

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**



**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Μοντελοποίηση της Υπόγειας Ροής και Μεταφοράς  
Ρύπου στην πεδιάδα των Μοιρών Ηρακλείου με τη  
χρήση του προσομοιωτή Visual MODFLOW**

Μοσχοπούλου Ελένη

**Εξεταστική Επιτροπή**

Καρατζάς Γεώργιος (Επιβλέπων)

Νικολαΐδης Νικόλαος

Βαρουχάκης Εμμανουήλ

Παρανυχιανάκης Νικόλαος

Χανιά, Σεπτέμβριος 2017

## Περίληψη

Τα υπόγεια ύδατα αποτελούν έναν από τους σημαντικότερους πόρους, εξασφαλίζοντας τις ανάγκες των συνεχώς αναπτυσσόμενων περιοχών για την παραγωγή πόσιμου νερού και νερού άλλων χρήσεων. Λόγω της αυξανόμενης ζήτησης, έχει παρατηρηθεί η ποσοτική και ποιοτική υποβάθμιση των υπόγειων υδάτων, επηρεάζοντας άμεσα ή έμμεσα τον άνθρωπο και τα οικοσυστήματα που εξαρτώνται από αυτά. Η αντιμετώπιση και αποκατάσταση του προβλήματος αυτού απαιτούν αρκετό χρόνο και σημαντικό κόστος. Καθίσταται άμεση και αναγκαία η αειφορική αξιοποίηση των υδατικών πόρων με την διαμόρφωση κατάλληλων σχεδίων διαχείρισης. Η κατάρτιση τέτοιων σχεδίων βασίζεται στην χρήση μαθηματικών μοντέλων προσομοίωσης της συμπεριφοράς του υδροφορέα.

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με την προσομοίωση της υπόγειας ροής και μεταφοράς νιτρικών ιόντων στην πεδιάδα των Μοιρών Ηρακλείου. Στην περιοχή παρατηρείται έντονη αγροτική δραστηριότητα, γεγονός που οδηγεί σε ανεξέλεγκτους και μη ορθολογικούς ρυθμούς άντλησης και χρήσης λιπασμάτων. Ως αποτέλεσμα, τα τελευταία 30 χρόνια παρατηρήθηκε η ταπείνωση του υπόγειου υδροφορέα περισσότερο από 35m, αλλά και η εξάπλωση της νιτρορύπανσης σε μεγάλες εκτάσεις.

Η εργασία διαρθρώνεται σε τρία βασικά μέρη. Το πρώτο μέρος επικεντρώνεται στο θεωρητικό υπόβαθρο, με αναφορές στην υπόγεια υδρολογία παρουσιάζοντας βασικές έννοιες και εξισώσεις. Επίσης παρουσιάζονται στοιχεία για την ρύπανση με ιδιαίτερη έμφαση στην νιτρορύπανση των υπόγειων υδροφορέων. Στο δεύτερο μέρος, αναφέρονται οι βασικές αρχές της μοντελοποίησης και περιγράφεται το μαθηματικό μοντέλο Visual MODFLOW, που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία. Επιπλέον, γίνεται αναλυτική περιγραφή των κλιματικών, γεωλογικών και υδρογεωλογικών συνθηκών της περιοχής μελέτης. Στο τελευταίο μέρος, περιγράφεται η διαδικασία για την προσομοίωση της υπόγειας ροής και της μεταφοράς μάζας, καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτήν.

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, γίνεται αντιληπτό το πρόβλημα της υπερεκμετάλλευσης των υπόγειων υδάτων και της νιτρορύπανσης, που αντιμετωπίζει η περιοχή. Χρησιμοποιώντας το μοντέλο που κατασκευάστηκε σε συνδυασμό με κλιματικά σενάρια, μπορεί να προσδιοριστεί μελλοντικά η δυναμική του συστήματος. Συνεπώς γνωρίζοντας τις αλλαγές που θα προκληθούν στην στάθμη του υπόγειου υδροφορέα και στην εξάπλωση της ρύπανσης, μπορούν να σχεδιαστούν κατάλληλα μέτρα πρόληψης και προστασίας.

## Abstract

Groundwater is one of the most valuable resources, ensuring the needs of the constantly developing areas for the production of potable and other uses water. Due to the increasing demand, quantitative and qualitative degradation of groundwater has been observed, affecting directly or indirectly humans and ecosystems. The treatment and rehabilitation of this problem takes time and has significant cost. Therefore, the development of sustainable management strategies, using mathematical models, appeals essential.

The present study deals with the modeling of ground water and nitrate transport in the groundwater aquifer of the hydrological basin of Moires, southern Crete. The intensive agricultural activity in the region has led to uncontrollable and non-rational pumping rates and fertilizer use. As a result, the lowering of waterbed more than 35 meters and the spread of nitrate pollution has been observed over the last 30 years.

The study is divided into three main parts. The first part focuses on the theoretical background. It concentrates on the underground hydrology, presenting basic significances and equations as well as the aquifers' pollution with particular emphasis on nitrate pollution. In the second part, the principles of modeling are reported, and the Visual MODFLOW software, which is used for the simulation, is described. In addition, a detailed presentation of the climatic, geological and hydrogeological conditions of the study area is made. In the last part, the procedure of simulation is described, as well as the results obtained from it.

The results of simulation clarify the problem of overexploitation and the high concentration of nitrates in surface water, that faces the area of Moires. Using the model that was constructed in conjunction with climatic scenarios, the system dynamics can be determined on the future. Consequently, being aware of the future changes, appropriate prevention and protection measures can be designed.

## Πρόλογος

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους συντέλεσαν στην επιτυχή διεκπεραίωσή της.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος και επιβλέποντα της παρούσας εργασίας κ. Γεώργιο Καρατζά για την ανάθεση της εργασίας. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Εμμανουήλ Βαρουχάκη για την συνεχή καθοδήγησή και υποστήριξη καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Τέλος, ευχαριστώ τους κ. Νικόλαο Νικολαΐδη, Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος, και κ. Νικόλαο Παρυχιανάκη, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος, για την συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή.

Ξεχωριστά θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την πολύτιμη στήριξή τους κατά την διάρκεια των σπουδών μου και ιδιαίτερα την περίοδο εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

## Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη .....	2
Abstract .....	3
Πρόλογος .....	4
Κατάλογος Εικόνων.....	7
Κατάλογος Πινάκων .....	9
Κατάλογος Διαγραμμάτων.....	9
1 Εισαγωγή .....	10
1.1 Γενικά Στοιχεία .....	10
1.2 Υδρολογικός Κύκλος .....	10
1.3 Υδρολογικό Ισοζύγιο .....	12
2 Βασικές Έννοιες και Εξισώσεις Υπόγειας Ροής.....	13
2.1 Υδροφορείς .....	13
2.1.1 Παράμετροι Υδροφορέων .....	14
2.1.2 Ομοιογένεια και ισοτροπία .....	18
2.2 Νόμος Darcy .....	19
2.3 Γενική Μορφή νόμου Darcy.....	21
2.4 Γενική Εξίσωση Μόνιμης Ροής.....	22
2.5 Γενική Εξίσωση Μη Μόνιμης Ροής.....	24
3 Ρύπανση Υπόγειων Υδάτων .....	25
3.1 Γενικά στοιχεία για την ρύπανση των υπόγειων υδάτων .....	25
3.2 Πηγές ρύπανσης .....	27
3.3 Μηχανισμοί μεταφοράς ρύπων στους υπόγειους υδροφορείς .....	29
3.4 Εξυγίανση υπόγειων υδροφορέων.....	36
4 Νιτρορύπανση .....	40
4.1 Εισαγωγή .....	40
4.2 Κύκλος του αζώτου .....	41
4.3 Προέλευση νιτρικών ιόντων.....	44
4.4 Επίδραση νιτρικών ιόντων .....	45
4.5 Τρόποι αντιμετώπισης της νιτρορύπανσης .....	47
4.5.1 Νομικό Πλαίσιο .....	47
4.5.2 Μέθοδοι απομάκρυνσης νιτρικών .....	49
5 Προσομοίωση υπόγειας ροής και μεταφοράς ρύπων.....	51

5.1 Γενικά στοιχεία προσομοίωσης .....	51
5.2 Ταξινόμηση μοντέλων προσομοίωσης .....	51
5.3 Μεθοδολογία εφαρμογής μοντέλων προσομοίωσης .....	52
5.4 Αριθμητικές Μέθοδοι για την επίλυση προβλημάτων υπόγειας ροής .....	54
5.5 Χωρική Διακριτοποίηση ενός υδροφορέα .....	55
5.6 Οριακές συνθήκες σε προβλήματα υπόγειας ροής .....	59
5.7 Μοντέλο προσομοίωσης της υπόγειας ροής και μεταφοράς μάζας-Visual MODFLOW .....	60
5.7.1 Κύριες υπορουτίνες MODFLOW .....	62
6. Περιγραφή Περιοχή Μοιρών Ηρακλείου Κρήτης .....	63
6.1 Γενικά Χαρακτηριστικά .....	63
6.2 Στοιχεία Φυσικού Περιβάλλοντος .....	64
6.3 Κλιματολογικές Συνθήκες .....	65
6.4 Γεωμορφολογικά Χαρακτηριστικά .....	66
6.4.1 Γεωλογική Δομή Κρήτης .....	66
6.4.2 Γεωλογική Δομή περιοχής μελέτης .....	67
6.5 Υδρογεωλογικά Χαρακτηριστικά .....	68
6.5.1 Υδρογεωλογικές Συνθήκες Κρήτης .....	68
6.5.2 Υδρογεωλογικές Συνθήκες περιοχής μελέτης .....	70
7 Διαδικασία Προσομοίωσης περιοχής μελέτης με χρήση του κώδικα Visual MODFLOW .....	72
7.1 Διαδικασία Προσομοίωσης υπόγειας ροής .....	72
7.2 Βαθμονόμηση του μοντέλου υπόγειας ροής .....	81
7.3 Επαλήθευση μοντέλου υπόγειας ροής .....	82
7.2.3 Διαδικασία Προσομοίωσης της μεταφοράς νιτρικών ιόντων .....	84
8 Παρουσίαση και Σχολιασμός Αποτελεσμάτων .....	88
8.1 Αποτελέσματα Βαθμονόμησης Μοντέλου .....	88
8.2 Αποτελέσματα Επαλήθευσης Μοντέλου .....	92
8.3 Αποτελέσματα Προσομοίωσης μεταφοράς νιτρικών ιόντων .....	96
9 Συμπεράσματα-Προτάσεις .....	101
9.1 Συμπεράσματα .....	101
9.2 Προτάσεις .....	102
Βιβλιογραφία .....	104
Παράρτημα .....	108

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1. Υδρολογικός Κύκλος ( <a href="https://water.usgs.gov/edu/watercyclegreek.html">https://water.usgs.gov/edu/watercyclegreek.html</a> ).....	11
Εικόνα 2. Ταξινόμηση Υδροφορέων (Μακρόπουλος και Κουτσογιάννης, 2016).....	14
Εικόνα 3. Τυπικές Τιμές Υδραυλικής Αγωγιμότητας (Γ. Καρατζάς, Ροή υπόγειων υδάτων και μεταφορά ρύπων, 2016) .....	16
Εικόνα 4. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις ομοιογένειας και ανισοτροπίας (τροποποιημένο από Freeze and Cherry, 1979).....	19
Εικόνα 5. Πειραματική διάταξη Darcy (Jacob Bear, 2001).....	20
Εικόνα 6. Στοιχειώδες παραλληλεπίπεδο πορώδους μέσου κορεσμένου με ρευστό πυκνότητας $\rho$ , (Γ. Καρατζάς, Ροή υπόγειων υδάτων και μεταφορά ρύπων, 2016) .....	23
Εικόνα 7. Πλούμιο ρύπανσης σε ισότροπο υδροφόρα από πηγή συνεχούς (επάνω) και στιγμιαίας (κάτω) εκπομπής (Freeze-Cherry, 1979, από Καλλέργη, 2000).....	26
Εικόνα 8. Κατανομή προσθήκης διαλυμένης ουσίας με τον χρόνο λόγω διάχυσης (Γ. Καρατζάς, Ροή υπόγειων υδάτων και μεταφορά ρύπων, 2016) .....	32
Εικόνα 9. Παράγοντες που προκαλούν διαμήκη μηχανική διασπορά (Fetter, 1994).....	34
Εικόνα 10. Διάταξη μεθόδου pump and treat ( <a href="http://www.wsr.it/en/products/remediation-systems">www.wsr.it/en/products/remediation-systems</a> ).....	37
Εικόνα 11. Διάταξη μεθόδου Αεροδιασποράς ( <a href="http://www.wsr.it/en/products/remediation-systems">www.wsr.it/en/products/remediation-systems</a> ).....	38
Εικόνα 12. Περιγραφή μεθόδου βιοεξυγίανσης ( <a href="http://www.rewordit.org">www.rewordit.org</a> ) .....	39
Εικόνα 13. Διάταξη μεθόδου Εγκιβωτισμού ( <a href="http://clu-in.org">clu-in.org</a> ) .....	40
Εικόνα 14. Κύκλος Αζώτου (John M. Evans and Howard Perlman, USGS) .....	43
Εικόνα 15. Χάρτης Ευπρόσβλητων Ζωνών από νιτρορύπανση γεωργικής προέλευσης, Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. ....	49
Εικόνα 16. Πρωτόκολλο Προσομοίωσης (τροποποιημένο από Anderson & Woessner, 1992) .....	52
Εικόνα 17. Χωρική Διακριτοποίηση με τη μέθοδο των πεπερασμένων δυσφορών (McDonald, M.G., and A.W. Harbaugh, 1988).....	56
Εικόνα 18. Εισροή στο κελί (i,j,k) από το κελί (i,j-1,k) (Καβαλιεράτου 2007) .....	58
Εικόνα 19. Ετήσιος ρυθμός άντλησης στη λεκάνη των Μοιρών (Πηγή: Βαρουχάκης 2015) .....	64
Εικόνα 20. Μηνιαία βροχομετρικά στοιχεία υδρολογικού έτους 2009-2010, από μετεωρολογικό σταθμό Πετροκεφάλι Μοιρών .....	65
Εικόνα 21. Μηνιαίες θερμοκρασίες υδρολογικού έτους 2009-2010, από μετεωρολογικό σταθμό Πετροκεφάλι Μοιρών .....	66
Εικόνα 22. Υδρολιθικός Χάρτης Κρήτης, Διαχειριστική Μελέτη Κρήτης (Κριτσωτάκης 2009) .....	69
Εικόνα 23. Υδρολιθικός Χάρτης λεκάνης Μοιρών- θέσεις ρηγμάτων (Κριτσωτάκης 2009).....	72
Εικόνα 24. Παράθυρο δημιουργίας καννάβου MODFLOW .....	74
Εικόνα 25. Αποτέλεσμα χωρικής διακριτοποίησης λεκάνης Μοιρών .....	75
Εικόνα 26. Ζώνες Υδραυλικής αγωγιμότητας κατά την κατασκευή του μοντέλου.....	76
Εικόνα 27. Παράθυρο καταχώρησης στοιχείων αντλητικών πηγαδιών, MODFLOW .....	77
Εικόνα 28. Χωρική Κατανομή πηγαδιών άντλησης στην λεκάνη των Μοιρών .....	78

Εικόνα 29. Παράθυρο καταχώρησης στοιχείων πηγαδιών παρατήρησης, MODFLOW ....	79
Εικόνα 30. Χωρική Κατανομή πηγαδιών παρατήρησης στάθμης νερού στην λεκάνη των Μοιρών .....	79
Εικόνα 31. Απεικόνιση των οριακών συνθηκών της περιοχής μελέτης, Constand Head (κόκκινο) και Drain (γκρι).....	80
Εικόνα 32. Τρισδιάστατη απεικόνιση των ζωνών της υδραυλικής αγωγιμότητας .....	82
Εικόνα 33. Ζώνες εμπλουτισμού υδροφορέα λόγω βροχόπτωσης για το υδρολογικό έτος 2009.....	83
Εικόνα 34. Χωρική κατανομή μορίων (particles)στην περιοχή μελέτης .....	85
Εικόνα 35. Αρχικές τιμές συγκέντρωσης Μαΐου 2008.....	86
Εικόνα 36. Παράθυρο καταχώρησης δεδομένων πηγαδιών παρατήρησης της συγκέντρωσης, MODFLOW.....	87
Εικόνα 37. Χωρική Κατανομή πηγαδιών παρατήρησης συγκέντρωσης στην λεκάνη των Μοιρών .....	87
Εικόνα 38. Πιεζομετρικός χάρτης περιοχής μελέτης υγρής περιόδου έτος 2008 .....	90
Εικόνα 39. Διεύθυνση ταχύτητας ροής για την υγρή περίοδο του υδρολογικού έτους 2008. ....	91
Εικόνα 40. Πιεζομετρικός Χάρτης περιοχής μελέτης ξηρής περιόδου έτος 2008.....	92
Εικόνα 41. Διεύθυνση ταχύτητας ροής για την υγρή περίοδο του υδρολογικού έτους 2008 .....	92
Εικόνα 42. Πιεζομετρικός Χάρτης περιοχής μελέτης υγρής περιόδου έτους 2009 .....	94
Εικόνα 43. Διεύθυνση ταχύτητας ροής για την υγρή περίοδο του υδρολογικού έτους 2009 .....	94
Εικόνα 44. Πιεζομετρικός Χάρτης περιοχής μελέτης ξηρής περιόδου έτος 2009.....	95
Εικόνα 45. Διεύθυνση ταχύτητας ροής για την ξηρή περίοδο του υδρολογικού έτους 2009 .....	95
Εικόνα 46. Τρισδιάστατη απεικόνιση κατανομής συγκέντρωσης Μάιος 2008 .....	97
Εικόνα 47. Τρισδιάστατη απεικόνιση κατανομής συγκέντρωσης Ιούνιος 2008 .....	98
Εικόνα 48. Τρισδιάστατη απεικόνιση κατανομής συγκέντρωσης Αυγουστος 2008 .....	99
Εικόνα 49. Τρισδιάστατη απεικόνιση κατανομής συγκέντρωσης Οκτώβριος 2008 .....	99
Εικόνα 50. Τρισδιάστατη απεικόνιση κατανομής συγκέντρωσης Απρίλιος 2009 .....	100



## **Κατάλογος Πινάκων**

Πίνακας 1. Τυπικές τιμές συντελεστών διαπερατότητας (Terzaghi and Peck, 1967) .....	17
Πίνακας 2. Μονάδες Μέτρησης MODFLOW .....	73
Πίνακας 3. Ζώνες Υδραυλικής Αγωγιμότητας (Βαρουχάκης 2015).....	75
Πίνακας 4. Αποτελέσματα Υδραυλικού ύψους για το υδρολογικό έτος 2008.....	88
Πίνακας 5. Αποτελέσματα υδραυλικών υψών για το υδρολογικό έτος 2008.....	93
Πίνακας 6. Αποτελέσματα συγκέντρωσης νιτρικών ιόντων .....	96

## **Κατάλογος Διαγραμμάτων**

Διάγραμμα 1. Σύγκριση Αποτελεσμάτων Βαθμονόμησης και Δεδομένων τιμών για την υγρή και ξηρή περίοδο 2008. ....	89
Διάγραμμα 2. Σύγκριση Αποτελεσμάτων Βαθμονόμησης και Δεδομένων τιμών χωρίς το πηγάδι B5, για την υγρή και ξηρή περίοδο 2008.....	90
Διάγραμμα 3. Σύγκριση Αποτελεσμάτων Βαθμονόμησης και Δεδομένων τιμών για την υγρή και ξηρή περίοδο 2009. ....	93
Διάγραμμα 4. Σύγκριση Αποτελεσμάτων Βαθμονόμησης και Δεδομένων τιμών συγκεντρώσεων .....	97

# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Γενικά Στοιχεία

Το νερό αποτελεί ζωτικής σημασίας φυσικό πόρο που επηρεάζει τα οικοσυστήματα και την ανθρώπινη ζωή. Περίπου το 70% της επιφάνειας της Γης καλύπτεται από νερό, από το οποίο μόνο το 3% μπορεί να αξιοποιηθεί για την κάλυψη των αναγκών, καθώς το υπόλοιπο 97% είναι αλμυρό, δηλαδή ακατάλληλο για οικιακές, αγροτικές και βιομηχανικές δραστηριότητες, χωρίς επεξεργασία. Επιπλέον, το μεγαλύτερο ποσοστό γλυκού νερού δεν είναι δυνατό να εκμεταλλευτεί λόγω της θέσης του (χιόνια, πάγοι). Έτσι ένα μικρό ποσοστό γλυκού νερού υπό την μορφή υπόγειου νερού, λιμνών και υδατορευμάτων είναι άμεσα εκμεταλλεύσιμο.

Το νερό αυτό εκμεταλλεύεται σε παγκόσμια κλίμακα κατά 69% για τη γεωργία (το περισσότερο μέσω της άρδευσης), 23% για τη βιομηχανία και το υπόλοιπο 8% για οικιακή χρήση. Λόγω των αυξανόμενων απαιτήσεων των ανθρώπων σε νερό για την κάλυψη των αναγκών τους, έχει παρατηρηθεί το φαινόμενο της λειψυδρίας και του περιορισμού των επιφανειακών νερών σε ποσότητα και ποιότητα σε πολλές περιοχές του πλανήτη. Η υπάρχουσα κατάσταση σε συνδυασμό με τα μελλοντικά σενάρια περί έλλειψης του πόσιμου νερού, επιτείνουν την καλύτερη δυνατή διαχείριση των υπόγειων υδάτων.

Στον ελλαδικό χώρο οι υπόγειοι υδροφορείς δέχονται μεγάλες πιέσεις, ιδιαίτερα λόγω της αγροτικής δραστηριότητας. Σύμφωνα με το Υπουργείο Ανάπτυξης οι ποσότητες άρδευσης έχουν διπλασιαστεί την τελευταία 20ετία, οδηγώντας στην υποβάθμιση του υπόγειου ορίζοντα. Σημαντικό πρόβλημα αποτελεί και η πληθώρα μη αδειοδοτούμενων γεωτρήσεων που επιβαρύνει το πρόβλημα και την αντιμετώπισή του. Συνεπώς γίνεται φανερό η ανάγκη σχεδιασμού κατάλληλων σχεδίων διαχείρισης των υπόγειων υδάτων, προκειμένου να καλύπτονται οι ανάγκες σε διαθέσιμο νερό με την προϋπόθεση της αειφόρου διατήρησης του πόρου.

## 1.2 Υδρολογικός Κύκλος

Το νερό στη φύση βρίσκεται σε μια συνεχή κυκλοφορία μεταξύ ωκεανών, ατμόσφαιρας, ξηράς και ωκεανών, σχηματίζοντας έτσι τον **υδρολογικό κύκλο**. Κατά την διάρκεια του κύκλου αυτού, το νερό μεταπίπτει σε όλες τις δυνατές καταστάσεις, την υγρή, στερεά (χιόνι, χαλάζι) και την αέρια (υδρατμοί). Μέσου του κύκλου αυτού, πραγματοποιείται μεταφορά του νερού, προσωρινή αποθήκευσή του και μεταβολή της κατάστασής του.

Θεωρώντας για δική μας διευκόλυνση ως αρχή του υδρολογικού κύκλου την ατμόσφαιρα θα περιγραφεί στη συνέχεια η κίνηση του νερού. Στην ατμόσφαιρα συγκεντρώνονται οι υδρατμοί που έχουν προέλθει από την εξάτμιση του νερού από τις θάλασσες, λίμνες, επιφάνεια εδάφους, βλάστηση κτλ. Με τη βοήθεια των αέριων μαζών οι υδρατμοί αυτοί μεταφέρονται και υπό κατάλληλες συνθήκες συμπυκνώνονται σε νέφη, από όπου με την μορφή ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων επιστρέφουν στην επιφάνεια της γης. Ως ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις εννοούνται όλες οι μορφές με τις οποίες το νερό φθάνει στην γη όπως βροχή, χαλάζι, χιόνι, κτλ.

Μέρος του νερού που πέφτει στην επιφάνεια της γης κατακρατείται από την βλάστηση και εξατμίζεται ή διαπνέεται από τα φυτά. Ένα δεύτερο μέρος διηθείται εντός του εδάφους, και τέλος ένα τρίτο μέρος απορρέει επιφανειακά καταλήγοντας σε λίμνες ή θάλασσες με ένα μικρό μέρος αυτού να εξατμίζεται κατά την διάρκεια της απορροής. Από το νερό που διηθείται στο έδαφος, ένα μέρος εξατμίζεται μέσω των πόρων του εδάφους ενώ ένα μέρος αποθηκεύεται ως υπόγειο νερό εμπλουτίζοντας έτσι του υπόγειους υδροφορείς, οι οποίοι έχουν την ικανότητα να αποθηκεύουν μεγάλες ποσότητες νερού για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Το υπόγειο νερό εμφανίζεται στην επιφάνεια της γης σε χαμηλότερα υψόμετρα, καταλήγοντας σε υδάτινους αποδέκτες ή στη θάλασσα. Τέλος, το νερό της θάλασσας με την διαδικασία της εξάτμισης, επανέρχεται στην ατμόσφαιρα κλείνοντας έτσι τον υδρολογικό κύκλο.



