υπεραρκετή και ουσιαστικά ανεξάντλητη. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη τη δυνατότητα εκμετάλλευσης των υδατικών αυτών πόρων, η εικόνα γίνεται τελείως διαφορετική. Αυτό συμβαίνει γιατί το 97,3% της συνολικής αυτής ποσότητας είναι αλμυρό νερό, δηλαδή ακατάλληλο να χρησιμοποιηθεί για οικιακή, βιομηχανική και αγροτική χρήση (Αραμπατζή, 2008).

Επίσης, το 2,1% αφορά χιόνια και πάγους, και αφαιρώντας ένα πολύ μικρό ποσοστό νερού που υπάρχει με μορφή υδρατμών στην ατμόσφαιρα, καταλήγει κανείς σε ένα τελικό ποσό $8,2 \times 10^{15} \text{ m}^3$, περίπου 0,6% του συνόλου, που αποτελεί τον εκμεταλλεύσιμο πόρο σε υγρή κατάσταση. Από το νερό αυτό, το 98% είναι υπόγειο νερό. Δυστυχώς, σχεδόν η μισή ποσότητα από το υπόγειο αυτό νερό είναι αποθηκευμένη σε πολύ μεγάλα βάθη από την επιφάνεια της γης ($>800\text{m}$), όπου η ποσότητα των περιεχόμενων αλάτων είναι πολύ μεγάλη και από όπου η άντλησή του είναι υπερβολικά δαπανηρή. Γίνεται λοιπόν φανερό, από τα παραπάνω ότι το διαθέσιμο για εκμετάλλευση νερό είναι πράγματι ένα πολύτιμο αγαθό, ιδιαίτερα εξαιτίας της άνισης κατανομής του τόσο χωρικά, σε διάφορες δηλαδή περιοχές της γης, όσο και χρονικά, εννοώντας βέβαια τις εποχικές διακυμάνσεις (Λατινόπουλος, 2006).

Στα παραπάνω έρχεται να προστεθεί ότι στην Ελλάδα παρουσιάζεται σημαντική μείωση των βροχοπτώσεων με την πάροδο των ετών. Οι παλιές μέθοδοι ανάκτησης νερού από ποτάμια και λίμνες φυσικές ή τεχνητές αποτυγχάνουν να λύσουν το πρόβλημα. Ιδιαίτερα πλήττονται κάποια από τα Ελληνικά νησιά, των οποίων οι κάτοικοι εφοδιάζονται με νερό χαμηλής ποιότητας που μεταφέρεται με δεξαμενόπλοια (Καρρά, 2011).

Οι Κυκλάδες, για παράδειγμα, χρειάζονται δώδεκα εκατομμύρια κυβικά μέτρα πόσιμου νερού τη μέρα, την ώρα που η ποσότητα αυτή καλύπτεται μέχρι σήμερα στο 60 με 65%. Κατά την καλοκαιρινή περίοδο οι ανάγκες για νερό αυξάνονται εξαιτίας του τουρισμού. Μέχρι το 2030 η ζήτηση θα έχει διπλασιαστεί. Από όλα τα παραπάνω, συμπεραίνεται ότι η έλλειψη νερού αναγνωρίζεται ως παρούσα απειλή στην ανθρώπινη δραστηριότητα και κατά συνέπεια επιβάλλεται επιτακτικά η ορθή διαχείριση των υδατικών πόρων και ιδιαίτερα των υπόγειων νερών που ποσοτικά υπερτερούν έναντι των επιφανειακών (Καρρά, 2011).

Τα υπόγεια νερά αποτελούν τμήμα μιας τεράστιας ποσότητας νερού σε διάφορες καταστάσεις, η οποία, όμως, δεν παραμένει στάσιμη, αλλά βρίσκεται σε μια διαρκή μετατροπή και κυκλοφορία περιοδικού χαρακτήρα, γνωστή σαν υδρολογικός κύκλος (Λατινόπουλος, 2006). Βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια της γης και μπορούν να συλλεχθούν μέσω φρεάτων, σπηράγγων ή αποστραγγιστικών αγωγών ή ρέουν φυσικά προς την επιφάνεια μέσω πηγών (Νάνου-Γιάνναρου, 2006). Η ροή των υπόγειων νερών γίνεται μέσα στους υδροφορείς ή υδροφόρα στρώματα. Ο υδρολογικός κύκλος απεικονίζεται σχηματικά στην εικόνα 1.1:



Εικόνα 1.1: Ο υδρολογικός κύκλος (Λατινόπουλος, 2006)

Τα υπόγεια νερά είναι μέρος του υδρολογικού κύκλου. Βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια της γης και μπορούν να συλλεχθούν μέσω φρεάτων, σπηράγγων ή αποστραγγιστικών αγωγών ή ρέουν φυσικά προς την επιφάνεια μέσω πηγών (Νάνου-Γιάνναρου, 2006). Η ροή των υπόγειων νερών γίνεται μέσω των υδροφορέων. Πρόκειται για γεωλογικούς σχηματισμούς που περιέχουν νερό και επιτρέπουν την κίνηση σημαντικών ποσοτήτων νερού (Λατινόπουλος, 1986).

Συνήθως η ροή του νερού στους υδροφορείς αναφέρεται σαν ροή σε πορώδη μέσα, όπως εξετάζεται και στη συγκεκριμένη εργασία. Σε αυτά, το εδαφικό σώμα διακρίνεται στον εδαφικό σκελετό που αποτελείται από στερεά ύλη και διάκενα ή πόρους μέσα από τα οποία πραγματοποιείται η ροή.

Ανάλογα με την ύπαρξη ή όχι ελεύθερης επιφάνειας οι υδροφορείς ταξινομούνται σε υπό πίεση ή περιορισμένους υδροφορείς και σε φρεάτιους ή μη περιορισμένους υδροφορείς αντίστοιχα. Η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας για τους φρεάτιους και της πιεζομετρικής για τους περιορισμένους υδροφορείς καθορίζει το υδραυλικό φορτίο, το οποίο ισούται με το άθροισμα του φορτίου πίεσης h_p και το υψόμετρο z :

$$h = h_p + z = p/\gamma + z \quad (1.1)$$

Στους φρεάτιους υδροφορείς το h καθορίζει τη θέση της ελεύθερης επιφάνειας ενώ στους περιορισμένους υδροφορείς προσδιορίζει την πίεση του νερού σε κάθε σημείο του υδροφορέα και ονομάζεται πιεζομετρικό φορτίο ϕ (Σωτηροπούλου, 2010).

1.2 Βασικές αρχές αξιοποίησης υδατικών πόρων

Η εκμετάλλευση των υδατικών πόρων δεν μπορεί παρά να στηρίζεται σε προχωρημένη γνώση των ποιοτικών και ποσοτικών χωροχρονικών μεταβολών τους. Τέσσερις βασικοί παράγοντες παίζουν καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση της εκμεταλλεύσιμης ποσότητας νερού σε ένα υδραυλικό σύστημα.

- A. Η μέση ετήσια επιφανειακή και υπόγεια απορροή, καθώς και η μέση ετήσια αναπλήρωση του υπόγειου νερού.
- B. Η τεχνοοικονομική δυνατότητα άντλησης του υπόγειου νερού.
- C. Η ποιότητα του νερού, υπόγειου ή επιφανειακού, στην υδρολογική λεκάνη και κοντά σε αυτήν.
- D. Η νομοθεσία για το νερό, υπόγειο ή επιφανειακό, μέσα στην υδρολογική λεκάνη.

Το βασικό κριτήριο για την αξιοποίηση των επιφανειακών ή υπογείων νερών, καθορίζεται κάθε φορά σε συνάρτηση με τις ειδικές συνθήκες που επικρατούν σε κάθε υδρολογική λεκάνη (Καλλέργης, 2001).

Συγκρίνοντας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα από τη χρήση των υπόγειων και επιφανειακών υδάτων διαπιστώνεται ότι :

1. Η άντληση νερού από πηγάδια απαιτεί σχετικά μικρό κόστος κατασκευής και εγκαταστάσεων (γεωτρήσεις, αντλητικά συστήματα) ενώ έχει σημαντικό κόστος λειτουργίας, ιδιαίτερα όταν η άντληση γίνεται από βαθιά υδροφόρα στρώματα. Από την άλλη πλευρά η χρήση επιφανειακών νερών, που αποθηκεύονται σε ταμιευτήρες, μπορεί να έχει ασήμαντα έξοδα λειτουργίας όμως το αρχικό επενδυτικό κεφάλαιο (υδραυλικές κατασκευές, αγωγοί μεταφοράς, φράγματα) είναι τόσο μεγάλο, ώστε αν αναχθεί σε ετήσια βάση είναι πολύ πιθανό να δώσει ένα ευνοϊκό για τα υπόγεια νερά οικονομικό ισοζύγιο.

2. Ο σχεδιασμός της διαχείρισης των υπόγειων υδατικών πόρων, εξαιτίας των πολύ μικρών ταχυτήτων κίνησης των υπόγειων νερών - σε αντίθεση με τα επιφανειακά νερά θα απαιτούσε μακροχρόνια δειγματοληψία, που συνήθως δεν είναι πρακτικά εφικτή. Όμως εξαιτίας αυτής της αργής κίνησης του νερού αλλά και της πολύ μεγάλης αποθηκευτικής ικανότητας των υδροφορέων ένα περιορισμένης χρονικής κλίμακας δείγμα δεδομένων είναι δυνατό να δώσει μια σαφή εικόνα των αθροιστικών επιπτώσεων από μακροχρόνιες μεταβολές. Αντίθετα, μετρήσεις επιφανειακών νερών, όπου οι μεταβολές είναι πολύ πιο συχνές και απότομες – συνήθως ακολουθούν τον εποχιακό κύκλο- δεν είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν με αξιοπιστία παρά μόνο αν καλύπτουν ένα πολυετές διάστημα δειγματοληψιών.

Συνολικά η άποψη που επικρατεί δεν είναι ότι οι υπόγειοι υδατικοί πόροι πλεονεκτούν απόλυτα απέναντι στους επιφανειακούς, αλλά ότι αν σε μια περιοχή συνυπάρχουν τότε η βέλτιστη λύση θα προέλθει από έναν ορθολογικό συνδυασμό και των δυο (Καρτεράκης, 2005).

1.3 Πηγές ρύπανσης

Οι πηγές ρύπανσης περιλαμβάνουν εκροές από αγροτικές και αστικές περιοχές, χημικά εκχυλίσματα και εκχυλίσματα από χώρους ταφής απορριμμάτων. Οι υπόγειοι υδροφόροι ορίζοντες μολύνονται επίσης από μικροβιακό φορτίο όπως ιοί και βακτήρια. Οι τύποι αυτών των παθογόνων μικροοργανισμών βρίσκονται σε αστικά και κτηνοτροφικά λύματα (Αινατζή και Πατεράκη, 2010). Στον πίνακα 1.1 προσδιορίζονται οι πηγές και οι τύποι ρύπανσης υπόγειων νερών.

Πίνακας 1.1: Πηγές και είδη ρύπανσης υπογείων υδάτων

Πηγή	Ρύπος
Χώροι ταφής απορριμμάτων (ακατάλληλα διαμορφωμένοι ή κακοσυντηρημένοι), απροστάτευτοι χώροι διάθεσης επικίνδυνων αποβλήτων, παλιά λατομεία	Χημικές ουσίες διαλυτές στο νερό οι οποίες περιέχονται στα απορρίμματα (μέταλλα, άλατα και οργανικά στοιχεία)
Σύστημα επεξεργασίας λυμάτων (ακατάλληλα διαμορφωμένα ή κακοσυντηρημένα)	Μικροοργανισμοί και παθογόνα
Φάρμες, περιοχές με γρασίδι όπως γήπεδα γκολφ	Λιπάσματα (θρεπτικά συστατικά) και μικροβιοκτόνα
Φάρμες ζώων (κυρίως μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις)	Θρεπτικά συστατικά και μικροοργανισμοί που εκχυλίζονται από απορρίμματα
Επιφανειακοί αγωγοί	Έλαια, επικίνδυνες χημικές ουσίες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΙΝΗΣΗΣ ΝΕΡΟΥ

2.1 Εισαγωγή

Η ανάγκη για καλύτερη κατανόηση των μηχανισμών ροής του υπόγειου νερού σε συνδυασμό με την ευρεία χρήση των υπολογιστών τα τελευταία χρόνια, οδήγησαν στην ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων για καλύτερη δυνατότητα προσομοίωσης της ροής του υπόγειου νερού. Μερικοί από τους βασικούς στόχους που επιδιώκονται μέσω της σύνθεσης ενός μοντέλου υπόγειας ροής είναι:

- Προσομοίωση των μηχανισμών που ελέγχουν τη λειτουργία και εξέλιξη ενός υδροφόρου συστήματος.
- Σχεδιασμός και μελέτη εναλλακτικών σεναρίων και δράσεων διαχείρισης του υπόγειου νερού.
- Σχεδιασμός έργων και εφαρμογή ενδεδειγμένων μέτρων μετά την επιλογή του καταλληλότερου σεναρίου για τη βελτιστοποίηση της χρήσης των υδάτινων πόρων. Η προσομοίωση της κίνησης του υπόγειου νερού ενός ή περισσότερων υδροφόρων συστημάτων με τη χρήση μαθηματικών μοντέλων, απαιτεί την όσο το δυνατό καλύτερη κατανόηση των μηχανισμών λειτουργίας του υπό εξέταση υδροφόρου συστήματος. Για να επιτευχθεί αυτό είναι απαραίτητη η συλλογή δεδομένων και μετρήσεων υπαίθρου όσον αφορά στα γεωλογικά, υδρογεωλογικά, υδρολογικά, κλιματολογικά, τοπογραφικά στοιχεία της περιοχής έρευνας. Η αξιολόγηση όλων των δεδομένων και πληροφοριών οδηγεί στη σύνθεση του εννοιολογικού μοντέλου. Το εννοιολογικό μοντέλο αποτελεί δηλαδή μια αναπαράσταση του φυσικού υδρογεωλογικού συστήματος (Τσελέπη, 2009).

Τα κύρια χαρακτηριστικά που λαμβάνονται υπόψη κατά τη σύνταξη του εννοιολογικού μοντέλου είναι η γεωμετρία των υδροφόρων στρωμάτων, τα υδραυλικά χαρακτηριστικά τους (περατότητα, μεταβιβασιμότητα) και οι ζώνες τροφοδοσίας (υπόγειες πλευρικές εισροές, διηθήσεις, κατείσδυση, επιστροφές αρδεύσεων) και εκφόρτισης. Στόχος του εννοιολογικού μοντέλου είναι η περιγραφή των βασικών μηχανισμών υδροδυναμικής λειτουργίας και εξέλιξης του υπό μελέτη υδροφόρου συστήματος και η τεκμηρίωση του τρόπου ή των τρόπων μαθηματικοποίησης των μηχανισμών αυτών στο μαθηματικό ομοίωμα. Κατά τη

σύνταξη του εννοιολογικού μοντέλου είναι απαραίτητο να γίνονται κάποιες παραδοχές όσον αφορά στα γεωλογικά κυρίως χαρακτηριστικά του. Εύλογο είναι ότι η προσπάθεια μετασχηματισμού του φυσικού συστήματος στο μαθηματικό μοντέλο εμπεριέχει τη σαφή αναγνώριση και καταγραφή των παραδοχών που γίνονται και των περιορισμών στην ισχύ του μοντέλου που αυτές συνεπάγονται (Γιαννέλης, 2009).

Η θεωρία της κίνησης του νερού στα πορώδη μέσα βασίζεται στον νόμο του Darcy που διατυπώθηκε το 1856 ύστερα από σχετικά πειράματα. Η ροή του υπόγειου νερού σε υδροφόρους σχηματισμούς περιγράφεται από διαφορικές εξισώσεις, οι οποίες βασίζονται στην αρχή διατήρησης της μάζας και ποικίλουν ανάλογα με το είδος του υδροφορέα και τις συνθήκες ροής.

Με τον όρο μοντέλο εννοούμε μια απλοποιημένη διατύπωση ενός πραγματικού συστήματος που προσομοιώνει την συμπεριφορά του σε διάφορες φυσικές ή ανθρωπογενείς μεταβολές και πιέσεις ή «τάσεις». Σύμφωνα με τα πρότυπα ASTM (D5880-95) μοντέλο θεωρείται ένα σύνολο υποθέσεων και παραδοχών σε μορφή μαθηματικών εξισώσεων οι οποίες περιγράφουν κάποιο φυσικό σύστημα.

Μαθηματικό μοντέλο κατά την ευρεία έννοια είναι μια σχέση ή εξίσωση η οποία εκφράζει τα βασικά χαρακτηρίστηκα ενός φυσικού συστήματος με μαθηματική μορφή. Σε γενικές γραμμές περιγράφεται από μια συναρτησιακή σχέση της μορφής : Εξαρτημένη μεταβλητή = f (ανεξάρτητες μεταβλητές, παράμετροι, συναρτήσεις ελέγχου).

Εξαρτημένες είναι οι μεταβλητές που περιγράφουν την κατάσταση του συστήματος (π.χ. υδραυλικό φορτίο), οι ανεξάρτητες μεταβλητές είναι συνήθως οι διαστάσεις του χώρου και του χρόνου, ενώ οι συναρτήσεις ελέγχου περιγράφουν εξωτερικές επιδράσεις και τάσεις (stresses). Στην περίπτωση των υπόγειων νερών, το μαθηματικό μοντέλο αποτελείται από μαθηματικές εξισώσεις οι οποίες περιγράφουν την λειτουργία του φυσικού συστήματος δηλαδή του υδροφόρου σχηματισμού κάνοντας διάφορες παραδοχές κατά την επίλυση του (<http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/>).

2.2 Ταξινόμηση μοντέλων υπόγειου νερού

Έχουν αναπτυχθεί διάφορα είδη προσομοιωμάτων-μοντέλων:

1. Τα παραμετρικά ομοιώματα είναι στατικά περιγράφοντας την παρούσα κατάσταση ενός συστήματος (Βουδούρης, 2004).
 2. Τα δυναμικά ομοιώματα δίνουν τη δυνατότητα πρόβλεψης στο μέλλον και περιλαμβάνουν μοντέλα που ανάλογα με την μεθοδολογία δόμησής τους διακρίνονται σε φυσικά, αναλογικά και μαθηματικά.
- **Φυσικά μοντέλα:** Αποτελούν πιστά αντίγραφα των φυσικών συστημάτων ροής κατασκευασμένα υπό κλίμακα, που μελετώνται σε εργαστηριακό περιβάλλον. Με αυτά γίνεται απευθείας προσομοίωση π.χ της υπόγειας ροής στο εργαστήριο. Οι πρακτικές τους εφαρμογές είναι δύσκολες εξαιτίας της πολυπλοκότητας που παρουσιάζουν τα αντίστοιχα φυσικά συστήματα.
 - **Αναλογικά μοντέλα:** Χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις που δεν είναι εύκολη η αναλυτική επεξεργασία του φαινομένου και είναι φυσικά συστήματα που υπακούουν σε μερικές διαφορικές εξισώσεις με οριακές συνθήκες όμοιες με το πρωτότυπο. Πρόκειται στην ουσία για εργαστηριακές προσομοιώσεις των υδροφορέων με πιο γνωστά τα ηλεκτρικά ομοιώματα, τα ανάλογα άμμου, τη συσκευή Hele-Shaw, τα ανάλογα μεμβράνης, τα ομοιώματα Moire, τα θερμικά ομοιώματα, τα υβριδικά ομοιώματα, τα ηλεκτρικά ομοιώματα κ.λπ. Οι τεχνικές των μοντέλων αυτών έχασαν τη δημοτικότητα τους, εξ αιτίας της ικανοποιητικής προσαρμοστικότητας, της μεγάλης διάθεσης και των πολύ μεγάλων δυνατοτήτων εφαρμογής των αριθμητικών μοντέλων. Παρουσιάζουν όμως ένα πλεονέκτημα σε σχέση με τα τελευταία, δηλαδή δεν απαιτούν διακριτικότητα στον χρόνο, που αποτελεί παράγοντα πιθανής δημιουργίας λαθών.
 - **Μαθηματικά μοντέλα:** Είναι αυτά που χρησιμοποιούνται κυρίως στην υδρογεωλογία. Διακρίνονται σε μοντέλα επεξεργασίας δεδομένων, καθορισμού παραμέτρων, ροής και μεταφοράς και μοντέλα διαχείρισης. Τα μαθηματικά μοντέλα έχουν ως κύριο στόχο την προσομοίωση της κίνησης του υπόγειου νερού χρησιμοποιώντας διαφορικές εξισώσεις. Βασίζονται κυρίως στην επίλυση βασικών εξισώσεων που περιγράφουν την κίνηση του υπόγειου νερού όπως είναι οι εξισώσεις του Darcy, Boussinesq, Laplace, Bernoulli, εξίσωση της συνέχειας, της ροής υπογείων υδάτων και θερμότητας. Τα

μαθηματικά μοντέλα είναι κατάλληλα για προβλήματα υδροφόρων σχηματισμών με ακανόνιστα γεωμετρικά όρια, ανισοτροπία, καθώς και χωρικά μεταβαλλόμενες παραμέτρους, ρυθμό άντλησης και τροφοδοσίας (Τάντος, 2006).

Με τα μαθηματικά μοντέλα γίνεται δυνατή η παρουσίαση μιας τεράστιας ποσότητας πληροφοριών με έναν εκπληκτικά απλό και συνεκτικό τρόπο. Όμως το σημείο εκκίνησης είναι η σαφής και πλήρης κατανόηση των διαδικασιών που καλείται να περιγράψει το μοντέλο.

Στην περίπτωση της ροής του υπόγειου νερού θα πρέπει να θεωρούνται ως βασικές οι εξής δυο διαδικασίες:

1. Η ροή του υπόγειου νερού λόγω των υδραυλικών βαθμίδων
2. Η αφαίρεση (άντληση) ή προσθήκη νερού (εμπλουτισμός)

Στην περίπτωση όμως των μοντέλων της μεταφοράς της ρύπανσης παρεμβαίνει ένα μεγάλο πλήθος, διαφορετικών μεταξύ τους, διαδικασιών, οι οποίες μπορούν να καταταγούν σε δυο ομάδες:

1. Στις διαδικασίες μεταφοράς με μοριακή διάχυση, μηχανική διασπορά και ρεύματα μεταφοράς,
2. Στις διαδικασίες που ευθύνονται για την παραγωγή ή εξασθένηση του ρυπαντή όπως είναι οι χημικές, βιολογικές, ακόμα και πυρηνικές διαδικασίες (ρόφηση, ιοντοανταλλαγή, οξειδοαναγωγή, ραδιενεργός θάνατος και βιοδιάσπαση).

Για την πλήρη περιγραφή του υδροφόρου συστήματος που θα παρουσιαστεί στο μοντέλο απαιτούνται πέρα από τις εξισώσεις που ελέγχουν τις διαδικασίες και τα παρακάτω:

- Ειδικές αριθμητικές τιμές των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν τις διαδικασίες καθώς και των παραμέτρων προσομοίωσης που εμπλέκονται στη διαδικασία επίλυσης των εξισώσεων,
- Πληροφορίες για την περιοχή, το σχήμα και τις συνθήκες κατά μήκος των συνόρων του υδροφορέα.

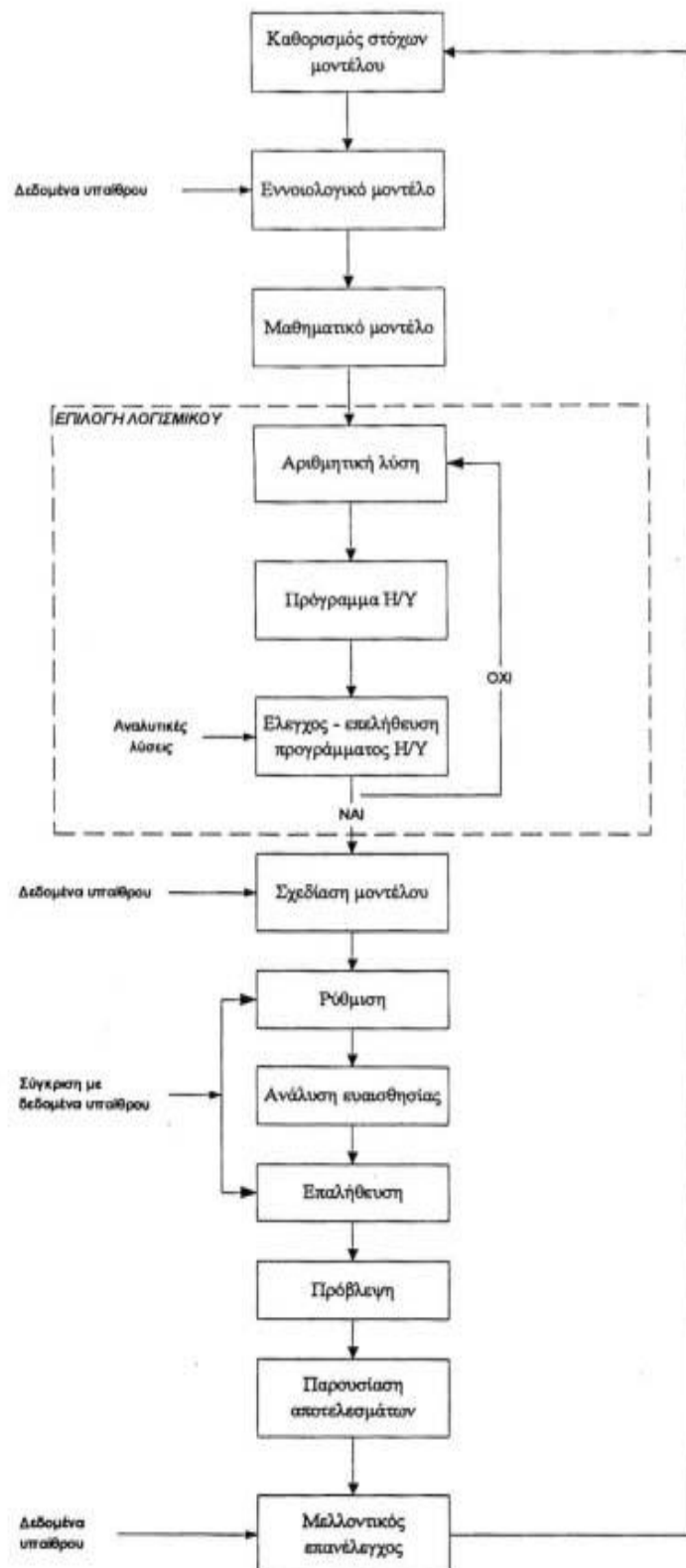
Η επίλυση των εξισώσεων του μοντέλου που θα προκύψει μετά τα πιο πάνω, γίνεται αναλυτικά ή αριθμητικά, ανάλογα με την πολυπλοκότητα των υδρογεωλογικών συνθηκών και τον αριθμό των διαδικασιών που συμμετέχουν στο μοντέλο.

Δυστυχώς πολύ μικρός αριθμός προβλημάτων ροής ή μεταφοράς μπορεί να επιλυθεί με αξιόπιστο τρόπο με τα μαθηματικά μοντέλα. Πρόκειται για τα μοντέλα που περιγράφουν τη ροή του υπόγειου νερού ή τη μεταφορά ενός μοναδικού μη αντιδρώντα με το νερό ρυπαντή σε κορεσμένο πορώδες μέσο (U.S.N.R.C. 1990). Η αβεβαιότητα αυτή ως προς την αξιοπιστία με την οποία τα μαθηματικά μοντέλα αποδίδουν τις υδρογεωλογικές διαδικασίες, οδήγησε σε πειραματικές έρευνες μακράς διάρκειας ώστε να βελτιωθεί η κατανόηση των πιο πάνω διαδικασιών (U.S.N.R.C. 1990).

Το μεγαλύτερο πρόβλημα στη σύνταξη των μαθηματικών μοντέλων είναι η ετερογένεια στην κλίμακα του πεδίου (μακροετερογένεια), με αποτέλεσμα τα στοιχεία εισόδου να προέρχονται από εκτιμήσεις που συχνά απέχουν σημαντικά από την πραγματικότητα. Την ίδια αξιοπιστία παρουσιάζει και η προέκταση των πορισμάτων της εργαστηριακής έρευνας (μικροετερογένεια) στη φυσική κλίμακα. Ένα δεύτερο μεγάλο πρόβλημα παρουσιάζει η ροή σε μέσα με διπλό πορώδες. Είναι δύσκολη έως αδύνατη η πρόγνωση για δοσμένη θέση, εκτός αν υπάρχει εκτεταμένη πληροφόρηση για το είδος και τη φύση του δικτύου ρωγμάτωσης (Καλλέργης, 2001).

2.3 Μεθοδολογία εφαρμογής των μοντέλων

Για την εφαρμογή των μαθηματικών μοντέλων στα υπόγεια νερά έχουν θεσπιστεί κάποια πρότυπα και κανόνες από της αρχές της προηγούμενης δεκαετίας από το National Research Council (1990). Η μεθοδολογία εφαρμογής μαθηματικών μοντέλων υπογείου νερού παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.1:



Εικόνα 2.1: Μεθοδολογία εφαρμογής μαθηματικών μοντέλων υπογείου νερού, (Τσελέπη, 2009)

Με βάση τα παραπάνω μια ολοκληρωμένη εφαρμογή ενός μοντέλου υπόγειας ροής πρέπει να ακολουθεί τα παρακάτω στάδια:

- **Καθορισμός των αντικειμενικών στόχων του μοντέλου:** Οι στόχοι αυτοί καθορίζουν και τις αντίστοιχες εξισώσεις που επιλέγονται καθώς και το λογισμικό.
- **Ανάπτυξη του εννοιολογικού μοντέλου (conceptual model) του συστήματος:**
Στη φάση αυτή ορίζονται οι υδροστρωματογραφικές ενότητες αναγνωρίζονται τα όρια του συστήματος, συγκεντρώνονται τα δεδομένα υπαίθρου, δεδομένα που αφορούν (υδραυλικές) παραμέτρους και εκτιμώνται ποσοτικά οι διάφορες συνιστώσες του υδατικού ισοζυγίου.
- **Επιλογή της αντίστοιχης εξίσωσης και του κατάλληλου λογισμικού:** Το λογισμικό είναι ένα πρόγραμμα H/Y το οποίο περιέχει αλγόριθμους που επιλύουν το μαθηματικό μοντέλο αριθμητικά. Η εξίσωση καθώς και το λογισμικό πρέπει πρώτα να επαληθευτούν. Η επαλήθευση της εξίσωσης αποδεικνύει ότι αυτή περιγράφει επαρκώς τους φυσικούς μηχανισμούς που λαμβάνουν χώρα στο πορώδες μέσο. Η επαλήθευση του λογισμικού επιτυγχάνεται συγκρίνοντας την αριθμητική του λύση με την αντίστοιχη αναλυτική, αν υπάρχει, για να αποδειχθεί έτσι ότι αυτό επιλύει ορθά τις σχετικές εξισώσεις που συνιστούν το μαθηματικό μοντέλο.
- **Σχεδιασμός - κατασκευή του μοντέλου:** Περιλαμβάνει τη διακριτοποίηση του χώρου και του χρόνου, τον καθορισμό αρχικών και οριακών συνθηκών, καθώς και αρχική επιλογή υδραυλικών παραμέτρων και τάσεων (stresses).
- **Ρύθμιση (Calibration):** Στόχος της ρύθμισης είναι να καταδείξει ότι το μοντέλο μπορεί να αναπαράγει τις πραγματικές ροές (fluxes) και τις μεταβλητές κατάστασης (state variables). Κατά τη διαδικασία της ρύθμισης, αναζητάται ένα σύνολο παραμέτρων και τάσεων που προσεγγίζουν καλύτερα τα πραγματικά υδραυλικά φορτία και τις διάφορες ροές. Η ρύθμιση γίνεται είτε με την κλασική μέθοδο της δοκιμής και σφάλματος (trial and error) είτε με τη χρήση πολυπλοκότερων μαθηματικών μεθόδων αυτόματης ρύθμισης (inverse modeling).

- **Ανάλυση ευαισθησίας (sensitivity analysis):** Το μοντέλο υπόκειται σε αβεβαιότητα που αποδίδεται στον μη ακριβή καθορισμό της χωρικής κατανομής των παραμέτρων του στην περιοχή ενδιαφέροντος. Αβεβαιότητα εισάγεται επίσης και στον καθορισμό των τάσεων και των οριακών συνθηκών. Η ανάλυση ευαισθησίας αποσκοπεί στον έλεγχο της σημασίας της αβεβαιότητας στη ρύθμιση του μοντέλου.
- **Επαλήθευση του μοντέλου (validation ή verification):** Στόχος της επαλήθευσης είναι η απόδοση μεγαλύτερης εμπιστοσύνης στο μοντέλο χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους ρύθμισής του για να παραχθεί έτσι ένα δεύτερο σύνολο αποτελεσμάτων.
- **Πρόβλεψη (prediction):** Αποδίδει ποσοτικά τη συμπεριφορά του συστήματος σε μελλοντικά σενάρια. Το μοντέλο εκτελείται διατηρώντας σταθερές τις παραμέτρους ρύθμισης και μεταβάλλοντας τις πιέσεις εκείνες που εκτιμάται ότι πρόκειται να αλλάξουν στο μέλλον.
- **Επανελέγχος του μοντέλου (postaudit):** Διεξάγεται μετά από αρκετό χρονικό διάστημα από τη ρύθμιση του μοντέλου. Νέα δεδομένα υπαίθρου συλλέγονται για να ελεγχθεί εάν οι προβλέψεις ήταν σωστές. Εάν αυτές ήταν σωστές τότε το μοντέλο αυτό επαληθεύεται για τη συγκεκριμένη περιοχή ενδιαφέροντος (Τάντος, 2006).

2.4 Παράμετροι υπόγειων υδροφορέων

- **Υδραυλική Αγωγιμότητα K (LT^{-1})**

Εκφράζει την ευκολία ή τη δυσκολία με την οποία ένα ρευστό ρέει μέσα στους πόρους του πορώδους μέσου. Αποτελεί τη σταθερά του νόμου του Darcy, έχει διαστάσεις ταχύτητας και εξαρτάται από τις ιδιότητες του ρευστού και του πορώδους μέσου (Νάνου-Γιάνναρου, 2006).

- **Μεταβιβασιμότητα (L^2T^{-1})**

Εκφράζεται ως το γινόμενο του πάχους B ενός ομογενούς και ισότροπου περιορισμένου υδροφορέα επί την υδραυλική αγωγιμότητα K και συμβολίζεται ως ακολούθως:

$$T=K \cdot B \quad (2.1)$$

Η έννοια της μεταβιβασιμότητας έχει νόημα, μόνο για δισδιάστατη ή οριζόντια ροή, συνήθως χρησιμοποιείται για τους υπό πίεση υδροφορείς και μπορεί να επεκταθεί και σε στρώματα μη ομογενή ή μεταβλητού πάχους B .

- **Ομογένεια και ισοτροπία υδροφορέων**

Οι έννοιες της ομογένειας και της ισοτροπίας αναφέρονται κυρίως στην ιδιότητα της φυσικής διαπερατότητας. Ένα πορώδες μέσο θεωρείται ομογενές εάν η διαπερατότητα είναι ίδια σε όλα τα σημεία του. Αλλιώς, το πορώδες μέσο ονομάζεται ανομογενές. Εάν η διαπερατότητα σε ένα συγκεκριμένο σημείο του χώρου είναι ανεξάρτητη από την ασκούμενη διεύθυνση, τότε το πορώδες μέσο καλείται ισότροπο στο συγκεκριμένο σημείο. Αλλιώς, ονομάζεται ανισότροπο. Κατ' αναλογία η έννοια της ισοτροπίας για δισδιάστατα πεδία ροής επεκτείνεται στις ιδιότητες της υδραυλικής αγωγιμότητας και της μεταβιβασιμότητας (Νάνου-Γιάνναρου, 2006)

- **Αποθηκευτικότητα (L^{-1})**

Ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο ένας υδροφορέας προσλαμβάνει ή αποδίδει νερό, διακρίνονται τα εξής δύο είδη:

1. Αποθηκευτικότητα περιορισμένου υδροφορέα ή ελαστική αποθηκευτικότητα.

Αυτή διακρίνεται σε:

- i. Ειδική αποθηκευτικότητα S_0 : Αποτελεί αδιάστατο μέγεθος και εκφράζει τον όγκο του νερού V_T που απελευθερώνεται (ή προσλαμβάνεται) ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα και ανά μονάδα πτώσης (ή αύξησης) του πιεζομετρικού φορτίου $\Delta\phi$.

$$S_0 = \frac{\Delta V_T}{V_T \bullet \Delta\phi} \quad (2.2)$$

- ii. Αποθηκευτικότητα υδροφορέα S_c : ισούται με τον όγκο νερού που απελευθερώνεται (ή προσλαμβάνεται) ανά μονάδα οριζόντιας επιφάνειας A του υδροφορέα και ανά μονάδα πτώσης (ή αύξησης) του πιεζομετρικού φορτίου $\Delta\phi$.

$$S_S = \frac{\Delta V_T}{A \bullet \Delta\phi} \quad (2.3)$$

Είναι μικρότερη από την φρεάτια αποθηκευτικότητα και χρησιμοποιείται στη δισδιάστατη ροή. Αποτελεί αδιάστατο μέγεθος.

2. Αποθηκευτικότητα φρεάτιου υδροφορέα ή φρεάτια αποθηκευτικότητα
Αποτελεί αδιάστατο μέγεθος.

Ορίζεται ως ο όγκος του νερού V_w που απελευθερώνεται (ή προσλαμβάνεται) ανά μονάδα οριζόντιας επιφάνειας του υδροφορέα A και ανά μονάδα πτώσης (ή αύξησης) της στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας Δh και ορίζεται ως (Νάνου-Γιάνναρου, 2006)

$$S = \frac{\Delta V_w}{A \bullet \Delta h} \quad (2.4)$$

2.5. Το μαθηματικό πρόβλημα των υπόγειων νερών

Σ' αυτή την ενότητα, αναλύεται εκτενώς το μαθηματικό μοντέλο, εξετάζοντας τις εξισώσεις και τις αρχικές οριακές συνθήκες που συνθέτουν το πρόβλημα των υπόγειων νερών.

2.5.1. Νόμος του Darcy

Σύμφωνα με τον Darcy, η κίνηση του υπόγειου νερού πραγματοποιείται από θέσεις υψηλότερων προς θέσεις χαμηλότερων ενεργειακών σταθμών. Η ενεργειακή στάθμη στο υπόγειο νερό εξαρτάται από τη θέση και την πίεση, γιατί η κινητική ενέργεια είναι πρακτικά ασήμαντη λόγω του μικρού μεγέθους ταχυτήτων. Η κίνηση του νερού χάνει ενέργεια λόγω των τριβών στα τοιχώματα του στερεού εδαφικού σκελετού. Η απώλειά της ανά μονάδα μήκους έχει βρεθεί πειραματικά ότι είναι ανάλογη της ταχύτητας του υπόγειου νερού για στρωτή ροή (Νάνου-Γιάνναρου, 2006)

Ο νόμος του Darcy μπορεί να διατυπωθεί με την εξής μορφή:

$$q = \frac{Q}{A} = K \bullet J \quad (2.5)$$

,όπου q είναι η ειδική παροχή ή ταχύτητα Darcy. Ως ειδική παροχή θεωρείται όγκος του νερού που περνά ανά μονάδα χρόνου (Q) από μια μοναδιαίου εμβαδού διατομή (A), κάθετη στη διεύθυνση της ροής.

Το K είναι η υδραυλική αγωγιμότητα ή συντελεστής διαπερατότητας και το J είναι η υδραυλική κλίση που εκφράζεται ως:

$$J = \frac{\phi_1 - \phi_2}{L} = \frac{\Delta\phi}{L} \quad (2.6)$$

Για τρισδιάστατη ροή ομογενούς ισότροπου πορώδους μέσου, ο νόμος του Darcy διατυπώνεται ως εξής:

$$q_x = K \cdot J_x = -K \frac{\partial\phi}{\partial x} = n \cdot V_x \quad (2.7)$$

$$q_y = K \cdot J_y = -K \frac{\partial\phi}{\partial y} = n \cdot V_y \quad (2.8)$$

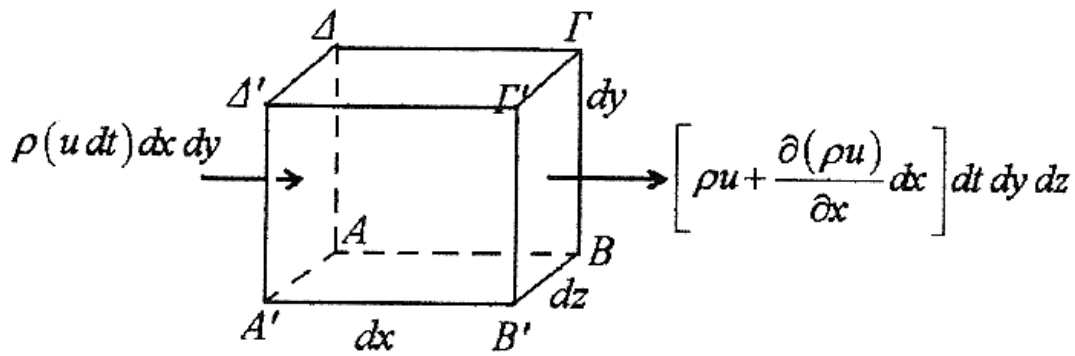
$$q_z = K \cdot J_z = -K \frac{\partial\phi}{\partial z} = n \cdot V_z \quad (2.9)$$

όπου,

n είναι το πορώδες, V είναι η ταχύτητα και ϕ είναι το πιεζομετρικό φορτίο (Νάνου-Γιάνναρου, 2006).

2.5.2. Εξίσωση συνέχειας

Η ροή σε πορώδη μέσα περιγράφεται από την εξίσωση διατήρησης της μάζας ή εξίσωση συνέχειας. Η μάζα του νερού σε διαφορικό όγκο διατηρείται, δηλαδή η μάζα που εισέρχεται μείον την μάζα που εξέρχεται ανά μονάδα χρόνου, ισούται με την μεταβολή της μάζας στον διαφορικό όγκο.



Εικόνα 2.2: Διαφορικός όγκος αναφοράς (Καρατζάς, 2002)

Μαθηματικά διατυπώνεται ως εξής:

$$\frac{\partial(\rho \cdot q_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot q_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot q_z)}{\partial z} = \frac{\partial(\rho \cdot n)}{\partial t} \quad (2.10)$$

όπου,

q_x, q_y, q_z = ειδική παροχή στους τρεις άξονες,

ρ = πυκνότητα του ρευστού,

n = πορώδες εδάφους.

Χρησιμοποιώντας τον συντελεστή αποθηκευτικότητας S_o για τον περιορισμένο υδροφορέα έχουμε:

$$\frac{\partial(\rho \bullet q_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \bullet q_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \bullet q_z)}{\partial z} = -\rho \bullet S_o \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (2.11)$$

Υποθέτουμε ότι η πυκνότητα δεν μεταβάλλεται στον χώρο. Επομένως η (2.11) γίνεται :

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = -S_o \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (2.12)$$

Και προσθέτοντας και τον όρο φόρτισης W (L^{-1}) έχουμε:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = -S_o \frac{\partial \phi}{\partial t} + W \quad (2.13)$$

Για τις διάφορες περιπτώσεις υδροφορέα και τρισδιάστατης ροής είναι:

1. Μη Μόνιμη Ροή

- Μη ομογενής ανισότροπος υδροφορέας

$$\frac{\partial(K_x \bullet \frac{\partial \phi_x}{\partial x})}{\partial x} + \frac{\partial(K_y \bullet \frac{\partial \phi_y}{\partial y})}{\partial y} + \frac{\partial(K_z \bullet \frac{\partial \phi_z}{\partial z})}{\partial z} = -S_o \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (2.14)$$

- Μη ομογενής και ισότροπος υδροφορέας

$$\frac{\partial(K \bullet \frac{\partial \phi_x}{\partial x})}{\partial x} + \frac{\partial(K \bullet \frac{\partial \phi_y}{\partial y})}{\partial y} + \frac{\partial(K \bullet \frac{\partial \phi_z}{\partial z})}{\partial z} = -S_o \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (2.15)$$

- Ομογενής και ανισότροπος υδροφορέας

$$K_x \bullet \frac{\partial^2 \phi_x}{\partial x^2} + K_y \bullet \frac{\partial^2 \phi_y}{\partial y^2} + K_z \bullet \frac{\partial^2 \phi_z}{\partial z^2} = -S_o \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (2.16)$$

- Ομογενής και ισότροπος υδροφορέας

$$\frac{\partial^2 \phi_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi_z}{\partial z^2} = -\frac{S_o}{K} \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (2.17)$$

Στην περίπτωση της μόνιμης ροής ισχύουν οι ίδιες εξισώσεις με το δεξί σκέλος αυτών να είναι ίσο με 0.