Εικόνα 1. Υδρολογικός Κύκλος (<https://water.usgs.gov/edu/watercyclegreek.html>)

### 1.3 Υδρολογικό Ισοζύγιο

Το υδρολογικό ισοζύγιο αποτελεί την μαθηματική έκφραση της διατήρησης της μάζας του νερού για έναν όγκο ελέγχου. Προκύπτει εξισώνοντας τη διαφορά της εισροής και της εκροής σε μια λεκάνη απορροής με το ρυθμό αλλαγής της αποθήκευσης του νερού στη λεκάνη σε καθορισμένο χρόνο.

$$\Delta M = M_{in} - M_{out}$$

Εξίσωση 1.1

Όπου  $\Delta M$ : η μεταβολή της περιεχόμενης μάζας για ένα χρονικό διάστημα

$M_{in}, M_{out}$ : η εισρέουσα και εκρέουσα μάζα αντίστοιχα από τον όγκο ελέγχου για το χρονικό διάστημα που μελετάται.

Η κυκλοφορία και κατανομή του νερού στην ατμόσφαιρα και τη γη, εκφράζεται από την ακόλουθη σχέση, που αποτελεί την γενική αναλυτική εξίσωση του υδρολογικού ισοζυγίου:

$$P = R + E + I$$

Εξίσωση 1.2

Όπου  $P$ : τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα

$R$ : η επιφανειακή απορροή

$E$ : η πραγματική εξατμισοδιαπνοή

$I$ : η κατείσδυση

Στα **ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα  $P$** , όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, περιλαμβάνονται οι δυνατές μορφές με τις οποίες τα μετεωρικά ύδατα μπορούν να επιστρέψουν από την ατμόσφαιρα στην επιφάνεια της γης (βροχή, χιόνι, χαλάζι κτλ). Συνηθίζεται όλες οι μορφές των κατακρημνίσεων να ανάγονται σε ισοδύναμο ύψος βροχής.

Με την **επιφανειακή απορροή  $R$**  εννοούμε την κίνηση του νερού λόγω βαρύτητας κατά μήκος του εδαφικού ανάγλυφου. Το νερό που προέρχεται από τα κατακρημνίσματα συνήθως ποτίζει το έδαφος, αλλά στην περίπτωση που αυτό είναι κορεσμένο, το νερό αρχίζει να ρέει προς χαμηλότερα υψόμετρα με την μορφή απορροής και κινείται κατακόρυφα, από την επιφάνεια ως τον υδροφόρο ορίζοντα (Perlmán et al., 2005). Από τον όγκο των κατακρημνισμάτων που πέφτει στο έδαφος, μόνο το ένα τρίτο καταλήγει στην θάλασσα, ενώ το υπόλοιπο είτε εξατμίζεται είτε διηθείται. Επίσης, μέρος της επιφανειακής απορροής χρησιμοποιείται από τον άνθρωπο για την κάλυψη των αναγκών του.

Η επιφανειακή απορροή επηρεάζεται από κλιματικούς και φυσιογραφικούς παράγοντες. Στους κλιματικούς παράγοντες ανήκουν η ένταση και η κατανομή των

βροχοπτώσεων κατά την διάρκεια ενός υδρολογικού έτους. Όσο αφορά τους φυσιογραφικούς παράγοντες, η κλίση, η επιφανειακή βλάστηση, το υδρογραφικό δίκτυο και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του εδάφους και υπεδάφους, μπορούν να διευκολύνουν ή όχι την κίνηση του νερού.

Η διαδικασία της **εξατμισοδιαπνοής** του νερού είτε από φυτοκαλυμμένες ή μη επιφάνειες εδάφους είτε από ελεύθερες υδάτινες επιφάνειες, αποτελεί μια από τις σημαντικότερες συνιστώσες του κύκλου του νερού. Η **εξάτμιση** αποτελεί το φαινόμενο κατά το οποίο τα μόρια ενός σώματος μεταπίπτουν από την υγρή ή στερεά φάση στην αέρια. Με τον όρο **διαπνοή** περιγράφεται η διαδικασία κατά την οποία τα φυτά απορροφούν νερό από το έδαφος μέσω των ριζών τους και στη συνέχεια το μεταβιβάζουν πίσω στην ατμόσφαιρα με την μορφή υδρατμών από τα στόματα των φυλλωμάτων τους. Η διαπνοή διαφέρει από την εξάτμιση, διότι τα φυτά έχουν την δυνατότητα να ελέγχουν την ποσότητα του νερού που διαπνέεται από το φύλλωμά τους. Ως **πραγματική εξατμισοδιαπνοή Ε**, ορίζεται η ταυτόχρονη εξάτμιση από το έδαφος και η διαπνοή των φυτών, κατά την οποία αφαιρείται ποσότητα νερού από μια καλλιεργούμενη επιφάνεια. Παρατηρούνται διαφορές στον ρυθμό εξατμισοδιαπνοής μεταξύ των καλλιεργειών, καθώς αυτή επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες. Καθοριστικό ρόλο παίζει το είδος της καλλιέργειας, η φυτοκάλυψη του εδάφους, το στάδιο ανάπτυξής της, η θερμοκρασία εδάφους και αέρα, η υγρασία, η ταχύτητα του ανέμου, η ηλιακή ακτινοβολία, το πορώδες κ.ά.

Η **κατείσδυση Ι** περιγράφει την ποσότητα των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, η οποία διαπερνά το έδαφος και καταλήγει στα υπόγεια υδροφόρα στρώματα. Με την διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται η ανανέωση των αποθεμάτων των υπόγειων υδροφορέων, συμβάλλοντας έτσι στην υδρο-οικονομία της περιοχής. Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την κατείσδυση μιας περιοχής είναι η υγρασία του εδάφους, η γεωλογική δομή, η φυτοκάλυψη, η ένταση και κατανομή των βροχοπτώσεων.

## 2 Βασικές Έννοιες και Εξισώσεις Υπόγειας Ροής

### 2.1 Υδροφορείς

Ο όρος **υδροφορέας** χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει υπεδάφιους σχηματισμούς που περιέχουν σημαντικές ποσότητες διαπερατών υλικών κορεσμένων με ύδωρ, τα οποία προμηθεύουν φρέατα και πηγές με υδατικές ποσότητες. Ανάλογα με τη θέση του υδροφόρου ορίζοντα οι υδροφορείς διακρίνονται σε **ελεύθερους ή φρεατικούς, περιορισμένους ή αρτεσιανούς** και στον ενδιάμεσο τύπο των **ημι-αρτεσιανών**.

Στους **ελεύθερους υδροφορείς** το κάτω όριο αποτελεί ένα αδιαπέρατο στρώμα, ενώ το άνω όριο είναι η ελεύθερη επιφάνεια του υπόγειου νερού. Η υδροστατική πίεση στην ελεύθερη επιφάνεια ταυτίζεται με την ατμοσφαιρική πίεση. Οι υδροφορείς αυτοί τροφοδοτούνται απευθείας με διηθούμενο νερό από την επιφάνεια του εδάφους. Οι αυξομειώσεις που παρατηρούνται στο ύψος του υδροφορέα αντιστοιχούν και σε αυξομειώσεις του όγκου του ύδατος που είναι αποθηκευμένο στον υδροφορέα.

Στους **περιορισμένους υδροφορείς** τα όρια στα οποία περικλείεται το υπόγειο ύδωρ είναι αδιαπέρατα, με αποτέλεσμα να επικρατούν πιέσεις μεγαλύτερες της ατμοσφαιρικής. Η κατάσταση αυτή μπορεί να διαπιστωθεί αν στην περιοχή υπάρχει κάποιο πηγάδι, τότε η στάθμη του νερού σε αυτό βρίσκεται σε υψηλότερα επίπεδα από το άνω όριο του υδροφορέα.



Εικόνα 2. Ταξινόμηση Υδροφορέων (Μακρόπουλος και Κουτσογιάννης, 2016)

### 2.1.1 Παράμετροι Υδροφορέων

- Πορώδες

Ως πορώδες του εδάφους θεωρείται το εκατοστιαίο ποσοστό του όγκου του εδάφους σε φυσική κατάσταση που δεν καταλαμβάνεται από συμπαγή στερεά υλικά (οργανικά και ανόργανα). Το εδαφικό πορώδες αποτελείται από την αέρια και την υγρή φάση του εδάφους. Το μέγεθος των εδαφικών πόρων, η κατανομή τους και ο συνολικός όγκος τους εξαρτάται από τη δομή και την υφή του εδάφους. Τα χονδρόκοκα εδάφη χαρακτηρίζονται από την παρουσία μεγάλων πόρων, ενώ τα πολύ λεπτόκοκα από την παρουσία πολλών λεπτών τριχοειδών πόρων. Το



επιθυμητό πορώδες εξαρτάται από την εκάστοτε χρήση της γης, και περιλαμβάνει ευμεγεθείς, μέσους και τριχοειδείς πόρους.

$$n = \frac{V_{\text{κενών}}}{V} \quad \text{Εξίσωση 2.1}$$

Όπου  $n$ : πορώδες εδάφους

$V_{\text{κενών}}$ : όγκος των κενών

$V$ : ο συνολικός όγκος του δείγματος

Επιπλέον ευρέως χρησιμοποιείται και το ενεργό πορώδες. Αποτυπώνει το ποσοστό των πόρων που επικοινωνούν μεταξύ τους και είναι διαθέσιμοι προκειμένου να 'περάσει' το νερό, με την βοήθεια της βαρύτητας ή της υδροστατικής πίεσης. Εκφράζεται ως ο λόγος του όγκου που καταλαμβάνουν τα διάκενα ως προς τον συνολικό όγκο.

$$n_e = \frac{V_r}{V} \quad \text{Εξίσωση 2.2}$$

Όπου  $n_e$ : ενεργό πορώδες εδάφους

$V_r$ : όγκος των διακένων

$V$ : ο συνολικός όγκος του δείγματος

- Υδραυλική Αγωγιμότητα

Η υδραυλική αγωγιμότητα εκφράστηκε από τον Darcy και αποτελεί μία από τις κύριες ιδιότητες του πορώδους μέσου και του ρευστού. Αποτελεί μέτρο της ευχέρειας της κίνησης του υπόγειου νερού διαμέσου των εδαφικών πόρων και εξαρτάται από το μέγεθος, το σχήμα και το βαθμό επικοινωνίας των κενών μεταξύ των πόρων (Driscoll 1986).

Ο προσδιορισμός της υδραυλικής αγωγιμότητας πραγματοποιείται με επιτόπου πειραματικές μετρήσεις, από δοκιμαστικές αντλήσεις, από την κοκκομετρία με τη βοήθεια εμπειρικών τύπων και ιχνηθετήσεις. Σε μια σειρά πειραμάτων που έγιναν σε ομοιόμορφο, ιδεώδες, πορώδες μέσο το οποίο αποτελείται από γυάλινες σφαίρες διαμέτρου  $d$ , μελετήθηκε η ροή διαφόρων ρευστών πυκνότητας  $\rho$ , ιξώδους  $\mu$  και σταθερής υδραυλικής κλίσης  $dh/dl$ . Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι για την υδραυλική αγωγιμότητα ισχύει:

$$k = \frac{K_s \rho g}{\mu} \quad \text{Εξίσωση 2.3}$$

Όπου  $k$ : υδραυλική αγωγιμότητα (m/s)

$K_s$ : διαπερατότητα ( $m^2$ )

$\rho$ : πυκνότητα ρευστού ( $\frac{kg}{m^3}$ )

$\mu$ : ιξώδες ( $\frac{kg}{m \cdot s}$ )

$g$ : επιτάχυνση βαρύτητας ( $\frac{kg}{s}$ )

**Table 2.2 Range of Values of Hydraulic Conductivity and Permeability**

		$k$ (darcy)	$k$ (cm <sup>2</sup> )	$K$ (cm/s)	$K$ (m/s)	$K$ (gal/day/ft <sup>2</sup> )
Rocks	Unconsolidated deposits					
Karst limestone	Gravel	$10^5$	$10^{-3}$	$10^2$	1	$10^6$
Permeable basalt		$10^4$	$10^{-4}$	10	$10^{-1}$	$10^5$
Fractured igneous and metamorphic rocks	Clean sand	$10^3$	$10^{-5}$	1	$10^{-2}$	$10^4$
Limestone and dolomite	Silty sand	$10^2$	$10^{-6}$	$10^{-1}$	$10^{-3}$	$10^3$
Sandstone		10	$10^{-7}$	$10^{-2}$	$10^{-4}$	$10^2$
	Silt, loess	1	$10^{-8}$	$10^{-3}$	$10^{-5}$	10
		$10^{-1}$	$10^{-9}$	$10^{-4}$	$10^{-6}$	1
		$10^{-2}$	$10^{-10}$	$10^{-5}$	$10^{-7}$	$10^{-1}$
		$10^{-3}$	$10^{-11}$	$10^{-6}$	$10^{-8}$	$10^{-2}$
		$10^{-4}$	$10^{-12}$	$10^{-7}$	$10^{-9}$	$10^{-3}$
		$10^{-5}$	$10^{-13}$	$10^{-8}$	$10^{-10}$	$10^{-4}$
		$10^{-6}$	$10^{-14}$	$10^{-9}$	$10^{-11}$	$10^{-5}$
		$10^{-7}$	$10^{-15}$	$10^{-10}$	$10^{-12}$	$10^{-6}$
		$10^{-8}$	$10^{-16}$	$10^{-11}$	$10^{-13}$	$10^{-7}$
Unfractured metamorphic and igneous rocks						
Shale						
Unweathered marine clay						
Glacial till						

Εικόνα 3. Τυπικές Τιμές Υδραυλικής Αγωγιμότητας (Γ. Καρατζάς, Ροή υπόγειων υδάτων και μεταφορά ρύπων, 2016)

- Διαπερατότητα (permeability)

Η διαπερατότητα ενός γεωλογικού σχηματισμού δηλώνει την ευκολία ή μη της διείσδυσης και διέλευσης ενός ρευστού δια μέσο αυτού. Ο συντελεστής διαπερατότητας ( $K_s$ ) περιγράφει την ικανότητα κίνησης του ρευστού στον



σχηματισμό αυτό και ισούται την ταχύτητα ροής στην περίπτωση που υδραυλική κλίση ήταν ίση με την μονάδα. Η διαπερατότητα είναι χαρακτηριστικό του είδους του εδαφικού υλικού και της σχετικής πυκνότητάς του και δεν σχετίζεται με τις ιδιότητες του ρευστού, όπως συμβαίνει στην περίπτωση της υδραυλικής αγωγιμότητας. Συγκεκριμένα εξαρτάται από το ενεργό πορώδες με σχέση ανάλογη και από την ειδική επιφάνεια των κόκκων, σχέση αντιστρόφως ανάλογη. Η διαπερατότητα συνδέεται με την υδραυλική αγωγιμότητα μέσω της σχέσης:

$$K_s = \frac{k\mu}{\gamma} \quad \text{Εξίσωση 2.4}$$

Όπου  $K_s$ : διαπερατότητα ( $m^2$ )

$k$ : υδραυλική αγωγιμότητα ( $m/s$ )

$\mu$ : δυναμικό ιξώδες ( $\frac{kg}{m \cdot s}$ )

$\gamma$ : ειδικό βάρος ρευστού ( $kN/m^3$ )

**Πίνακας 1. Τυπικές τιμές συντελεστών διαπερατότητας (Terzaghi and Peck, 1967)**

Κατηγορία	$k$ (cm/sec)	Τύπος Εδάφους
Υψηλή	$> 10^{-1}$	Καθαρά χαλίκια, αμμώδη χαλίκια
Μέση	$10^{-1}-10^{-3}$	Καθαρές άμμοι, αμμοχάλικα
Χαμηλή	$10^{-3}-10^{-5}$	Λεπτόκοκκες άμμοι, αμμώδεις ιλύες, ιλύες
Πολύ Χαμηλή	$10^{-5}-10^{-7}$	Ιλυώδεις άργιλοι, αργιλοιλύες
Πρακτικά αδιαπέρατος	$<10^{-7}$	Άργιλοι

- Μεταβιβασιμότητα (Transmissivity)

Η μεταβιβασιμότητα εκφράζει τον όγκο του νερού που διέρχεται από μια μοναδιαία διατομή του υδροφόρου στρώματος με υδραυλική κλίση ίση με την μονάδα και την επικράτηση του κινηματικού ιξώδους. Υπολογίζεται ως το γινόμενο της υδραυλικής αγωγιμότητας επί το πάχος του υδροφόρου στρώματος σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο:

$$T=kD \quad \text{Εξίσωση 2.5}$$

Όπου  $T$ : η μεταβιβασιμότητα ( $m^2/s$ )

k: υδραυλική αγωγιμότητα (m/s)

D: πάχος στρώματος (m)

- Αποθηκευτικότητα (Storativity)

Ο συντελεστής αποθηκευτικότητας (S) εκφράζει τον όγκο νερού που μπορεί να ληφθεί ή αποθηκευτεί από ένα κατακόρυφο πρίσμα ενός υδροφόρου στρώματος με μοναδιαία επιφάνεια ανά μονάδα μεταβολής του φορτίου. Σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση υπολογίζεται ο συντελεστής αποθηκευτικότητας:

$$S = \frac{\Delta V}{A \Delta h} \quad \text{Εξίσωση 2.6}$$

Όπου  $\Delta V$  ο όγκος που προστίθεται ή απελευθερώνεται από τη μοναδιαία επιφάνεια A, εξαιτίας μοναδιαίας πτώσης ή αύξησης του φορτίου  $\Delta h$ .

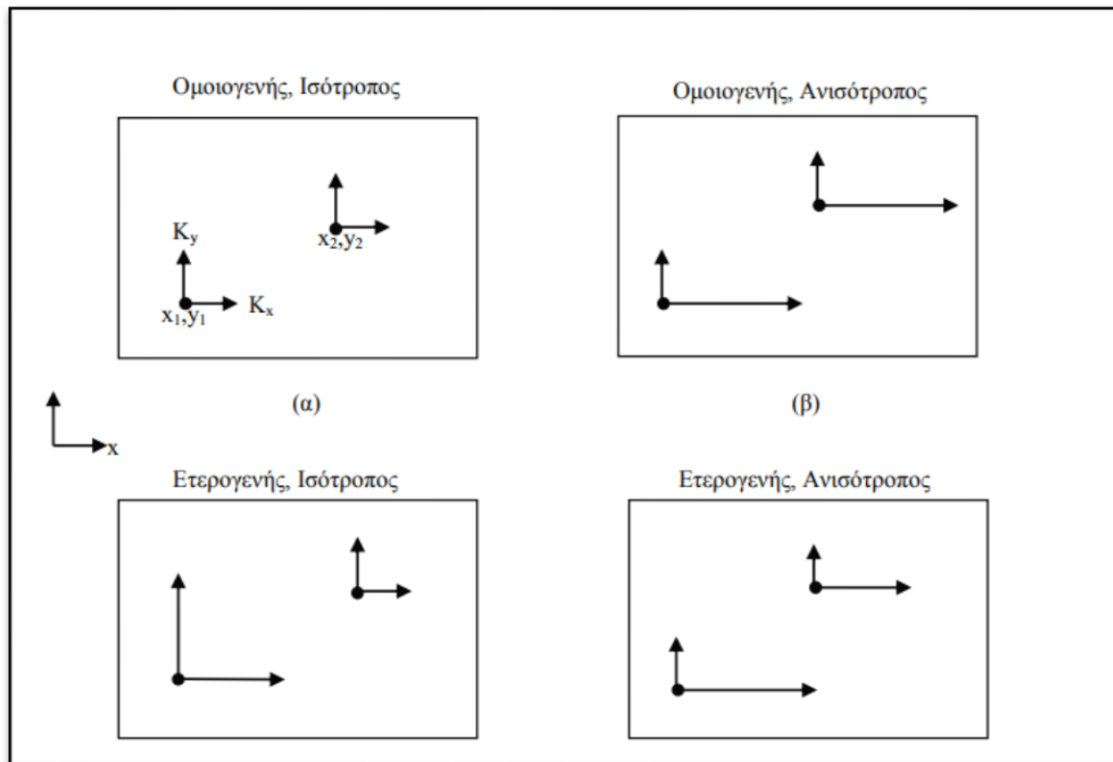
Οι τιμές που λαμβάνει ο συντελεστής αποθηκευτικότητας στους ελεύθερους υδροφορείς κυμαίνονται μεταξύ 1-3%, ενώ για τους περιορισμένους μεταξύ 0,0001-0,5%. Αυτή η διαφορά οφείλεται στον διαφορετικό τρόπο απελευθέρωσης του νερού. Αναλυτικότερα, στους περιορισμένους υδροφορείς η προσθήκη ή αφαίρεση του νερού είναι αποτέλεσμα της διόγκωσης του νερού και συμπίεση του υδροφορέα. Συνεπώς, η αποθηκευτικότητα εξαρτάται από την ελαστικότητα του υδροφορέα και την συμπίεστότητα του νερού.

### 2.1.2 Ομοιογένεια και ισοτροπία

Ένας υδροφορέας χαρακτηρίζεται ως **ομοιογενής** όταν η υδραυλική αγωγιμότητά του, διατηρείται σταθερή για κάθε διεύθυνση σε κάθε σημείο. Συνήθως συναντώνται ετερογενείς υδροφορείς καθώς οι υδραυλικές ιδιότητές τους μεταβάλλονται χωρικά.

**Ισότροπος** χαρακτηρίζεται ένας υδροφόρος ορίζοντας, ο οποίος σε ορισμένο σημείο του εμφανίζει την ίδια υδραυλική αγωγιμότητα σε όλες τις κατευθύνσεις. Στην περίπτωση που σε ένα συγκεκριμένο σημείο του υδροφορέα παρατηρούνται διαφορετικές υδραυλικές ιδιότητες σε κάθε κατεύθυνση τότε αυτός χαρακτηρίζεται ως ανισότροπος.

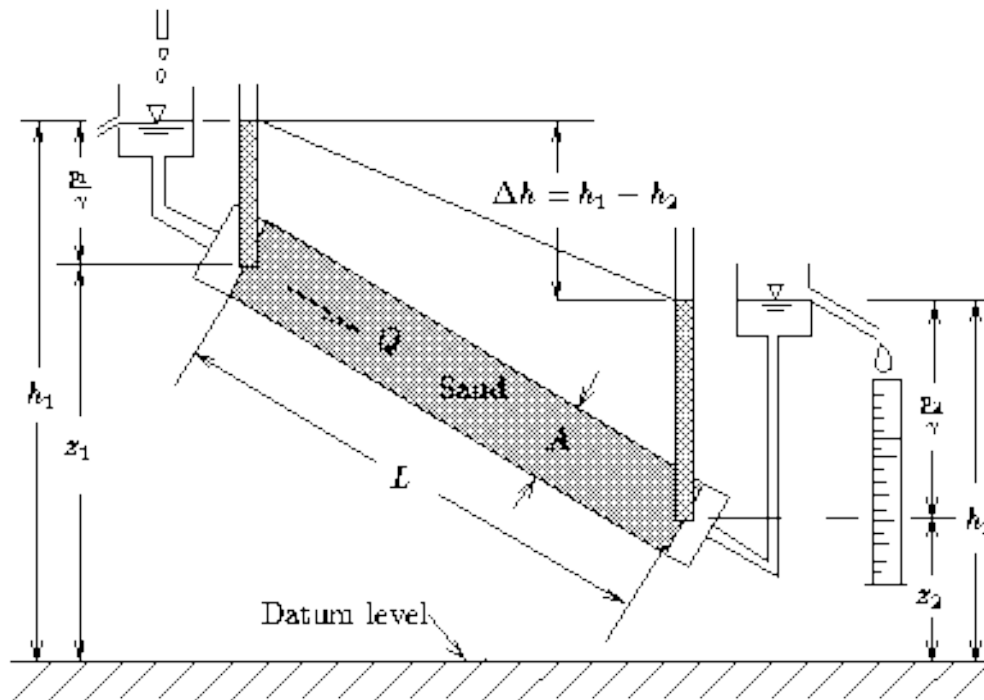
Η ύπαρξη ανομοιογένειας ή ανισοτροπίας σε έναν υδροφορέα δυσχεραίνει την επίλυση του προβλήματος. Παρατηρείται βαθμιαία ή και απότομη μεταβολή των τιμών των μεγεθών αυτών, και έτσι συνηθίζεται η παραδοχή ομοιογενούς ή ισότροπου υδροφορέα.