Για μόνιμη ροή σε ομογενή και ισότροπο υδροφορέα η εξίσωση συνέχειας ονομάζεται εξίσωση Laplace και ισουται με:(Νάνου-Γιάνναρου, 2006)

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2.18)$$

2.5.3 Αρχικές και οριακές συνθήκες

Για την επίλυση τους προβλήματος ροής υπόγειου υδροφορέα επιλέγεται το κατάλληλο μαθηματικό μοντέλο που προσομοιώνει την ροή. Κατά την επίλυση αυτού είναι αναγκαίο να ορισθούν:

- Η γεωμετρία του πεδίου ροής
- Οι αρχικές συνθήκες, δηλαδή να καθοριστεί η συνάρτηση δυναμικού ϕ σε κάποια ορισμένη χρονική στιγμή που συνήθως συμβολίζεται με $t=0$.
- Οι οριακές συνθήκες, δηλαδή η συμπεριφορά της ροής στα όρια του υπό εξέταση υδροφορέα.

Στα πρακτικά προβλήματα συνηθέστερες οριακές συνθήκες είναι οι ακόλουθες:

1. Όρια δεδομένου πιεζομετρικού φορτίου:

Είναι τα όρια στα οποία ασκείται γνωστό πιεζομετρικό φορτίο, πιθανόν μεταβαλλόμενο στο χρόνο με γνωστό τρόπο. Τέτοιου είδους όρια παρατηρούνται όταν το πεδίο ροής συνορεύει με κάποιο υδάτινο δυναμικό. Μία ειδική περίπτωση είναι όταν στο όριο το ασκούμενο πιεζομετρικό φορτίο είναι σταθερό με αποτέλεσμα να αποτελεί και ισοδυναμική γραμμή. Έτσι μπορεί να υπάρξει ροή μόνο κάθετα από ή προς τον υδροφορέα. Τέτοιου τύπου οριακές συνθήκες ονομάζονται συνθήκες Dirichlet ή οριακές συνθήκες πρώτου τύπου.

2. Όρια δεδομένης εισροής ή εκροής:

Όρια στα οποία υπάρχει δεδομένη εισροή ή εκροή ρευστού από ή τον γειτονικό υδροφορέα αντίστοιχα. Αυτά παρατηρούνται όταν ο υπό εξέταση υδροφορέας τροφοδοτεί ή τροφοδοτείται από κάποιον άλλον υδροφορέα. Ειδική περίπτωση αποτελεί η ύπαρξη αδιαπέρατου ορίου, δηλαδή μηδενικής εισροής ή εκροής. Όταν η εισροή ή η εκροή είναι σταθερή, τότε το όριο αυτό αποτελεί και γραμμή ροής. Τέτοιου τύπου οριακές συνθήκες ονομάζονται συνθήκες Neumann ή οριακές συνθήκες δευτέρου τύπου(Τάντος, 2006)

2.6 Μαθηματικά μοντέλα σε συνάρτηση με λογισμικό H/Y

Τα μαθηματικά μοντέλα, τα οποία έχουν πλέον ταυτιστεί με τα λογισμικά H/Y, αποτελούν την σύγχρονη μέθοδο επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν προβλήματα ροής και μεταφοράς διαλυτών ουσιών στα υπόγεια νερά. Τα περισσότερα μαθηματικά μοντέλα χρησιμοποιούν στην επίλυση των αντίστοιχων διαφορικών εξισώσεων, την αναλυτική ή την αριθμητική μέθοδο (Καλλέργης, 2001). Οι αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης διαφορικών εξισώσεων διακρίνονται σε τρεις κυρίες κατηγορίες:

- **Μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών (finite difference method):**

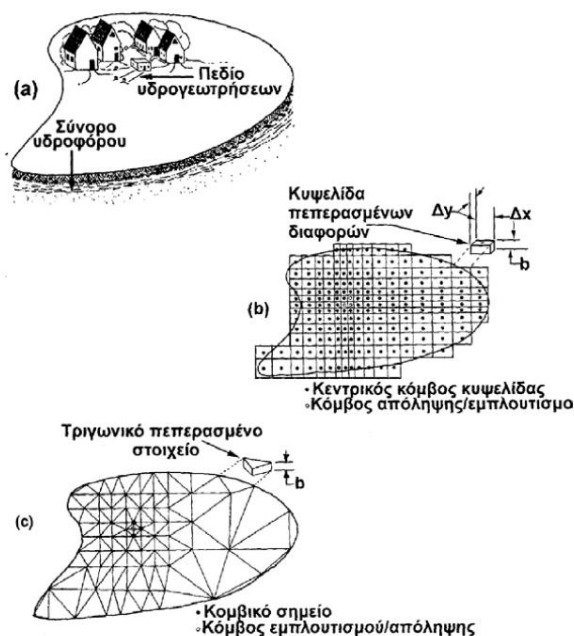
Στην μέθοδο αυτή η διακριτοποίηση του χώρου μελέτης γίνεται σε πλέγμα ορθογωνικής μορφής και η επίλυση των εξισώσεων γίνεται επάνω στα κόμβους του πλέγματος που μπορεί να είναι στο κέντρο κάθε κελιού (block centered grid) ή στις κορυφές (mesh centered grid). Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται με επιτυχία στα προβλήματα δυο ή τριών διαστάσεων, με τον κάνναβο να είναι ορθογωνικής μορφής. Σε ότι αφορά την αριθμητική τεχνική που χρησιμοποιεί η μέθοδος αυτή είναι απλή, κατανοητή και από υπολογιστική άποψη άμεσα εφαρμόσιμη.

- **Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (finite elements method):**

Κατά την μέθοδο αυτή, το πεδίο εφαρμογής αντιμετωπίζεται σαν σύνολο υποπεριοχών (πεπερασμένα στοιχεία). Οι εξισώσεις επιλύονται στο εσωτερικό κάθε στοιχείου με την βοήθεια λογισμού των διαφορών ή με την μέθοδο των σταθμισμένων υπολοίπων. Στην συνέχεια η σύνθεση των επιμέρους στοιχείων οδηγεί στο αλγεβρικό πρόβλημα (Σωτηροπούλου, 2010).

Συγκρίνοντας τις δυο παραπάνω μεθόδους οι πεπερασμένες διαφορές προγραμματίζονται ευκολότερα. Σε γενικές γραμμές η κατασκευή ενός καννάβου πεπερασμένων διαφορών απαιτεί λιγότερα δεδομένα. Τα πεπερασμένα στοιχεία σε αντίθεση με τις πεπερασμένες διαφορές, προσεγγίζουν καλύτερα ακανόνιστα όρια και εσωτερικές γεωλογικές δομές, όπως ρήγματα, ενώ ακόμη μπορούν να προσομοιώσουν καλύτερα σημειακές πηγές και καταβόθρες, επιφάνειες διήθησης και τη μεταβαλλόμενη ελεύθερη επιφάνεια του υπόγειου νερού. Μια θεμελιώδης διαφορά μεταξύ των δύο μεθόδων είναι ότι στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών υπολογίζεται μία τιμή του υδραυλικού φορτίου για κάθε κομβικό σημείο και αντιπροσωπεύει τη μέση τιμή για το αντίστοιχο κελί. Αντίθετα στα πεπερασμένα

στοιχεία το υδραυλικό φορτίο ορίζεται πλήρως σε κάθε σημείο του στοιχείου με τη χρήση των συναρτήσεων παρεμβολής (interpolation functions) (Καλλέργης, 2001). Στην εικόνα 2.3 δίνεται μια παραστατική παρουσίαση των πιο πάνω δυο μεθόδων: των μοντέλων πεπερασμένων διαφορών (Εικόνα 2.3.b) και πεπερασμένων στοιχείων (Εικόνα 2.3.c)



Εικόνα 2.3 : Δισδιάστατος κάναβος στις μεθόδους b) «πεπερασμένων διαφορών» και c) πεπερασμένων στοιχείων» με τις αντίστοιχες κυψελίδες (βρόχους) τους (Καλλέργης, 2001)

Οι μεταβλητές, όπως εκφράζονται μέσα από τις μερικές διαφορικές εξισώσεις, αλλάζουν συνεχώς. Έτσι, οι συνεχείς μεταβλητές αντικαθίστανται με ξεχωριστές διακριτές μεταβλητές που προσδιορίζονται σε επιλεγμένα σημεία, τους 'κόμβους' (nodes), που βρίσκονται μέσα στο χώρο του συστήματος που περιγράφεται από το αριθμητικό μοντέλο. Οι μεταβλητές αυτές δίνονται από έναν πεπερασμένο αριθμό αλγεβρικών εξισώσεων που περιγράφουν μια συγκεκριμένη παράμετρο, όπως π.χ. το φορτίο ϕ (Τάντος, 2006, Γιαννέλη, 2009).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ

3.1 Εισαγωγή

Η υφαλμύριση είναι ένα αρκετά σημαντικό πρόβλημα για τις παράκτιες περιοχές σε όλο τον κόσμο. Οι διαστάσεις του προβλήματος είναι ορατές, δεδομένου ότι το 60 με 70 % του παγκοσμίου πληθυσμού ζει σε παράκτιες περιοχές. Ακόμη και ελάχιστες ποσότητες θαλασσινού νερού μπορούν να προκαλέσουν την ποιοτική υποβάθμιση των πολύτιμων υδροφόρων στρωμάτων. Ο κίνδυνος της υφαλμύρισης εξ άλλου είναι άμεσα συνδεδεμένος με την μείωση των ποσοτήτων των φρέσκων υδάτων. Η αύξηση του πληθυσμού και η οικονομική ανάπτυξη έχει ως άμεσο αποτέλεσμα την αύξηση των αναγκών σε αποθέματα φρέσκου νερού. Το φαινόμενο της υφαλμύρισης των υπόγειων υδάτων είναι έντονο και στην Ελλάδα, ενώ όλα δείχνουν ότι στο μέλλον θα οξυνθεί (Καρτεράκης, 2005).

Στην Ελλάδα, η κύρια πηγή κάλυψης των αναγκών σε γλυκό νερό είναι τα υπόγεια ύδατα. Η χρήση του νερού γίνεται κυρίως για πόση και άρδευση καθώς επίσης και για κάλυψη των τουριστικών και βιομηχανικών αναγκών. Στις περισσότερες παράκτιες περιοχές η οικονομία βασίζεται κυρίως στον τουρισμό και τη γεωργία. Ιδιαίτερα τους καλοκαιρινούς μήνες οι απαιτήσεις σε νερό είναι ιδιαίτερα υψηλές με αποτέλεσμα την υπεράντληση των υπόγειων υδροφορέων. Το γεγονός αυτό έχει ως συνέπεια την υφαλμύριση των υδροφόρων στρωμάτων και την υποβάθμιση της ποιότητας του γλυκού νερού, με αποτέλεσμα να είναι ακατάλληλο για κάθε χρήση. Σε πολλές παράκτιες περιοχές της ηπειρωτικής Ελλάδας αλλά κυρίως στα νησιά είναι γεγονός ότι η στάθμη στους υπόγειους υδροφορείς μειώνεται κατά 5m ετησίως (200m τα τελευταία 40 χρόνια), ενώ το βάθος άντλησης του νερού φτάνει και τα 300m. Στην ουσία η υφαλμύριση είναι απτή απόδειξη της άναρχης και ανορθολογικής διαχείρισης του υδατικού δυναμικού. Είναι λοιπόν φανερό, ότι η μελέτη του φαινομένου της υφαλμύρισης των παράκτιων υδροφορέων είναι πολύ σημαντική για την Ελλάδα λόγω της μεγάλης ακτογραμμής και των κοινωνικοοικονομικών επιπτώσεων στις παράκτιες περιοχές (Καλλέργης, 2001, Καρτεράκης, 2005).

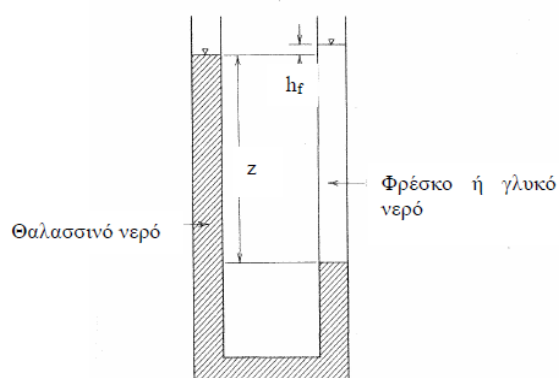
Πιθανές αιτίες δημιουργίας του φαινομένου της υφαλμύρισης ενός υπόγειου υδροφορέα είναι :

- **Φυσικές**, λόγω της ύπαρξης θαλασσινού νερού και άλμης που βρίσκεται σε κατώτερα γεωλογικά στρώματα,

- **Ανθρωπογενείς**, λόγω της διείσδυσης στο έδαφος είτε του αλατιού που χρησιμοποιείται για την τήξη του πάγου είτε των υγρών διασταλλαγμάτων διήθησης των χωματερών. Πιο συχνά παρατηρείται το φαινόμενο αυτό σε παραθαλάσσιες περιοχές, όπου η υπερεκμετάλλευση του υπόγειου νερού προκάλεσε την διείσδυση του θαλασσινού νερού μέσα στους υδροφορείς. Όταν σε έναν υδροφορέα εισχωρήσει αλμυρό νερό, μέρος του αλατιού προσροφάται στην επιφάνεια των στερεών, δυσκολεύοντας τη διαδικασία αναστροφής και την αποκατάσταση του υδροφορέα. (Καρτεράκης, 2005).

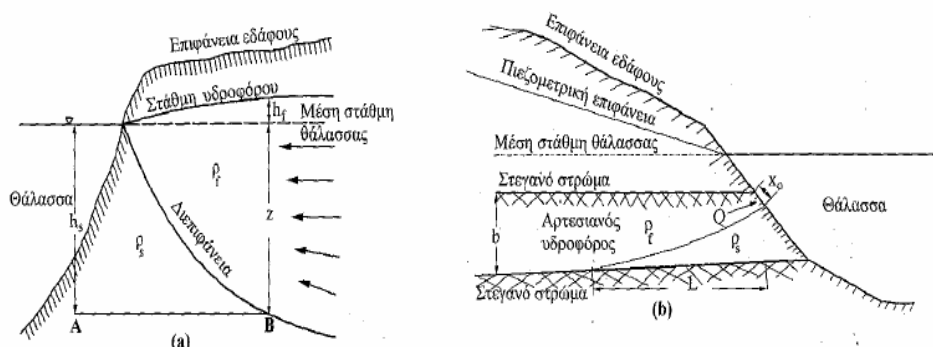
3.2 Μηχανισμός δημιουργίας υφαλμύρισης

Η μελέτη του φαινομένου της υφαλμύρισης, η οποία βασίζεται στην υδροστατική ισορροπία δύο υγρών, μπορεί μελετηθεί εργαστηριακά σε διατάξεις παρόμοιες με αυτή της εικόνας. Η υδροστατική ισορροπία μεταξύ γλυκού και θαλασσινού νερού μπορεί να αναπαρασταθεί σε έναν σωλήνα σχήματος U (εικόνα 3.1) στον οποίο παρέχεται στις δύο εισόδους του σωλήνα αλμυρό και γλυκό νερό, χωρίς να αναμιγνύονται μεταξύ τους. Οι πιέσεις σε κάθε μεριά του σωλήνα θα πρέπει να είναι ίσες.



Εικόνα 3.1 : Υδροστατική ισορροπία μεταξύ θαλασσινού και γλυκού νερού, αναπαριστώμενη με σωλήνα σχήματος U (Todd, 1980)

Στο πραγματικό πεδίο αν δεχθούμε ότι το γλυκό και το θαλασσινό νερό δεν αναμιγνύονται και δεδομένου ότι έχουν διαφορετικές πυκνότητες, σχηματίζεται ανάμεσά τους μια διεπιφάνεια που το σχήμα της καθορίζεται από το υδροδυναμικό ισοζύγιο, οπουδήποτε τα δυο ρευστά βρίσκονται σε επαφή. Η εικόνα δείχνει μια παράκτια διατομή ενός ελεύθερου υδροφόρου. Κατά τους Ghyben και Herzberg, υπάρχει ένα σημείο, όπου συναντώνται οι διατομές της ακτής, της διεπιφάνειας, της στάθμης της θάλασσας και του υδροφόρου (Καλλέργης, 2001).



Εικόνα 3.2: Κατανομή γλυκού και αλμυρού νερού σε παράκτιους ελεύθερους (a) και περιορισμένους (b) υδροφορείς. Με x_0 συμβολίζεται το μέτωπο εκφόρτισης γλυκού νερού (Καλλέργης, 2001, Todd, 1980)

Η ολική υδροστατική πίεση στο σημείο A (εικόνα 3.2) είναι:

$$p_A = \rho_s g h_s = \rho_s g z \quad (3.1)$$

Στο σημείο B (εικόνα 3.2) η πίεση θα είναι:

$$p_B = \rho_f g (z + h_f) \quad (3.2)$$

Επειδή $p_A = p_B$ προκύπτει η σχέση Ghyben-Herzberg:

$$z = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h_f = h_f \frac{\rho_f}{\Delta \rho} \quad (3.3)$$

Για δεδομένη πυκνότητα αλμυρού νερού και γλυκού νερού ίση με

$$\rho_s = 1.025 \frac{g}{cm^3}, \rho_f = 1 \frac{g}{cm^3}, \Delta = \rho_s - \rho_f = 0.025 \quad \text{και} \quad \frac{\rho_f}{\Delta \rho} = c = 40 \quad \text{οπότε τελικά}$$

προκύπτει ότι η τελική εξίσωση που για τον υπολογισμό της θέσης του υφάλμυρου

$$\text{μετώπου (Καλλέργης, 2001):} \quad z = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h_f = 40 h_f \quad (3.4)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΡΥΠΑΝΣΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ ΜΕ ΝΙΤΡΙΚΑ

4.1 Εισαγωγή

Η ρύπανση των υπόγειων και επιφανειακών νερών λόγω νιτρικών αλάτων είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη χρήση λιπασμάτων στη γεωργία. Δεδομένης της μεγάλης διαλυτότητας των νιτρικών ιόντων, το άζωτο που προστίθεται σε διάφορες μορφές για τις ανάγκες θρέψης των φυτών οξειδώνεται τελικά σε νιτρικά και μεταφέρεται διαλυμένο στο νερό το οποίο απορρέει προς του επιφανειακούς αποδέκτες ή διεισδύει στους υπόγειους υδροφορείς. Ο ρυθμός μεταφοράς του νιτρικού αζώτου εξαρτάται από πολλούς παράγοντες (βροχόπτωση, πορώδες εδάφους, τρόπος εφαρμογής της λίπανσης, κλίση εδάφους, κ.α.), αλλά ως μηχανισμός μεταφοράς παραμένει ο σημαντικότερος παράγοντας εμπλουτισμού των υδροφορέων σε αζωτούχες ενώσεις (ΚΥΑ 16190/1335/25.6.97).

Για τον λόγο αυτό, το ΥΠΕΧΩΔΕ εφαρμόζοντας την Οδηγία 91/676/ΕΟΚ συνέταξε την ΚΥΑ 16190/1335/25.6.97 (ΦΕΚ 519Β) για τη νιτρορύπανση και εξέδωσε κατάλογο ευπρόσβλητων ζωνών με την ΚΥΑ 19652/1906/5.8.1999 (ΦΕΚ 1575Β) και την ΚΥΑ 20419/2522/18.9.2001 (ΦΕΚ 1212Β). Επίσης ενήργησε για τη σύνταξη από το Υπουργείο Γεωργίας της ΥΑ 85167/820/6.4.2000 (ΦΕΚ477Β) με την οποία εγκρίθηκε ο «Κώδικας Ορθής Γεωργικής Πρακτικής».

Οι δύο ΚΥΑ που καθόρισαν τις ευπρόσβλητες στη νιτρορύπανση ζώνες βασίστηκαν σε εκτεταμένη δειγματοληψία και ανάλυση επιφανειακών και υπόγειων νερών από όλα τα υδατικά διαμερίσματα της Ελλάδας. Τα κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν για τον χαρακτηρισμό των ευπρόσβλητων ζωνών, σύμφωνα με την Οδηγία 91/676/ΕΟΚ ήταν:

- Κατά πόσο η περιεκτικότητα σε νιτρικά ιόντα των γλυκών νερών και ιδιαίτερα εκείνων που χρησιμοποιούνται ή προορίζονται για τη λήψη πόσιμου νερού, υπερβαίνει ή θα μπορούσε να υπερβεί την περιεκτικότητα που καθορίζεται στην Οδηγία 75/440/ΕΟΚ (50 mg/l), αν δεν ληφθούν μέτρα.
- Κατά πόσο τα υπόγεια νερά περιέχουν ή θα μπορούσαν να περιέχουν περισσότερο από 50 mg/l νιτρικών ιόντων, αν δεν ληφθούν μέτρα.

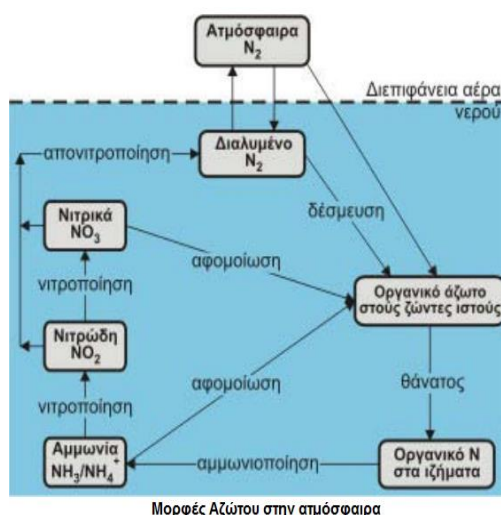
- Κατά πόσο οι φυσικές λίμνες γλυκού νερού, εκβολές ποταμών, άλλοι χώροι γλυκού νερού, παράκτια ή θαλάσσια νερά διαπιστώνεται ότι είναι ή ότι μπορεί να γίνουν ευτροφικά στο μέλλον, αν δεν ληφθούν μέτρα.

Οι αναλύσεις έγιναν την περίοδο 1997-1999, σε όλα τα υδατικά διαμερίσματα της χώρας και τα αποτελέσματα εξετάστηκαν ως προς τη συχνότητα υπέρβασης του ορίου των 50 mg/l νιτρικών ιόντων. Με βάση τα αποτελέσματα αυτά (ΥΠΕΧΩΔΕ, 1999) φαίνεται ότι οι νομοί Αργολίδας, Ηλείας, Βοιωτίας και Λάρισας, οι οποίοι έχουν έντονη αγροτική δραστηριότητα παρουσιάζουν σε πολλά σημεία υπερβάσεις των ορίων συγκέντρωσης όλων των μορφών αζώτου (νιτρικά, νιτρώδη και αμμωνιακά). Ιδιαίτερο πρόβλημα εμφανίζεται στο Νομό Αργολίδας, όπου την άνοιξη 1999 σε τρία από τα σημεία δειγματοληψίας οι συγκεντρώσεις των νιτρικών ιόντων υπερβαίνουν τα 100 mg/l. Ο Νομός Αττικής παρουσιάζει σε πολλά σημεία υπερβάσεις των ορίων των νιτρικών και των νιτρωδών ιόντων οι οποίες όμως θα πρέπει να οφείλονται μάλλον στην υψηλή συγκέντρωση αστικών και βιομηχανικών δραστηριοτήτων, παρά σε αγροτικής προέλευσης νιτρορύπανση. Πρέπει να σημειωθεί ότι ο αριθμός των δειγματοληψιών δεν ήταν ιδιαίτερα μεγάλος, αλλά το δείγμα θεωρείται αξιόπιστο από το ΥΠΕΧΩΔΕ για τον καθορισμό των ευπρόσβλητων ζωνών. Τα γενικό συμπέρασμα που προκύπτει από το σύνολο των αναλύσεων είναι ότι οι υπερβάσεις των ορίων των συγκεντρώσεων των νιτρικών είναι σημειακές με έντονη εποχιακότητα και συνδέονται άμεσα με έντονη γεωργική δραστηριότητα (ΚΥΑ 16190/1335/1997).

4.2 Ο κύκλος του αζώτου

Το άζωτο είναι το πιο άφθονο στοιχείο στην ατμόσφαιρα, που αποτελεί σχεδόν το 80% του αέρα που αναπνέουμε. Τα αέρια του αζώτου μπορούν να βρεθούν σε πολλές μορφές, οι σημαντικότερες από τις οποίες αποτελούνται από N_2 , N_2O , NO , NO_2 , NH_3 . Μερικά από αυτά τα αέρια αντιδρούν εύκολα με το νερό της βροχής και παράγουν νιτρικά και ιόντα αμμωνίου σε διάλυμα. Αυτά τα ιόντα μπορούν να γίνουν μέρος της σύνθεσης στρωμάτων του εδάφους, ή ακόμα και να εισέλθουν στα υπόγεια ύδατα. Οι δύο πιο σημαντικές ενώσεις που προκύπτουν από την αντίδραση αυτών των αερίων και των ομβρίων υδάτων είναι τα νιτρικά (NO_3^-) και το αμμώνιο (NH_4^+).

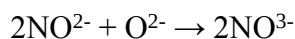
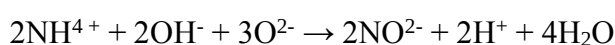
Στην ατμόσφαιρα μείζονες πηγές των νιτρικών είναι αντιδράσεις που προκαλούνται από κεραυνούς, τη φωτοχημική οξείδωση στη στρατόσφαιρα, τη χημική οξείδωση της αμμωνίας, την παραγωγή NO από το έδαφος μέσω των μικροβιακών διεργασιών, και την καύση ορυκτών καυσίμων. Η αμμωνία στην ατμόσφαιρα προέρχεται από την παραγωγή λιπασμάτων, την αναερόβια αποσύνθεση της οργανικής ύλης, τη βακτηριακή (νιτροβακτήρια και αζωτοδεσμευτικά) αποσύνθεση των περιττωμάτων, καθώς και την καύση του άνθρακα. Οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες έχουν σημαντικό αντίκτυπο στα επίπεδα αυτών των ενώσεων που απαντούν τόσο στο νερό της βροχής όσο και στην ατμόσφαιρα. Πολλές από τις κύριες πηγές των νιτρικών και του αμμωνίου προέρχονται από τη χρήση και την παραγωγή λιπασμάτων και την καύση των καυσίμων. Νιτρικά που απελευθερώνει η ατμόσφαιρα μπορούν να μετατραπούν ξανά σε στοιχειακό άζωτο, μέσα από τη διαδικασία της απονιτροποίησης. Αυτό συχνά γίνεται στο έδαφος από τη δραστηριότητα των βακτηρίων (απονιτροποιητικά βακτήρια) που μειώνουν τα νιτρικά άλατα. Το αμμώνιο μπορεί να υποστεί τη διαδικασία της νιτροποίησης, η οποία είναι μια αντίδραση οξείδωσης, που το μετατρέπει σε νιτρικά. Μέσω αυτού του μηχανισμού, το άζωτο από το ιόν του αμμωνίου επιστρέφει πάλι στην ατμόσφαιρα. Μετά τη μετατροπή από στοιχειώδη σε αζωτούχα ιόντα σε διαλύματα του νερού της βροχής, το άζωτο που βρίσκεται σε αυτές τις ουσίες μπορεί να επιστρέψει πίσω στην ατμόσφαιρα από τα μονοπάτια που περιγράφηκαν προηγουμένως, ολοκληρώνοντας έτσι τον κύκλο (Κοντουδάκης κ.α, 2011).



Εικόνα 4.1: Κύκλος του Αζώτου σε υδάτινο περιβάλλον (Luk and Au-Yeung, 2002)

4.3 Νιτρικά (NO_3^-) και Νιτρώδη ιόντα (NO_2^-) στο φυσικό περιβάλλον

Τα νιτρικά ιόντα παράγονται από οξείδωση αμμωνίας και αποτελούν τμήμα του κύκλου του αζώτου στη φύση, επομένως υπάρχουν στα φυσικά νερά, αλλά η συγκέντρωσή τους είναι συνήθως χαμηλή ενώ σε αερόβιες συνθήκες διεισδύουν στον υδροφόρο ορίζοντα. Συγκεκριμένα, είναι το τελικό προϊόν της φυσικής αποσύνθεσης οργανικών αζωτούχων ενώσεων, οι οποίες μπορεί να προέρχεται από ζωικά περιττώματα, λιπάσματα ή προηγούμενη χρήση του νερού από τον άνθρωπο. Η οξείδωση του ιόντος αμμωνίου NH_4^+ που προκύπτει από την αποσύνθεση, πραγματοποιείται σε δύο στάδια με τη βοήθεια μικροοργανισμών:

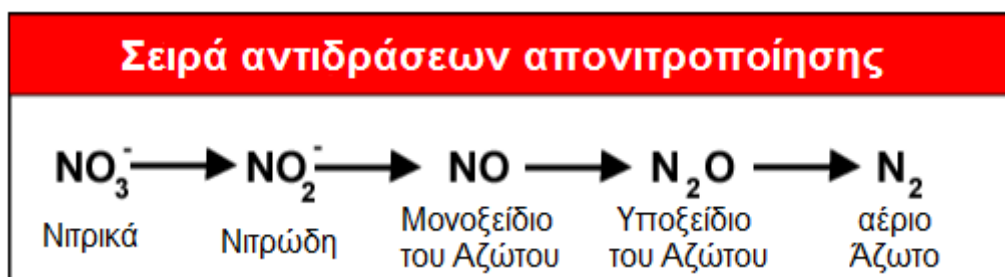


Επομένως, σε πρόσφατα ρυπασμένα νερά το άζωτο βρίσκεται υπό την μορφή οργανικού αζώτου και αμμωνίας. Καθώς περνάει ο χρόνος το οργανικό άζωτο μετατρέπεται σταδιακά σε αμμωνία και αργότερα εάν υπάρχουν αερόβιες συνθήκες γίνεται οξείδωση της αμμωνίας σε νιτρώδη και νιτρικά. Με βάση τα παραπάνω, νερά που περιέχουν μεγάλη ποσότητα οργανικού αζώτου και αμμωνίας θεωρούνται ότι έχουν ρυπανθεί πρόσφατα και επομένως παρουσιάζουν μεγάλο κίνδυνο για τη δημόσια υγεία. Νερά όπου το άζωτο βρίσκεται υπό μορφή νιτρικών σημαίνει ότι έχουν ρυπανθεί πριν από αρκετό καιρό και επομένως δεν αποτελούν άμεση απειλή για την δημόσια υγεία. Παρ' όλα αυτά αυξημένες περιεκτικότητες σε νιτρικά και νιτρώδη ιόντα προκαλούν βλάβες στον ανθρώπινο οργανισμό γι αυτό είναι αναγκαία η ανίχνευσή και η εξουδετέρωσή τους. Το ανώτατο όριο συγκέντρωσης νιτρικών στο πόσιμο νερό έχει καθορισθεί σε 50 mg/L, ενώ το επιθυμητό όριο είναι 25 mg/L (Κοντουδάκης κ.α, 2011). Στην εικόνα 4.2 φαίνεται η διαδικασία της νιτροποίησης:



Εικόνα 4.2 : Διαδικασία της νιτροποίησης (<http://www.usgs.gov/>)

Η κύρια διαδικασία απομάκρυνσης των νιτρικών είναι η αναγωγή τους, σύμφωνα με την αντίδραση: $2\text{NO}_3^- + 12\text{H}^+ + 10\text{e}^- \rightarrow \text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$. Οι κύριες αναγωγικές ουσίες υδρόθειο, μεθάνιο, ιόντα σιδήρου (H_2S , CH_4 , Fe^{2+}) βρίσκονται διαλυμένες στο νερό σε μικρή αναλογία σε σχέση με τα νιτρικά και έτσι καθίσταται αδύνατη η πλήρης φυσική αναγωγή των νιτρικών. Η αναγωγή των νιτρικών ή απονιτροποίηση (denitrification) στους υδροφορείς επιτυγχάνεται από οργανική ύλη, παρουσία βακτηρίων με τελικό προϊόν την αμμωνία. Το νιτρώδες ιόν NO_2^- εμφανίζεται ως ένα ενδιάμεσο στάδιο της βιολογικής ανασύνθεσης υπό αερόβιες συνθήκες από ενώσεις που περιέχουν οργανικό άζωτο και είναι εξαιρετικά ασταθές και δραστικό σε σχέση με το νιτρικό ιόν. Σαν ανώτατη παραδεκτή συγκέντρωση νιτρώδων έχουν ορισθεί τα 0,1 mg/L. Στα επιφανειακά νερά η παρουσία των νιτρώδων ιόντων είναι περιορισμένη γιατί οξειδώνονται σε νιτρικά με την παρουσία φωτός και βακτηριδίων (Κοντουδάκης κ.α, 2011). Στην εικόνα 4.3 φαίνεται η διαδικασία της απονιτροποίησης



Εικόνα 4.3 : Απονιτροποίηση (<http://www.usgs.gov/>)

4.4 Πηγές και Επιδράσεις του αζώτου

Πρόσφατες μελέτες δείχνουν αυξανόμενο ποσοστό της συγκέντρωσης των νιτρικών στα υπόγεια κυρίως ύδατα σε πολλές αναπτυγμένες χώρες. Η αλόγιστη χρήση αζωτούχων λιπασμάτων που πραγματοποιείται στη γεωργία, είναι ένας από τους λόγους που οδηγεί σε υψηλά επίπεδα συγκέντρωσης των νιτρικών στα καλλιεργήσιμα εδάφη. Αυτά, εν συνεχεία, θα καταλήξουν είτε σε επιφανειακά νερά λόγω της επιφανειακής απορροής είτε σε υπόγεια ύδατα λόγω της διήθησης. Παράλληλα, αυξημένες συγκεντρώσεις παρατηρούνται και σε αστικές περιοχές λόγω της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, γεγονός που οφείλεται κυρίως στην ατελή καύση αποβλήτων ή καυσίμων. Από τον αέρα οδηγούνται μέσω των κατακρημνίσεων στην

επιφάνεια του εδάφους ή του υδάτινου όγκου. Η προσρόφιση ή η παραμονή της ουσίας στο έδαφος εξαρτάται από την ετερογενή φύση του εδάφους, καθώς υπάρχουν διαφορετικοί τύποι εδάφους με διαφορετικά ποσά οργανικής ύλης και διαφορετικού μεγέθους κόκκων. Επιπρόσθετα, νιτρικά ιόντα μπορεί να ανιχνεύονται και σε εδάφη στα οποία εναποτίθενται μεγάλες ποσότητες απορριμμάτων και ζωικών ή ανθρώπινων απόβλητων, τα οποία παράγονται κατά τη διαδικασία της σήψης.

Εκτός από τις επιπτώσεις που μπορεί να έχει το φαινόμενο του ευτροφισμού στο περιβάλλον, μπορούν να δημιουργηθούν προβλήματα από μεγάλες συγκεντρώσεις αζώτου (μεγαλύτερες από 50mg/L) στον ανθρώπινο οργανισμό. Τα νιτρικά που περιέχονται στο περιβάλλον, από μόνα τους δεν είναι τοξικά. Γίνονται όμως επικίνδυνα όταν αναμειχθούν με τοξικά που ήδη υπάρχουν στον ανθρώπινο οργανισμό. Τις περισσότερες φορές το άζωτο εισέρχεται στον οργανισμό από τις τροφές και λιγότερο από το νερό. Τα λαχανικά, το συντηρημένο κρέας και τα δημητριακά αποτελούν τη μεγαλύτερη πηγή αζώτου (Κοντουδάκης κ.α, 2011).

Οι επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία από τα νιτρικά ιόντα είναι:

- **Μεθαιμογλοβιναιμία:** Το σύνδρομο των «μπλε μωρών» ή αλλιώς μεθαιμογλοβιναιμία μπορεί να προκληθεί όταν παιδιά κάτω του ενός έτους λάβουν μεγάλη ποσότητα νιτρικών. Τα νιτρικά με τη βοήθεια βακτηρίων που συναντώνται στο πεπτικό σύστημα των βρεφών μετατρέπονται σε νιτρώδη. Σε αυτή τη διαδικασία βοηθά και το υψηλό pH των βρεφών. Τα νιτρώδη αντιδρούν με την αιμογλοβίνη του αίματος, οξειδώνοντας τα ιόντα σιδήρου και παράγοντας μεθαιμογλοβίνη. Αυτή σε συνδυασμό με τις μεγάλες ποσότητες υγρών που καταναλώνουν τα βρέφη και τη μικρή ικανότητα του οργανισμού τους να μετατρέψει ξανά την μεθαιμογλοβίνη σε αιμογλοβίνη κάνει τα μωρά πολύ ευάλωτα σε ασθένειες.
- **Καρκίνος:** Μια ακόμη πιθανή συνέπεια παρουσίας υψηλών συγκεντρώσεων νιτρικών στον ανθρώπινο οργανισμό είναι η εμφάνιση καρκίνου. Τα νιτρικά που περιέχονται στο στομάχι με τη βοήθεια βακτηρίων μετατρέπονται σε νιτρώδη. Αυτά αντιδρούν με προϊόντα της πέψης και παράγουν νιτροζαμίνες που θεωρούνται καρκινογόνες. Ο καρκίνος του στομάχου είναι η δεύτερη αιτία θανάτων παγκοσμίως, είναι πολύ επώδυνος και συνδέεται με τα νιτρικά που λαμβάνουμε από το πόσιμο νερό (Κοντουδάκης κ.α, 2011).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΟΙ ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ PTC (Princeton Transport Code) ΚΑΙ ΤΟΥ ARGUS ONE

5.1 Εισαγωγή

Το PTC (Princeton Transport Code) είναι ένα τρισδιάστατο μοντέλο προσομοίωσης της υπόγειας ροής και μεταφοράς ρυπαντών. Το PTC χρησιμοποιεί έναν ειδικό αλγόριθμο (splitting algorithm) που επιτρέπει τη διακριτοποίηση της υπό μελέτη περιοχής σε παράλληλα οριζόντια στρώματα. Σε κάθε επίπεδο γίνεται διακριτοποίηση πεπερασμένων στοιχείων, επιτρέποντας την ακριβή περιγραφή περιοχών με ακανόνιστο σχήμα. Τα επίπεδα συνδέονται κάθετα με διακριτοποίηση πεπερασμένων διαφορών. Ο συνδυασμός αυτός, των μεθόδων των πεπερασμένων στοιχείων και των πεπερασμένων διαφορών, δίνει τη δυνατότητα να εφαρμοστεί η διαδικασία splitting. Κατά τη διάρκεια μιας χρονικής επανάληψης, όλοι οι υπολογισμοί διακρίνονται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο, όλες οι οριζόντιες διακριτοποιήσεις πεπερασμένων στοιχείων επιλύονται, ανεξάρτητα η μία από την άλλη. Στο δεύτερο στάδιο, επιλύονται οι κάθετες εξισώσεις που συνδέουν τα επίπεδα (Pinder, 2001).

5.2 Η λύση του αλγορίθμου PTC

Το PTC χρησιμοποιεί το ακόλουθο σύστημα διαφορικών εξισώσεων για να αναπαραστήσει την υπόγεια ροή, που περιγράφεται από το υδραυλικό ύψος h :

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

Η ταχύτητα ροής των υπόγειων υδάτων δίνεται από τους εξής τύπους:

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

Η εξίσωση μεταφοράς ρύπων που περιγράφεται από τη συγκέντρωση c , δίνεται από της εξίσωση:

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

Όπου ,

K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} η υδραυλική αγωγιμότητα στις κατευθύνσεις x, y, z αντίστοιχα (LT^{-1})

h το υδραυλικό ύψος (L)

S ο ειδικός συντελεστής αποθηκευτικότητας (L^{-1})

Q η παροχή άντλησης (πηγάδι / πηγή) (L^3/T)

V_x, V_y, V_z η ταχύτητα της ροής κατά τη διεύθυνση x, y, z αντίστοιχα (LT^{-1})

D_{ij} η υδροδυναμική διασπορά σε όλες τις κατευθύνσεις με $i = x, y, z$ και $j = x, y, z$ (L^2/T)

c η χημική συγκέντρωση στο σημείο (x,y,z) τη χρονική στιγμή t (M/L^3)

θ το πορώδες του υδροφορέα

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

c^w η συγκέντρωση του αντλούμενου νερού στο σημείο (x_i, y_i, z_i)

Οι παραπάνω εξισώσεις βασίζονται στην αρχή διατήρησης της μάζας και στο νόμο του Darcy. Αρχικά επιλύεται η πρώτη εξίσωση που περιγράφει το υδραυλικό ύψος h , μετά οι ταχύτητες του Darcy V_x, V_y, V_z από τη δεύτερη εξίσωση και τέλος, επιλύεται η τρίτη εξίσωση για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης c του ρύπου (Trichakis, Baltas, 2011).

5.3 Οριακές και αρχικές συνθήκες για την υπόγεια ροή

Οριακή συνθήκη είναι μια μαθηματική έκφραση που περιορίζει τις εξισώσεις του μαθηματικού μοντέλου στον χώρο.

Η αρχικές συνθήκες περιγράφουν την κατανομή του υδραυλικού φορτίου κατά την χρονική στιγμή της έναρξης της προσομοίωσης. Η χρονική στιγμή της έναρξης της προσομοίωσης αντιστοιχεί στον χρόνο μηδέν του μοντέλου. Οι οριακές συνθήκες στην εξίσωση ροής διακρίνονται σε καθορισμένου φορτίου ή Dirichlet, καθορισμένης ροής ή Neumann και συνδυασμός μεταβλητού φορτίου και ροής ή Cauchy.

- **Στην οριακή συνθήκη Dirichlet ή καθορισμένου φορτίου ή πρώτου είδους**, το υδραυλικό φορτίο ορίζεται ως συνάρτηση της θέσης και του χρόνου κατά μήκος μιας οριακής επιφάνειας της περιοχής προσομοίωσης. Σε γενικές γραμμές στο όριο αυτό, το υδραυλικό φορτίο μπορεί είτε να μεταβάλλεται με τον χρόνο ή να παραμένει σταθερό.
- **Η συνθήκη καθορισμένης ροής ή Neumann ή δεύτερου είδους**, επιλέγεται κατά μήκος μιας συνοριακής επιφάνειας που η ροή είναι συνάρτηση του χρόνου και της θέσης. Στην περίπτωση που θέλουμε να προσομοιώσουμε ένα αδιαπέρατο υδραυλικό όριο (π.χ αδιαπέρατος σχηματισμός, γραμμή ροής, υπόγειος υδροκρίτης κλπ) η ροή ισούται με μηδέν.
- **Η συνθήκη μεταβλητού φορτίου και ροής ή Cauchy ή τρίτου είδους**, χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου η ροή διαμέσου μιας οριακής επιφάνειας εξαρτάται από της μεταβολές του φορτίου όσο και από τις μεταβολές του υδραυλικού φορτίου που επικρατεί εγκάρσια στην επιφάνεια (Τάντος, 2006).

5.4 Παράμετροι

Η εξίσωση της ροής περιέχει δύο πεδία παραμέτρων: την υδραυλική αγωγιμότητα K και την ειδική αποθηκευτικότητα S . Όταν ο προσομοιωτής είναι δύο διαστάσεων, η υδραυλική αγωγιμότητα και η ειδική αποθηκευτικότητα αντικαθίστανται από τη μεταβιβασιμότητα T και τον ειδικό συντελεστή αποθηκευτικότητας S . Επίσης, σ' ένα πρόβλημα υδροφόρου ορίζοντα παίζει σημαντικό ρόλο και το πορώδες.