Εικόνα 4. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις ομοιογένειας και ανισοτροπίας (τροποποιημένο από Freeze and Cherry, 1979)

## 2.2 Νόμος Darcy

Ο Γάλλος μηχανικός υδραυλικής Henry Darcy το 1856 μελέτησε την κίνηση του νερού διαμέσου οριζοντίων στρωμάτων άμμου, τα οποία χρησιμοποιούνται συνήθως σαν φίλτρα. Αναλυτικότερα, ανάμεσα σε δύο δεξαμενές υπήρχε ένας σωλήνας με εμβαδόν διατομής  $A$  γεμάτος με πορώδες υλικό (άμμο) κορεσμένο σε νερό. Εξαιτίας της υψομετρικής διαφοράς που υπήρχε στις στάθμες του νερού στις δύο δεξαμενές, η κίνηση του νερού παρατηρήθηκε από το μεγαλύτερο προς το μικρότερο πιεζομετρικό φορτίο. Ένα ογκομετρικό δοχείο μετά τον εκχειλιστή της δεύτερης δεξαμενής χρησίμευε για την μέτρηση της παροχής  $Q$ , που περνούσε μέσα από πορώδες υλικό. Στην συνέχεια παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε από τον Darcy.



Εικόνα 5. Πειραματική διάταξη Darcy (Jacob Bear, 2001)

Η μελέτη αυτή οδήγησε τον Darcy στο συμπέρασμα ότι ο ρυθμός ροής ( $Q/A$ ) μέσου ενός πορώδους μέσου είναι ανάλογος των απωλειών φορτίου, ανάλογος ενός συντελεστή  $K$  που χαρακτηρίζει το πορώδες υλικό και αντιστρόφως ανάλογος του μήκους πορείας της ροής. Η διατύπωση αυτή αποτελεί το Νόμο του Darcy, θεμελιώδη νόμο κίνησης της υπόγειας υδραυλικής, και εκφράζεται από την ακόλουθη μαθηματική σχέση:

$$\frac{Q}{A} = -K \frac{\Delta h}{L} \quad \text{ή} \quad q = -K \frac{\Delta h}{L} \quad \text{Εξίσωση 2.7}$$

Όπου:  $Q$ : παροχή, ( $L^3/T$ )

$A$ : επιφάνεια, [ $L^2$ ]

$K$ : υδραυλική αγωγιμότητα, [ $L/T$ ]

$\Delta h$ : απώλεια φορτίου που εκφράζεται ως  $\left(\frac{p_1}{\gamma + z_1}\right) - \left(\frac{p_2}{\gamma + z_2}\right)$ , [ $L$ ]

$L$ : το μήκος της στήλης, [ $L$ ]

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

Το αρνητικό πρόσημο δείχνει ότι η ταχύτητα της ροής είναι προς την κατεύθυνση που ελαττώνεται το φορτίο.

Ως εμπειρικός νόμος, ο νόμος του Darcy, έχει περιορισμένα όρια εφαρμογής. Βασικό κριτήριο χρήσης του είναι ο αριθμός Reynolds, που θα πρέπει να παίρνει τιμές μικρότερες της κρίσιμης. Ο αριθμός Reynolds για τη ροή των ρευστών μέσα σε πορώδες υλικό ορίζεται από τη σχέση:

$$R_e = \frac{V_D d_{10}}{\nu} \quad \text{Εξίσωση 2.8}$$

Όπου  $V_D$ : η ταχύτητα διαστάλαξης,

$\nu$ : η κινηματική συνεκτικότητα του ρευστού

$d_{10}$ : η χαρακτηριστική μέση διάμετρος των κόκκων του πορώδους υλικού

Έτσι ο νόμος του Darcy ορίζεται όταν ο αριθμός Reynolds είναι μικρότερος της μονάδας  $Re < 1$ , δηλαδή για στρωτή ροή. Στην περίπτωση των υπόγειων υδάτων λόγω των μικρών παροχών ισχύει ο περιορισμός αυτός, πράγμα που εξασφαλίζει την χρήση του νόμου χωρίς καμία προϋπόθεση, πλην των περιπτώσεων που συναντάται μεγάλη υδραυλική κλίση π.χ. κοντά σε φρέαρ άντλησης και σε περιπτώσεις τυρβώδους ροής π.χ. όταν υπάρχει βασάλτης ή ασβεστόλιθος με μεγάλα ανοίγματα (Καρατζάς, 2016).

## 2.3 Γενική Μορφή νόμου Darcy

Η παραπάνω διατύπωση για το νόμο του Darcy αφορά στρωτή ροή (ισχύει ο περιορισμός του Reynolds Number), όμως για την πλήρη τρισδιάστατη περιγραφή της υπόγειας ροής σε **ισότροπα μέσα** προκύπτει:

$$\begin{bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{bmatrix} = -K \begin{bmatrix} \frac{\partial h}{\partial x} \\ \frac{\partial h}{\partial y} \\ \frac{\partial h}{\partial z} \end{bmatrix} \quad \text{Εξίσωση 2.9}$$

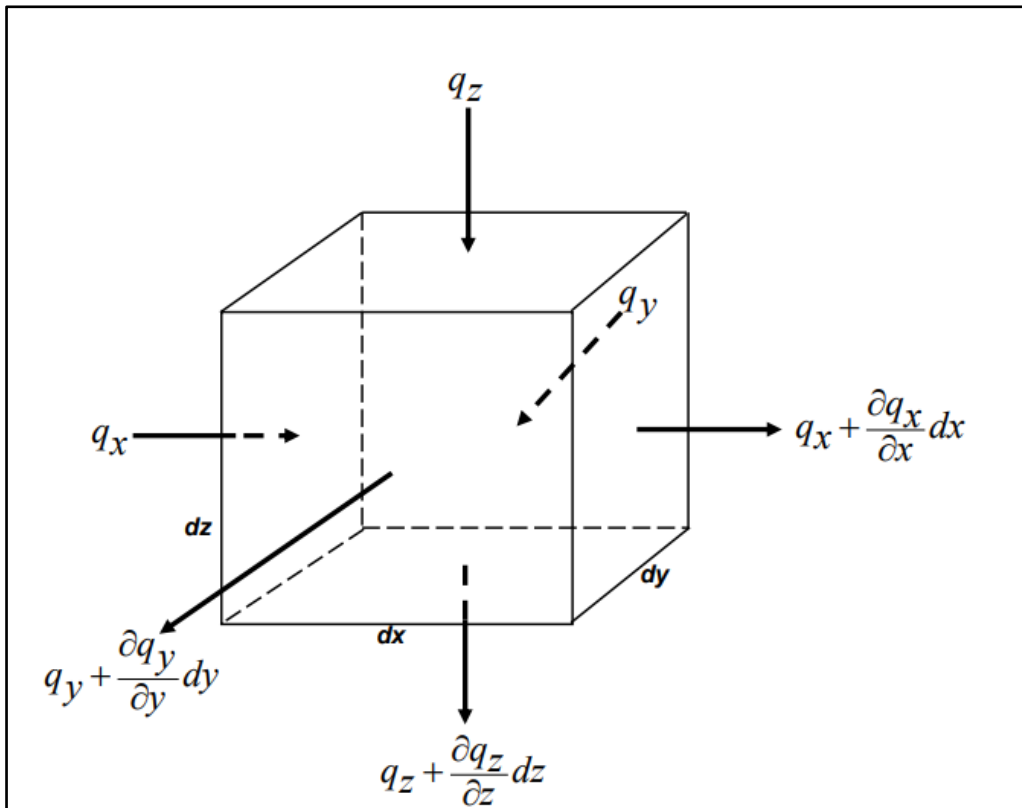
Στην περίπτωση που ο εδαφικός σχηματισμός είναι ανισότροπος, δηλαδή η υδραυλική αγωγιμότητα μεταβάλλεται από κατεύθυνση σε κατεύθυνση, αλλάζει η μορφή του νόμου του Darcy. Αυτό συμβαίνει διότι σε ένα ανισότροπο μέσο η

ειδική παροχή σε μια διεύθυνση δεν εξαρτάται μόνο από υδραυλική κλίση στην κατεύθυνση αυτή, αλλά και από τις αντίστοιχες υδραυλικές κλίσεις στις κάθετες διευθύνσεις. Έτσι για **ανισότροπα μέσα ο νόμος του Darcy** εμφανίζεται στην γενική του μορφή :

$$\begin{bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial h}{\partial x} \\ \frac{\partial h}{\partial y} \\ \frac{\partial h}{\partial z} \end{bmatrix} \quad \text{Εξίσωση 2.10}$$

## 2.4 Γενική Εξίσωση Μόνιμης Ροής

Όπως παρουσιάσθηκε παραπάνω ο νόμος του Darcy αποτελεί τον θεμελιώδη νόμο της υπόγειας υδραυλικής και ισχύει σε συνθήκες μόνιμης ροής. Παρέχει τρεις εξισώσεις για τον προσδιορισμό των τριών συνιστωσών της ταχύτητας διήθησης και του υδραυλικού ύψους. Έτσι είναι αναγκαία η χρήση μιας ακόμη εξίσωσης προκειμένου να λυθούν τα προβλήματα αυτής της μορφής. Η τέταρτη εξίσωση προκύπτει από την εφαρμογή της Αρχής Διατήρησης της Μάζας ή Αρχή της Συνέχειας. Σύμφωνα με την αρχή αυτή, για έναν μοναδιαίο όγκο κορεσμένου πορώδους εδαφικού υλικού η μάζα του ρευστού διατηρείται (Εικόνα 6). Μαθηματικά διατυπώνεται ως εξής:



Εικόνα 6. Στοιχειώδες παραλληλεπίπεδο πορώδους μέσου κορεσμένου με ρευστό πυκνότητας  $\rho$ , (Γ. Καρατζάς, Ροή υπόγειων υδάτων και μεταφορά ρύπων, 2016)

Σύμφωνα με την αρχή της συνέχειας σε σταθερές συνθήκες η ροή μάζας που εισέρχεται είναι ίση με τη ροή μάζας που εξέρχεται:

$$\text{Παροχή μάζας}_{in} = \text{Παροχή μάζας}_{out} \rightarrow$$

$$q_x dz dy + q_y dz dx + q_z dx dy$$

$$= \left( q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \right) dz dy + \left( q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \right) dx dz + \left( q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \right) dx dy$$

$$\rightarrow -\frac{\partial q_x}{\partial x} dx dy dz - \frac{\partial q_y}{\partial y} dx dy dz - \frac{\partial q_z}{\partial z} dx dy dz = 0 \rightarrow$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = 0$$

Εξίσωση 2.11

Συνδυάζοντας την παραπάνω εξίσωση με αυτήν που υπολογίζει την ταχύτητα διήθησης σύμφωνα με τον νόμο του Darcy για ομοιογενείς και ισότροπους υδροφορείς, προκύπτει η **γενική εξίσωση μόνιμης ροής (steady state)** σε ομοιογενείς και ισότροπους υδροφορείς:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

Εξίσωση 2.12

## 2.5 Γενική Εξίσωση Μη Μόνιμης Ροής

Στην περίπτωση μη σταθερών συνθηκών, συνυπολογίζεται και ο παράγοντας της ειδικής αποθηκευτικότητας. Αν αρχικά θεωρήσουμε για διευκόλυνση μονοδιάστατη ροή, τότε η ειδική παροχή που εισέρχεται στον μοναδιαίο όγκο ελέγχου του παραπάνω σχήματος είναι  $q_x$ , ενώ η παροχή που εξέρχεται είναι  $q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx$ . Λόγω των μη σταθερών συνθηκών η μεταβολή στην αποθηκευμένη μάζα νερού δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\Delta V = S_o V \frac{\partial h}{\partial t} dt \quad \text{Εξίσωση 2.13}$$

Από την αρχή διατήρησης της μάζας προκύπτει:

$$\Delta m = m_{in} - m_{out} \rightarrow \Delta m = \rho \left( (q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx) dydz \right) dt - \rho (q_x dydz) dt$$

$$\text{Επίσης } \Delta m = \rho \Delta V = \rho S_o V \frac{\partial h}{\partial t} dt = \rho S_o dx dydz \frac{\partial h}{\partial t} dt$$

Από τις δύο παραπάνω εξισώσεις, προκύπτει η εξίσωση συνέχειας της μονοδιάστατης ροής:

$$S_o \frac{\partial h}{\partial t} = - \left( \frac{\partial q_x}{\partial x} \right) \quad \text{Εξίσωση 2.14}$$

Αν στην παραπάνω εξίσωση αντικατασταθεί η ειδική παροχή από τη σχέση που προκύπτει από τον νόμο του Darcy τότε προκύπτει η εξίσωση της μονοδιάστατης ροής για ισότροπο και ομοιογενές μέσο:

$$S_o \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial h}{\partial x} \right) \rightarrow \frac{S_o}{K} \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \quad \text{Εξίσωση 2.15}$$

Στην περίπτωση ανισότροπου μέσου ισχύει η παραπάνω εξίσωση με την προϋπόθεση ότι η διεύθυνση στην οποία εξελίσσεται η ροή ταυτίζεται με μία από τις τρεις διεύθυνσης διαπερατότητας του πορώδους μέσου.

Σύμφωνα με τις εξισώσεις που παρουσιάστηκαν παραπάνω μπορεί να δοθεί και η γενική εξίσωση ροής σε τρισδιάστατη ροή. Επομένως **η γενική εξίσωση ροής για ομοιογενές και ισότροπο μέσο σε μη σταθερές συνθήκες:**



$$\frac{S_o}{K} \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \quad \text{Εξίσωση 2.16}$$

Η γενική εξίσωση ροή για ετερογενές και ανισότροπο μέσο σε μη σταθερές συνθήκες:

$$S_o \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) - R \quad \text{Εξίσωση 2.17}$$

Όπου R: ο ρυθμός άντλησης ή εμπλουτισμού του υπόγειου υδροφορέα [ $LT^{-1}$ ].

Για την εφαρμογή της παραπάνω εξίσωσης θα πρέπει οι κύριοι άξονες της υδραυλικής αγωγιμότητας να ταυτίζονται με τις καρτεσιανές συντεταγμένες του συστήματος.

### 3 Ρύπανση Υπόγειων Υδάτων

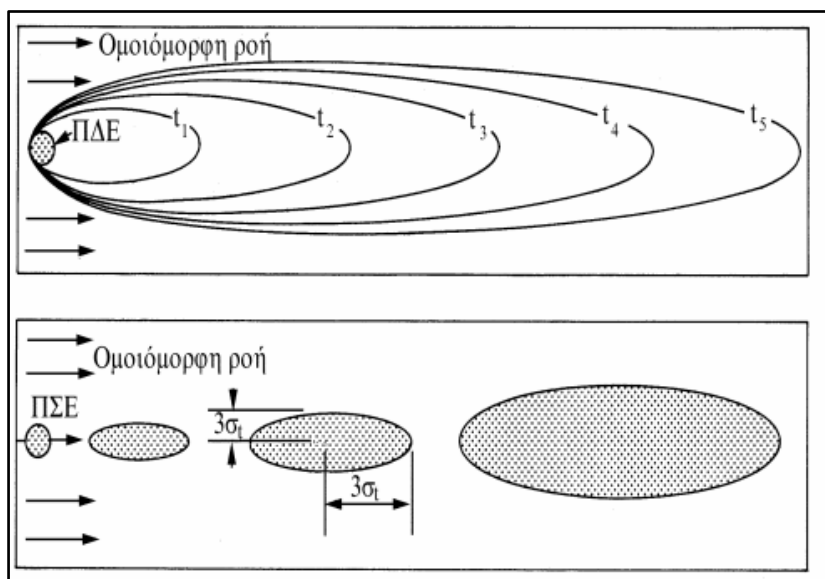
#### 3.1 Γενικά στοιχεία για την ρύπανση των υπόγειων υδάτων

Ως **ρύπανση** χαρακτηρίζεται η επιβάρυνση των υπόγειων υδάτων με ανόργανες και οργανικές χημικές ενώσεις καθώς και μικροοργανισμούς, διαλυμένες ή αιωρούμενες, καθιστώντας ακατάλληλη την άμεση ή έμμεση χρήση τους. Η ρύπανση των υπογείων υδάτων είναι αποτέλεσμα φυσικών και ανθρωπογενών παραγόντων που μεταφέρονται, εναποτίθενται και διασκορπίζονται στην επιφάνεια του εδάφους από όπου μπορούν να μεταφερθούν στα βαθύτερα στρώματα του εδάφους.

Οι ανόργανες ουσίες που χαρακτηρίζονται ως ρύποι και εντοπίζονται πιο συχνά στα υπόγεια ύδατα είναι τα νιτρικά, τα χλωριούχα και θειικά ιόντα, τα οξέα και τα βαρέα μέταλλα. Αντίστοιχα, υπάρχει πληθώρα οργανικών ενώσεων που επιβαρύνουν τα υπόγεια νερά, οι οποίες παράγονται κατά κύριο λόγο από τις βιομηχανίες. Ένα μέρος των ενώσεων αυτών διαλύεται στο νερό, ενώ υπάρχουν και ενώσεις όπως τα πετρελαιοειδή, οι οποίες μεταφέρονται με το νερό είτε επιπλέοντας σε αυτό είτε βυθισμένες στη μάζα του. Οι επιπτώσεις των περιστατικών ρύπανσης τόσο στο περιβάλλον όσο και στην ανθρώπινη υγεία,

επηρεάζονται από το είδος του ρύπου, την ποσότητα του, τον μηχανισμό κίνησής του στο υπόγεια ύδατα.

Το νερό αποτελεί τον βασικό παράγοντα μεταφοράς των ρύπων εντός του εδάφους. Το επιφανειακό νερό διηθείται και διαμέσου της ακόρεστης ζώνης κινείται στα υπόγεια υδροφόρα στρώματα, όπου και διακλαδίζεται ανάλογα με τις ισχύουσες συνθήκες ροής. Το ρυπασμένο νερό ακολουθεί τους καθορισμένους μηχανισμούς μεταφοράς του υπόγειου νερού, οι οποίοι παρουσιάζονται αναλυτικά στην συνέχεια. Η μορφή κίνησης του ρυπασμένου νερού μέσα στον υδροφορέα έχει την μορφή πλουμίου ή θυσάνου ακολουθώντας τις γραμμές της ροής, όπως αυτές ισχύουν στην θέση της πηγής (Εικόνα 7).



Εικόνα 7. Πλούμιο ρύπανσης σε ισότροπο υδροφορέα από πηγή συνεχούς (επάνω) και στιγμιαίας (κάτω) εκπομπής (Freeze-Cherry, 1979, από Καλλέργη, 2000)

Το ρυπασμένο νερό με το πέρασμα του χρόνου είτε εξασθενεί μέσα στον υδροφορέα, είτε οδηγείται προς κάποιο φρέαρ, είτε εκβάλλει στα επιφανειακά υδάτινα συστήματα όπως θάλασσες, ποτάμια, λίμνες. Η εξασθένηση της ρύπανσης είναι αποτέλεσμα της ικανότητας αυτοκαθαρισμού των εδαφών καθώς και διαδικασιών που πραγματοποιούνται στην ακόρεστη ζώνη. Μέσω των διαδικασιών αυτών παρατηρείται μείωση του ρυπαντικού φορτίου και αναγέννηση του ρυπασμένου νερού. Στην ακόρεστη ζώνη λόγω της ύπαρξης μεγάλης ποσότητας οξυγόνου και οργανικής ύλης, παρατηρείται η ύπαρξη αερόβιων διεργασιών. Οι διεργασίες αυτές συντελούν στην μείωση του BOD και την μετατροπή του αζώτου και της αμμωνίας σε νιτρικά ιόντα με τη βοήθεια βακτηρίων. Στην ζώνη αυτή, το νερό φιλτράρεται λόγω της αργής κίνησής του και έτσι απομακρύνονται βακτήρια και παθογόνοι μικροοργανισμοί, τα οποία προσροφώνται από τα στοιχεία του εδάφους. Όταν το ρυπασμένο νερό εισέλθει στην κορεσμένη ζώνη, η εξασθένηση της ρύπανσης επηρεάζεται από το είδος του ρύπου και τα υδραυλικά

χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου υδροφορέα. Κάποιες ουσίες, όπως τα νιτρικά που θα αναλυθούν εκτενέστερα στην παρούσα διπλωματική εργασία, δεν υφίστανται εξασθένιση στην κορεσμένη ζώνη. Γίνεται αντιληπτό πως η ύπαρξη ακόμα και μικρού πάχους ακόρεστης ζώνης, λειτουργεί ως προστασία του υπόγειου υδροφορέα από περιπτώσεις ρύπανσης.

Για την διαχείριση και αντιμετώπιση της υποβάθμισης της ποιότητας των υπόγειων υδάτων, είναι απαραίτητη η γνώση της πορείας της ρύπανσης. Αρχικά πρέπει να προσδιορισθούν οι πηγές ρύπανσης με σκοπό να περιορισθεί η μελλοντική εξάπλωση του φαινομένου. Στην συνέχεια να μελετηθούν οι μηχανισμοί εξάπλωσης των ρύπων στο υπόγειο υδροφορέα. Η μελέτη αυτή δίνει αποτελέσματα για την συγκέντρωση και το χρόνο εμφάνισης του ρύπου σε συγκεκριμένα σημεία. Τέλος, με την ανάπτυξη κατάλληλων σχεδίων δράσης, μπορεί να αποκατασταθεί η ρύπανση στο υπόγειο υδροφορέα.

### 3.2 Πηγές ρύπανσης

Οι πηγές ρύπανσης των υπόγειων υδάτων είναι πολυάριθμες. Για την καλύτερη μελέτη αυτών μπορούν να ταξινομηθούν αν ληφθεί υπ' όψη κάποιο βασικό χαρακτηριστικό της πηγής. Στόχος της ταξινόμησης των πηγών είναι η καλύτερη μελέτη της ρύπανσης λόγω της διαφορετικής συμπεριφοράς εξέλιξης της κάθε περίπτωσης ρύπανσης και του τρόπου αντιμετώπισης αυτής. Έτσι, θεωρώντας αρχικά ως κριτήριο την έκταση της πηγής, χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες στις σημειακές και στις διάχυτες πηγές. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των δύο αυτών ομάδων.

- **Σημειακές πηγές**, όπου ο ρύπος μεταφέρεται μέσω μικρής επιφάνειας σε σχέση με την επιφάνεια του συνολικού υδροφόρου στρώματος το οποίο δέχεται τον ρύπο. Στις σημειακές πηγές αναφέρονται οι εκροές των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων, διαρροές από δεξαμενές αποθήκευσης ή μεταφοράς πετρελαίου, διαρροές στραγγισμάτων από χωματερές.
- **Διάχυτες πηγές**, η επιφάνεια εισαγωγής του ρύπου είναι μεγαλύτερη συγκριτικά αυτής των σημειακών πηγών ή αποτελείται από πολυάριθμες κοντινές σημειακές πηγές. Παράδειγμα διάχυτων πηγών αποτελεί η αλόγιστη χρήση λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων σε καλλιεργούμενες περιοχές (νιτρορύπανση).

Περαιτέρω ταξινόμηση των πηγών μπορεί να γίνει με κριτήριο την δραστηριότητα ή ενέργεια που προκαλεί την εμφάνιση της ρύπανσης. Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό, οι πηγές ρύπανσης των υπόγειων υδάτων προέρχονται από φυσικές διεργασίες, αστικές-οικιακές, βιομηχανικές, αγροτικές δραστηριότητες και

από ραδιενεργές διεργασίες. Στην συνέχεια γίνεται εκτενέστερη περιγραφή των χαρακτηριστικών της κάθε κατηγορία.

- **Φυσικές διεργασίες**

Ως μορφές φυσικής ρύπανσης χαρακτηρίζονται η διείσδυση του θαλασσινού νερού, η μεταφορά ρύπων της ατμόσφαιρας, ο επαγωγικός εμπλουτισμός υδροφορέων με ακάθαρτα επιφανειακά νερά, η θερμική ρύπανση και ο τεχνητός εμπλουτισμός.

Η **εισχώρηση του θαλασσινού νερού** θα μπορούσε να ανήκει στη ρύπανση λόγω αστικών και γεωργικών δραστηριοτήτων καθώς προκαλείται από την υπεράντληση παράκτιων υδροφορέων. Παρά το γεγονός αυτό, μπορεί να ταξινομηθεί σε αυτή την κατηγορία κυρίως λόγω της συσσώρευσης αλάτων σε γεωλογικούς σχηματισμούς υδροφορέων κατά την πάροδο των χρόνων. Οι **ρύποι της ατμόσφαιρας**, οι οποίοι προέρχονται κυρίως από βιομηχανικές εκπομπές, μεταφέρονται με τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα στην επιφάνεια του εδάφους και από εκεί διεισδύουν στα υπόγεια ύδατα. Ο **επαγωγικός εμπλουτισμός υδροφορέων** έχει ως αποτέλεσμα να μεταφέρονται σε αυτούς οργανικές και ανόργανες ουσίες ακόμα και ιοί ή βακτήρια, από επιφανειακούς αποδέκτες που συνδέονται υδραυλικά με υπόγειους υδροφορείς.

- **Αστικές-οικιακές δραστηριότητες**

Οι αστικές δραστηριότητες έχουν ως αποτέλεσμα την παραγωγή στερεών απορριμμάτων και αστικών λυμάτων. Σε περίπτωση που τα απορρίμματα αυτά διατίθενται ανεπεξέργαστα σε λάκκους στο έδαφος, ο κίνδυνος ρύπανσης των υπόγειων νερών είναι άμεσος. Για την αποφυγή της απευθείας απόρριψης των οικιακών λυμάτων στο έδαφος χρησιμοποιούνται σηπτικές δεξαμενές για την κατακράτηση και το χώνεμα των στερεών σε συνδυασμό με απορροφητικές τάφρους βαθιάς διήθησης. Η μη ορθή τοποθέτηση, λειτουργία και καθαρισμός της παραπάνω διάταξης μπορεί να οδηγήσει στην μεταφορά λυμάτων στα κατώτερα υδρολογικά στρώματα.