Στην περίπτωση ενός πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων, μπορεί κανείς είτε να καθορίσει τις τιμές των παραμέτρων σε κάθε κόμβο είτε να αποδώσει μια σταθερή τιμή σε κάθε στοιχείο. Αποτέλεσμα αυτού είναι να εξέλθει η σταθερή παράμετρος από το ολοκλήρωμα και να απλοποιηθεί η ολοκλήρωση (Τάντος, 2006)

5.5 Μεταφορά στο υπόγειο νερό

Η μεταφορά στο υπόγειο νερό γενικά, περιγράφει το φαινόμενο της κίνησης και εξέλιξης διαλυμένων ρυπαντών λόγω της κίνησης του υπόγειου νερού καθώς επίσης και διάφορες φυσικοχημικές διαδικασίες που συμβαίνουν στην υποεπιφάνεια.

Το κυριότερο πρόβλημα εντοπίζεται στην κίνηση ρύπων που προκύπτουν από ανθρωπογενείς δραστηριότητες και από τη φυσική ύπαρξη ρυπαντών όπως είναι το αλμυρό νερό στους παράκτιους υδροφορείς ή άλλα ανόργανα διαλυμένα σωματίδια.

Όπως η μοντελοποίηση ροής του υπόγειου νερού έτσι και η μεταφορά ρύπων περιλαμβάνει μία σειρά από βήματα απαραίτητα για την ανάπτυξη και την εκτέλεση του μοντέλου:

- Σύνταξη πληροφοριών για την ποιότητα του νερού
- Προσδιορισμός του αριθμού των φυσικών διαστάσεων
- Καθορισμός του μεγέθους του μοντέλου
- Εισαγωγή των οριακών συνθηκών του μοντέλου
- Εισαγωγή των παραμέτρων του μοντέλου
- Εισαγωγή των φορτίσεων του μοντέλου
- Καθορισμός της διακριτοποίησης του μοντέλου
- Τρέξιμο του μοντέλου
- Εξαγωγή των συγκεντρώσεων
- Βαθμονόμηση του μοντέλου
- Τρέξιμο του μοντέλου ξανά (Pinder, 2001)

5.5.1 Οριακές και αρχικές συνθήκες του μοντέλου

Για να πάρουμε μοναδική λύση σε μία διαφορική εξίσωση θα πρέπει να ορίσουμε κάποιες αρχικές και οριακές συνθήκες. Γενικώς οι αρχικές συνθήκες είναι να περιγράψουν την τιμή μίας παραμέτρου σε κάποιο αρχικό χρόνο ίσο με το μηδέν. Οι

οριακές συνθήκες ορίζουν την αλληλεπίδραση της υπό μελέτης περιοχής με το εξωτερικό της περιβάλλον.

Τύποι οριακών συνθηκών για τη μεταφορά μάζας :

- | | |
|--------------------------|---------------------------------------|
| 1. Τύπος I - First type | Σταθερή Συγκέντρωση |
| 2. Τύπος II –Second type | Σταθερή Κλίση ($\Delta C/\Delta x$) |
| 3. Τύπος III-Third type | Μεταβλητή ροή ανά μονάδα επιφάνειας |

5.6 Μοντελοποίηση της ροής στον υπόγειο υδροφορέα

5.6.1 Περιγραφή του μοντέλου “Argus ONE”

Το Argus ONE είναι ένα ανεξάρτητο μοντέλο συστήματος γεωγραφικών πληροφοριών που χρησιμοποιείται για την αριθμητική μοντελοποίηση. Χρησιμοποιώντας μια εννοιολογική προσέγγιση του μοντέλου, σε συνδυασμό με τη δυνατότητά του δημιουργίας γραφικών, το Argus ONE έχει τη δυνατότητα γραφικής απεικόνισης διεπιφανειών σε αριθμητικά μοντέλα.

Το GIS - Argus ONE παρέχει ένα περιβάλλον όπου διάφορες πληροφορίες συντίθενται με εύκολο τρόπο ώστε να εισαχθούν στα αριθμητικά μοντέλα. Όπως και στα άλλα συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών, οι διάφοροι τύποι πληροφοριών αποθηκεύονται σε επίπεδα, τα οποία ο χρήστης μπορεί να επεξεργαστεί.

Με τη βοήθεια του προγράμματος αυτού δημιουργούνται πλέγματα πεπερασμένων στοιχείων ή πεπερασμένων διαφορών. Οι πληροφορίες δημιουργούνται χρησιμοποιώντας μαθηματικές και ορθολογικές συναρτήσεις καθώς και συναρτήσεις του χώρου καθορίζοντας έτσι, τις σχέσεις μεταξύ των επιπέδων.

Η τεχνολογία Argus ‘*Plug-in Extension (PIE)*’ καθιστά ικανή την επικοινωνία μεταξύ εξωτερικών προγραμμάτων και του Argus ONE. Τέτοια εξωτερικά προγράμματα μπορεί να είναι αριθμητικά μοντέλα και αλγόριθμοι.

Η χρήση του Argus ONE βασίζεται στα διάφορα “layers” που προαναφέρθηκαν τα οποία ουσιαστικά είναι διαφανή φύλλα εργασίας και το κάθε ένα περιέχει κάποιες πληροφορίες. Μέσα από το “Information layer” μπορεί κανείς να εισάγει, να ψηφιοποιήσει και να μεταβάλλει κάθε είδους πληροφορία σχετικά με το χώρο ή τους κόμβους όπως οι οριακές συνθήκες, οι σημειακές πηγές και δεξαμενές, η τοπογραφία και οι φυσικές παράμετροι. Χρησιμοποιώντας αυτές τις πληροφορίες μπορεί να καθοριστεί το περίγραμμα της περιοχής μελέτης καθώς και η επιθυμητή πυκνότητα

του πλέγματος ενώ στη συνέχεια μπορούν να υπολογιστούν άλλες παράμετροι όπως το πάχος του σχηματισμού κ.λπ. Ακόμη, από το “Data layer”, είναι δυνατή η εισαγωγή και ανάγνωση διαφόρων στοιχείων, στοιχείων σχετικά με τα πλέγματα, δεδομένων που έχουν δημιουργηθεί από άλλα προγράμματα - το PTC στην περίπτωση αυτή – όπου στη συνέχεια μπορεί να γίνει η γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων. Επίσης, από το “Map layer” γίνεται η εισαγωγή ψηφιοποιημένου χάρτη της περιοχής μελέτης για τον καλύτερο προσανατολισμό στην περιοχή (Olivares, 2002).

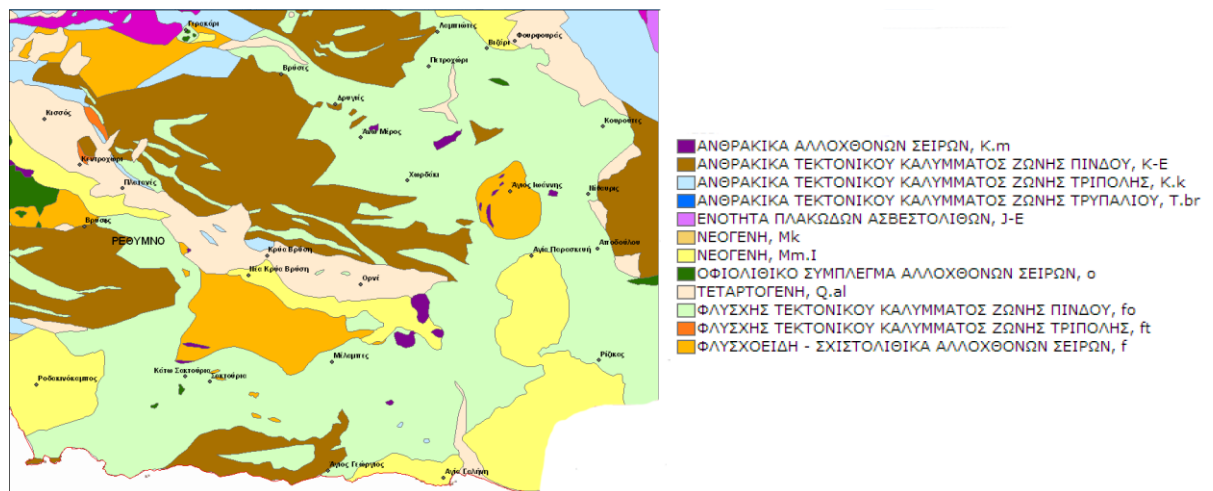
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η λεκάνη του Πλατύ ποταμού βρίσκεται στο νότιο μέρος της Κρήτης, στο νομό Ρεθύμνου. Η λεκάνη απορροής καλύπτει μία έκταση 203 km², περιλαμβάνει μία πεδιάδα που εκτείνεται ανάμεσα σε βορρά και νότο και με βουνά που υψώνονται στην ανατολική και δυτική πλευρά. Η λεκάνη δέχεται περίπου 850 mm βροχής ετησίως. Περίπου το 80% της συνολικής έκτασης της κοιλάδας καλλιεργείται με ελαιώνες. Η κύρια πηγή αρδευτικού νερού είναι τα υπόγεια ύδατα. Οι γεωτρήσεις που έχουν γίνει επέτρεψαν την άρδευση των καλλιεργειών (Donta and Lange, 2006).

6.1 Ανάγλυφο και Γεωλογία

Τα βουνά στα Δυτικά υψώνονται έως τα 1500 m, ενώ η πεδιάδα απλώνεται σε υψόμετρο από 250 έως 50 m. Ο Πλατύς ποταμός είναι το κύριο ρεύμα της λεκάνης και η εκβολή του βρίσκεται στη νότια ακτή της Αγίας Γαλήνης. Ένας σημαντικός παραπόταμος του Πλατύ είναι ο Λιγιώτης.

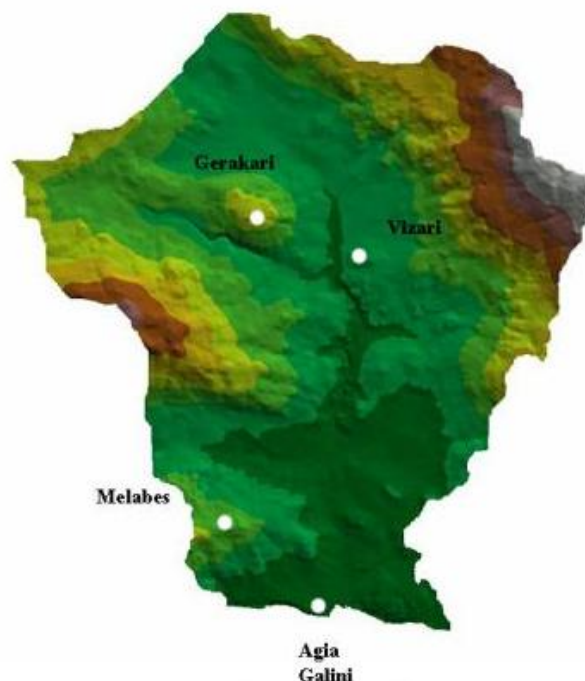
Νεογενείς και Προνεογενείς σχηματισμοί αποτελούν τη βασική γεωλογική σύσταση της περιοχής. Πιο αναλυτικά οι σχηματισμοί που κατατάσσονται στη ζώνη της Πίνδου (μία στρωματογραφική την εξέλιξη των Προνεογενών σχηματισμών στην Ελλάδα) αναπτύσσονται κυρίως στην περιοχή ενδιαφέροντος. Οι βασικοί σχηματισμοί στη ζώνη της Πίνδου είναι οι ανώτεροι Τριασικοί ασβεστόλιθοι και ραδιολαρίτες. Αποτελούνται από λεπτά ροζ στρώματα ασβεστόλιθων που στηρίζονται σε ραδιολαρίτες και ψαμμίτες με ψαμμιτικούς ασβεστόλιθους. Κρητιδικοί παχυστρωματώδεις ασβεστόλιθοι που αποτελούνται από ροζ ασβεστόλιθους στη βάση, μαύρους – γκρι ασβεστόλιθους στη μέση της στρωματογραφικής ακολουθίας και μία σειρά από λεπτούς Παλαιόκενους ασβεστόλιθους εναλλάξ με στρώματα μάργας στην κορυφή της ακολουθίας. Ο Φλύσχος της Ηώκαινου περιόδου αποτελεί τον πιο πρόσφατο σχηματισμό της ζώνης της Πίνδου. Μπορεί να είναι ελαφρώς μεταμορφωμένα σε σημεία. Ο Φλύσχος είναι ο πιο άφθονος σχηματισμός της περιοχής. Κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, άμμοι με περιστασιακούς λιγνίτες αποτελούν τους Νεογενείς σχηματισμούς στη λεκάνη του Πλατύ. Εκτείνονται προς τα Ανατολικά – Βορειοανατολικά του Πλατύ (Donta and Lange, 2006).



Εικόνα 6.1: Γεωλογικός χάρτης της λεκάνης του Πλατού (<http://emeric.ims.forth.gr/>)

6.2 Κλίμα και Υδατικοί Πόροι

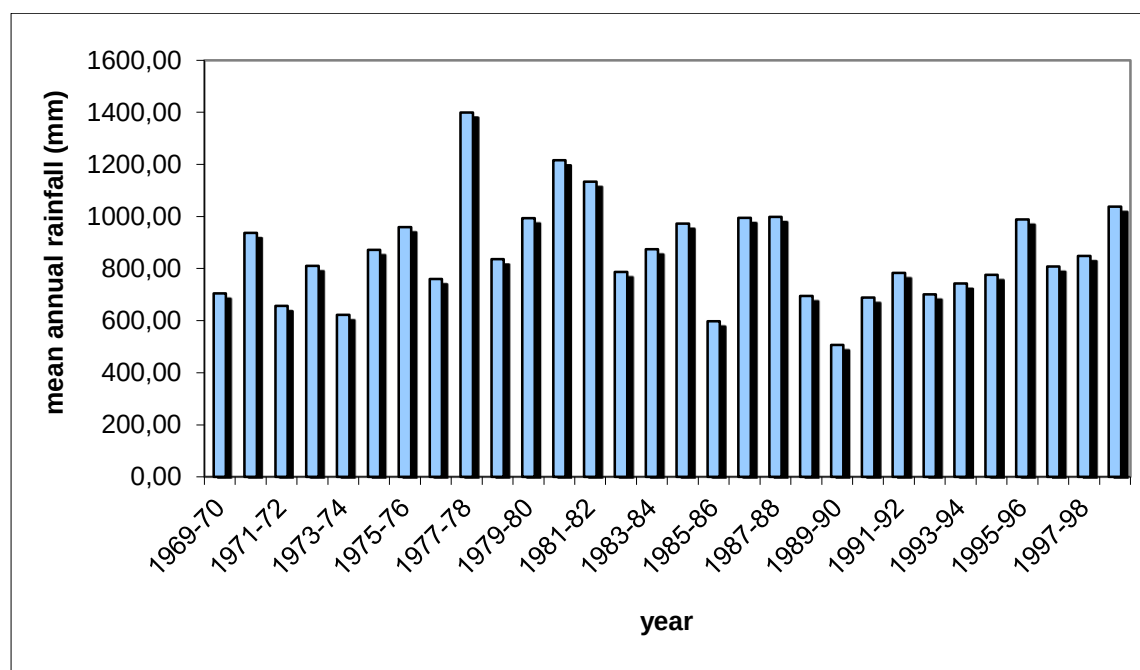
Το κλίμα είναι ήπιο Μεσογειακό, με ήπιους υγρούς χειμώνες και ζεστά και ξηρά καλοκαίρια. Υπάρχουν 3 βροχομετρικοί σταθμοί στην περιοχή. Η τοποθεσία των σταθμών φαίνεται στην εικόνα 6.2.



Εικόνα 6.2: Γεωφυσικός χάρτης της λεκάνης του Πλατού με τους βροχομετρικούς σταθμούς (Donta and Lange, 2006)

Ο σταθμός στο Γερακάρι εμφανίζει τις υψηλότερες τιμές μέσης ετήσιας βροχόπτωσης καθώς βρίσκεται στο μεγαλύτερο υψόμετρο. Η βροχόπτωση κυμαίνεται για το σταθμό στο Γερακάρι στα 1300 mm στο υψόμετρο των 580 m, για τον σταθμό του Βυζαρίου στο υψόμετρο των 310 m η βροχόπτωση ανέρχεται στα 754 mm και για το σταθμό της Αγίας Γαλήνης που βρίσκεται σε ύψος 20 m η βροχόπτωση είναι 574 mm. Ο σταθμός της Αγίας Γαλήνης παρουσιάζει πολύ χαμηλή ετήσια βροχόπτωση σε σχέση με άλλους σταθμούς στην Κρήτη και τη χαμηλότερη στο νομό Ρεθύμνου και ο σταθμός στο Γερακάρι παρουσιάζει τη 2^η υψηλότερη μέση ετήσια βροχόπτωση στο νομό Ρεθύμνου (Donta and Lange, 2006).

Η μέση ετήσια βροχόπτωση για τη λεκάνη του Πλατύ φαίνεται στην εικόνα 6.3.



Εικόνα 6.3: Μέση ετήσια βροχόπτωση στη λεκάνη του Πλατύ (Donta and Lange, 2006)

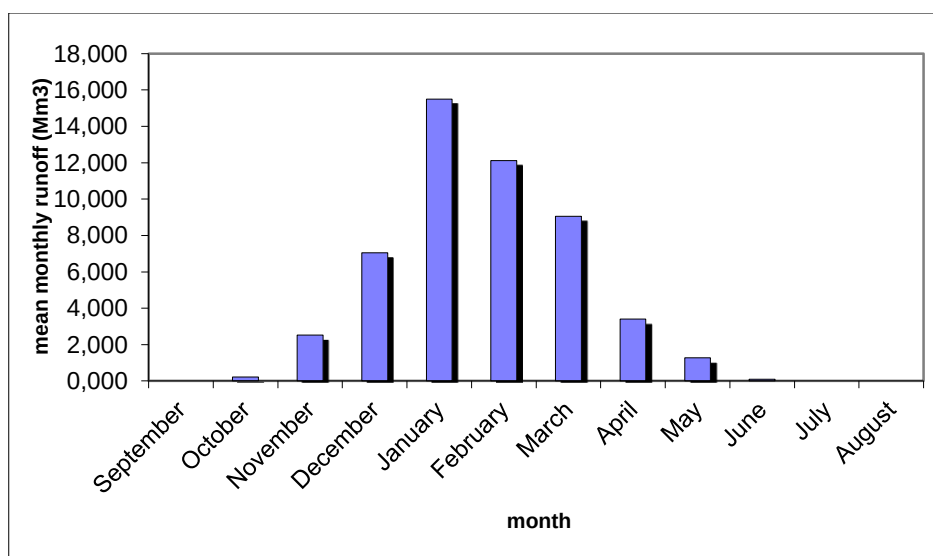
Όπως φαίνεται στην εικόνα η ξηρότερη χρονιά ήταν το υδρολογικό έτος 1989-1990 και το υγρότερο υδρολογικό έτος ήταν το 1977-1978. Το σχήμα απεικονίζει την εποχιακή διακύμανση της βροχόπτωσης στη λεκάνη. Περίπου το 40% της ετήσιας βροχόπτωσης εμφανίζεται τον Δεκέμβριο έως τον Ιανουάριο. Ο Δεκέμβριος δείχνει να είναι ο υγρότερος μήνας ενώ ο Ιούλιος και ο Αύγουστος οι ξηρότεροι μήνες. Η υγρή περίοδος ξεκινάει από τον Οκτώβρη ή το Νοέμβρη έως το Μάρτη και η ξηρή περίοδος εκτείνεται από τον Μάιο έως το Σεπτέμβριο.

6.2.1 Επιφανειακά νερά

Το υδατικό ισοζύγιο της περιοχής σχετίζεται με τις βροχοπτώσεις, τις απώλειες εξάτμισης και εξατμισοδιαπνοής, την επιφανειακή απορροή, τη διήθηση και την υπόγεια κίνηση του νερού (τροφοδοσία υπόγειων υδροφόρων στρωμάτων από τα νερά του Πλατύ, και των διηθούμενων κατακρημνισμάτων).

Εξάτμιση και εξατμισοδιαπνοή: Τόσο η εξάτμιση του νερού από υδάτινες επιφάνειες ή και από γυμνό έδαφος όσο και η εξατμισοδιαπνοή από καλλιεργούμενο ή καλυμμένο με φυτική βλάστηση έδαφος αποτελούν φυσικές διεργασίες που εξαρτώνται από κλιματικούς (θερμοκρασία αέρα, υγρασία αέρα, ατμοσφαιρική πίεση, ηλιακή ακτινοβολία, ηλιοφάνεια, ταχύτητα ανέμου), εδαφικούς (εδαφική υγρασία, μηχανική σύσταση) και φυτικούς παράγοντες (είδος καλλιέργειας, στάδιο ανάπτυξης). Η χρήση όλων των παραπάνω παραμέτρων μπορεί να δώσει αρκετά αξιόπιστες εκτιμήσεις της εξάτμισης και εξατμισοδιαπνοής όπως οι τροποποιημένες εξισώσεις Penman και Penman – Monteith (Doorenbos and Pruitt, 1977).

Ο Πλατύς ποταμός είναι το κύριο υδατόρευμα της λεκάνης και η εκβολή του βρίσκεται στη νότια ακτή της περιοχής της Αγίας Γαλήνης. Ένας σημαντικός παραπόταμος του Πλατύ είναι ο Λιγιότης. Ο Πλατύς παρουσιάζει μέση ετήσια απορροή 50.7 Mm³. Η μέση μηνιαία απορροή του Πλατύ απεικονίζεται στην Εικόνα 6.4.



Εικόνα 6.4: Μέση μηνιαία απορροή του ποταμού Πλατύ (Donta and Lange, 2006))

Όπως φαίνεται στην εικόνα 6.4 η υψηλότερη τιμή μηνιαίας απορροής παρατηρείται τον Ιανουάριο και το Φεβρουάριο. ενώ χαμηλές τιμές η καθόλου ροή παρατηρούνται από τον Ιούνιο έως τον Οκτώβριο. Ο ποταμός ήταν ξηρός για όλα τα υδρολογικά έτη τον Ιούλιο, Αύγουστο, Σεπτέμβρη και Οκτώβρη το 1969, 1971, 1973 και το 1988. Για πολλά υδρολογικά έτη δεν παρατήθηκε ροή τον Ιούνιο και ακόμα και τον Νοέμβρη.

6.2.2 Υπόγεια νερά

Η κύρια πηγή του αρδευτικού νερού στην κοιλάδα είναι τα υπόγεια νερά. Συστήματα άρδευσης με σταγόνες χρησιμοποιούνται για τους ελαιώνες cv Κορωνέικη. Η cv θρουμπουλιά δεν είναι αρδευόμενη. Τα αμπέλια επίσης δεν είναι αρδευόμενα . Περίπου 20 γεωτρήσεις έχουν καταγραφεί στην περιοχή. Οι περισσότερες χρησιμοποιούνται για υδρευτικούς και αρδευτικούς σκοπούς, ενώ κάποιες χρησιμοποιούνται για έρευνα, ενώ κάποιες άλλες είτε δεν χρησιμοποιούνται είτε έχουν καταστραφεί. Εκτιμάται ότι δεν αντλείται μεγάλη ποσότητα υπόγειου νερού από τον υδροφορέα (Donta and Lange, 2006).

6.3 Γεωργική κατάσταση

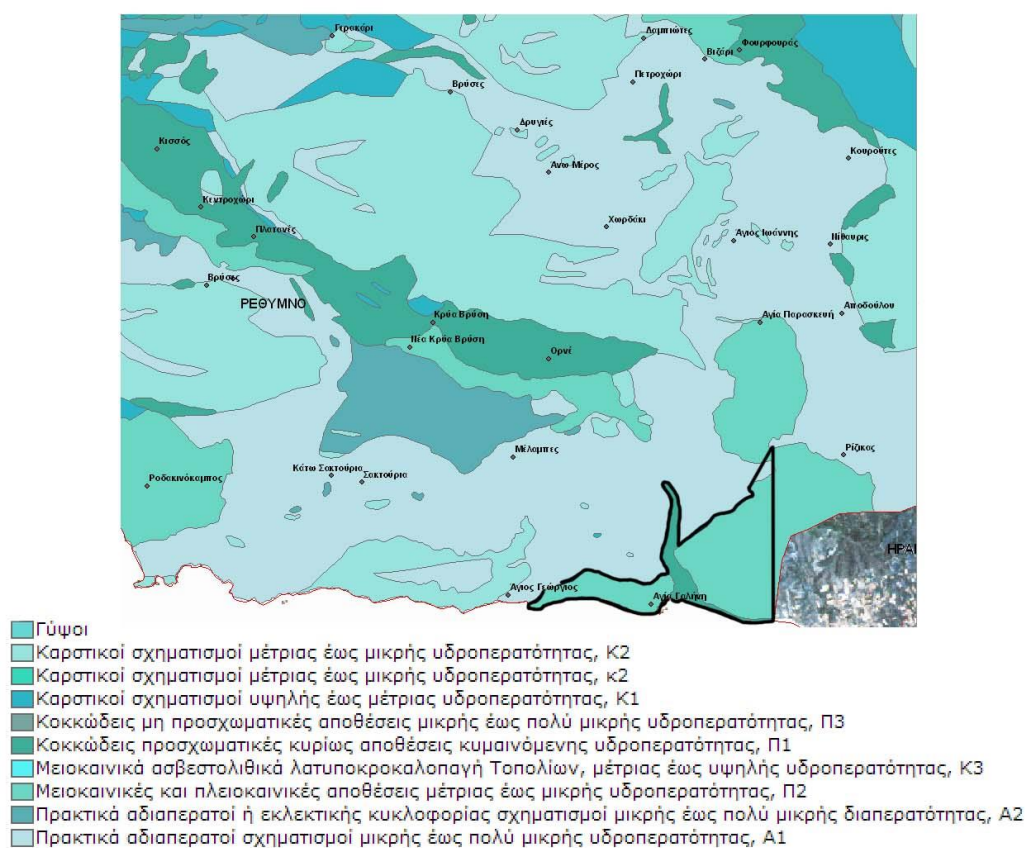
Περίπου το 80% της λεκάνης καλλιεργείται. Το 75% των καλλιεργειών είναι ελιές (80% cv Throumbolia, 15% cv Koroneiki, 3-4% cv Mastoidis), 15% είναι αμπέλια (cv Vidiano), και 5% είναι θερμοκήπια και άλλες καλλιέργειες.

Διάφορες μορφές αζωτούχων λιπασμάτων χρησιμοποιούνται εμπειρικά χωρίς ανάλυση για τις διατροφικές ανάγκες των καλλιεργειών (περίπου 4 kg ανα δέντρο για τους ελαιώνες). Η καταπολέμηση των ζιζανίων γίνεται κυρίως με ζιζανιοκτόνα (80%) και το όργωμα χρησιμοποιείται μόνο στην cv Κορωνέικη (Donta and Lange, 2006).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 - ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΝΙΤΡΙΚΩΝ ΣΤΟΝ ΥΠΟΓΕΙΟ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ

7.1 Μοντελοποίηση της ροής του υπόγειου υδροφορέα

Μετά την εξέταση των υδρογεωλογικών παραμέτρων της περιοχής διαπιστώθηκε πως κατάντη του φράγματος του Αμαρίου η υπόγεια ροή διακόπτεται από αδιαπέρατους γεωλογικούς σχηματισμούς. Υπόγεια ροή παρατηρούμε πως δημιουργείται στα τελευταία 3 χιλιόμετρα ροής του Πλατύ ποταμού προς την θάλασσα, κυρίως λόγω ύπαρξης αλλουβιακών αποθέσεων. Το πρόγραμμα Argus ONE πρόκειται να εφαρμοστεί στην περιοχή της Αγίας Γαλήνης η οποία απεικονίζεται μέσω του υδρολιθολογικού χάρτη στην εικόνα 7.1.



Εικόνα 7.1: Η περιοχή μελέτης (<http://emeric.ims.forth.gr/>)

Αρχικά, μετά την έναρξη του προγράμματος Argus ONE επιλέγουμε από το φάκελο “PIEs” το “New PTC project”. Έτσι, εμφανίζεται το παράθυρο PTC Configuration του σχήματος στο οποίο γίνεται η εισαγωγή κάποιων γενικών στοιχείων όπως:

1. το θέμα της εργασίας, που είναι ο Πλάτυς ποταμός της Αγίας Γαλήνης.
2. ο τύπος του πλέγματος που θα χρησιμοποιηθεί και ο οποίος θα είναι τριγωνικός, αφού είναι πιο αξιόπιστος
3. ο συντελεστής μοριακής διάχυσης, ίσος με 0,0001
4. ο συντελεστής βάρους, ίσος με 1
5. το κριτήριο επίτευξης συνθήκης σταθερής ροής σύμφωνα με το οποίο, η διαφορά των διαδοχικών χρονικών βημάτων ροής να είναι μικρότερη ή ίση με 0,01.

Τα βήματα φαίνονται στην εικόνα 7.2:

PTC Configuration

General | Stresses

Project title:

Mesh type

☒ Triangular
☐ Quadrilateral

Physical properties

Molecular diffusion:
Upstream weight:

Steady state criterion:

☒ Use water table

Number of iterations for watertable:
Convergence criterion:

Number of layers:

Layer number
1

Output Control

☒ Echo nodal coordinates
☐ Echo interface elevations
☒ Echo boundary conditions
☒ Echo material properties
☐ Echo incidence list
☐ Echo infiltration flux
☐ Echo initial heads
☐ Echo initial concentrations

Εικόνα 7.2: Εισαγωγή γενικών στοιχείων

Ακόμη επιλέγεται η χρήση του “water table” αφού στην περιοχή μελέτης ο υδροφορέας θεωρούμε ότι είναι ελεύθερος και εισάγεται:

1. ο αριθμός των επαναλήψεων για τον υδροφόρο ορίζοντα, ίσος με 50
2. το κριτήριο σύγκλισης για αυτές τις επαναλήψεις, ίσο με 0,01

Επίσης, είναι απαραίτητο να καθοριστεί ο αριθμός των εδαφικών στρωμάτων που θα χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο κι έτσι, επιλέγεται ένα στρώμα, αφού το μοντέλο πρόκειται να προσομοιώσει τον ανώτερο υδροφόρα.

Ανοίγοντας το φάκελο “Stresses” καθορίζεται ο αριθμός και οι τιμές των παραμέτρων που μεταβάλλονται με τη φόρτιση. Στο σύνολο “General control” υποδεικνύεται αν το μοντέλο πρόκειται να προσομοιώσει μόνο τη ροή, επιλέγοντας το “Do flow” ή τη ροή και τη μεταφορά, σημειώνοντας και το “Do transport”. Επιπλέον, αν απαιτούνται και υπολογισμοί της ταχύτητας σημειώνεται και το “Do velocity”. Η επιλογή “Use memory” θα πρέπει πάντα να είναι επιλεγμένη ενώ προαιρετικό είναι το ισοζύγιο μάζας και μπορεί να ενεργοποιηθεί σημειώνοντας το “Do mass balance”. Πάντως επειδή η παρούσα έκδοση του PTC συμπεριλαμβάνει τη σύνταξη ενός ισοζυγίου μάζας γι’ αυτό, θα πρέπει να επιλέγεται.

Στην πρώτη φάση εφαρμογής του μοντέλου ελέγχεται η ροή (“Do flow”), η ταχύτητα ροής (“Do velocity”), το ισοζύγιο μάζας (“Do mass balance”) και η χρήση μνήμης (“Use memory”), όπως φαίνεται στην εικόνα 7.3.

PTC Configuration

General Stresses

Stress	Flow	Velocity	Transport	Length
1	1	1	1	90
2	1	1	1	90
3	1	1	1	90
4	1	1	1	90
5	1	1	1	90
6	1	1	1	90

Insert Modify Delete

General control

- ☒ Do flow
- ☒ Do velocity
- ☐ Do transport
- ☒ Use memory
- ☒ Do mass balance

Time control

Total number of time steps: 100

No. of flow time-steps reset: 20

No. of flow time-steps no-change: 1

No. of conc. time-steps per flow: 2

Time-step multiplier: 1

Total time: 90

Graphs control

Time step of first flow output: 200

Output period flow: 200

Time step of first conc. output: 200

Output period conc.: 200

Number of stress periods: 20

Total simulation time: 1800

Graphics filenames for heads: heads

Graphics filenames for concentrations: concs

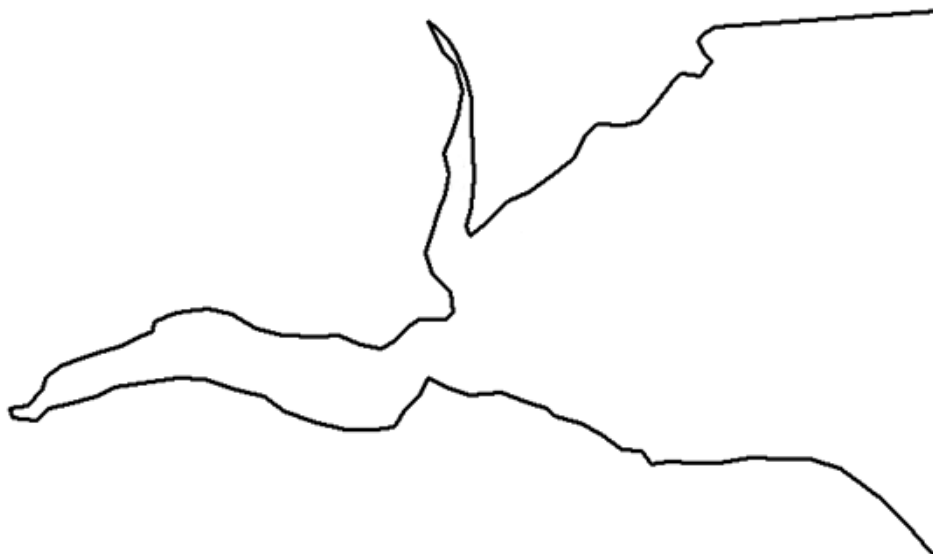
OK Cancel

Εικόνα 7.3: Εισαγωγή στοιχείων φόρτισης

Στο σύνολο “Time control” καθορίζεται ο συνολικός αριθμός των χρονικών βημάτων, ίσος με 100 (“Total number of time steps”), ο αριθμός των χρονικών βημάτων ροής πέρα από τον οποίο γίνεται επαναρίθμηση του μοντέλου, ίσος με 20 (“No. of flow time-steps reset”), ο αριθμός των χρονικών βημάτων ροής πέρα από τον οποίο δεν υπάρχει αλλαγή – λόγω του πολλαπλασιαστή = 1 – (“No. of flow time-steps no-change”). Ακόμη, προσδιορίζεται ο αριθμός των χρονικών βημάτων συγκέντρωσης μέσα σε ένα χρονικό βήμα ροής, ίσος με 2 (“No. of conc. time-steps per flow”), ο πολλαπλασιαστής για κάθε χρονικό βήμα, ίσος με 1 (“Time-step multiplier”) και τέλος το συνολικό χρονικό διάστημα μελέτης που θα είναι 90 μέρες (“Total time”).

Το διάστημα αυτό αντιπροσωπεύει 3 μηνιαίες περιόδους που διαρκούν από τον Απρίλιο μέχρι τον Ιούλιο, από τον Ιούλιο μέχρι τον Οκτώβριο, από τον Οκτώβριο μέχρι τον Φεβρουάριο και από τον Φεβρουάριο μέχρι τον Απρίλιο και για την οποία θα γίνει η μοντελοποίηση της ροής του υπόγειου υδροφορέα.

Κατόπιν, έγινε εισαγωγή του χάρτη της περιοχής μελέτης στο πρόγραμμα. Στο πρόγραμμα του “Argus ONE” δεν υπάρχει δυνατότητα ρύθμισης των μονάδων των διαφόρων μεγεθών με κάποια εντολή, έτσι γίνεται μια “συμφωνία” όπου θα χρησιμοποιούνται οι ίδιες μονάδες σε όλη τη διάρκεια του προγράμματος – το μήκος θα δίνεται σε μέτρα (m) και ο χρόνος σε μέρες (d). Στη συνέχεια, σχεδιάστηκε η περίμετρος της περιοχής μελέτης όπως φαίνεται στην εικόνα 7.4.



Εικόνα 7.4: Σχεδίαση της περιμέτρου της περιοχής μελέτης

Στη συνέχεια, περιγράφονται οι οριακές συνθήκες ροής της περιοχής μελέτης. Η τροφοδοσία του υδροφόρου συστήματος γίνεται μέσω των πλευρικών υπόγειων εισροών από τα ανατολικά όρια του ομοιώματος.

Η επιλογή των κατάλληλων οριακών συνθηκών του μοντέλου αποτελεί ένα σημαντικό στοιχείο για την επιτυχή προσομοίωση του υπό μελέτη συστήματος. Οι συνθήκες αυτές περιγράφουν την υδραυλική επικοινωνία του υπό μελέτη συστήματος με τον περιβάλλοντα υδρογεωλογικό χώρο. Έτσι, ορίστηκαν οι ακόλουθες:

1. Συνθήκες σταθερού υδραυλικού φορτίου (1^{ου} είδους):

Η οριακή συνθήκη σταθερού υδραυλικού φορτίου προϋποθέτει την ύπαρξη απεριόριστης ποσότητας νερού. Τέτοιες συνθήκες στην περιοχή μελέτης συναντώνται μόνο στο νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης, που βρέχεται από τη θάλασσα, κατά μήκος της ακτογραμμής. Λαμβάνοντας ως στάθμη αναφοράς τον πυθμένα του υδροφόρου ορίζοντα, που βρίσκεται 70 m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, το υδραυλικό φορτίο που έχει οριστεί είναι 70 m ώστε να ταυτίζεται με τη μέση ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας. Μόλις σχηματιστεί η περιοχή στην οποία πρόκειται να οριστεί οριακή συνθήκη πρώτου είδους εμφανίζεται ένα παράθυρο στο οποίο ορίζεται ο τύπος της οριακής συνθήκης καθώς και η τιμή φόρτισης.

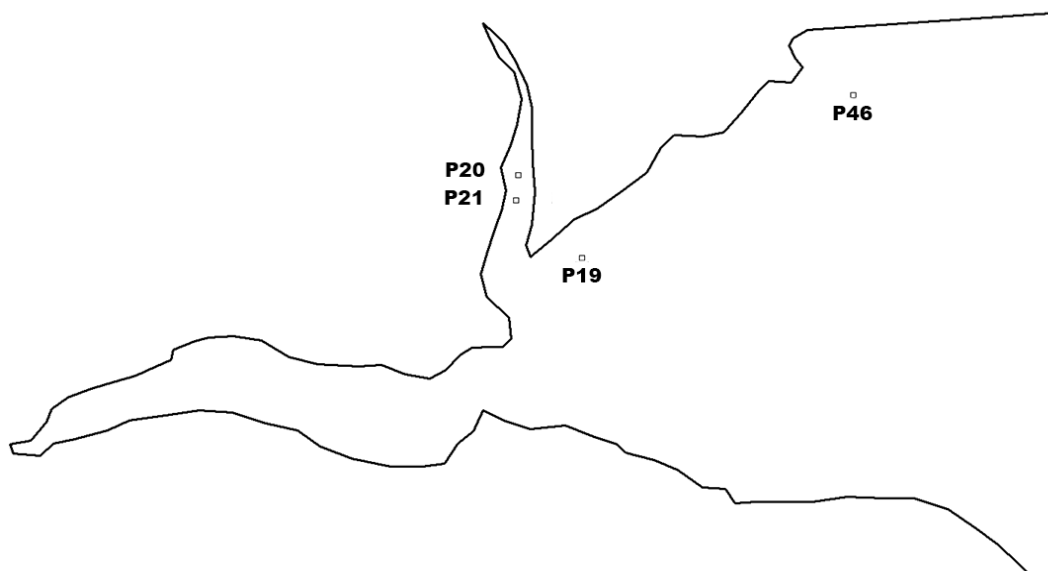
2. Συνθήκες σταθερής ροής (2^{ου} είδους):

Αυτός ο τύπος οριακής συνθήκης πλεονεκτεί έναντι των υπολοίπων συνθηκών αφού δεν προκαλεί αλλοιώσεις στο σύστημα υπόγειας ροής που προσομοιώνεται. Στο μοντέλο αυτό η 1η οριακή συνθήκη σταθερής ροής εφαρμόζεται στο βορειοανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης για την προσομοίωση των πλευρικών εισροών στο υδροφόρο σύστημα από τους παρακείμενους γεωλογικούς σχηματισμούς. Με τον ίδιο τρόπο που καθορίστηκαν οι τιμές οριακών συνθηκών του πρώτου είδους, ορίζονται και οι τιμές του δεύτερου είδους που είναι $39 \text{ m}^3/\text{d}$ για το πρώτο 6μηνο και $41 \text{ m}^3/\text{d}$ για το 2^ο εξάμηνο. Για την εισαγωγή των πηγαδιών άντλησης χρησιμοποιήθηκε δευτέρου είδους οριακή συνθήκη (σταθερής ροής) και συμπληρώθηκαν οι τιμές άντλησής τους όπως φαίνεται στον πίνακα 7.1:

Πίνακας 7.1: Ρυθμοί άντλησης πηγαδιών

Πηγάδια	1^ο εξάμηνο	2^ο εξάμηνο
	Ρυθμός άντλησης (m³/d)	Ρυθμός άντλησης (m³/d)
P19	0	171
P20	0	48
P21	0	20
P46	0	340

Στην εικόνα 7.5 φαίνονται η τοποθέτηση των πηγαδιών στο περίγραμμα της περιοχής:



Εικόνα 7.5: Η θέση των πηγαδιών άντλησης

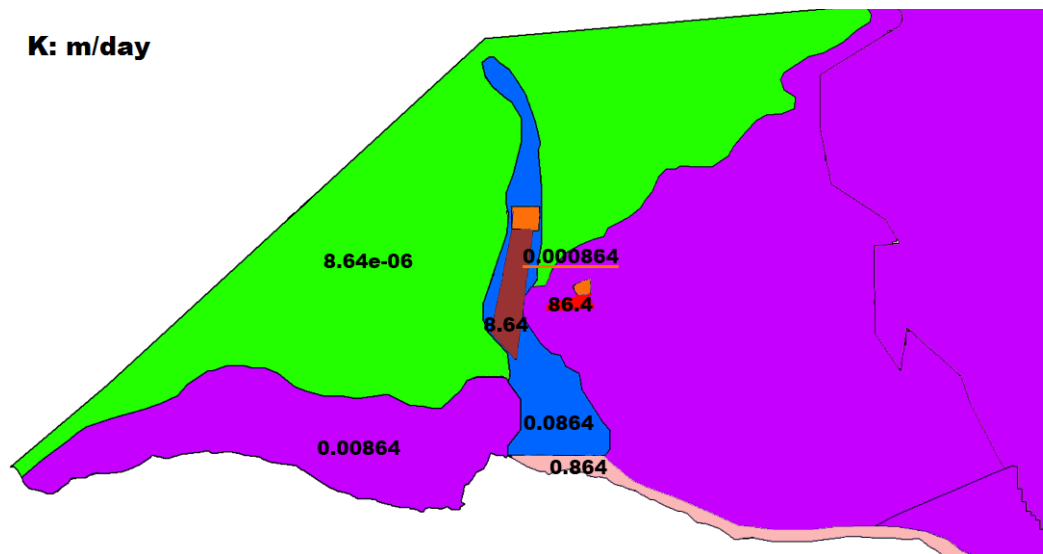
Για την επίλυση του μοντέλου υπόγειας ροής απαιτείται ο ορισμός της κατανομής της υδραυλικής αγωγιμότητας K . Αρχικά σχηματίζονται οι ζώνες της υδραυλικής αγωγιμότητας, καθώς στην περιοχή συναντάμε τον σχηματισμό της Παντανάσσας αποτελούμενη κυρίως από κροκαλοπαγή, ψαμμίτες και άμμο, παράκτιες αποθέσεις αποτελούμενες από άμμο και κροκάλες τοπικής προελεύσεως, πρόσφατες αλλουβιακές αποθέσεις αποτελούμενες από άμμο και ασύνδετα κροκαλοπαγή και τέλος απο

φλύσχη αποτελούμενο από ψαμμιτο-ιλυολιθικούς σχηματισμούς. Οι υψηλότερες τιμές έχουν κατανεμηθεί στις ανάντη περιοχές του συστήματος και προοδευτικά μειώνονται προς την παράκτια ζώνη. Τελικά, η περιοχή διαιρείται σε 7 ζώνες όπου η υδραυλική αγωγιμότητα μεταβάλλεται από $8,64 \cdot 10^{-6}$ – $86,4$ m/d. Οι τιμές αυτές είναι ενδεικτικές των σχηματισμών της περιοχής σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Freeze and Cherry, 1979). Στον πίνακα 7.2 φαίνεται συνοπτικά η γεωλογική σύσταση της περιοχής:

Πίνακας 7.2: Γεωλογική Δομή της υπό εξέταση περιοχής

Σχηματισμός	Σύσταση	Υδραυλική αγωγιμότητα (Κ σε m/day)
Σχηματισμός Παντάνασσας	Κροκαλοπαγή Ψαμμίτες Άμμος	0.00864
Παράκτιες αποθέσεις	Άμμος Κροκάλες τοπικής προέλευσης	0.864
Πρόσφατες αλλουβιακές αποθέσεις	Άμμος Ασύνδετα κροκαλοπαγή	0.0864
Φλύσχης	Ψαμμιτο-ιλυολιθικοί σχηματισμοί	8.64×10^{-6}

Στην εικόνα 7.6, φαίνεται ο σχηματισμός των ζωνών υδραυλικής αγωγιμότητας.