- **Βιομηχανικές δραστηριότητες**

Η παραγωγή αποβλήτων από τις βιομηχανίες είναι μεγάλη και προέρχεται κυρίως από τις διαδικασίες παραγωγής, επεξεργασίας και ψύξης. Οι ρύποι που προέρχονται από βιομηχανικές μονάδες διαφέρουν αν περιέχουν ανόργανα στοιχεία ή οργανικές ενώσεις. Ρύποι που περιέχουν ανόργανα στοιχεία είναι πλούσιοι σε μέταλλα, τα οποία είναι επικίνδυνα λόγω της υψηλής τους τοξικότητας. Στην περίπτωση που οι ρύποι περιέχουν οργανικές ενώσεις, εντοπίζονται κυρίως εντομοκτόνα και φυτοφάρμακα και πετρελαιοειδή. Βιομηχανικά απόβλητα διατίθενται μέσω του αέρα, εδάφους, επιφανειακών και υπόγειων νερών, διαρροών καθώς και ατυχημάτων.

Οι διαρροές συμβαίνουν κυρίως στους αγωγούς μεταφοράς και στις δεξαμενές αποθήκευσης των λυμάτων. Ατυχήματα προκαλούνται κυρίως από την μεταφορά χημικών ή πετρελαιοειδών τα οποία ανατρέπονται. Λόγω της ευφλεκτότητας των στοιχείων που μεταφέρουν πραγματοποιείται άμεση έκπλυση στην περιοχή με μεγάλες ποσότητες νερού. Αποτέλεσμα της ενέργειας αυτής είναι η μεταφορά νερού και ρύπων στο έδαφος και η ταυτόχρονη διήθηση τους στους υπόγειους υδροφορείς.

- **Αγροτικές δραστηριότητες**

Χαρακτηριστικό των πηγών ρύπανσης λόγω αγροτικής δραστηριότητας είναι η κατανομή τους στον χώρο σε αντίθεση με τον σημειακό χαρακτήρα των άλλων πηγών ρύπανσης. Πηγές ρύπανσης λόγω αγροτικών δραστηριοτήτων αποτελούν τα ζωικά λύματα, το νερό των αρδεύσεων και τα διάφορα χημικά που εφαρμόζονται στις αγροτικές εκτάσεις.

Οι κτηνοτροφικές μονάδες παράγουν μεγάλες ποσότητες ζωικών αποβλήτων, τα οποία απορρίπτονται συνήθως απευθείας στο έδαφος. Οι ενώσεις που περιέχονται σε αυτά διαλύονται στο έδαφος και διηθούνται στα υδροφόρα στρώματα.

Το νερό που αρδεύτηκε και δεν καταναλώθηκε επιστρέφει στους υπόγειους υδροφορείς, όμως με πολύ μεγαλύτερη αλατότητα από αυτό που χρησιμοποιήθηκε κατά την άρδευση. Η αύξηση της αλατότητας είναι αποτέλεσμα την διάλυσης των θρεπτικών στοιχείων του εδάφους κατά την άρδευση.

Τα χημικά που χρησιμοποιούνται είναι οργανικές και ανόργανες ενώσεις αζώτου, καλίου, φωσφόρου καθώς και εντομοκτόνα και ζιζανιοκτόνα. Συγκεκριμένα η χρήση αζωτούχων λιπασμάτων έχει αυξηθεί δραματικά τα τελευταία χρόνια, με αποτέλεσμα την έκπλυση των νιτρικών στο υπόγειο νερό. Οι συνέπειες της μη ορθολογικής χρήσης των λιπασμάτων και της συσσώρευσης μεγάλων ποσοτήτων νιτρικών είναι η διατάραξη της ισορροπίας των οικοσυστημάτων (ευτροφισμός) και της ανθρώπινης υγείας.

- **Ραδιενεργές Διεργασίες**

Τα ραδιενεργά απόβλητα, που προέρχονται κυρίως από πυρηνικούς αντιδραστήρες για την παραγωγή ενέργειας, συνήθως διατίθενται στο έδαφος. Συνεπώς, ραδιενεργοί ρύποι φθάνουν στα υπόγεια ύδατα από όπου και μεταφέρονται, προκαλώντας μεγάλους κινδύνους στην δημόσια υγεία ακόμα και αν βρίσκονται σε ελάχιστες συγκεντρώσεις.

### **3.3 Μηχανισμοί μεταφοράς ρύπων στους υπόγειους υδροφορείς**

Οι μηχανισμοί μεταφοράς των ρύπων στους υπόγειους υδροφορείς διακρίνονται σε φυσικούς, χημικούς, βιολογικούς και πυρηνικούς. Η ορθή και έγκαιρη γνώση του μηχανισμού μεταφοράς του ρύπου, οδηγεί στην άμεση προστασία και εξυγίανση των υπόγειων υδροφορέων. Γνωρίζοντας τους φυσικοχημικούς μηχανισμούς και με την χρήση κατάλληλων μαθηματικών μοντέλων, μπορεί να:

- προβλεφθεί ο χρόνος άφιξης και η συγκέντρωση των ρύπων σε συγκεκριμένα σημεία,
- να σχεδιασθούν αποδοτικά μέτρα για την αποκατάσταση των μολυσμένων υδροφορέων,
- να μελετηθεί η ασφαλής και οικονομική διάθεση των αποβλήτων για την αποφυγή μελλοντικής εξάπλωσης των ρύπων.

Στους φυσικούς μηχανισμούς μεταφοράς ρύπων ανήκει η μέθοδος της συναγωγής, διάχυσης και διασποράς. Στην συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά οι μέθοδοι αυτοί και οι μαθηματικές εξισώσεις που τις διέπουν.

Με την διαδικασία της **συναγωγής**, οι διαλυμένες ουσίες ακολουθούν την κίνηση του υπόγειου νερού διαμέσου των πόρων λόγω διαφοράς στην υδραυλική κλίση, από περιοχές με υψηλή ενέργεια σε περιοχές χαμηλότερης ενέργειας. Η ποσότητα της διαλυμένης ουσίας που μεταφέρεται λόγω της κίνησης του νερού εξαρτάται από τη συγκέντρωσή της στα υπόγεια ύδατα καθώς και από την ποσότητα του νερού της υπόγειας ροής. Η κίνηση γίνεται με την μέση γραμμική ταχύτητα του νερού, σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$v_x = \frac{K}{n_e} \frac{dh}{dl} \quad \text{Εξίσωση 3.1}$$

Όπου  $v_x$ : μέση γραμμική ταχύτητα [L/T]

$K$ : υδραυλική αγωγιμότητα [L/T]

$n_e$ : ενεργό πορώδες

$dh/dl$ : υδραυλική κλίση [L/L]

Η ροή της μάζας της ουσίας,  $F_x$ , λόγω συναγωγής είναι ίση με την ποσότητα του νερού που ρέει πολλαπλασιασμένη με την συγκέντρωση των διαλυμένων στερεών, σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$F_x = v_x n_e C \quad \text{Εξίσωση 3.2}$$

Η μεταφορά του ρύπου λόγω της συναγωγής εκφράζεται μαθηματικά από την παρακάτω εξίσωση (Fischer et al., 1979):

$$\frac{DC}{Dt} = \frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} \quad \text{Εξίσωση 3.3}$$

Αν στο πεδίο ροής δεν παρατηρείται δημιουργία ή απώλεια μάζας, τότε ο πρώτος όρος μηδενίζεται. Έτσι προκύπτει η μονοδιάστατη εξίσωση μεταφοράς μάζας:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -v_x \frac{\partial C}{\partial x} \quad \text{Εξίσωση 3.4}$$

Η κλίση της συγκέντρωσης  $C$  κατά την διεύθυνση του χρόνου είναι ανάλογη της αρνητικής κλίσης της συγκέντρωσης κατά την διεύθυνση της απόστασης  $x$ .

Με την διαδικασία της **διάχυσης**, οι διαλυμένες ουσίες μεταφέρονται από μια περιοχή υψηλής συγκέντρωσης προς μια άλλη περιοχή χαμηλότερης συγκέντρωσης. Διάχυση παρατηρείται όσο υπάρχει μεταβολή στην συγκέντρωση μιας διαλυμένης ουσίας ακόμα και όταν δεν υπάρχει κίνηση του υγρού. Στην περίπτωση που παρατηρείται μόνο η διεργασία της διάχυσης, το σύστημα αποκτά ομοιόμορφες συνθήκες συγκέντρωσης εξομαλύνοντας κάθε χωρική διαφοροποίηση.

Η ροή μάζας ενός ρύπου λόγω της διάχυσης είναι ανάλογη της διαφοράς των συγκεντρώσεων. Η παραπάνω διατύπωση αποτελεί τον **1<sup>ο</sup> νόμο του Fick**, που περιγράφει την μονοδιάστατη ροή μάζας λόγω του φαινομένου της διάχυσης σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$q = -D_d \frac{\partial C}{\partial x} \quad \text{Εξίσωση 3.5}$$

Όπου  $q$ : η ροή μάζας του ρύπου, δηλαδή η μάζα που διέρχεται ανά μονάδα χρόνου από μια επιφάνεια κάθετη στην κίνηση του ρευστού [ $ML^{-2}T^{-1}$ ]

$D_d$ : ο συντελεστής μοριακής διάχυσης [ $L^2T^{-1}$ ]

$C$ : η συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας [ $ML^{-3}$ ]

$\frac{\partial C}{\partial x}$ : η μεταβολή (κλίση) της συγκέντρωσης [ $ML^{-3}L^{-1}$ ]

Στην παραπάνω εξίσωση, το αρνητικό πρόσημο δείχνει την κίνηση του ρευστού από περιοχές μεγάλης συγκέντρωσης σε περιοχές χαμηλότερης. **Ο συντελεστής της μοριακής διάχυσης** εξαρτάται από τις ιδιότητες του ρευστού,

της διαλυμένης σε αυτό ουσίας και την θερμοκρασία. Στην περίπτωση που η συγκέντρωση μεταβάλλεται κατά το πέρασμα του χρόνου, η μεταφορά της διαλυμένης ουσίας περιγράφεται από τον **2<sup>ο</sup> νόμο του Fick**, σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

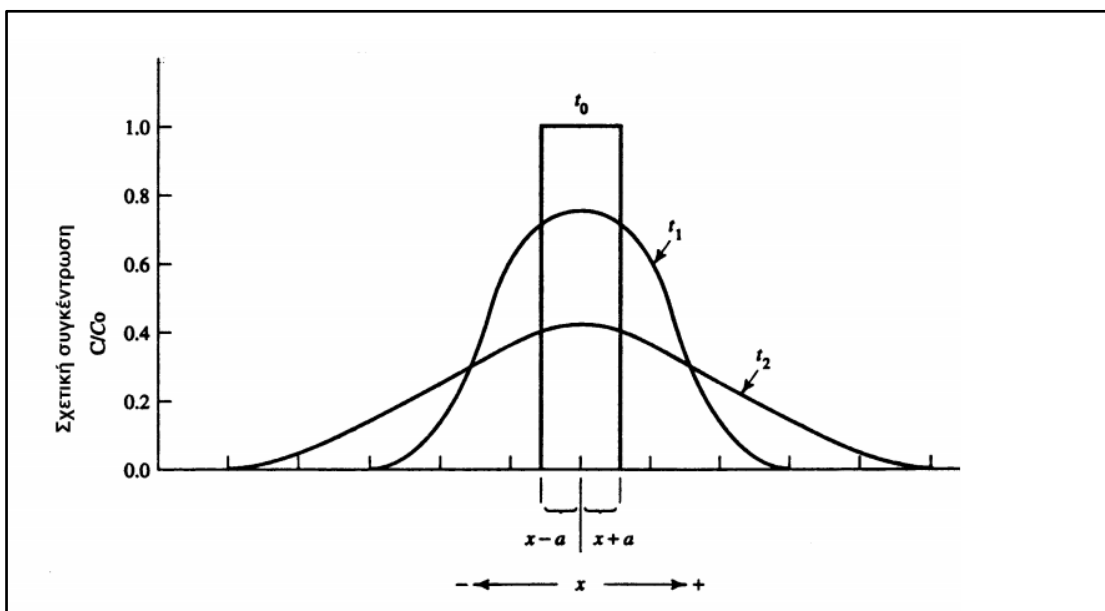
$$\frac{\partial C}{\partial t} = -D_d \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad \text{Εξίσωση 3.6}$$

Πρέπει να τονισθεί πως κατά την κίνηση σε πορώδη υλικά τα ιόντα ακολουθούν μακρύτερες διαδρομές από το νερό, γύρω από τους πόρους, με αποτέλεσμα η διάχυση να γίνεται με αργότερους ρυθμούς. Για τον λόγο αυτόν, υπολογίζεται η πραγματική σταθερά διάχυσης σύμφωνα με την σχέση:

$$D^* = \omega D_d \quad \text{Εξίσωση 3.7}$$

Όπου  $\omega$ : σταθερά που σχετίζεται με την στροφική ή ελικοειδή κίνηση, με τιμές μικρότερες της μονάδας.

Κατά την διάχυση η αρχική συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας απλώνεται από το μέρος που εμφανίστηκε προς το πορώδες μέσω ακόμα και αν δεν παρατηρείται κίνηση των υπόγειων υδάτων. Ο τρόπος κίνησης της συγκέντρωσης της διαλυμένης ουσίας φαίνεται να ακολουθεί την κανονική ή Gaussian κατανομή όπως φαίνεται στην Εικόνα 8.



Εικόνα 8. Κατανομή προσθήκης διαλυμένης ουσίας με τον χρόνο λόγω διάχυσης (Γ. Καρατζάς, Ροή υπόγειων υδάτων και μεταφορά ρύπων, 2016)



Αν στην εξίσωση 3.6 που διατυπώνει τον 2<sup>ο</sup> νόμο Fick, εφαρμοστούν οι κατάλληλες οριακές και αρχικές συνθήκες, μπορεί να προκύψει η ακόλουθη λύση. Έτσι, θεωρώντας ότι σε ένα σημείο ενός πορώδους μέσου έχουμε σταθερή παροχή μιας ουσίας με αρχική συγκέντρωση  $C_0$ , τότε η συγκέντρωση  $C_i(x,t)$  της ουσίας σε απόσταση  $x$  από την πηγή μετά από χρόνο  $t$  είναι η ακόλουθη (Crank 1956):

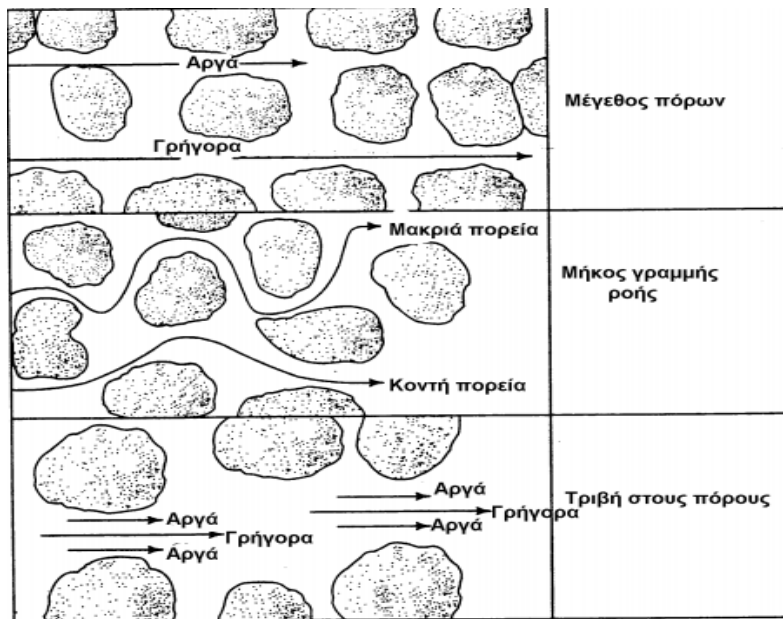
$$C_i(x,t) = C_0 \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2(D^*t)^{0.5}} \right) \quad \text{Εξίσωση 3.8}$$

Ο όρος  $\operatorname{erfc}$  εκφράζει την συμπληρωματική συνάρτηση σφάλματος (complementary error function), η οποία αποτελεί μαθηματική συνάρτηση και σχετίζεται με την Gaussian κατανομή που ακολουθεί ο μηχανισμός της διάχυσης. Για την εύρεση της τιμής της συνάρτησης σφάλματος χρησιμοποιείται πίνακας, ο οποίος παρουσιάζεται στο Παράρτημα.

Ένας ακόμα φυσικός μηχανισμός μεταφοράς των ρύπων στους υπόγειους υδροφορείς, είναι αυτός της διασποράς. Κατά την **διασπορά**, παρατηρείται εξάπλωση του όγκου του ρυπασμένου νερού σε ένα μέσο λόγω της ανάμειξης που συμβαίνει κατά μήκος των διαδρομών της ροής από την διαφορά ταχύτητας. Η διασπορά διακρίνεται σε **μηχανική** και **υδροδυναμική**.

Το φαινόμενο της μηχανικής διασποράς οφείλεται (Εικόνα 9):

- Μεγαλύτερη ταχύτητα ροής στο μέσο των πόρων από ότι πλευρικά (κινούμενο νερό των ποταμών),
- Στις διαφοροποιήσεις στο μέγεθος των πόρων, επιτρέποντας γρηγορότερη κίνηση του υγρού σε κάποιες περιπτώσεις
- Στην διαφορετική κίνηση μορίων στο πορώδες μέσο εκτελώντας μεγαλύτερες διαδρομές.



Εικόνα 9. Παράγοντες που προκαλούν διαμήκη μηχανική διασπορά (Fetter,1994)

Η μηχανική διασπορά διακρίνεται ανάλογα με την διεύθυνση εξάπλωσης της διαλυμένης ουσίας σε διαμήκη και εγκάρσια. Κατά την διαμήκη διασπορά, η ανάμειξη συμβαίνει κατά μήκος των διαδρομών ροής του ρευστού. Αντίθετα στην εγκάρσια διασπορά, η διαλυμένη ουσία απλώνεται κάθετα στην διεύθυνση ροής. Θεωρώντας πως η μηχανική διασπορά μπορεί να περιγραφεί από τον νόμο του Fick καθώς και ότι η ποσότητα της μηχανικής διασποράς είναι συνάρτηση της μέσης γραμμικής ταχύτητας, τότε προκύπτει ο **συντελεστής δυναμικής διασποράς,  $\alpha$** . Ο συντελεστής αυτός αποτελεί μια ιδιότητα του υλικού και διαφέρει για διαμήκη και εγκάρσια διασπορά. Έτσι η μηχανική διασπορά δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$D' = v_x a_L \quad \text{Εξίσωση 3.9}$$

Όπου  $D'$ : η μηχανική διασπορά

$v_x$ : η μέση ταχύτητα ροής [ $LT^{-1}$ ]

$a_L$ : συντελεστής δυναμικής διασποράς [L]

Για την περιγραφή του μηχανισμού της ταυτόχρονης διάχυσης και της διασποράς, χρησιμοποιείται ο όρος **υδροδυναμική διασπορά**. Ο συντελεστής υδροδυναμικής διασποράς δίνεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$D_L = a_L v_i + D^* \quad \text{Εξίσωση 3.10i}$$

$$D_T = a_T v_i + D^* \quad \text{Εξίσωση 3.10ii}$$

Όπου  $D_L, D_T$ : συντελεστής υδροδυναμικής διασποράς για διαμήκη και εγκάρσια κατεύθυνση ροής αντίστοιχα

$a_L, a_T$ : συντελεστής διαμήκης και εγκάρσιας διασποράς αντίστοιχα.

Η μονοδιάστατη εξίσωση για το μηχανισμό της υδροδυναμικής διασποράς σε ισότροπο πορώδες μέσο από πηγή ρύπανσης σταθερής συγκέντρωσης, περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} \quad \text{Εξίσωση 3.11}$$

Από την παραπάνω εξίσωση και θεωρώντας μεταφορά συντηρητικών ρύπων από μια πηγή με σταθερή συγκέντρωση σε ισότροπα πορώδη μέσα για αρχική συγκέντρωση  $C_0$ , προκύπτει ότι η συγκέντρωση  $C_i(x,t)$  της ουσίας σε απόσταση  $x$  από την πηγή μετά από χρόνο  $t$  είναι η ακόλουθη (Ogata-Banks (1961)):

$$C(x, t) = C_0 \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{L - v_x t}{2(D_L t)^{0.5}} \right) + \exp \left( \frac{v_x L}{D_L} \right) \operatorname{erfc} \left( \frac{L + v_x t}{2(D_L t)^{0.5}} \right) \right] \quad \text{Εξίσωση 3.12}$$

Σε μεγάλη απόσταση από την πηγή, η ανώτερο εξίσωση μπορεί να απλοποιηθεί, αφού ο δεύτερος όρος της αγκύλης θεωρείται πρακτικά ίσος με το μηδέν και μπορεί να παραλειφθεί. Έτσι η εξίσωση δίνεται από την ακόλουθη απλοποιημένη μορφή (Sauty 1980):

$$C(x, t) = C_0 \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{L - v_x t}{2(D_L t)^{0.5}} \right) \right] \quad \text{Εξίσωση 3.13}$$

Πέρα από τους φυσικούς μηχανισμούς μεταφοράς ρύπων στους υπόγειους υδροφορείς που αναφέρθηκαν παραπάνω, μεταφορά μπορεί να συμβεί μέσω βιολογικών και χημικών διεργασιών. Στις βιολογικές ανήκουν η αποσύνθεση και η αποδόμηση των ρύπων με τη βοήθεια μικροοργανισμών τόσο με αερόβιες όσο και αναερόβιες διεργασίες. Στις χημικές ανήκουν η προσρόφηση των ρύπων στην επιφάνεια πετρωμάτων, η ανταλλαγή ιόντων μεταξύ των ρύπων και των εδαφικών κόκκων, η καθίζηση, η αναγωγή και η οξειδωση των ρύπων. Τέλος παρατηρείται και η μεταφορά ρύπων λόγω πυρηνικών διεργασιών, όπως είναι η βαθμιαία διάσπαση των ισοτόπων με την πάροδο του χρόνου.

Πρέπει να τονισθεί πως οι ρύποι διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες σε σχέση με την ικανότητά τους να μετασχηματίζονται και να υποβαθμίζονται μέσα στο περιβάλλον. Οι δύο κατηγορίες είναι οι εξής:

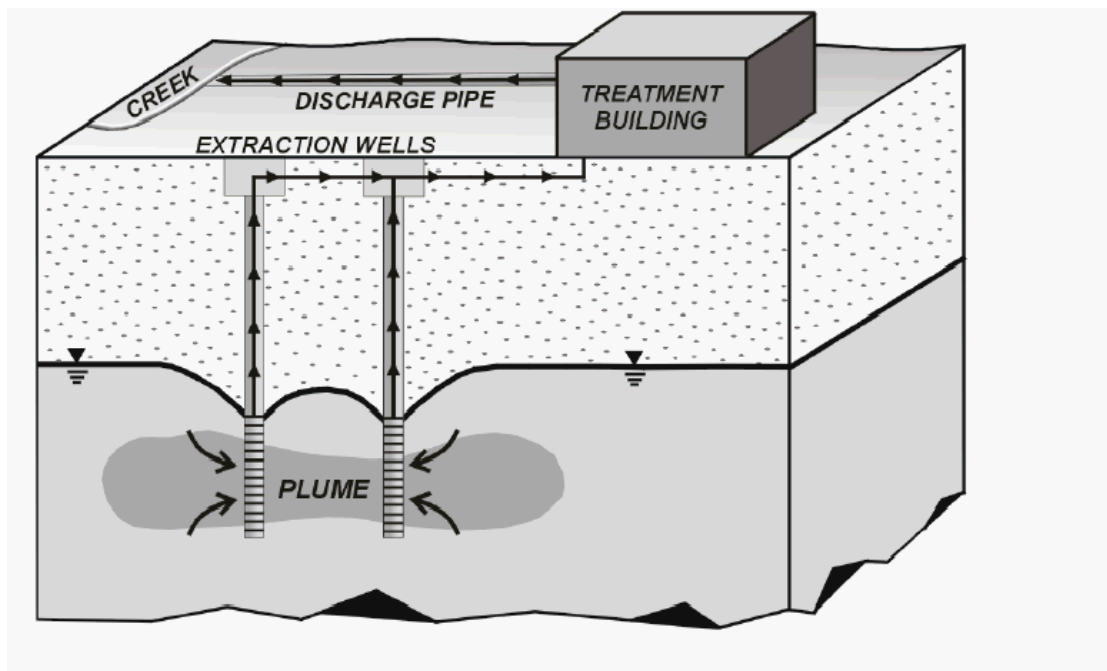
- **Συντηρητικοί (conservative)**, οι ρύποι που ανήκουν στην κατηγορία αυτή, χαρακτηρίζονται ως σταθερές ενώσεις αφού δεν μετασχηματίζονται φυσικά ή χημικά σε λιγότερο τοξικές ουσίες όταν διαλυθούν στο νερό. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα μέταλλα και τα άλατα.
- **Μη συντηρητικοί (no conservative)**, παρατηρείται ότι οι ρύποι της κατηγορίας αυτής μετασχηματίζονται σε λιγότερο τοξικές ουσίες αφού διαλυθούν στο νερό μέσω χημικών ή βιολογικών διεργασιών. Με το μετασχηματισμό αυτό παρατηρείται υποβάθμιση του ρυπαντικού τους φορτίου. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οργανικές ενώσεις, BOD και η αμμωνία.