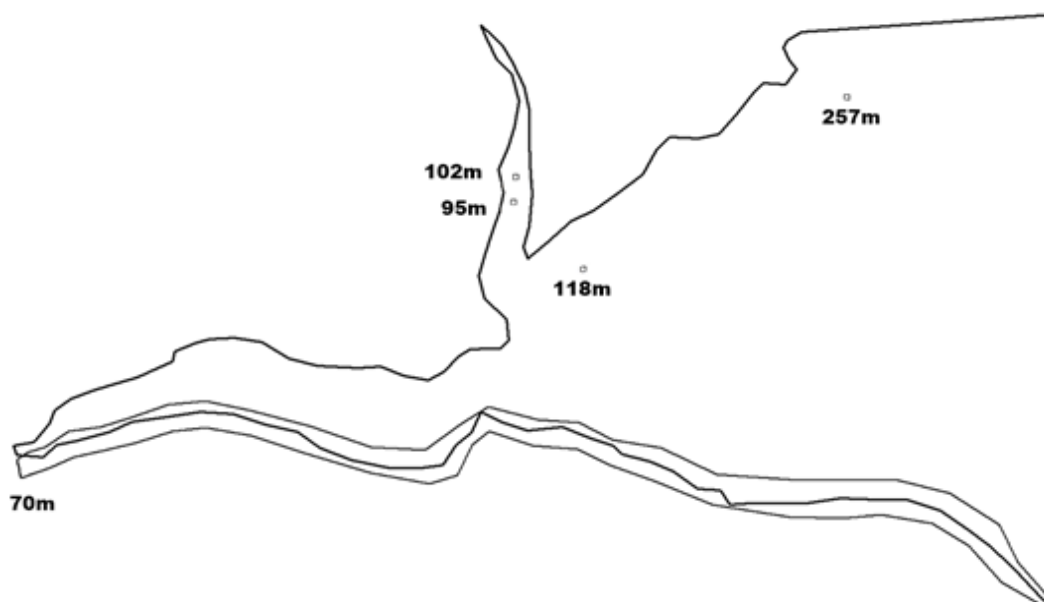
Εικόνα 7.6: Ζώνες υδραυλικής αγωγιμότητας (m/d)

Στη συνέχεια, εισάγονται στο μοντέλο οι τιμές των αρχικών υδραυλικών υψών που προέρχονται από μετρήσεις που διεξήχθησαν από το Υπουργείο Γεωργίας το 2006 στον πίνακα 7.3:

Πίνακας 7.3: Αρχικά υδραυλικά ύψη τον Οκτώβριο του 2006

Γεώτρηση	P19	P20	P21	P46
Αρχικό υδραυλικό ύψος (m)	48	32	25	187
Αρχικό υδραυλικό ύψος + 70 (m)	118	102	95	257

Στην εικόνα 7.7 απεικονίζονται τα αρχικά υδραυλικά ύψη:

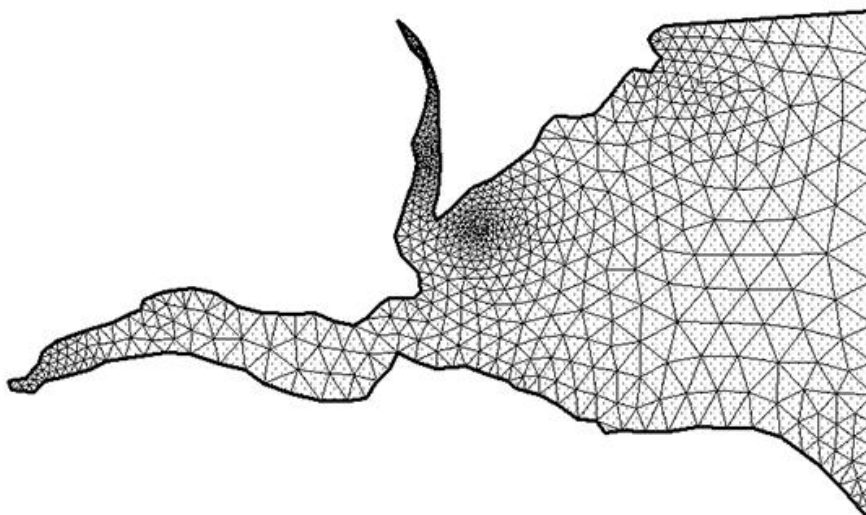


Εικόνα 7.7: Εισαγωγή αρχικών υδραυλικών υψών

Ακόμη, στο πρόγραμμα, εισήχθησαν οι υψομετρικές τιμές της περιοχής με βάση τον τοπογραφικό χάρτη. Στη συνέχεια, για την προσομοίωση της περιοχής εφαρμόστηκε η μέθοδος Interpolation κάνοντας γραμμική παρεμβολή μεταξύ των σημείων αυτών και υπολογίζοντας το υψόμετρο σε όλους τους κόμβους της περιοχής μελέτης.

Επίσης, στο πεδίο της βροχόπτωσης εισάγεται η ποσότητα του νερού που τελικά διηθείται και η οποία θεωρείται ότι είναι 0.00018375 m/d, για το πρώτο εξάμηνο και 0.00007875 m/d για το 2^ο εξάμηνο με βάση το συντελεστή κατείσδυσης που θεωρήθηκε ίσος με 30% και τα βροχομετρικά στοιχεία που συγκεντρώθηκαν για την περιοχή.

Μετά την εισαγωγή όλων των δεδομένων που είναι απαραίτητα για την εκτέλεση του μοντέλου, δημιουργείται το πλέγμα που φαίνεται στην εικόνα 7.8. Το πλέγμα που δημιουργήθηκε είναι πυκνότερο γύρω από τα πηγάδια άντλησης, για να επιτευχθεί ακριβέστερη επίλυση των εξισώσεων στις περιοχές αυτές και αποτελείται από 762 κόμβους και 1282 στοιχεία.



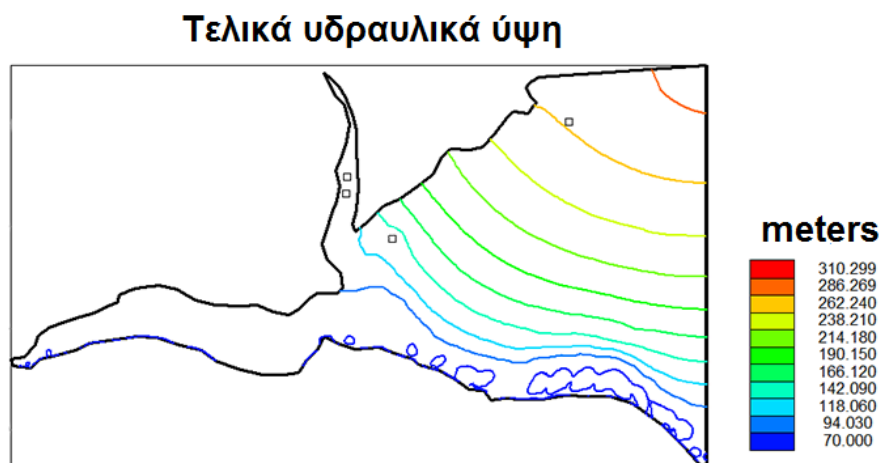
Εικόνα 7.8: Δημιουργία τριγωνικού πλέγματος

Πριν τη διαδικασία της προσομοίωσης χρειάστηκε να βαθμονομηθεί το μοντέλο ώστε να ελαχιστοποιηθεί η απόκλιση μεταξύ των τιμών των υδραυλικών υψών που χρησιμοποιήθηκαν από το Υπουργείο Γεωργίας και των τιμών που εμφανίστηκαν κατά την προσομοίωση του μοντέλου. Κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης έγιναν αλλαγές κυρίως στις τιμές άντλησης των πηγαδιών και δημιουργήθηκαν ζώνες διαφορετικής υδραυλικής αγωγιμότητας εντός γεωλογικών σχηματισμών. Η τελική απόκλιση αναφορικά με τις τελικές τιμές των υδραυλικών υψών δεν ξεπέρασε το 1%. Οι τιμές που μοντελοποιήθηκαν φαίνονται στον πίνακα 7.4:

Πίνακας 7.4: Τελικά υδραυλικά ύψη κατά τη βαθμονόμηση Απρίλιος 2007

Υψόμετρο (m)	Γεώτρηση	Βαθμονομημένο υδραυλικό ύψος (m)	Μετρημένο υδραυλικό ύψος (m)	Διαφορά (m)
60	P19	124.01	124	0.01
44	P20	109.79	109	0.79
39	P21	101.96	102	0.04
206	P46	263.99	264	0.01

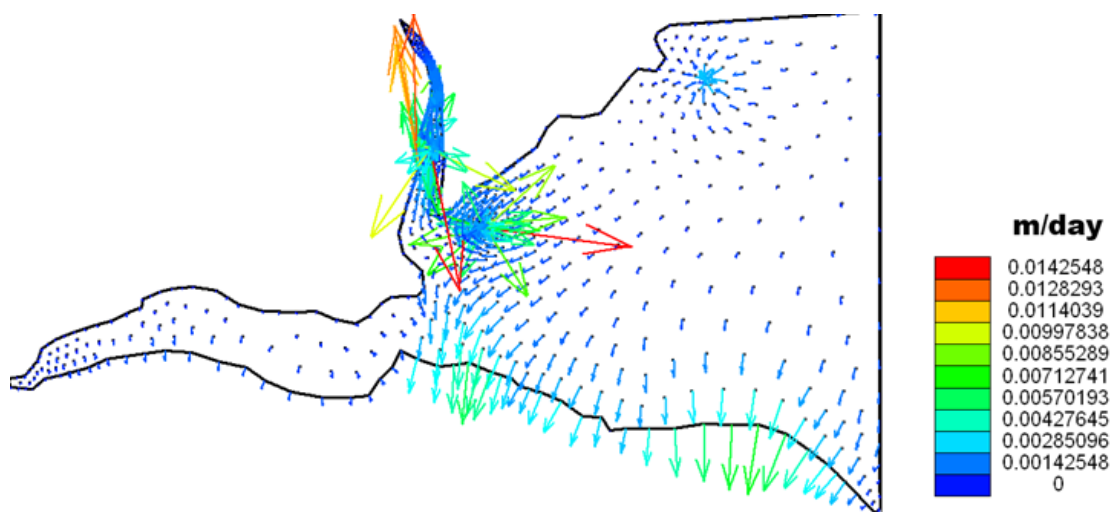
Μετά την εκτέλεση της προσομοίωσης, είναι δυνατή η γραφική απεικόνιση των τελικών υδραυλικών υψών καθώς και των ταχυτήτων της ροής. Έτσι, προκύπτει το γράφημα της εικόνας 7.9 στο οποίο παρουσιάζονται τα τελικά υδραυλικά ύψη:



Εικόνα 7.9: Τελικά υδραυλικά ύψη μετά από 6 μήνες

Όπως παρατηρούμε στο βορειανατολικό τμήμα της περιοχής πλησίον της γεώτρησης P46 τα υδραυλικά φορτία είναι υψηλότερα από την μέση στάθμη της θάλασσας. Αυτό οφείλεται στον χαμηλό ρυθμό αντλήσεων στην περιοχή. Επίσης στο νότιο-νοτιοδυτικό τμήμα της περιοχής παρατηρούμε ότι τα υδραυλικά φορτία ξεπερνούν την μέση στάθμη της θάλασσας κατά αρκετά μέτρα δημιουργώντας έτσι συνθήκες προστασίας του υπόγειου νερού από την υφαλμύριση.

Στη συνέχεια ακολούθησε η αναπαράσταση της ταχύτητας ροής του υπόγειου νερού εικόνα 7.10.



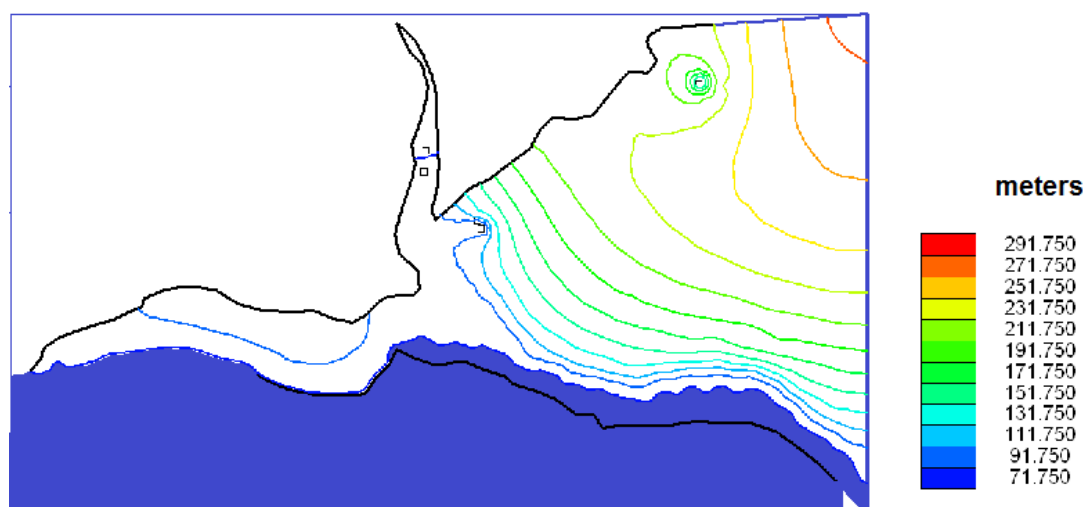
Εικόνα 7.10: Ταχύτητες ροής υπόγειων υδάτων

Οι μεγαλύτερες ταχύτητες παρατηρούνται στο κεντρικό και στο νότιο τμήμα της περιοχής εξαιτίας της ύπαρξης ζωνών διαφορετικής υδραυλικής αγωγιμότητας στο ίδιο εδαφικό στρώμα. Στα υπόλοιπα τμήματα οι ταχύτητες ροής είναι σχετικά μικρές.

Για να αναπαρασταθεί γραφικά η περιοχή που παρουσιάζει πρόβλημα υφαλμύρισης, χρησιμοποιούμε το πάχος του υδροφόρου στρώματος (70m) στο νότιο όριο που συνορεύει με την θάλασσα από την εξίσωση του Ghyben-Herzberg:

$$z = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h_f = 40h_f, \text{ υπολογίζουμε το } h_f \text{ το οποίο είναι ίσο με } 1.75 \text{ m. Άρα το}$$

ελάχιστο υδραυλικό ύψος που απαιτείται για την αποφυγή υφαλμύρισης είναι 71.75 m. Τελικώς ακολουθεί το γράφημα της περιοχής που είναι υφαλμυρισμένη στην εικόνα 7.11:

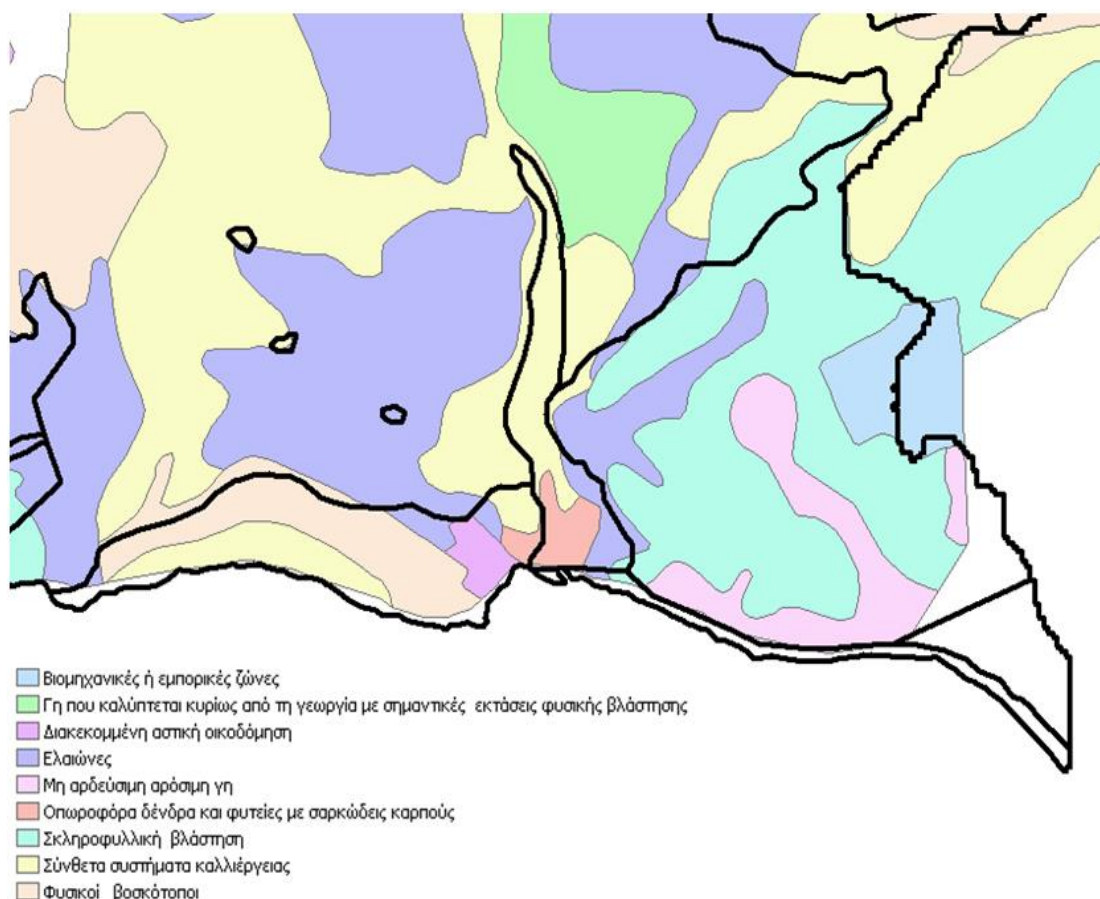


Εικόνα 7.11: Υφαλμυρισμένη περιοχή

7.2 Μοντελοποίηση της μεταφοράς των νιτρικών στον υπόγειο υδροφόρα

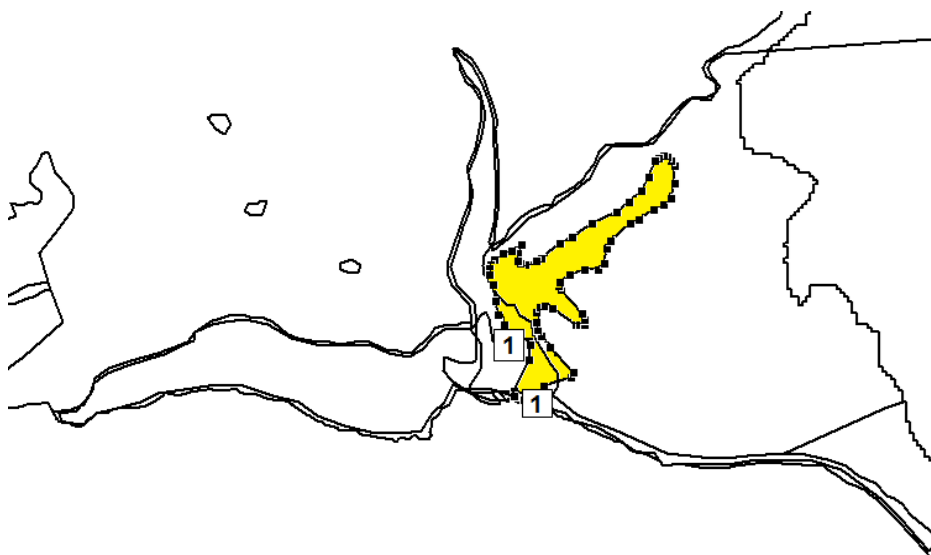
Για την εισαγωγή των δεδομένων που αφορούν τη μεταφορά ρύπων, ενεργοποιείται το παράθυρο PTC Configuration, από το φάκελο “PIEs” επιλέγοντας το “Edit Project Info...”, όπου στο φάκελο “Stresses” σημειώνεται τώρα και η επιλογή “Do transport” ώστε να γίνεται πλέον και ο υπολογισμός της μεταφοράς της μάζας του ρυπαντή.

Ακόμα για την εισαγωγή των δεδομένων που αφορούν τη μεταφορά ρύπων ήταν απαραίτητη η μελέτη της χρήσεων της γης της περιοχής της Αγίας Γαλήνης. Στο σχήμα φαίνονται αναλυτικά στην περιοχή που θα εφαρμοστεί το μοντέλο μας οι χρήσεις γης, με κύριες γεωργικές δραστηριότητες την καλλιέργεια οπωροφόρων δέντρων και ελαιώνων, όπως φαίνεται στην εικόνα 7.12:



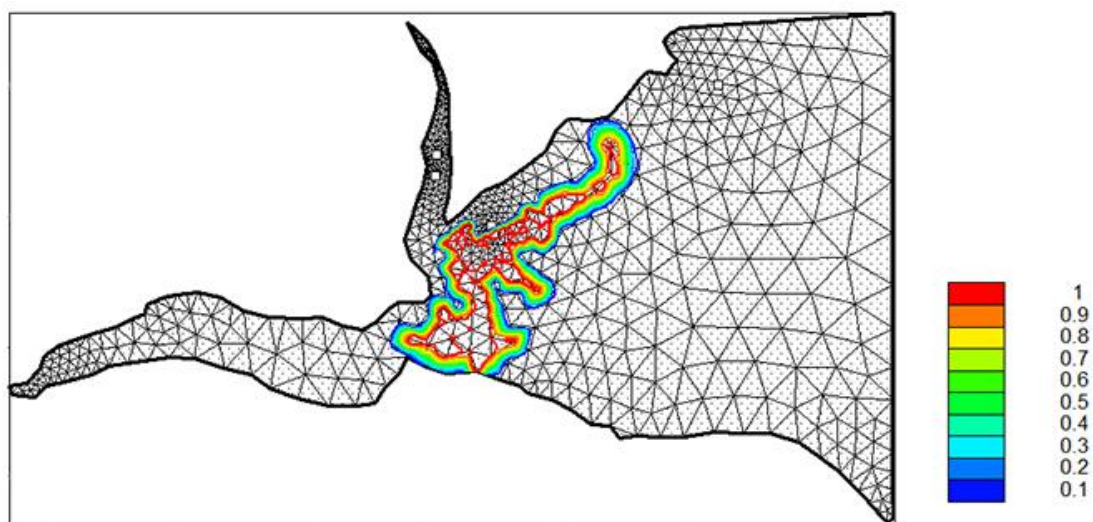
Εικόνα 7.12: Χρήσεις γης στην περιοχή εφαρμογής του μοντέλου

Αρχικά γίνεται ο διαχωρισμός του έτους σε 4 περιόδους, που η κάθε μία διαρκεί 90 μέρες. Η περίοδος λίπανσης για τις καλλιέργειες των ελαιώνων ξεκινάει το Φεβρουάριο ενώ για τις καλλιέργειες των οπωροφόρων δέντρων είναι τον Φεβρουάριο αλλά και τον Ιούλιο, οπότε και εισήχθησαν πηγές ρύπανσης στο μοντέλο κατά τις περιόδους αυτές. Στη συνέχεια εισάγουμε 20 περιόδους που αντιστοιχούν σε ένα 3μηνο το καθένα χρονικά (συνολικά 5 χρόνια) και επιλέχθηκε η τιμή 1 mg/l (normalized concentration) επειδή δεν υπήρχαν στοιχεία για τις συγκεντρώσεις των νιτρικών στην περιοχή από το Υπουργείο Γεωργίας για να παρατηρηθεί πόσο γρήγορα θα εξαπλωθεί η ρύπανση. Επίσης για την περίοδος αυτές, θεωρήθηκε ότι οι τιμές άντλησης των πηγαδιών είναι οι ίδιες με αυτές που ορίστηκαν για τη μοντελοποίηση της ροής ενώ η βροχόπτωση είναι ίδια με τις τιμές της μοντελοποίησης της ροής. Κατόπιν για την εισαγωγή των συγκεντρώσεων των νιτρικών ορίστηκαν οριακές συνθήκες τύπου 1, όπως φαίνεται στην εικόνα 7.13:

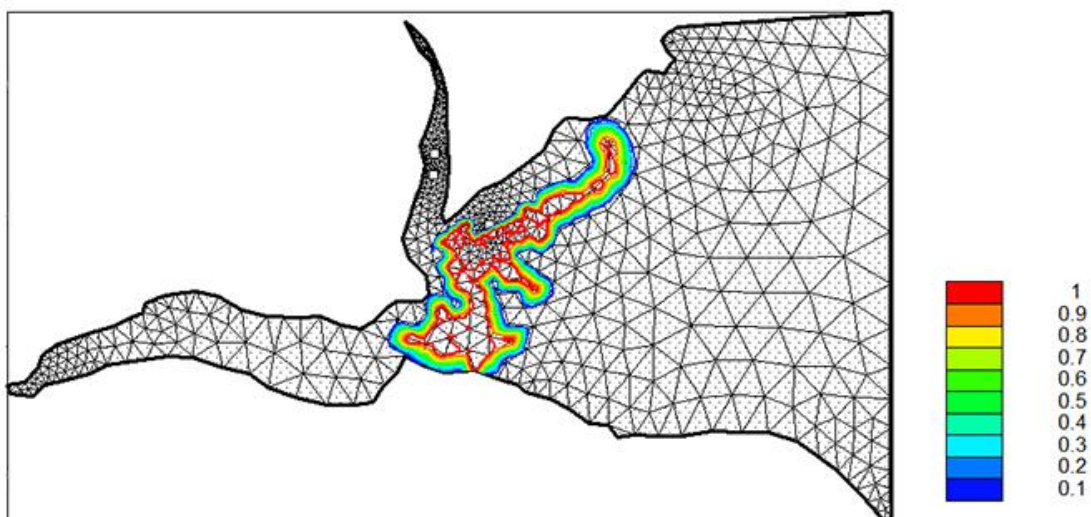


Εικόνα 7.14: Καθορισμός των οριακών συνθηκών μεταφοράς στην περιοχή μελέτης

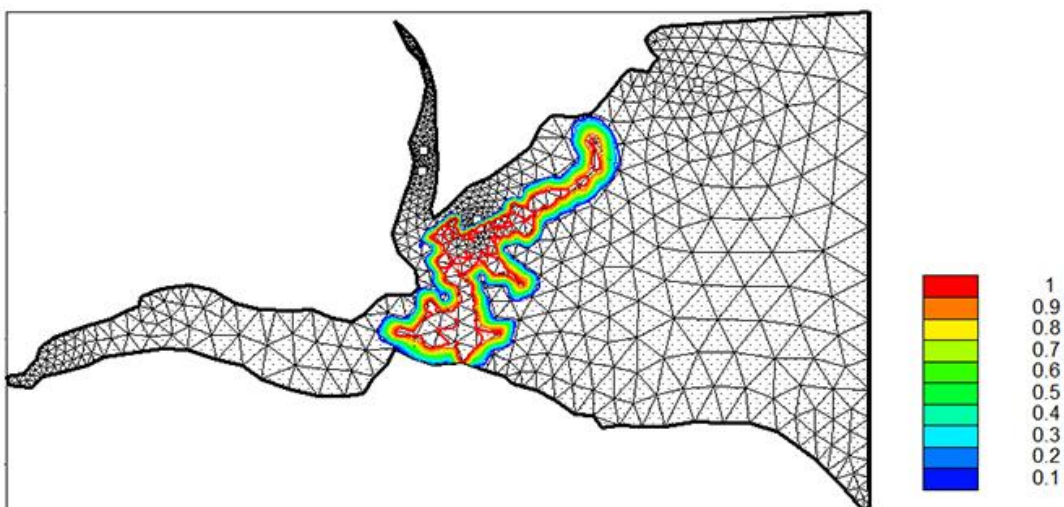
Αφού έχουν εισαχθεί όλα τα δεδομένα, γίνεται επανεκτέλεση του μοντέλου για 20 stresses δηλαδή για 5 χρόνια. Μετά την εκτέλεση του προγράμματος, παρουσιάζονται με γραφικό τρόπο τα αποτελέσματα των συγκεντρώσεων των νιτρικών μετά από 1, 2, 3, 4 και 5 χρόνια στις εικόνες 7.14, 7.15, 7.16, 7.17, 7.18:



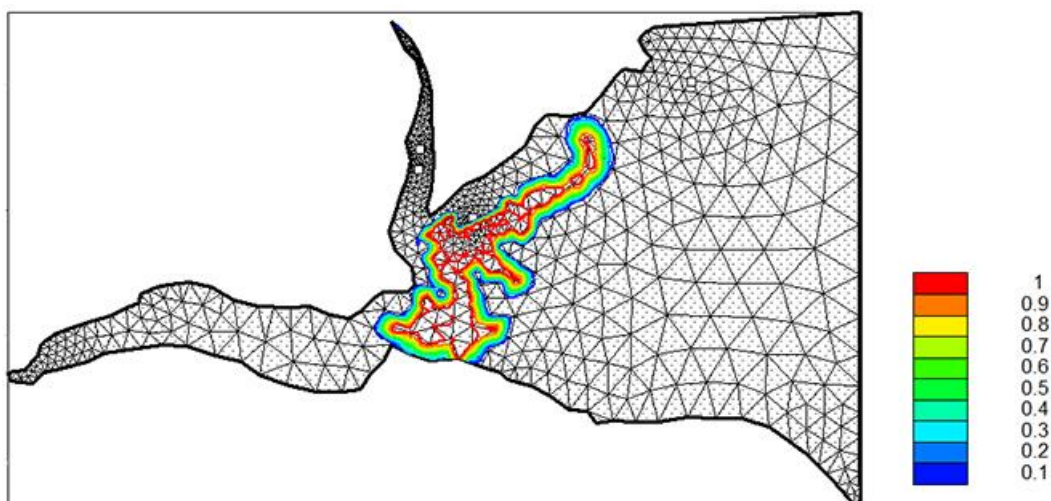
Εικόνα 7.14: Συγκέντρωση νιτρικών στην περιοχή μετά από 1 χρόνο



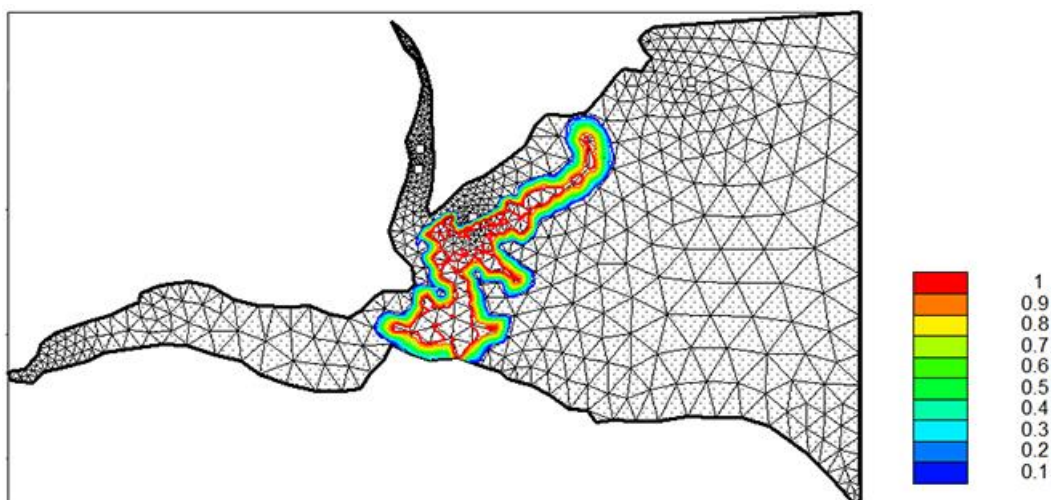
Εικόνα 7.15: Συγκέντρωση νιτρικών στην περιοχή μετά από 2 χρόνια



Εικόνα 7.16: Συγκέντρωση νιτρικών στην περιοχή μετά από 3 χρόνια



Εικόνα 7.17: Συγκέντρωση νιτρικών στην περιοχή μετά από 4 χρόνια



Εικόνα 7.18: Συγκέντρωση νιτρικών στην περιοχή μετά από 5 χρόνια

Παρατηρείται από την εξέλιξη των αποτελεσμάτων πως μολονότι υφίσταται έντονη καλλιεργητική δραστηριότητα στην περιοχή συνεπώς και αυξημένη χρήση λιπασμάτων, από την προσομοίωση της μεταφοράς των νιτρικών για 5 χρόνια δεν προέκυψε έντονο πρόβλημα ρύπανσης του υπόγειου υδροφόρου συστήματος, καθώς οι ρύποι δεν μεταφέρονται με γρήγορους ρυθμούς και η ζώνη ρύπανσης δεν απλώνεται ιδιαίτερα ούτε και μετά από 5 χρόνια λίπανσης . Το γεγονός αυτό οφείλεται στην μικρή υδραυλική αγωγιμότητα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

8.1 Ανακεφαλαίωση και επιμέρους συμπεράσματα

Στο πλαίσιο της εργασίας αυτής μελετήθηκε ο υπόγειος υδροφορέας στην περιοχή της Αγίας Γαλήνης στο νομό Ρεθύμνου και εφαρμόστηκε το πρόγραμμα “Argus ONE” για τη μοντελοποίηση της υπόγειας ροής και της μεταφοράς των νιτρικών.

Μετά την εξέταση των υδρογεωλογικών παραμέτρων της περιοχής διαπιστώθηκε πως κατάντη του φράγματος του Αμαρίου, η υπόγεια ροή διακόπτεται από αδιαπέρατους γεωλογικούς σχηματισμούς. Υπόγεια ροή παρατηρούμε πως δημιουργείται στα τελευταία 3 χιλιόμετρα ροής του Πλατύ ποταμού προς την θάλασσα, κυρίως λόγω ύπαρξης αλλουβιακών αποθέσεων.

Εξετάζοντας τα δεδομένα που προέκυψαν από την προσομοίωση της υπόγειας ροής στην περιοχή, παρατηρούμε πως η στάθμη του υπόγειου υδροφορέα αυξάνεται σημαντικά μετά το πέρας της υγρής περιόδου Οκτώβριος – Απρίλιος. Το γεγονός αυτό, οφείλεται τόσο στις περιορισμένες αντλήσεις που πραγματοποιούνται στην περιοχή, όσο και στην αυξημένη υπόγεια πλευρική εισροή που υπάρχει κάθε υδρολογικό έτος. Στο υπόλοιπο τμήμα της περιοχής μελέτης, η υδραυλική στάθμη είναι μεγαλύτερη από την επιφάνεια της θάλασσας, με εξαίρεση την παράκτια ζώνη όπου η στάθμη του υπόγειου υδροφορέα βρίσκεται στο επίπεδο της επιφάνειας της θάλασσας.

Με την μοντελοποίηση της υπόγειας ροής δόθηκε η δυνατότητα εκτίμησης της ζώνης υφαλμύρισης της περιοχής. Το φαινόμενο δεν είναι έντονο καθώς η θέση του μετώπου της υφαλμύρισης, βρίσκεται σε σχετικά κοντινή απόσταση με την ακτογραμμή και παρατηρείται ότι διατηρείται ικανό υδραυλικό φορτίο και η θαλάσσια διείσδυση εμποδίζεται αποτελεσματικά.

Κατά τη μοντελοποίηση της μεταφοράς νιτρικών ήταν απαραίτητη η μελέτη της χρήσεων της γης της περιοχής της Αγίας Γαλήνης. Από τα υπάρχοντα στοιχεία προέκυψε ότι οι μεγαλύτερες τιμές νιτρικών εμφανίζονται στις ζώνες υδροφορίας οι οποίες παρουσιάζουν μεγάλο βαθμό επικινδυνότητας λόγω των υδρογεωλογικών συνθηκών που επικρατούν. Αυτό οφείλεται στην έντονη καλλιεργητική δραστηριότητα που παρατηρείται στις περιοχές αυτές και ειδικά στις ισχυρές αζωτούχες λιπάνσεις. Μολονότι υφίσταται έντονη καλλιεργητική δραστηριότητα

στην περιοχή με κύριες γεωργικές δραστηριότητες την καλλιέργεια οπωροφόρων δέντρων και ελαιώνων, κάτι που έχει ως συνέπεια την αυξημένη χρήση λιπασμάτων, από την προσομοίωση της μεταφοράς των νιτρικών για 5 χρόνια, δεν προέκυψε έντονο πρόβλημα ρύπανσης του υπόγειου υδροφόρου συστήματος. Αυτό συμβαίνει διότι οι ρύποι αυτοί, δεν μεταφέρονται με γρήγορους ρυθμούς.

Τέλος, στην περίπτωση που στην περιοχή η συγκέντρωση των νιτρικών θα ξεπερνούσε το ανώτατο επιτρεπτό όριο, η ζώνη ρύπανσης θα καταλάμβανε μεγαλύτερη έκταση, γεγονός που θα προκαλούσε σημαντικά προβλήματα στη χρήση του νερού στην περιοχή αλλά και την διατάραξη του οικοσυστήματος, αν λάβει κανείς υπόψη του το μεγάλο πληθυσμό πουλιών και ζώων που φιλοξενούνται στην περιοχή.

8.2 Προτάσεις - Μέτρα

Για την εξασφάλιση της βιωσιμότητας του υπόγειου υδροφόρου συστήματος του Πλατύ ποταμού προτείνονται μέτρα προστασίας υπόγειου υδροφορέα.

Τα μέτρα αυτά, είναι :

- Η οργανωμένη συλλογή αξιόπιστων δεδομένων θα αποτελέσει τη βάση για τη σύνταξη καλύτερων μοντέλων ροής του υπόγειου νερού και μεταφοράς ρύπων.
- Δημιουργία φορέα παρακολούθησης των υδατικών πόρων της περιοχής όπου θα λαμβάνει μετρήσεις στην περιοχή σε τακτά χρονικά διαστήματα για την συστηματική παρακολούθηση των υπόγειων νερών.
- Έλεγχος λειτουργίας δημοτικών και ιδιωτικών γεωτρήσεων.
- Υποκατάσταση χρήσης υπόγειων υδάτων μέσω χρήσης των επιφανειακών υδατικών πόρων όπως για παράδειγμα από το κοντινό φράγμα του Αμαρίου.
- Διατήρηση του ρυθμού αντλήσεων σε σταθερά επίπεδα ετησίως ώστε να μην παρατηρείται ιδιαίτερη πτώση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα με αποτέλεσμα την σταδιακή διεύρυνση του μετώπου της υφαλμύρισης.
- Κατασκευή υπόγειου διαφράγματος συγκράτησης και αποθήκευσης ενός μέρους της υπόγειας ροής.
- Ενημέρωση του κοινού, με αποτέλεσμα την ουσιαστική ευαισθητοποίηση στην χρήση των φυσικών πόρων.

Με την εφαρμογή των παραπάνω μέτρων μπορεί να επιτευχθεί η προστασία των υπόγειων υδάτινων σχηματισμών και η αύξηση των υδάτινων αποθεμάτων. Έτσι θα εξασφαλιστεί η αειφόρος διαχείριση των υπόγειων υδάτινων πόρων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική Βιβλιογραφία:

1. Αινατζή Ο., Πατεράκη Α., Μέθοδοι διαχείρισης ρύπανσης εδαφών, Πτυχιακή εργασία, ΤΕΙ Δυτικής Μακεδονίας, Τμήμα Γεωτεχνολογίας και Περιβάλλοντος, 2010
2. Αραμπατζή Κ., Διερεύνηση χρήσης γενετικών αλγορίθμων με συνδυασμό χρήσης συστήματος πηγαδιών άντλησης για αντιμετώπιση ρύπανσης υπόγειου παράκτιου υδροφορέα, Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Τμήμα Περιβάλλοντος, 2008
3. Βουδούρης Κ., Θαλάσσια διείσδυση σε παράκτια υπόγεια υδατικά συστήματα λόγω υπεράντλησης και η οδηγία 2000/60/ΕΚ, δημοσίευση, Α.Π.Θ, Τμήμα Γεωλογίας, Υδροτεχνικά τόμος 14, 2004
4. Γιαννέλης Γ., Προκαταρκτικό πρόγραμμα βασικών και συμπληρωματικών μέτρων για την προστασία και αποκατάσταση υδατικών συστημάτων, ΥΠΕΚΑ, 2012
5. Καλλέργης Γ., Εφαρμοσμένη – Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία, Έκδοση Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας, 2001.
6. Καραγιάννης Ν., Μαθηματική προσομοίωση υπόγειου υδροφορέα περιοχής Σχινιά Μαραθώνα, Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2003
7. Καρατζάς Γ., Ροή Υπογείων Υδάτων και Μεταφορά Ρύπων, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Πολυτεχνείου Κρήτης, 2002
8. Καρρά Θ., Προσομοίωση παράκτιου υδροφορέα Σαντορίνης με το Seawat, Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π, Τμήμα Τοπογράφων Μηχανικών 2011
9. Καρτεράκης Σ., Διαχείριση των υπογείων υδάτων με χρήση συνδυασμού μεθόδων προσομοίωσης και βελτιστοποίησης, Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, 2005
10. Κοντουδάκης Μ., Μαρκογιαννάκη Ε, Μουσουράκη Α. Groundwater nitrates, Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, 2011
11. ΚΥΑ 16190/1335/25.6.97, 1997
12. ΚΥΑ 19652/1906/5.8, 1999

13. ΚΥΑ 85167/820/6.4, 2000
14. ΚΥΑ 20419/2522/18.9, 2001
15. Λατινόπουλος Π.Δ., Υδραυλική των Υπόγειων Ροών, Διδακτικές σημειώσεις, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 1986.
16. Νάνου- Γιάνναρου Α., Εισαγωγή στα Υπόγεια Νερά, Ε.Μ.Π., Διδακτικές σημειώσεις , 1999
17. Σωτηροπούλου Κ., Προσομοίωση του υπόγειου παράκτιου υδροφορέα της Μεσαρίας στη Σαντορίνη, Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π, Τμήμα Τοπογράφων Μηχανικών, 2010
18. Τάντος Β., Περιβαλλοντική υδρογεωλογική έρευνα του προσχωματικού υδροφόρου της περιοχής Κιάτου – Κορίνθου, Διπλωματική εργασία, Κατασκευή μοντέλου προσομοίωσης της υπόγειας ροής, Πανεπιστήμιο Πατρών, Σχολή Θετικών Επιστημών, 2006
19. Τσελέπη Μ., Προσομοίωση λειτουργίας υδροφορέα υπό συνθήκες κλιματικών αλλαγών, Διπλωματική εργασία, Α.Π.Θ, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2009

Διεθνής Βιβλιογραφία:

20. Donta AA, Lange MA, Water on Mediteranean islands, Book ISSN 1611-4957 ISBN 3-9808840-7-4, 2006
21. Doorenbos and Pruitt, Guidelines for predicting water crop requirements, Irrigation and Drainage Paper 24, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1977
22. Luk and Au-Yeung. Experimental investigation on the chemical reduction of nitrate from groundwater, Advances in Environmental Research, Volume 6 Issue 4, 2002
23. Olivares J.L, Argus ONE-PTC interface, v. 2.2 User's guide
24. Pinder, G. F, "On the Modelling of Groundwater Systems using Geographical Information Systems", September, 2001.
25. Todd D., Groundwater Hydrology, second edition, Wiley, New York, 1980

26. Trichakis, I., & Baltas, E. (2006). The ptc groundwater model for the simulation of the mavrosouvala aquifer in Attica *WSEAS Transactions on Environment and Development*, 2(11), 1422-1426
27. U.S.N.R.C., Groundwater transport (DSM chemical plant in collaboration with TUDelft, Claessens), 1990

Παγκόσμιος Ιστός:

<http://emeric.ims.forth.gr/>

<http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/>

<http://www.usgs.gov/>