### 3.4 Εξυγίανση υπόγειων υδροφορέων

Η εξυγίανση των υπόγειων υδροφορέων έχει ως στόχο την επαναφορά της ποιότητας των υπόγειων νερών στην κατάσταση πριν την ρύπανσή τους. Λόγω της αδυναμίας απομάκρυνσης όλων των μορίων του ρύπου, δεν μπορεί να υπάρξει ολική αποκατάσταση. Η επιλογή της μεθόδου καθορίζεται από τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του ρύπου, την έκταση της ρύπανσης, την υδρογεωλογία και γεωχημική μορφολογία του εδάφους, την διεύθυνση και την ταχύτητα ροής του υπόγειου νερού, τις οικονομικοτεχνικές συνθήκες και την μελλοντική χρήση της ρυπασμένης περιοχής.

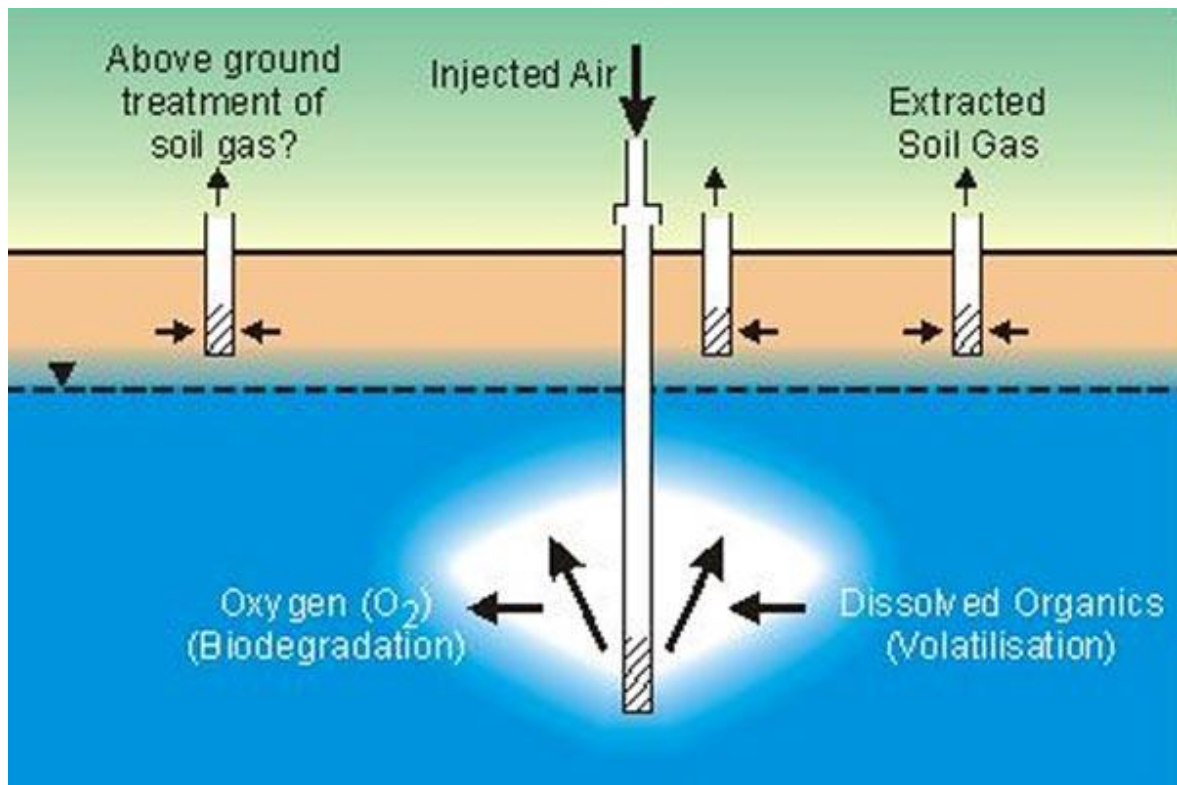
Οι σημαντικότερες μέθοδοι αποκατάστασης των υπόγειων υδροφορέων είναι οι ακόλουθες:

- **Μέθοδος άντλησης και απορρύπανσης διαλυμένων ρυπαντών (pump and treat).** Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται στην περίπτωση διαλυμένων ρυπαντών στο υπόγειο νερό. Με τη χρήση γεωτρήσεων αντλείται υπόγειο νερό και στη συνέχεια μεταφέρεται σε μονάδα επεξεργασίας. Αφού το ρυπασμένο νερό υποστεί την κατάλληλη επεξεργασία είναι δυνατή η επανεισαγωγή του στον υδροφόρο ορίζοντα, η διάθεση του στο έδαφος, η διοχέτευσή του σε υδρόρευμα (Εικόνα 10). Χαρακτηριστικά μεθόδου:
  - Αποτελεσματικότητά της εξαρτάται από την γεωλογία των υδροφορέων και τη φύση των ρυπαντών
  - Χρονοβόρα μέθοδος, συνήθως δεν αντλούνται όλα τα ρυπασμένα ύδατα
  - Πολύ δαπανηρή
  - Απόδοσή της αντιστρόφως ανάλογη του βαθμού απορρόφησης του ρύπου από το έδαφος



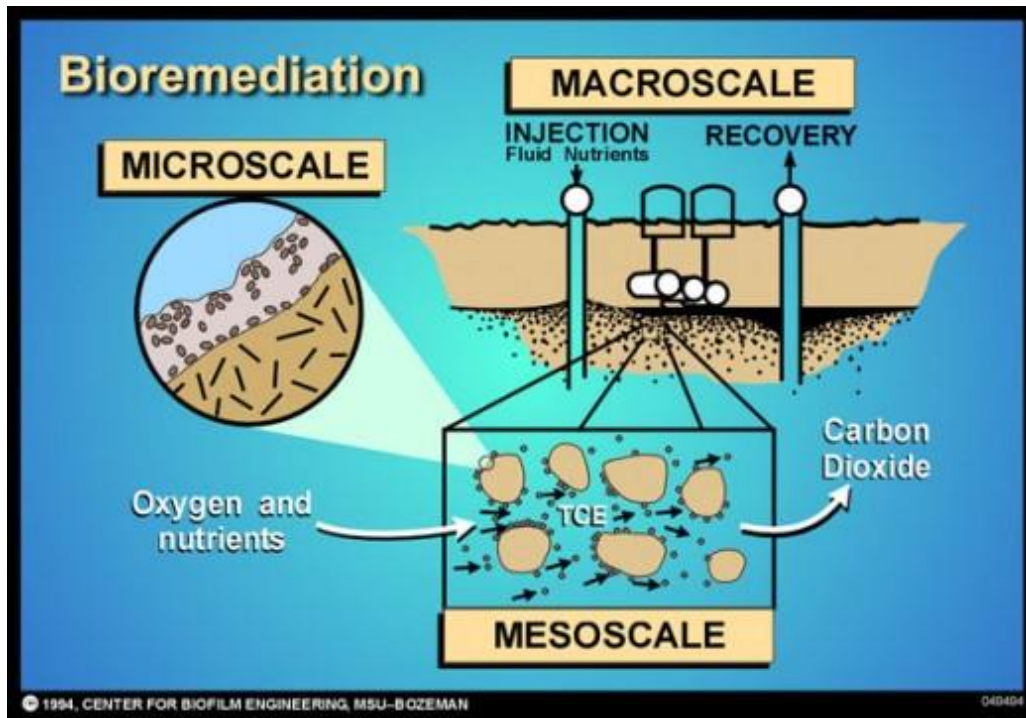
Εικόνα 10. Διάταξη μεθόδου pump and treat ([www.wsr.it/en/products/remediation-systems](http://www.wsr.it/en/products/remediation-systems))

- **Αεροδιαχωρισμός (air stripping).** Με την μέθοδο του αεροδιαχωρισμού διαβιβάζεται μέσω φυσητήρα αέρας, προκαλώντας την εξάτμιση των πτητικών ουσιών σύμφωνα με τον νόμο του Henry.
- **Αεροδιασπορά (air sparging).** Με την χρήση κατακόρυφου σωλήνα διαβιβάζεται αέρας στην κορεσμένη και ακόρεστη ζώνη ώστε να επιτευχθεί η εξαέρωση του ρυπαντή (Εικόνα 11). Με την αεροδιασπορά πραγματοποιείται ταυτόχρονη απορρύπανση τη κορεσμένης και ακόρεστης ζώνης.



Εικόνα 11. Διάταξη μεθόδου Αεροδιασποράς ([www.wsr.it/en/products/remediation-systems](http://www.wsr.it/en/products/remediation-systems))

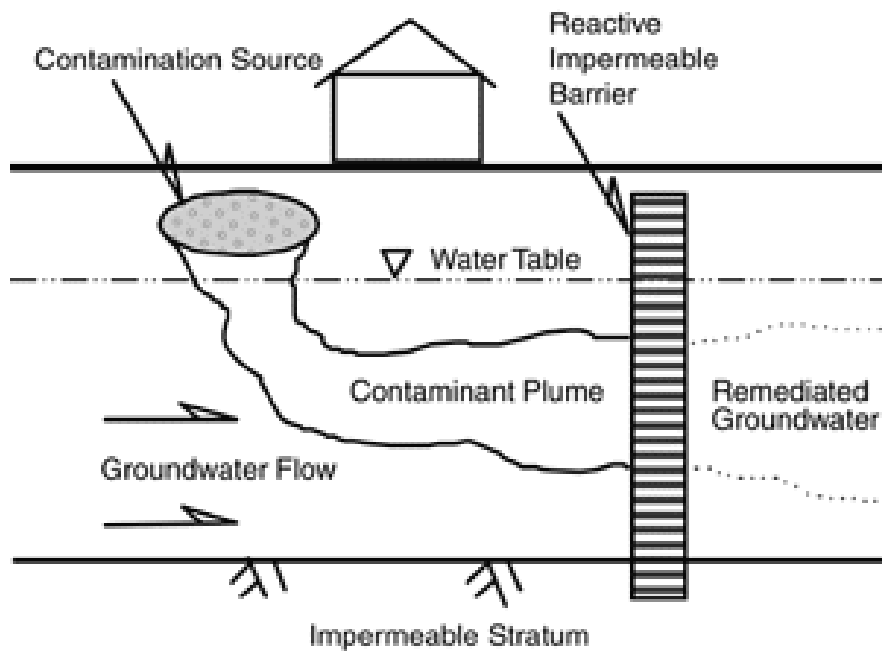
- **Βιολογική Αποκατάσταση (Bio-remediation).** Η εξυγίανση με βιολογικές μεθόδους χρησιμοποιεί μικροοργανισμούς (βακτήρια, μύκητες), οι οποίοι αποδομούν τις οργανικές ουσίες (Εικόνα 12). Για την εφαρμογή της μεθόδου θα πρέπει να εξετασθεί η επιδεκτικότητα του ρυπαντή στην βιοδιάσπαση από μικροοργανισμούς. Χαρακτηριστικά της μεθόδου της βιοεξυγίανσης:
  - Αποφυγή της επεξεργασίας των ρυπασμένων δειγμάτων με χημικά μέσα
  - Μόνιμος περιορισμός των ρύπων
  - Αποκατάσταση in situ
  - Λογικό κόστος



Εικόνα 12. Περιγραφή μεθόδου βιοεξυγίανσης ([www.rewordit.org](http://www.rewordit.org))

- **Μέθοδος άντλησης επιπλεόντων ρυπαντών.** Κατά την μέθοδο αυτή γίνεται αρχικά άντληση του υπόγειου νερού στην περιοχή της ρύπανσης με σκοπό το σχηματισμό ενός κώνου κατάπτωσης. Λόγω διαφοράς υδραυλικής κλίσης ο ρύπος κινείται προς την γεώτρηση, όπου με μια δεύτερη άντληση απομακρύνεται από τον υπόγειο υδροφόρα.
- **Μέθοδος εγκιβωτισμού.** Στόχος της μεθόδου αυτής είναι να περιοριστεί η εξάπλωση του ρύπου, χρησιμοποιώντας φυσικά και υδροδυναμικά φράγματα. Ο εγκιβωτισμός γίνεται συνήθως μέσα στο έδαφος, αλλά μπορεί να γίνει και στην επιφάνεια για να αποφευχθεί η διήθηση της βροχής στο υπέδαφος. Κατά την διαδικασία του εγκιβωτισμού δημιουργούνται γύρω από την ρυπασμένη περιοχή τοιχώματα μικρής διαπερατότητας συνήθως από τσιμέντο, μπετονίτη, σιδερένιους πάσσαλους ή γεωμεμβράνες (Εικόνα 13).





Εικόνα 13. Διάταξη μεθόδου Εγκιβωτισμού (clu-in.org)

- **Μέθοδος σταθεροποίησης εδάφους.** Κατά την μέθοδο αυτή το ρυπασμένο έδαφος αναμειγνύεται με κάποιο υλικό (τσιμέντο, άσβεστος, ασφαλτικά υλικά) με σκοπό την σταθεροποίηση του. Λόγω της μικρής υδροπερατότητας αυτών των υλικών αποφεύγεται η εξάπλωση της ρύπανσης.

## 4 Νιτρορύπανση

### 4.1 Εισαγωγή

Με τον όρο **νιτρορύπανση** περιγράφεται η άμεση ή έμμεση απόρριψη στο περιβάλλον αζωτούχων ενώσεων που έχουν ως αποτέλεσμα την υποβάθμιση των υδατικών οικοσυστημάτων και την προσβολή της ανθρώπινης υγείας. Το άζωτο υπό φυσιολογικές συνθήκες βρίσκεται σε ισορροπία μεταξύ εδάφους, ατμόσφαιρας και υδρόσφαιρας. Ανθρωπογενείς δραστηριότητες, κυρίως αγροτικές, έχουν οδηγήσει τα τελευταία χρόνια στην υπέρμετρη χρήση αζωτούχων ενώσεων. Κύρια πηγή νιτρορύπανσης αποτελούν τα αζωτούχα λιπάσματα και φυτοφάρμακα, τα οποία χρησιμοποιούνται για τον εμπλουτισμό του εδάφους, την αύξηση της παραγωγής και την καταπολέμηση ασθενειών. Επίσης τα απόβλητα των κτηνοτροφικών μονάδων καθώς και τα αστικά και βιομηχανικά απόβλητα αποτελούν επιπρόσθετη πηγή ρύπανσης.



Το άζωτο που περιέχεται στα λιπάσματα σε διάφορες μορφές για την κάλυψη των θρεπτικών αναγκών των καλλιεργειών οξειδώνεται σε νιτρικά, τα οποία μεταφέρονται διαλυμένα στο νερό και διηθούνται στα υπόγεια υδροφόρα στρώματα, οδηγώντας στην υποβάθμιση της ποιότητας του νερού. Ο ρυθμός μεταφοράς των νιτρικών επηρεάζεται από ποικίλους παράγοντες όπως είναι η βροχόπτωση, το πορώδες του εδάφους, ο τρόπος και χρόνος εφαρμογής της λίπανσης. Η κατάσταση αυτή σε συνδυασμό με την υπεράντληση των αποθεμάτων σε υπόγεια ύδατα για την κάλυψη των απαιτήσεων σε νερό, θέτει σε άμεση προτεραιότητα την προστασία και διατήρηση των υπόγειων υδροφορέων.

Πέρα από τα λιπάσματα που χρησιμοποιούνται εκτενώς τα τελευταία χρόνια έχουν καταγραφεί και άλλες πηγές νιτρικών, οι οποίες αναλύονται στην συνέχεια. Τις τελευταίες δεκαετίες τόσο σε διεθνές όσο και σε ευρωπαϊκό επίπεδο έχουν θεσπιστεί μέτρα πρόληψης και αντιμετώπισης των περιπτώσεων νιτρορύπανσης. Στόχος είναι η διατήρηση της ποιότητας του περιβάλλοντος αλλά και η διαφύλαξη της δημόσιας υγείας, καθώς έρευνες αποδεικνύουν τις δυσμενείς επιπτώσεις της συσσώρευσης των νιτρικών στον ανθρώπινο οργανισμό.

## 4.2 Κύκλος του αζώτου

Το άζωτο αποτελεί βασικό χημικό στοιχείο για τη ζωή των οργανισμών καθώς είναι συστατικό πολλών βιομορίων όπως τα νουκλεϊκά οξέα και οι πρωτεΐνες. Ο **κύκλος του αζώτου** αποτελεί το σύνολο των βιοχημικών και φυσικοχημικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα για την μετατροπή του αζώτου στις αξιοποιήσιμες από τους οργανισμούς μορφές.

Αν και υπάρχει αφθονία αζώτου στην ατμόσφαιρα, δεν μπορεί να εκμεταλλευτεί από τους οργανισμούς στην μορφή που βρίσκεται, μοριακό άζωτο ( $N_2$ ). Έτσι η εισαγωγή του στις τροφικές αλυσίδες των οικοσυστημάτων γίνεται με την διαδικασία της **αζωτοδέσμευσης**, κατά την οποία μετατρέπεται το ατμοσφαιρικό άζωτο σε μορφές αξιοποιήσιμες από τους παραγωγούς. Η αζωτοδέσμευση διακρίνεται σε ατμοσφαιρική και βιολογική. Κατά την ατμοσφαιρική αζωτοδέσμευση το άζωτο της ατμόσφαιρας αντιδρά με τους υδρατμούς σχηματίζοντας αμμωνία ( $NH_3$ ), είτε με το ατμοσφαιρικό οξυγόνο σχηματίζοντας νιτρικά ιόντα ( $NO_3^-$ ). Τα παραπάνω προϊόντα μεταφέρονται μέσω των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων στο έδαφος. Η ατμοσφαιρική αζωτοδέσμευση κατέχει το 10% της συνολικής αζωτοδέσμευσης. Όσο αφορά την βιολογική αζωτοδέσμευση, αυτή πραγματοποιείται από ελεύθερους ή συμβιωτικούς μικροοργανισμούς. Αζωτοδεσμευτικά βακτήρια δεσμεύουν το ατμοσφαιρικό άζωτο και το μετατρέπουν σε νιτρικά ιόντα, τα οποία μπορούν να απορροφηθούν από τα φυτά. Η βιολογική αζωτοδέσμευση κατέχει το 90% της συνολικής αζωτοδέσμευσης.

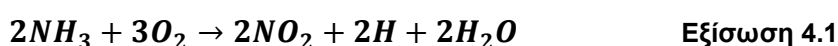
Στη συνέχεια, τα φυτά χρησιμοποιούν τα νιτρικά ιόντα που προέκυψαν από την ατμοσφαιρική ή βιολογική αζωτοδέσμευση, ώστε να συνθέσουν τις απαραίτητες για αυτά αζωτούχες ενώσεις. Το άζωτο που περιέχεται στις ουσίες αυτές διακινείται μέσω της τροφικής αλυσίδας στις διάφορες τάξεις των καταναλωτών για την παραγωγή πρωτεϊνών. Το άζωτο επανέρχεται στο έδαφος από την οργανική ύλη των φυτών (καρποί, φύλλα) και των ζώων (νεκρά σώματα, ουρία, περιττώματα). Οι ουσίες αυτές διασπώνται από τους αποικοδομητές του εδάφους οδηγώντας στην παραγωγή αμμωνίας. Η αμμωνία μετατρέπεται τελικά σε νιτρικά ιόντα με τη δράση των νιτροποιητικών βακτηρίων και τέλος παραλαμβάνεται πάλι από τα φυτά για να εκμεταλλευτεί όπως περιγράφηκε παραπάνω. Το άζωτο που απομακρύνθηκε από την ατμόσφαιρα επιστρέφει πάλι σε αυτήν με τη βοήθεια των απονιτροποιητικών βακτηρίων, τα οποία μετατρέπουν τα νιτρικά ιόντα σε μοριακό άζωτο (Εικόνα 14).

### Δέσμευση

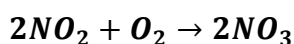
Η δέσμευση αποτελεί την μετατροπή του μοριακού αζώτου στις μορφές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τους παραγωγούς, αμμωνιακό άζωτο και νιτρικά ιόντα. Η δέσμευση μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε βιολογικά από μικροοργανισμούς, είτε φυσικά με φυσικοχημικές διαδικασίες κυρίως υπό την επίδραση των ηλεκτρικών εκκενώσεων των καταιγίδων, είτε με τεχνητά με την παραγωγή τεχνητών λιπασμάτων.

### Νιτροποίηση

Ο όρος νιτροποίηση χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει την αερόβια βιολογική διεργασία δύο σταδίων, κατά τα οποία η αμμωνία οξειδώνεται σε νιτρώδη και εν συνεχεία τα νιτρώδη οξειδώνονται και αυτά για την παραγωγή νιτρικών.



Εξίσωση 4.1



Εξίσωση 4.2

Πρέπει να τονισθεί πως παρά το σημαντικό ρόλο που έχει η νιτροποίηση στον κύκλο του αζώτου, αποτελεί ταυτόχρονα και σημαντική πηγή ρύπανσης για τους υδάτινους αποδέκτες. Τα νιτρικά έχουν μεγάλη διαλυτότητα στο νερό και εκπλένονται εύκολα από το έδαφος, γεγονός που εμποδίζει την εναπόθεσή τους στο έδαφος και την τελική τους κατάληξη στους υδάτινους αποδέκτες.

### Απονιτροποίηση

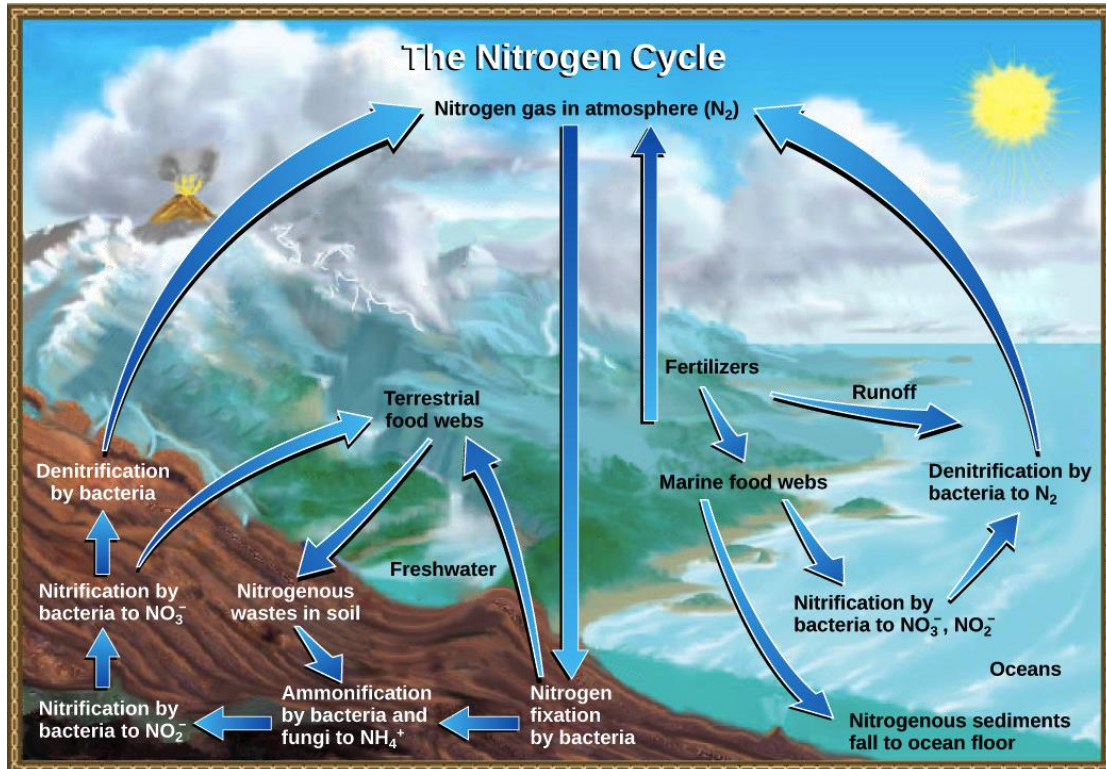
Η παραγωγή των νιτρικών κατά το στάδιο της νιτροποίησης μπορεί να διαταράξει την ισορροπία του οικοσυστήματος λόγω της μεγάλης τοξικότητάς τους.

Έτσι είναι απαραίτητη η απομάκρυνση των παραγόμενων νιτρικών, η οποία πραγματοποιείται με την διαδικασία την απονιτροποίησης. Κατά την διαδικασία αυτή πραγματοποιείται βιολογική αναγωγή των νιτρικών και νιτρωδών προς αέριο άζωτο με ενδιάμεσα προϊόντα  $\text{NO}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ . Το άζωτο απομακρύνεται από το σύστημα λόγω της μικρής του διαλυτότητας στις συνθήκες που επικρατούν.

Τα νιτρικά ιόντα ανάγονται σε νιτρώδη, έπειτα από νιτρώδη ιόντα σε οξείδιο του αζώτου και αυτό σε μοριακό άζωτο που είναι αέριο. Έτσι ανατροφοδοτείται η ατμόσφαιρα με άζωτο και ολοκληρώνεται ο κύκλος του στη φύση.



Οι ανθρώπινες δραστηριότητες έχουν προκαλέσει μεταβολές στον κύκλο του αζώτου, με τον εμπλουτισμού του εδάφους και των υδάτων με αζωτούχες ενώσεις κυρίως μέσω λιπασμάτων. Αποτέλεσμα της διαταραχής αυτής είναι η μετατροπή των ενώσεων αυτών σε νιτρικά άλατα, από το οποία όσα δεν μπορούν να απορροφηθούν από τα φυτά και να ακολουθήσουν την διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω, καταλήγουν στους υδάτινους αποδέκτες και υπόγειους υδροφορείς διαταράσσοντας την ισορροπία των συστημάτων αυτών.



Εικόνα 14. Κύκλος Αζώτου (John M. Evans and Howard Perlman, USGS)

### 4.3 Προέλευση νιτρικών ιόντων

Κατά το πέρασμα των χρόνων οι ανθρώπινες δραστηριότητες όπως η εντατική εκβιομηχάνιση, η γεωργική ανάπτυξη και η αύξηση των αστικών κέντρων, έχουν συντελέσει στην αύξηση των οργανικών και ανόργανων ρύπων στα υπόγεια ύδατα. Αναλυτικότερα, μια από της μεγαλύτερες απειλές για τα υδάτινα οικοσυστήματα είναι η ύπαρξη διαλυμένου αζώτου κυρίως με την μορφή της νιτρικών ιόντων ( $\text{NO}_3^-$ ). Στα υπόγεια νερά, το διαλυμένο άζωτο υπάρχει με τις ακόλουθες μορφές:

- της αμμωνίας ( $\text{NH}_3$ ) και του αμμώνιου ( $\text{NH}_4^+$ ), προέρχεται κυρίως από την υδρόλυση της ουρίας και την αποικοδόμηση των οργανικών αζωτούχων ενώσεων από αναερόβια βακτήρια. Η συγκέντρωση της αμμωνίας στα επιφανειακά και υπόγεια ύδατα είναι χαμηλή και δεν αποτελεί ξεκάθαρη ένδειξη ρύπανσης αυτών, καθώς μπορεί να σχηματισθεί και από ενώσεις αζώτου λόγω αναγωγικών συνθηκών κατά την αποσύνθεση του εδάφους.
- της νιτρώδους ρίζας ( $\text{NO}_2^-$ ), που είναι ενδιάμεσο ασταθές προϊόν της διαδικασίας οξειδωσης της αμμωνίας σε νιτρικά και την αναγωγή των νιτρικών σε αμμωνία. Η συγκέντρωση των ιόντων αυτών είναι πολύ μικρή και μόνο σε υψηλές συγκεντρώσεις μπορούν να προκαλέσουν επιπτώσεις στον ανθρώπινο οργανισμό καθώς αντιδρούν με δευτεροταγείς αμίνες και συνθέτουν τις νιτροζαμίνες, οι οποίες χαρακτηρίζονται ως καρκινογόνες.
- Των νιτρικών ιόντων ( $\text{NO}_3^-$ ), σταθερά ιόντα αποτέλεσμα διάφορων βιολογικών διεργασιών. Η παραγωγή τους γίνεται κατά την οξειδωση των αζωτούχων ενώσεων αρχικά σε νιτρώδη και στην συνέχεια σε νιτρικά. Η υψηλή συγκέντρωση των επιφανειακών και υπόγειων νερών σε νιτρικά αποτελεί σημαντικό δείκτη ρύπανσης.

Οι πηγές των παραπάνω αζωτούχων ενώσεων ταυτίζονται με αυτές που παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 3.2, για τις πηγές ρύπανσης των υπόγειων υδροφορέων. Από τις πηγές αυτές, οι αγροτικές δραστηριότητες αποτελούν την μεγαλύτερη και σοβαρότερη πηγή ρύπανσης. Η χρήση των λιπασμάτων είναι απαραίτητη για την γεωργική ανάπτυξη, τα προβλήματα όμως που προκύπτουν οφείλονται στην λανθασμένη χρήση αυτών. Τα λιπάσματα διακρίνονται σε οργανικά, φυτικής ή ζωικής προέλευσης, και σε ανόργανα, βιομηχανικά χημικά λιπάσματα. Περιέχουν κυρίως άζωτο, φώσφορο και κάλιο σε μορφές που μπορούν να απορροφηθούν από τα φυτά. Οι πλεονάζουσες ποσότητες που συσσωρεύονται στην επιφάνεια του εδάφους, είτε κατεισδύουν στους υπόγειους υδροφορείς είτε απορρέουν στους επιφανειακούς αποδέκτες μέσω της βροχής.

#### 4.4 Επίδραση νιτρικών ιόντων

Οι αζωτούχες ενώσεις είναι απαραίτητες για τους ζωντανούς οργανισμούς, όμως μπορεί να προκαλέσουν επιπτώσεις σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις. Οι επιπτώσεις αυτές αφορούν την μεταβολή της ισορροπίας των οικοσυστημάτων, τους ζωντανούς οργανισμούς των οικοσυστημάτων αυτών αλλά και τον άνθρωπο.

##### Επίδραση νιτρικών στα οικοσυστήματα

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που προκαλείται από τον εμπλουτισμό των λιμνών, παρόχθιων περιοχών και υδατορευμάτων με μεγάλες ποσότητες θρεπτικών ουσιών, είναι το φαινόμενο του ευτροφισμού. Ο εμπλουτισμός κυρίως με άζωτο και φώσφορο επιταχύνει την πρωτογενή παραγωγή υπό ευνοϊκές συνθήκες. Πέρα από την αύξηση της πρωτογενούς παραγωγής και συνεπώς της βιομάζας των αλγών, προκαλούνται αλλαγές στις πληθυσμιακές ισορροπίες των οργανισμών και στην ποιότητα του νερού. Αναλυτικότερα, η υπέρμετρη ανάπτυξη των αλγών έχει ως αποτέλεσμα την κατανάλωση μεγάλων ποσοτήτων οξυγόνου από τους οργανισμούς αυτούς, στερώντας έτσι το οξυγόνο από τις υπόλοιπες μορφές ζωής των συστημάτων αυτών, μειώνοντας την βιοποικιλότητα σε βάθος χρόνου. Πέρα από την δέσμευση του οξυγόνου παρατηρείται και η μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στα βαθύτερα στρώματα των συστημάτων. Γίνεται φανερό ότι οι συνέπειες του ευτροφισμού είναι ανεπιθύμητες στην περίπτωση που υποβαθμίζουν την ισορροπία του οικοσυστήματος και την βιώσιμη παροχή αγαθών και υπηρεσιών.

##### Επίδραση νιτρικών στην υγεία του ανθρώπου

Η μεγάλη συγκέντρωση των νιτρικών ιόντων στους υδάτινους αποδέκτες επηρεάζει τόσο το περιβάλλον όσο και την ανθρώπινη υγεία. Στην πραγματικότητα, τα νιτρικά ιόντα δεν είναι αυτά που δημιουργούν επιπτώσεις στον άνθρωπο καθώς πρόκειται για σταθερά ιόντα που θα μπορούσαν να χαρακτηρισθούν ως μη τοξικά. Μεγάλη τοξικότητα παρουσιάζουν τα νιτρώδη ιόντα τα οποία είναι ιδιαίτερα ασταθή και μετατρέπονται σε νιτρικό οξείδιο ( $\text{NO}$ ) ή αντιδρούν με άλλα μόρια.

Η μεγάλη συγκέντρωση των νιτρικών και νιτρωδών ιόντων προκαλούν σημαντικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία ακόμη και τον θάνατο. Σε ενήλικα άτομα οι συγκεντρώσεις  $15\text{-}70 \text{ mg/kg NO}_3^-$  και  $20 \text{ mg/kg NO}_2^-$ , θεωρούνται θανατηφόρες. Τα νιτρώδη ιόντα δημιουργούνται από τα νιτρικά πριν την εισαγωγή της τροφής στο στομάχι μέσω μικροοργανισμών που βρίσκονται στα φυτά, το νερό και τις τροφές. Μετά την είσοδο της τροφής στο στομάχι μπορούν να απορροφηθούν κατευθείαν χωρίς να αναχθούν σε νιτρώδη ή σε σπάνιες περιπτώσεις ενδέχεται να συμβεί η αναγωγή των  $\text{NO}_3^-$  σε  $\text{NO}_2^-$ . Έχει εκτιμηθεί



πως η ύπαρξη  $\text{NO}_2^-$  στο στομάχι μπορεί να οδηγήσουν στην μετατροπή τους σε καρκινογόνες ουσίες.

Η ύπαρξη των νιτρικών ιόντων στον ανθρώπινο οργανισμό έχει παρατηρηθεί πως προκαλεί τις ακόλουθες επιδράσεις:

- **Μεθαιμοσφαιριναιμία**, αποτελεί την πιο γνωστή νόσο η οποία προκαλείται από υψηλές συγκεντρώσεις νιτρικών στον νερό. Η νόσος προσβάλλει κυρίως τα βρέφη και έχει ως χαρακτηριστικό γνώρισμα την κυάνωση της επιδερμίδας, η οποία αρχίζει κυρίως γύρω από τα χείλη και προχωράει στα δάκτυλα, στο πρόσωπο καλύπτοντας στο τέλος όλο το σώμα. Επιπλέον συμπτώματα της νόσου είναι η ταχυκαρδία, οι γαστρεντερικές διαταραχές, η ατονία και ασφυκτικά φαινόμενα. Τα νιτρικά ιόντα που εισάγονται στον ανθρώπινο οργανισμό μέσω του νερού ή των τροφών, ανάγονται σε νιτρώδη στην περιοχή του λεπτού εντέρου με την βοήθεια βακτηριδίων. Στη συνέχεια τα νιτρώδη μετατρέπουν την αιμοσφαιρίνη των ερυθρών αιμοσφαιρίων του αίματος σε μεθαιμοσφαιρίνη. Η αντικατάσταση αυτή έχει ως αποτέλεσμα να μην δεσμεύεται και να μεταφέρεται το οξυγόνο, όπως θα γινόταν φυσιολογικά από την αιμοσφαιρίνη. Η μεθαιμοσφαιριναιμία προκαλείται από την ανώμαλη συσσώρευση της μεθαιμοσφαιρίνης. Τα τελευταία χρόνια δεν έχουν καταγραφεί περιστατικά της νόσου.
- **Καρκινογένεση**, έχει παρατηρηθεί πως το νιτρώδες ιόν μπορεί να αντίδραση με μία αμίνη και να σχηματίσει νιτριποράγωγα, τις νιτροζαμίνες. Πρόκειται για χημικές ουσίες που χαρακτηρίζονται ως καρκινογόνες και υπεύθυνες για τερατογένεση. Ο σχηματισμός των νιτροζαμινών λαμβάνει χώρα κατά κύριο λόγο στο στομάχι του ανθρώπου όπου το pH είναι όξινο και παρατηρείται αφθονία σε νιτρώδη και δευτεροταγείς αμίνες που προέρχονται από τρόφιμα και φάρμακα.
- **Διαταραχές της λειτουργίας του θυρεοειδούς**, σύμφωνα με μελέτες παρατηρήθηκε συσχέτιση μεταξύ της πρόληψης νιτρικού άλατος και της εμφάνισης συμπτωμάτων υπερθυρεοειδισμού σε άτομα που κατανάλωναν πόσιμο νερό με συγκέντρωση νιτρικών μεγαλύτερης των 11,3 ppm. (Van Maanen et al. 1994, από EWG 1996).
- **Επιπτώσεις κατά τον τοκετό**

## 4.5 Τρόποι αντιμετώπισης της νιτρορύπανσης

### 4.5.1 Νομικό Πλαίσιο

Οι επιπτώσεις της νιτρορύπανσης τόσο στο περιβάλλον όσο κι στον άνθρωπο αναγνωρίστηκαν πολύ νωρίς, επιτάσσοντας την λήψη άμεσων και αποτελεσματικών μέτρων για την αντιμετώπιση της υφιστάμενης κατάστασης σε διεθνές επίπεδο. Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας καθόρισε ως ανώτερο επιτρεπτό όριο για την ανθρώπινη υγεία τη συγκέντρωση των νιτρικών στο πόσιμο νερό τα 50mg/l. Το όριο αυτό έχει θεσπιστεί και στην Ευρωπαϊκή και Ελληνική νομοθεσία. Σε πολλές ευρωπαϊκές χώρες εντοπίζονταν συγκεντρώσεις μεγαλύτερες των επιτρεπόμενων, οδηγώντας έτσι στην θέσπιση μέτρων για τον περιορισμό της νιτρορύπανσης.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση (τότε ΕΟΚ) ήδη από το 1975 είχε εκδώσει νομοθετικό πλαίσιο, την Οδηγία 75/440/ΕΟΚ, για την απαιτούμενη ποιότητα των επιφανειακών υδάτων που προορίζονται για την παραγωγή πόσιμου νερού. Στην συνέχεια το 1980 εκδόθηκε νέα Οδηγία, Οδηγία 80/778/ΕΟΚ, για την ποιότητα του πόσιμου νερού. Και στις δύο οδηγίες η ανώτατη επιτρεπτή συγκέντρωση νιτρικών για την ανθρώπινη υγεία ορίζεται αυτή των 50mg/l, ενώ ως ενδεικτικό όριο δίνεται αυτή των 25mg/l. Η τελευταία Οδηγία καταργήθηκε και αντικαταστήθηκε από την Οδηγία 93/83/ΕΟΚ, που αφορά την ποιότητα του πόσιμου νερού, χωρίς όμως να μεταβληθούν τα όρια της συγκέντρωσης των νιτρικών.

Το Συμβούλιο το 1991 εξέδωσε την Οδηγία 91/676/ΕΟΚ, «οδηγία για νιτρορύπανση». Στόχο της οδηγίας είναι η μείωση της ρύπανσης των υδάτων που προκαλείται από τη χρήση νιτρικών γεωργικής προελεύσεως καθώς και η πρόληψη της νιτρορύπανσης. Τα κράτη καλούνται να εφαρμόσουν τα ακόλουθα μέτρα:

- παρακολούθηση των υδάτων και καταγραφή της συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων και της τροφικής κατάστασης,
- προσδιορισμός των υδάτων που έχουν ρυπανθεί ή διατρέχουν κίνδυνο ρύπανσης,
- χαρακτηρισμός ευπρόσβλητων περιοχών,
- θέσπιση κωδίκων ορθής γεωργικής πρακτικής και κατάρτιση προγραμμάτων δράσης,
- επανεξέταση τουλάχιστον ανά τετραετία του χαρακτηρισμού ευπρόσβλητων ζωνών και των προγραμμάτων δράσης.

Στόχος θέσπισης του Κώδικα Ορθής Γεωργικής Πρακτικής, που αφορά τα λιπάσματα και ειδικότερα τα αζωτούχα, είναι η καθοδήγηση των γεωργών για την εφαρμογή φιλικών μεθόδων λίπανσης ως προς το περιβάλλον. Συγκεκριμένα ο κώδικας επιδιώκει:

- Την αποτροπή της ρύπανσης των υπόγειων και επιφανειακών υδάτων λόγω συσσώρευσης νιτρικών από τη βαθιά διήθηση ή την επιφανειακή απορροή
- Καθοδήγηση γεωργών για την ορθολογική διαχείριση των νερών στα συστήματα άρδευσης, τους τρόπους εφαρμογής, στην εξοικονόμηση νερού κ.α.
- Στην ορθή διαχείριση των κτηνοτροφικών αποβλήτων για την προστασία του περιβάλλοντος και της δημόσιας υγείας.

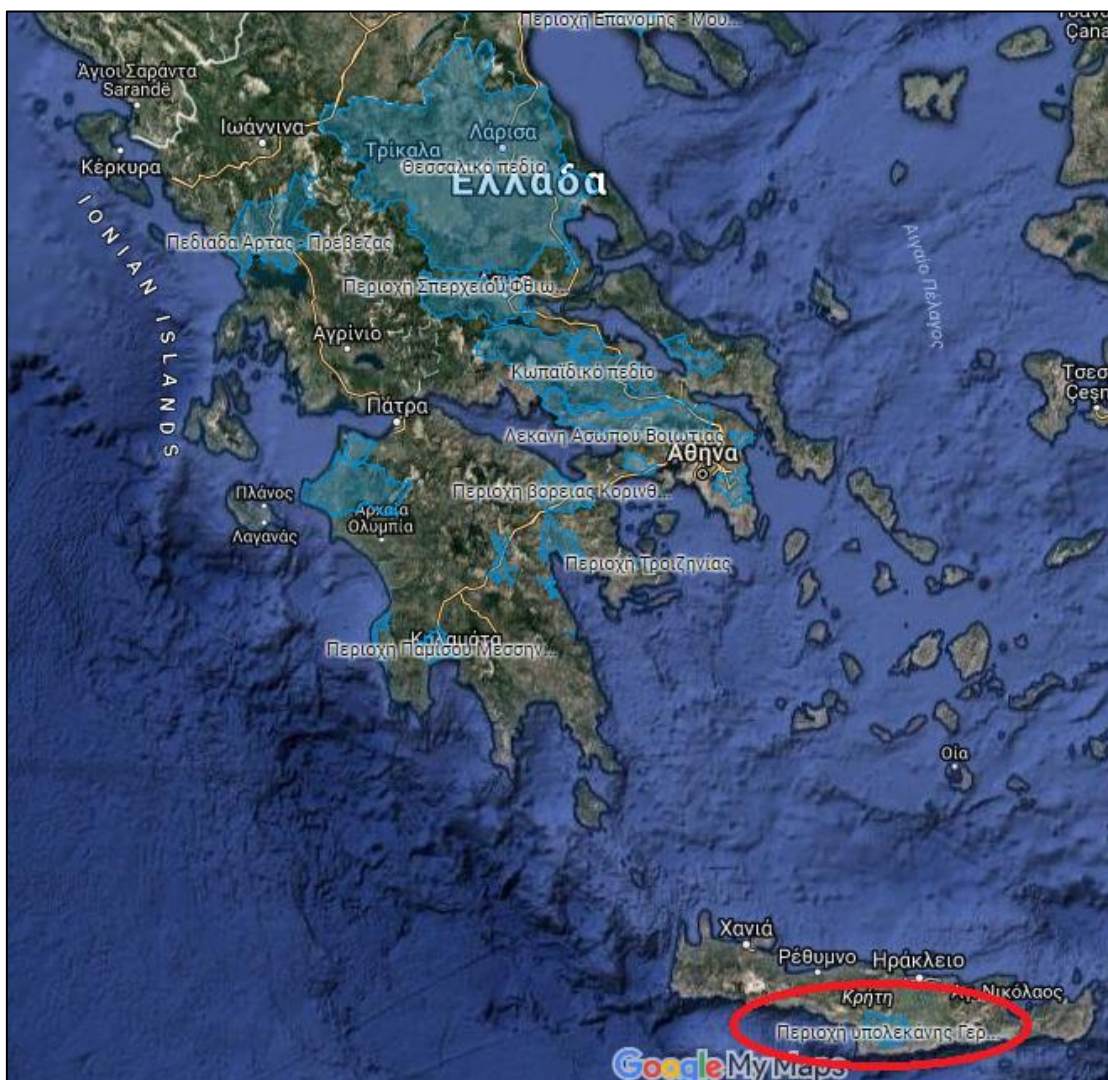
Η οδηγία αυτή επέφερε σημαντικές αλλαγές στην διαχείριση και προστασία των υδάτων. Οι διατάξεις της βασίζονται σε δύο θεμελιώδεις αρχές του δίκαιου του περιβάλλοντος, την αρχή «πρόληψης στην πηγή» και «ο ρυπαίνων πληρώνει». Τα όρια που είχαν τεθεί από προηγούμενες Οδηγίες συμπεριλαμβάνονται και στην Οδηγία 2000/60/ΕΚ (2000), η οποία αφορά την ποιότητα υδάτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Στην Οδηγία αυτή γίνεται πρώτη φορά αναφορά στον όρο «καλή οικολογική κατάσταση» των υδάτινων συστημάτων. Σύμφωνα με στοιχεία της Ε.Ε για το διάστημα μεταξύ του 2004 και 2007 οι συγκεντρώσεις των νιτρικών ιόντων σταθεροποιήθηκαν ή και μειώθηκαν στο 70% των υπό παρακολούθηση περιοχών.

Η εναρμόνιση της Εθνικής Νομοθεσίας με την Οδηγία 91/676/ΕΟΚ για «την προστασία των υδάτων από την νιτρορύπανση γεωργικής προέλευσης», πραγματοποιήθηκε με την ΚΥΑ 161690/1335/1997. Το 1999 εφόσον αξιοποιήθηκαν τα στοιχεία ποιότητας των επιφανειακών και υπόγειων νερών και σύμφωνα με τα κριτήρια της Οδηγίας 91/676/ΕΟΚ, καθορίστηκαν οι ευπρόσβλητες περιοχές λόγω νιτρορύπανσης γεωργικής προέλευσης με την ΚΥΑ 19652/1906/1999. Στις ζώνες αυτές ανήκουν οι περιοχές του Θεσσαλικού Πεδίου, του Κωπαϊδικού Πεδίου, του Αργολικού Πεδίου και της Λεκάνης του Πηνειού Ηλείας. Το 2001 επικαιροποιήθηκε ο κατάλογος των ευπρόσβλητων περιοχών και συμπληρώθηκε με τις περιοχές της Λεκάνης του Στρυμόνα του Κάμπου της Θεσσαλονίκης, Πέλλας, Ημαθίας και της Πεδιάδας Άρτας-Πρέβεζας με την ΚΥΑ 2041/2522/18-9-2001. Στις προαναφερόμενες ευπρόσβλητες ζώνες εκπονήθηκαν και τα Προγράμματα Δράσης, όπως αυτά προβλέπονται από την Οδηγία. Το 2010 ο κατάλογος συμπληρώθηκε με τη λεκάνη απορροής του ποταμού Ασωπού Βοιωτίας σύμφωνα με την ΚΥΑ 106253/08.11.10.

Το 2013 και ύστερα από εξέταση από τις ελληνικές αρχές των νέων προτεινόμενων ευπρόσβλητων ζωνών από την Ευρωπαϊκή Ένωση, των αποτελεσμάτων του Εθνικού Δικτύου Παρακολούθησης των επιφανειακών και υπόγειων νερών καθώς και των Σχεδίων Διαχείρισης των λεκανών απορροής των Υδάτινων Διαμερισμάτων της χώρας, εντάχθηκαν νέες ευπρόσβλητες ζώνες λόγω



της νιτρορύπανσης γεωργικής προέλευσης, με την ΚΥΑ 190126/17.04.2013. Τέλος με την ΚΥΑ 147070/02.12.2014 εντάχθηκε μεγάλος αριθμός ευπρόσβλητων περιοχών, μαζί και η περιοχή της υπολεκάνης του Γεροποτάμου Μεσσαράς Κρήτης, η οποία μελετάται στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής.



Εικόνα 15. Χάρτης Ευπρόσβλητων Ζωνών από νιτρορύπανση γεωργικής προέλευσης, Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας.

#### 4.5.2 Μέθοδοι απομάκρυνσης νιτρικών

Η ρύπανση που προκαλείται από τα νιτρικά είναι διάχυτης πηγής, γεγονός που δυσχεραίνει το καθορισμό της κατάλληλης πολιτικής για τον περιορισμό της. Σε συνδυασμό με την αργή κίνηση του νερού, έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση της ρύπανσης μετά από μεγάλα χρονικά διαστήματα. Τα μέτρα που έχουν προβλεφθεί για την αντιμετώπιση τόσο της φυσικής όσο και της οικονομικής

σημασίας του προβλήματος, διακρίνονται σε μέτρα προστασίας και μέτρα θεραπείας.

### Μέτρα προστασίας

Τα μέτρα προστασίας επικεντρώνονται κυρίως στον έλεγχο των ποσοτήτων των νιτρικών που προέρχονται από τις αγροτικές δραστηριότητες και εισέρχονται στο σύστημα εδάφους νερού. Στόχος των μέτρων αυτών είναι η τήρηση των προβλεπόμενων ορίων για το πόσιμο νερό. Τα μέτρα αυτά βασίζονται στην αρχή της πρόληψης, η οποία αποτελεί γενική αρχή του κοινοτικού δικαίου επιβάλλοντας στις αρμόδιες αρχές την λήψη κατάλληλων μέτρων, προκειμένου να προλαμβάνουν ενδεχόμενους κινδύνους για το περιβάλλον και τη δημόσια υγεία.

Κάποιες από τις σημαντικότερες μορφές μέτρων πρόληψης είναι οι ακόλουθες:

- Βελτίωση γεωργικών πρακτικών.
- Μείωση της χρησιμοποιούμενης ποσότητας κτηνοτροφικών αποβλήτων.
- Αλλαγή τρόπου χρήσης γης.
- Καθορισμός ζωνών προστασίας
- Οικονομικά μέτρα ελέγχου

### Μέτρα θεραπείας

Παρά την κυρίαρχη τάση της πρόληψης στην πηγή, υπάρχουν πολυάριθμες περιπτώσεις ήδη ρυπασμένων υδροφορέων για τους οποίους πρέπει να ληφθούν κατάλληλα μέτρα εξυγίανσης. Οι κύριες μορφές των μέτρων προστασίας είναι οι εξής:

- Μεταφορά νερού από άλλες πηγές
- Ανάμειξη νερών με διαφορετικές συγκεντρώσεις νιτρικών
- Επεξεργασία των ρυπασμένων υδατικών πόρων

Οι μέθοδοι επεξεργασίας αφορούν την απομάκρυνση των νιτρικών από τα νερά και διαφέρουν ως προς την αποτελεσματικότητα, την ευκολία χρήσης και το κόστος. Διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, τις φυσικοχημικές και τις βιολογικές. Στις φυσικοχημικές μεθόδους ανήκουν η ιονανταλλαγή, η αντίστροφη όσμωση, η κατάλυση και η ηλεκτροδιάλυση. Οι παραπάνω μέθοδοι έχουν περιορισμένη χρήση λόγω του υψηλού οικονομικού τους κόστους αλλά και λόγω της παραγωγής αποβλήτων κατά τις διεργασίες αυτές. Όσο αφορά την βιολογική απομάκρυνση των νιτρικών, επικρατεί η μέθοδος της απονιτροποίησης, η οποία διακρίνεται σε ετερότροφη και αυτότροφη. Κατά την απονιτροποίηση, βακτήρια χρησιμοποιούν τα νιτρικά ιόντα και τα νιτρώδη ως τελικούς δέκτες ηλεκτρονίων, ενώ πραγματοποιείται η αναγωγή του ρυπασμένου νερού σε αέριο άζωτο. Η μέθοδος αυτή θεωρείται οικονομική σε σχέση με τις συμβατικές και φυσικοχημικές

μεθόδους, δεν απαιτείται μετεπεξεργασία ούτε παρατηρείται η παραγωγή παραπροϊόντων. Το μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η αργή ολοκλήρωσή της σε σύγκριση με τις φυσικοχημικές μεθόδους.

## **5 Προσομοίωση υπόγειας ροής και μεταφοράς ρύπων**

### **5.1 Γενικά στοιχεία προσομοίωσης**

Η προσομοίωση της υπόγειας ροής έχει ως στόχο την κατασκευή ενός ομοιώματος των υπόγειων υδάτων ώστε να αναπαραστήσει ένα φυσικό υδροδυναμικό σύστημα υπόγειων νερών με ένα μαθηματικό ισοδύναμο. Η ανάπτυξη προσομοιώσεων καθώς και η διεξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων εξαρτώνται από την σωστή εννοιολογική προσέγγιση του υδρογεωλογικού συστήματος και την επιλογή της βέλτιστης μαθηματικής αναπαράστασης των φυσικών χαρακτηριστικών.

Πληθώρα μαθηματικών μοντέλων μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανάλογα με τα επιθυμητά αποτελέσματα ή ακόμα και να συνδυαστούν. Τα εργαλεία που παρέχει το κάθε μοντέλο εκτελούν διαφορετικές λειτουργίες όπως είναι ο χαρακτηρισμός της θέσης, η κατασκευή του εννοιολογικού μοντέλου, η βαθμονόμηση, η δημιουργία καννάβου, η τελική επεξεργασία και η αναπαράσταση. Ο χρήστης δύναται με την επιλογή ενός ή πληθώρας σημείων (κελιών) να εισάγει και να τροποποιήσει τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά και τις οριακές συνθήκες της περιοχής μελέτης. Τέλος, τα αποτελέσματα είναι γενικευμένα παρέχοντας στον χρήστη την ικανότητα να συνδέει το προς επίλυση πρόβλημα με την αντίστοιχη γραφική απεικόνιση.

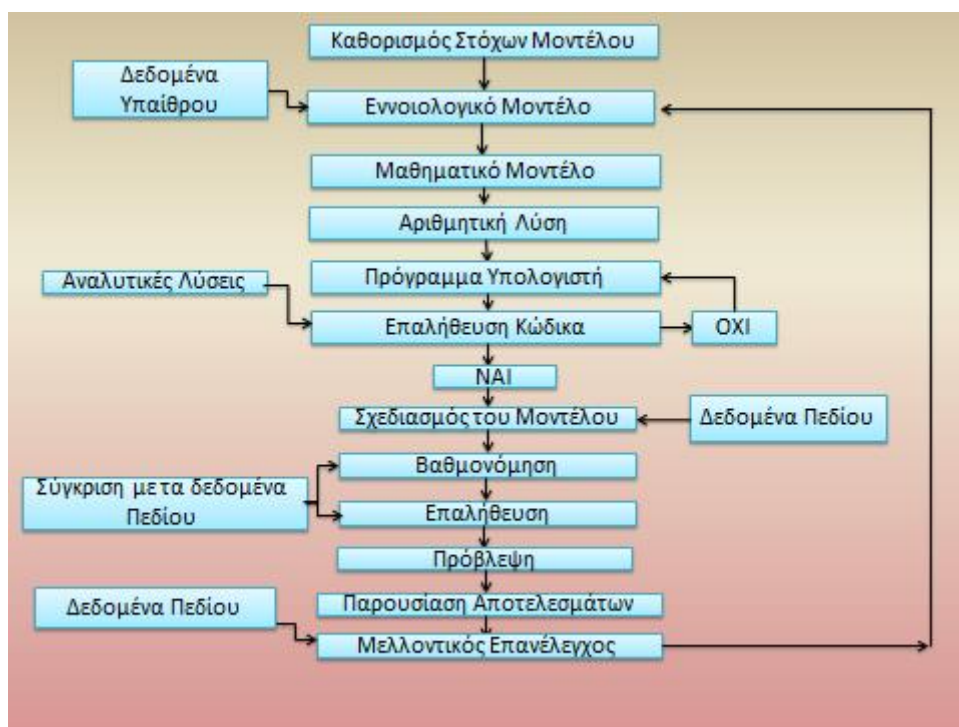
### **5.2 Ταξινόμηση μοντέλων προσομοίωσης**

Η επίλυση των προβλημάτων προσομοίωσης της υπόγειας ροής πραγματοποιείται είτε με φυσικά μοντέλα είτε με την χρήση υπολογιστή. Με τα φυσικά μοντέλα γίνεται άμεση αναπαράσταση του υπό εξέταση προβλήματος στο εργαστήριο, σε μικρότερη ή μεγαλύτερη κλίμακα από αυτό. Μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η δυσκολία εφαρμογής της, λόγω της πολυπλοκότητας των φυσικών συστημάτων. Χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικό υπολογιστή, το πρόβλημα μπορεί να λυθεί αναλυτικά (αναλυτικά μοντέλα) ή μέσω αριθμητικής μεθόδου (αριθμητικά μοντέλα). Όσο αφορά το αναλυτικά μοντέλα, αυτά εφαρμόζονται κυρίως σε απλοποιημένα συστήματα, δηλαδή μόνιμη μονοδιάστατη ροή με ενιαίες υδρολογικές και χημικές ιδιότητες. Λόγω των προϋποθέσεων αυτών η χρήση τους περιορίστηκε σε προβλήματα πολύ μικρής κλίμακας. Έτσι για πολυπλοκότερες

συνθήκες όπως ακανόνιστα γεωμετρικά όρια, ανισοτροπία συστήματος, χωρικά μεταβαλλόμενοι παράμετροι, ρυθμοί άντλησης και τροφοδοσίας, χρησιμοποιούνται τα αριθμητικά μοντέλα. Για την απλούστευση της επίλυσης των προβλημάτων, χρησιμοποιούνται αριθμητικές μέθοδοι με συνηθέστερες τις πεπερασμένες διαφορές και τα πεπερασμένα σημεία. Χαρακτηριστικά των μεθόδων αυτών παρουσιάζονται στην συνέχεια της εργασίας.

### 5.3 Μεθοδολογία εφαρμογής μοντέλων προσομοίωσης

Για την βέλτιστη χρήση των μαθηματικών μοντέλων έχουν θεσπιστεί οδηγίες και κανόνες με βάση τα οποία μπορεί να προσομοιωθεί η υπόγεια ροή, γνωστά ως **Πρωτόκολλο Προσομοίωσης (Modeling Protocol)** από τους Anderson & Woessner (1992). Στην συνέχεια παρουσιάζεται η διαδικασία που ακολουθείται για την δόμηση ενός μοντέλου υπόγειας ροής:



Εικόνα 16. Πρωτόκολλο Προσομοίωσης (τροποποιημένο από Anderson & Woessner, 1992)

- **Καθορισμός στόχων μοντέλου:** Οι στόχοι αυτοί καθορίζουν τις αντίστοιχες εξισώσεις και το λογισμικό που θα χρησιμοποιηθεί.
- **Ανάπτυξη εννοιολογικού μοντέλου του συστήματος:** ορισμός των υδροσρωματογραφικών ενοτήτων και ορίων συστήματος. Συγκεντρώνονται τα δεδομένα υπαίθρου, καθορίζονται οι υδραυλικές παράμετροι που



επικρατούν και εκτιμώνται ποσοτικά οι διάφορες συνιστώσες του υδατικού ισοζυγίου.

- **Επιλογή της αντίστοιχης εξίσωσης και του κατάλληλου λογισμικού:** η επιλογή αυτή γίνεται εφόσον επαληθευτεί πως το λογισμικό που επιλέχθηκε είναι κατάλληλο να περιγράψει του μηχανισμούς που λαμβάνουν χώρα στο πορώδες μέσο του υπό εξέταση προβλήματος. Η επαλήθευση αυτή μπορεί να γίνει με την σύγκριση της αριθμητικής και της αναλυτικής λύσης, αν η δεύτερη υπάρχει, ώστε ναδειχθεί ότι το επιλύει ορθά τις εξισώσεις που συνιστούν το μαθηματικό μοντέλο.
- **Σχεδιασμός-κατασκευή μοντέλου:** διακριτοποιείται ο χρόνος και ο χώρος, καθορίζονται οι αρχικές και οριακές συνθήκες, καθώς και αρχική επιλογή υδραυλικών παραμέτρων και ιάσεων.
- **Βαθμονόμηση ( calibration):** κατά την διαδικασία αυτή, τροποποιούνται οι παράμετροι εισόδου που είχαν δοθεί στο πρόγραμμα προκειμένου να προσεγγιστούν καλύτερα τα υδραυλικά δεδομένα του υπό εξέταση υδροφορέα. Η βαθμονόμηση πραγματοποιείται είτε με την μέθοδο της δοκιμής και αποτυχίας (trial and error) είτε με την χρήση πολυπλοκότερων μαθηματικών μεθόδων αυτόματης βαθμονόμησης (inverse modeling).
- **Ανάλυση ευαισθησίας (sensitivity analysis):** σκοπός της διαδικασίας αυτής είναι να διαπιστωθεί η αβεβαιότητα της προσομοίωσης μεταβάλλοντας τα δεδομένα εισόδου. Αν η μεταβολή μια παραμέτρου ή οριακής συνθήκης διαφοροποιεί σημαντικά το αποτέλεσμα του μοντέλου, αυτό σημαίνει πως το μοντέλο παρουσιάζει ευαισθησία στην παράμετρο αυτή ή την συνθήκη.
- **Επαλήθευση μοντέλου (validation):** χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους που προέκυψαν κατά την βαθμονόμηση του μοντέλου δημιουργείται ένα δεύτερο σύνολο αποτελεσμάτων, ώστε να δοθεί μεγαλύτερη εμπιστοσύνη στο μοντέλο.
- **Πρόβλεψη (prediction):** με την ολοκλήρωση των παραπάνω διαδικασιών το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μελλοντικά σενάρια. Κατά την διαδικασία αυτή το μοντέλο εκτελείται με σταθερές παραμέτρους ρύθμισης αλλά διαφοροποιώντας τις πιέσεις που εκτιμάται να αλλάξουν στο μέλλον. Οι προβλέψεις που γίνονται από το μοντέλο αποτελούν εκτιμήσεις και συνήθως εμπεριέχουν σφάλματα
- **Προγνωστική ανάλυση ευαισθησίας :** για να ποσοτικοποιήσει την επίδραση της αβεβαιότητας στις τιμές των παραμέτρων της πρόβλεψης. Πεδία εκτιμώμενων μελλοντικών πιέσεων προσομοιώνονται για να ελέγξουν τον αντίκτυπο στην πρόβλεψη του μοντέλου.
- **Παρουσίαση του μοντέλου και των αποτελεσμάτων:** απαραίτητη η περιγραφή και γραφική απεικόνιση τόσο της όλης διαδικασίας όσο και των αποτελεσμάτων.
- **Επανελέγχος του μοντέλου:** η διαδικασία αυτή λαμβάνει χώρα ύστερα από ένα μεγάλο χρονικό διάστημα από την ρύθμιση του μοντέλου.

Συλλέγονται δεδομένα υπαίθρου και ελέγχεται αν οι προβλέψεις αποδεδειχθούν σωστές, έτσι το μοντέλο επαληθεύεται για το χρονικό διάστημα που εξετάζεται.

- **Επανασχεδιασμός του μοντέλου (Model redesign):** στην περίπτωση που ο επανέλεγχος του μοντέλου οδηγήσει σε διαφοροποιήσεις στην συμπεριφορά του συστήματος τότε είναι απαραίτητη η αλλαγή του εννοιολογικού μοντέλου ή των παραμέτρων προσομοίωσης.

## 5.4 Αριθμητικές Μέθοδοι για την επίλυση προβλημάτων υπόγειας ροής

Η επίλυση των προβλημάτων προσομοίωσης των υπόγειων υδροφορέων πραγματοποιείται με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων, λόγω της ευκολίας χρήσης έναντι των αναλυτικών. Οι συνηθέστερες αριθμητικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι οι ακόλουθες:

- Πεπερασμένες Διαφορές (Finite Difference Method)
- Πεπερασμένα Στοιχεία (Finite Elements Method)
- Ολοκληρωμένες Πεπερασμένες Διαφορές (Integrated Finite Difference Method)
- Οριακή Ολοκληρωτική Εξίσωση (Boundary Integral Equation Method)
- Αναλυτικά Στοιχεία (Analytic Elements Method)

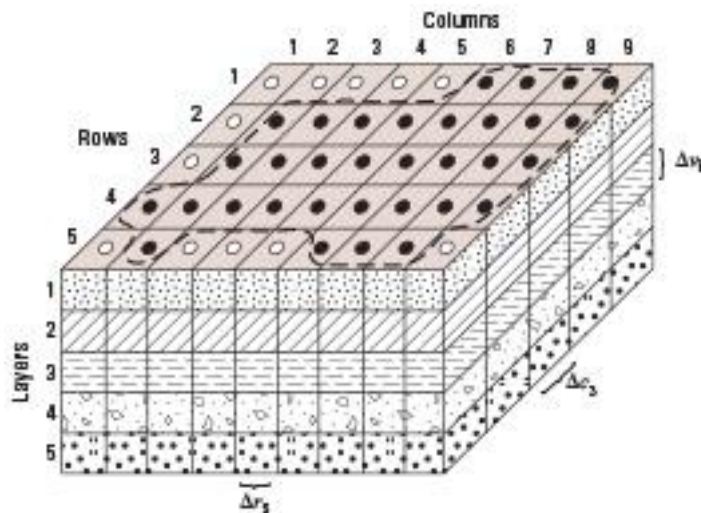
Από τις παραπάνω μεθόδους κυρίως χρησιμοποιούνται οι πεπερασμένες διαφορές και τα πεπερασμένα στοιχεία. Η επιλογή μεταξύ των μεθόδων αυτών εξαρτάται από την φύση του προβλήματος καθώς και την προτίμηση του χρήστη. Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών παρουσιάζει μεγαλύτερη ευκολία στην κατανόησή της και τον προγραμματισμό και απαιτεί λιγότερα στοιχεία για την κατασκευή του πλέγματος. Αντίστοιχα, η μέθοδος των πεπερασμένων σημείων προσεγγίζει καλύτερα τα όρια ακανόνιστου σχήματος, διαχειρίζεται καλύτερα ελαττωματικές ζώνες και προσομοιώνει σημειακές πηγές και επιφάνειες με διαρροή.

Παρά το γεγονός πως η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών είναι μια ειδική περίπτωση της μεθόδου των πεπερασμένων σημείων, οι δύο αυτές μέθοδοι παρουσιάζουν διαφορές κυρίως στην φιλοσοφία επίλυσης. Με την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών υπολογίζεται μια τιμή για το υδραυλικό ύψος σε κάθε κόμβο, η τιμή αυτή αποτελεί ταυτόχρονα και το υδραυλικό ύψος του κελιού γύρω από τον κόμβο αυτό. Δεν ορίζεται ο τρόπος μεταβολής του υδραυλικού ύψους από τον έναν κόμβο στον άλλον. Σε αντίθεση στην μέθοδο των πεπερασμένων

στοιχείων, ορίζεται ακριβώς ο τρόπος που μεταβάλλεται το υδραυλικό ύψος μέσα σε ένα στοιχείο με την βοήθεια πολλαπλασιαστικών συναρτήσεων. Τα υδραυλικά ύψη υπολογίζονται για ευκολία από τους κόμβους, αλλά το υδραυλικό ύψος ορίζεται παντού μέσω των βασικών συναρτήσεων.

## 5.5 Χωρική Διακριτοποίηση ενός υδροφορέα

Ο υπό εξέταση υδροφορέας διακριτοποιείται χωρικά με ένα δίκτυο στοιχειωδών ορθογωνικών κελιών που ονομάζονται κυψελίδες (cells). Χρησιμοποιείται κατάλληλο σύστημα αναφοράς προκειμένου να προσδιοριστεί η θέση του κάθε κελιού, η οποία περιγράφεται από σειρές, στήλες και επίπεδα. Το δίκτυο που δημιουργείται από τους κόμβους σχηματίζει το πλαίσιο εργασίας για το αριθμητικό μοντέλο (grid). Για την διευκόλυνση του χρήστη χρησιμοποιείται ένα σύστημα τριών δεικτών  $i, j, k$  οι οποίοι αντιστοιχούν στις σειρές, στήλες και στρώσεις αντίστοιχα. Οι διαστάσεις του καννάβου είναι αποτέλεσμα του εννοιολογικού μοντέλου που σχεδιάστηκε καθώς και τύπου του μοντέλου που επιλέχθηκε (δισδιάστατο ή τρισδιάστατο). Στη Εικόνα 17 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της χωρικής διακριτοποίησης ενός υποθετικού συστήματος υδροφορέων.



#### EXPLANATION

- Aquifer boundary
- Active cell
- Inactive cell
- $\Delta x_j$  Dimension of cell along the row direction—  
Subscript indicates the number of the column
- $\Delta y_k$  Dimension of cell along the column direction—  
Subscript indicates the number of the row
- $\Delta z_k$  Dimension of cell along the vertical direction—  
Subscript (k) indicates the number of the layer

Εικόνα 17. Χωρική Διακριτοποίηση με τη μέθοδο των πεπερασμένων δυσφορών (McDonald, M.G., and A.W. Harbaugh, 1988)

Η δημιουργία της εξίσωσης της ροής του υπόγειου νερού με την μορφή των πεπερασμένων διαφορών προκύπτει από την εφαρμογή της εξίσωσης της συνέχειας με την οποία ισχύει ότι το αλγεβρικό άθροισμα εισροής και εκροής ενός κελιού για ορισμένο χρονικό διάστημα είναι ίσο με την μεταβολή της συγκέντρωσης σε αυτό. Θεωρώντας πως η πυκνότητα του νερού παραμένει σταθερή η εξίσωση της συνέχειας που περιγράφει την ισορροπία της ροής του νερού σε ένα κελί είναι η εξής:

$$\Sigma Q_i = SS \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta V \quad \text{Εξίσωση 5.1}$$

Όπου  $Q_i$ : η παροχή που εισρέει σε κάθε κελί

$SS$ : η ειδική αποθηκευτικότητα για μοναδιαία αύξηση του φορτίου

$\Delta V$ : ο όγκος του κελιού

$\Delta h$ : η μεταβολή του φορτίου στο χρονικό διάστημα  $\Delta t$

Χρησιμοποιώντας την παραπάνω εξίσωση σε συνδυασμό με την εξίσωση του νόμου του Darcy και την μέθοδο των όπισθεν διαφορών για την προσέγγιση της παραγώγου ως προς τον χρόνο, προκύπτει η γενική εξίσωση ροής του υπόγειου νερού με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών για κάθε κελί  $(i,j,k)$ , η



οποία χρησιμοποιείται και από τον κώδικα MODFLOW (McDonald and Harbaugh, 1988):

$$CR_{i,j-\frac{1}{2},k}(h_{i,j-1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CR_{i,j+\frac{1}{2},k}(h_{i,j+1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CC_{i-\frac{1}{2},j,k}(h_{i-1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CC_{i+\frac{1}{2},j,k}(h_{i+1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CV_{i,j,k-\frac{1}{2}}(h_{i,j,k-1}^m - h_{i,j,k}^m) + CC_{i,j,k+\frac{1}{2}}(h_{i,j,k+1}^m - h_{i,j,k}^m) + P_{i,j,k}h_{i,j,k}^m + Q_{i,j,k} = SS_{i,j,k}(\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k) \frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t_m - t_{m-1}} \quad \text{Εξίσωση 5.2}$$

Όπου:

$h_{i,j,k}^m, h_{i-1,j,k}^m, h_{i,j-1,k}^m, h_{i,j,k-1}^m, h_{i+1,j,k}^m, h_{i,j+1,k}^m, h_{i,j,k+1}^m$ : τα φορτία στο κελί (i,j,k) και τα γειτονικά του για τρέχον χρονικό βήμα

$h_{i,j,k}^{m-1}$ : το φορτίο στο κελί (i,j,k) για το προηγούμενο χρονικό βήμα

$t_m$ : το τρέχον χρονικό βήμα

$t_{m-1}$ : το προηγούμενο χρονικό βήμα

$\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k$ : ο όγκος του κελιού (i,j,k)

$SS_{i,j,k}$ : η ειδική αποθηκευτικότητα του κελιού (i,j,k)

$P_{i,j,k}h_{i,j,k}^m$ : παροχές που εισέρχονται/εξέρχονται στο κελί (i,j,k) και εξαρτώνται από το φορτίο, από πηγές όπως επαφή με τον πυθμένα ποταμού ή λίμνης, εξατμισοδιαπνοή κλπ

$Q_{i,j,k}$ : παροχές που εμπλουτισμού ή άντλησης, δεν εξαρτώνται από το φορτίο όπως οι γεωτρήσεις.

Οι συντελεστές των όρων ονομάζονται αγωγιμότητες (conductances), αποτελούν σταθερούς όρους και συνδυάζουν τις συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας στην κάθε διεύθυνση με τις διαστάσεις του πλέγματος.

$$CR_{i,j-\frac{1}{2},k} = KR_{i,j-\frac{1}{2},k} \frac{\Delta c_i \Delta v_k}{\Delta r_{j-1/2}}$$

$$CR_{i,j+\frac{1}{2},k} = KR_{i,j+\frac{1}{2},k} \frac{\Delta c_i \Delta v_k}{\Delta r_{j+1/2}}$$

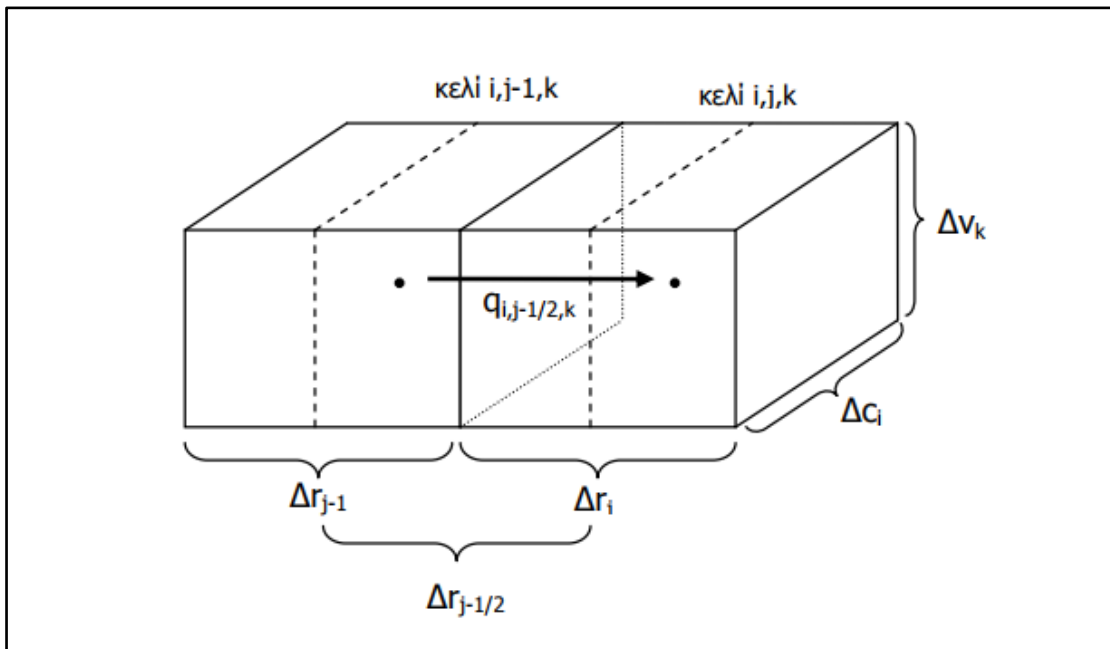
$$CC_{i-\frac{1}{2},j,k} = KC_{i-\frac{1}{2},j,k} \frac{\Delta r_j \Delta v_k}{\Delta c_{i-1/2}}$$

$$CC_{i+\frac{1}{2},j,k} = KC_{i+\frac{1}{2},j,k} \frac{\Delta r_j \Delta v_k}{\Delta c_{i+1/2}}$$

$$CV_{i,j,k-\frac{1}{2}} = KV_{i,j,k-\frac{1}{2}} \frac{\Delta r_j \Delta c_i}{\Delta k_{i-1/2}}$$

$$CV_{i,j,k-\frac{1}{2}} = KV_{i,j,k-\frac{1}{2}} \frac{\Delta r_j \Delta c_i}{\Delta k_{i+1/2}}$$

Όπου  $KR_{i,j-\frac{1}{2},k}$  ορίζεται η υδραυλική αγωγιμότητα κατά μήκος της σειράς  $i$  μεταξύ των κόμβων  $i,j,k$  και  $i,j-1,k$  όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 18. Όμοια ορίζονται και οι υδραυλικές αγωγιμότητες για τις υπόλοιπες συνιστώσες.



Εικόνα 18. Εισροή στο κελί  $(i,j,k)$  από το κελί  $(i,j-1,k)$  (Καβαλιεράτου 2007)

Κατά την κατασκευή του καννάβου με την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, η επίλυση των εξισώσεων γίνεται πάνω στους κόμβους. Δύο τύποι καννάβου χρησιμοποιούνται για την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Στον πρώτο ο κάθε κόμβος βρίσκεται στο κέντρο κάθε κελιού (Block-centered finite difference grid), ενώ στον δεύτερο οι κόμβοι βρίσκονται στις κορυφές των κελιών σχηματίζοντας έτσι ένα πλέγμα (Mesh-centered finite difference grid). Η διαφορά μεταξύ των δύο αυτών τύπων είναι στον τρόπο που αντιμετωπίζουν τις οριακές συνθήκες ροής.

Η διακριτοποίηση αυτή του συνεχούς χωρίου σε μεμονωμένα κομβικά σημεία και η αντικατάσταση των παραγώγων της προς προσδιορισμό συνάρτησης μέσω διαφορών, καθώς και των συνθηκών που ικανοποιεί αυτή ανάγει το όλο πρόβλημα σε ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων, η φύση του οποίου εξαρτάται από τη φύση της μερικής διαφορικής εξίσωσης που περιγράφει το πρόβλημα.

## 5.6 Οριακές συνθήκες σε προβλήματα υπόγειας ροής

Η ορθή επιλογή των οριακών συνθηκών αποτελεί βασικό παράγοντα κατασκευής ενός αξιόπιστου και αντιπροσωπευτικού μοντέλου για την εξεταζόμενη περιοχή. Με τη χρήση οριακών συνθηκών καθορίζεται η εξαρτημένη μεταβλητή στάθμη (head) καθώς και η παράγωγος αυτής, η ροή του ύδατος (flux), στα όρια της περιοχής του προβλήματος. Πρέπει να επισημανθεί πως τα υδρογεωλογικά όρια των υδροφόρων συστημάτων σχηματίζονται από φυσικές παρουσίες οι οποίες και καθορίζουν την έκταση και το βάθος του υδροφορέα, ενώ ταυτόχρονα καθορίζουν και τις συνθήκες εμπλουτισμού του. Ως φυσικά όρια χαρακτηρίζονται τα αδιαπέρατα στρώματα καθώς και επιφανειακά και υπόγεια νερά όπως ποτάμια και ρήγματα καρστικού ή μη χαρακτήρα.

Κατά την μοντελοποίηση της υπόγειας ροής σε συνθήκες σταθερής κατάστασης (steady state case) η επιλογή των οριακών συνθηκών αποκτά μεγαλύτερη σημασία καθώς το είδος της υπόγειας ροής αλλά και η πιθανή εμφάνιση αποκλίσεων στα αποτελέσματα της προσομοίωσης εξαρτώνται από την επιλογή των οριακών συνθηκών. Τρία είδη οριακών συνθηκών συναντώνται στα μοντέλα προσομοίωσης της υπόγειας ροής:

- Συνθήκη 1<sup>ης</sup> τάξης (Dirichlet)

Κατά την συνθήκη αυτή δηλώνονται ανά κόμβο η σταθερή τιμή του υδραυλικού ύψους. Το πρόγραμμα αυτόματα ορίζει ως σταθερούς όρους τις γραμμές και στήλες του πίνακα των συντελεστών, που σχετίζονται με αυτούς τους κόμβους και λαμβάνει υπόψη την κάθετη μεταβολή του υδραυλικού ύψους ανάλογα με το βάθος.

- Συνθήκη 2<sup>ης</sup> τάξης (Neumann)

Η ροή κατά μήκος ενός στοιχείου θεωρείται σταθερή, η ολοκλήρωση των σχέσεων δίνει τις κομβικές κατανομές.

- Συνθήκη 3<sup>ης</sup> τάξης (Cauchy)

Η συνθήκη αυτή ονομάζεται και μικτού ορίου καθώς συσχετίζει τις οριακές τιμές της στάθμης με τη ροή. Η ροή κατά μήκος του ορίου υπολογίζεται με δεδομένη μια τιμή του υδραυλικού ύψους στο όριο αυτό.

## 5.7 Μοντέλο προσομοίωσης της υπόγειας ροής και μεταφοράς μάζας- Visual MODFLOW

Στην παρούσα εργασία για την προσομοίωση της υδροδυναμικής κατάστασης της περιοχής των Μοιρών επιλέχθηκε το λογισμικό πακέτο Visual MODFLOW (Modular three dimensional finite difference groundwater flow model) της Αμερικανικής Υπηρεσίας Γεωλογικών Ερευνών (U.S.G.S.). Ο κώδικας Visual MODFLOW, γραμμένος σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN, χρησιμοποιείται ευρέως για την προσομοίωση της τρισδιάστατης ροής των υπόγειων υδάτων και μεταφορά ρυπαντικών παραγόντων.

Συγκεκριμένα για την προσομοίωση της κίνησης των υπόγειων υδάτων χρησιμοποιείται ο κώδικας MODFLOW, που περιέχεται στο λογισμικό πακέτο. Με την χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών επιλύεται η εξίσωση ροής των υπόγειων υδάτων που έχει προκύψει ως συνδυασμός της εξίσωσης διατήρησης μάζας και του νόμου Darcy. Η επίλυση των εξισώσεων πραγματοποιείται στο κέντρο των κυψελίδων του καννάβου (block-centered) και είναι απαραίτητη η γνώση των υδραυλικών, υδρογεωλογικών και υδρολογικών χαρακτηριστικών της περιοχής.

Η ακόλουθη εξίσωση περιγράφει την κίνηση των υπογείων υδάτων σταθερής πυκνότητας διαμέσου ενός ετερογενούς και ανισότροπου πορώδους μέσου σε συνθήκες μη μόνιμης ροής (Anderson and Woessner, 1992) (McDonald and Harbaugh, 1988):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_y \frac{\partial h}{\partial t} \quad \text{Εξίσωση 5.3}$$

Όπου:

- $K_{xx}, K_{yy}, K_{zz}$  : οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας κατά μήκος των  $x, y, z$  αξόνων συντεταγμένων, οι οποίες θεωρούνται να είναι παράλληλοι προς τους κύριους άξονες της υδραυλικής αγωγιμότητας ( $L^2 T^{-1}$ )
- $h$ : το υδραυλικό φορτίο (L)
- $W$ : η παροχή ανά μονάδα χρόνου που προέρχεται από εισροές ή εκροές του νερού ( $T^{-1}$ )
- $S_y$ : ειδική απόδοση του πορώδους μέσου ( $L^{-1}$ )
- $t$ : ο χρόνος (T)

Η παραπάνω εξίσωση μαζί με τον προσδιορισμό της ροής, των αρχικών συνθηκών πιεζομετρικής στάθμης αποτελούν την μαθηματική αναπαράσταση της κίνησης του υπόγειου νερού. Για την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιείται η αριθμητική μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών, και είναι απαραίτητη η χωρική διακριτοποίηση του υπό μελέτη υδροφορέα καθώς και ο ορισμός των οριακών συνθηκών, όπως παρουσιάσθηκε στις προηγούμενες ενότητες.

Ο κώδικας MT3DMS χρησιμοποιείται ευρέως για την προσομοίωση της κίνησης των ρύπων και την μεταβολή στην συγκέντρωσή τους τόσο στο χρόνο όσο και στον χώρο. Λαμβάνει υπόψη τις υδρογεωλογικές συνθήκες, τις φυσικές και χημικές διεργασίες που συντελούν στην βαθμιαία μείωση του ρυπαντικού φορτίου. Η αριθμητική επίλυση της προσομοίωσης βασίζεται στην ακόλουθη εξίσωση που περιγράφει την τρισδιάστατη κίνηση των ρύπων σε συνθήκες μη μόνιμης ροής, για πορώδες υλικό με ομοιόμορφη κατανομή του πορώδους (Zheng and Wang, 1999):

$$\frac{\partial(\theta C^k)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \theta D_{ij} \frac{\partial C^k}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i C^k) + q_s C_s^k + \sum R_n \quad \text{Εξίσωση 5.4}$$

Όπου:

$C^k$ : η συγκέντρωση των διαλυμένων ουσιών [ $ML^{-3}$ ]

$t$ : ο χρόνος [T]

$D_{ij}$ : συντελεστής υδροδυναμικής διασποράς [ $L^2T^{-1}$ ]

$v_i$ : ταχύτητα ροής υπόγειου νερού [ $LT^{-1}$ ]

$q_s$ : παροχή εισόδου ή εξόδου ανά μονάδα όγκου του πορώδους μέσου [ $T^{-1}$ ]

$C_s^k$ : συγκέντρωση ρύπων στην πηγή εισόδου ή εξόδου του νερού [ $ML^{-3}$ ]

$\sum R_n$ : ο όρος για τις διάφορες χημικές αντιδράσεις [ $ML^{-3}T^{-1}$ ]

Η παραπάνω εξίσωση αποτελεί έκφραση της αρχής διατήρησης της μάζας σε κάθε χρονική στιγμή για απειροστό όγκο ελέγχου του υπόγειου υδροφορέα. Όπως και στον κώδικα του Modflow, η επίλυση της εξίσωσης γίνεται με την χρήση αριθμητικών μεθόδων όπως η μέθοδος του Euler, Lagrange καθώς και ο συνδυασμός τους. Οι ομοιότητες που παρουσιάζουν οι δύο αυτοί κώδικες ως προς δομή και τον σχεδιασμό τους, διευκολύνουν τη χρήση του μοντέλου μεταφοράς σε συνδυασμό με το μοντέλο της ροής. Ο κώδικας MT3DMS παρουσιάζει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα :

- Δυνατότητα εφαρμογής σε ελεύθερους, περιορισμένους και με διαρροή υπόγειους υδροφορείς
- Δυνατότητα εφαρμογής σε κεκλιμένα διακριτοποιημένα επίπεδα και σε μεταβλητού πάχους κελιά
- Διαθέτει αρκετές αριθμητικές τεχνικές για την επίλυση της διεργασίας της συναγωγής καθώς και συνοριακές συνθήκες για τη δημιουργία ρεαλιστικών προσομοιώσεων
- Λαμβάνει υπόψη την επίδραση εξωτερικών υδραυλικών πηγών όπως οι γεωτρήσεις, τα κανάλια, τα ποτάμια καθώς και την επίδραση της επιφανειακής φόρτισης και εξατμισοδιαπνοής
- Πλήρης συμβατότητα με το μοντέλο προσομοίωσης της υπόγειας ροής MODFLOW
- Χαρακτηρίζεται από σταθερότητα και ευρωσία, επιτρέποντας την ακρίβεια των αποτελεσμάτων

#### 5.7.1 Κύριες υπορουτίνες MODFLOW

Για την απλούστευση της χρήσης του λογισμικού αλλά και την επίτευξη ακριβέστερων αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, έχουν δημιουργηθεί κατάλληλες υπορουτίνες. Ο χρήστης δύναται να επιλέξει με βάση τα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης, τα πακέτα που θα επιφέρουν την βέλτιστη προσομοίωση. Τα κυριότερα πακέτα είναι τα ακόλουθα:

- *Βασικό πακέτο (Basic Package, BAS)*, όπου εισάγονται τα στοιχεία της χωρικής διακριτοποίησης του υδροφορέα, η χρονική περίοδος προσομοίωσης και το βήμα κάθε περιόδου, οι οριακές συνθήκες ανά κόμβο. Στην αρχή της εξεταζόμενης χρονικής περιόδου, η αρχική συνθήκη ορίζεται από τα πιεζομετρικά δεδομένα μέσω των μετρήσεων του πεδίου.
- *Πακέτο κεντροβαρικής διάταξης της ροής (Block-Centered Flow Package, BCF)*, όπου εισάγονται δεδομένα για τον τύπο του υδροφορέα, τις συνθήκες ροής, τα χαρακτηριστικά του υδροφορέα (υδραυλική αγωγιμότητα, μεταβιβαστικότητα, ενεργό πορώδες).
- *Πακέτο Εμπλουτισμού (Recharge Package, RCH)*, ο εμπλουτισμός περιγράφει την κατείσδυση επιφανειακού νερού είτε λόγω των βροχοπτώσεων είτε λόγω τεχνητού εμπλουτισμού. Ο εμπλουτισμός εισάγεται μόνο στο ανώτερο στρώμα.
- *Γεωτρήσεις (Well Package)*, αφορά τα στοιχεία από τις γεωτρήσεις άντλησης ή εμπλουτισμού του υδροφορέα για την υπό εξέταση περίοδο. Στις περιπτώσεις άντλησης εισάγονται αρνητικές τιμές, ενώ στις περιπτώσεις εμπλουτισμού εισάγονται θετικές.
- *Όριο γενικού φορτίου (General Head Boundary, G.H.B.)*, εφαρμόζεται για να προσομοιώσει την πλευρική τροφοδοσία ενός υδροφορέα. Η

τροφοδοσία αυτή υπολογίζεται από την διαφορά στην στάθμη μεταξύ της εξωτερικής πηγής και του κάθε κελιού στην περιοχή. Ο ρυθμός τροφοδοσίας εξαρτάται από την αγωγιμότητα των υλικών μεταξύ των πηγών και των κελιών. Η αγωγιμότητα είναι μια αριθμητική παράμετρος και υπολογίζεται ως η οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα του κελιού επί την εγκάρσια διατομή αυτής και διαιρούμενη με την απόσταση από την εξωτερική πηγή τροφοδοσίας.

- *Σταθερό Φορτίο (Constant Head)*, χρησιμοποιείται για την εισαγωγή των τιμών του υδραυλικού φορτίου σε συγκεκριμένα κελιά του καννάβου. Συμπεριφέρεται ως ανεξάντλητη πηγή νερού που εισάγεται ή εξάγεται από το σύστημα. Κατά την διάρκεια της προσομοίωσης τα όρια σταθερού σημείου δεν μεταβάλλονται.
- *Output Control*, μέσου του πακέτου αυτού καθορίζεται η μορφή και ο τρόπος παρουσίασης των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Παρέχει την δυνατότητα σύνδεσης με άλλα προγράμματα ώστε να γίνει η γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την εισαγωγή των παραπάνω δεδομένων.

## 6. Περιγραφή Περιοχή Μοιρών Ηρακλείου Κρήτης

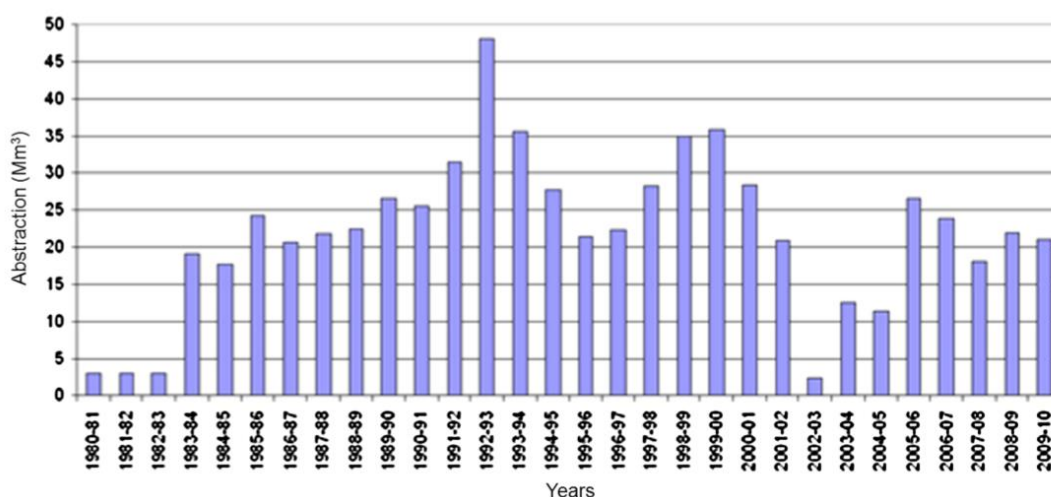
### 6.1 Γενικά Χαρακτηριστικά

Η πεδιάδα των Μοιρών ανήκει στην ευρύτερη πεδιάδα της Μεσσαράς, η οποία ανήκει στον Νομό Ηρακλείου και βρίσκεται στο νότιο κεντρικό τμήμα της Κρήτης. Η πεδιάδα της Μεσσαράς αποτελεί την μεγαλύτερη πεδιάδα του νησιού (398km<sup>2</sup>) και την πιο παραγωγική, καθώς το μεγαλύτερο μέρος της εκμεταλλεύεται αγροτικά. Περίπου το 38% της πεδιάδας καλλιεργείται εκ του οποίου το 75% καταλαμβάνουν ελαιόδεντρα, 10% αμπέλια, 2% εσπεριδοειδή και 13% οπωροκηπευτικά (Βαρουχάκης, 2015).

Η πεδιάδα της Μεσσαράς εκτείνεται από τα ανατολικά προς τα δυτικά στην νότια ακτή του νησιού. Το βόρειο τμήμα της συνορεύει με την οροσειρά του Ψηλορείτη, ενώ νότια με την οροσειρά των Αστερουσιών. Δυτικά βρέχεται από τον κόλπο της Μεσσαράς που αποτελεί τμήμα του Λιβυκού Πελάγους, ενώ ανατολικά εκτείνεται ως τις παρυφές του όρους Δίκη. Στην ενδοχώρα της πεδιάδας υπάρχουν αρκετά χωριά όχι ιδιαίτερα ανεπτυγμένα καθώς οι κάτοικοι ασχολούνται με την πρωτογενή παραγωγή. Η πεδιάδα της Μεσσαράς διακρίνεται λόγω των υδρογεωλογικών χαρακτηριστικών σε δύο μικρότερες λεκάνες, της Βαγιόνας και των Μοιρών. Η πόλη των Μοιρών είναι μαζί με το Τυμπάκι από τις

μεγαλύτερες της Μεσσαράς, με έντονη αγροτική δραστηριότητα αλλά και τουριστική δραστηριότητα τα τελευταία χρόνια.

Λόγω της μεγάλης αγροτικής δραστηριότητας οι ανάγκες σε άρδευση είναι αυξημένες. Έτσι τα τελευταία χρόνια η περιοχή αντιμετωπίζει το πρόβλημα της λειψυδρίας, καθώς και οι βροχοπτώσεις είναι περιορισμένες ιδιαίτερα την θερινή περίοδο (Εικόνα 19).



Εικόνα 19. Ετήσιος ρυθμός άντλησης στη λεκάνη των Μοιρών (Πηγή: Βαρουχάκης 2015)

Τη λύση σε αυτό το πρόβλημα σχεδιάστηκε να δώσει το φράγμα της Φανερωμένης, μια τεχνητή λίμνη χωρητικότητας έως και 20 εκατομμυρίων κυβικών μέτρων νερού. Τα έργα ολοκλήρωσης του φράγματος ολοκληρώθηκαν το 2005, παρόλα αυτά το πρόβλημα της λειψυδρίας στην περιοχή δεν άλλαξε λόγω της κακής διαχείρισής του.

## 6.2 Στοιχεία Φυσικού Περιβάλλοντος

Η Κρήτη χαρακτηρίζεται από ένα πλούσιο φυσικό περιβάλλον αποτέλεσμα των γεωμορφολογικών ιδιοτήτων της και των εναλλαγών οικοσυστημάτων και τοπίων. Η κρητική χλωρίδα παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον καθώς αποτελείται από 1.800 περίπου αυτόχθονα είδη, εκ των οποίων τα 180 είναι ενδημικά, δηλαδή συναντώνται μόνο στην Κρήτη και πουθενά αλλού στον κόσμο. Μερικά από τα ενδημικά είδη καταλαμβάνουν μεγάλες εκτάσεις του νησιού (όπως ο κρητικός έβενος, η κρητική αριστολόχια, το πετρομάρουλο), ενώ άλλα είναι πιο περιορισμένα κινδυνεύοντας με εξαφάνιση.

Αντίστοιχα πλούσια χαρακτηρίζεται και η κρητική πανίδα με υψηλό ποσοστό ενδημισμού. Συγκεκριμένα, έχει υπολογισθεί ότι ο αριθμός των

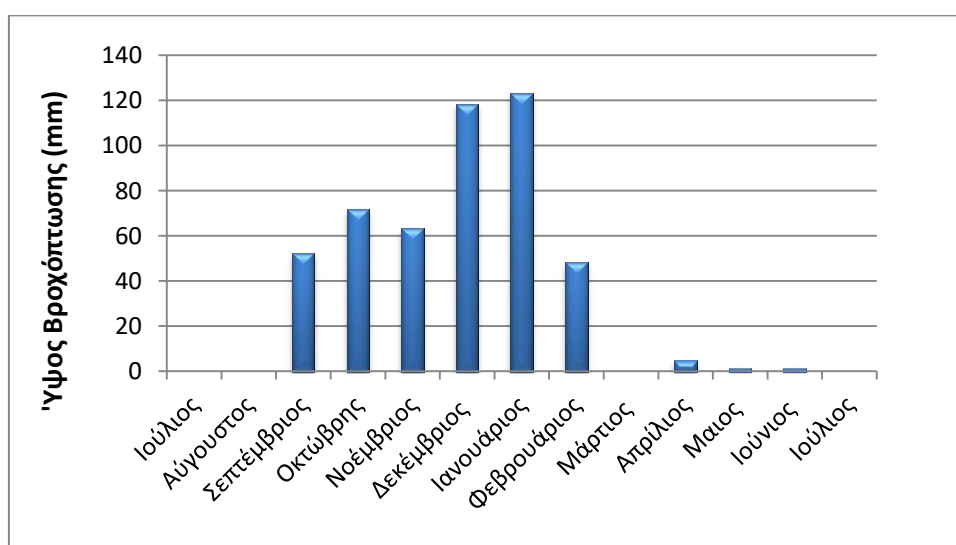


ενδημικών ασπόνδυλων της Κρήτης ανέρχεται στα 1.000 είδη. Στην κατηγορία αυτή ανήκει και ο κρητικός βάτραχος, ο οποίος κινδυνεύει από την συρρίκνωση των υγροτόπων και την ρύπανση αυτών. Σημαντικός είναι και ο κατάλογος των πουλιών στο νησί που ξεπερνά τα 350 είδη με τα 250 εξ αυτών να έχουν τακτική παρουσία.

Πρέπει να αναφερθεί πως η βιοποικιλότητα που παρουσιάζει η Κρήτη έχει οδηγήσει στην ανάγκη προστασίας και διατήρησής της. Έτσι, 53 συνολικά περιοχές έχουν ενταχθεί στο δίκτυο Natura2000, εκ των οποίων 28 αποτελούν Τόπους Κοινοτικής Σημασίας και 26 Ζώνες Ειδικής Προστασίας.

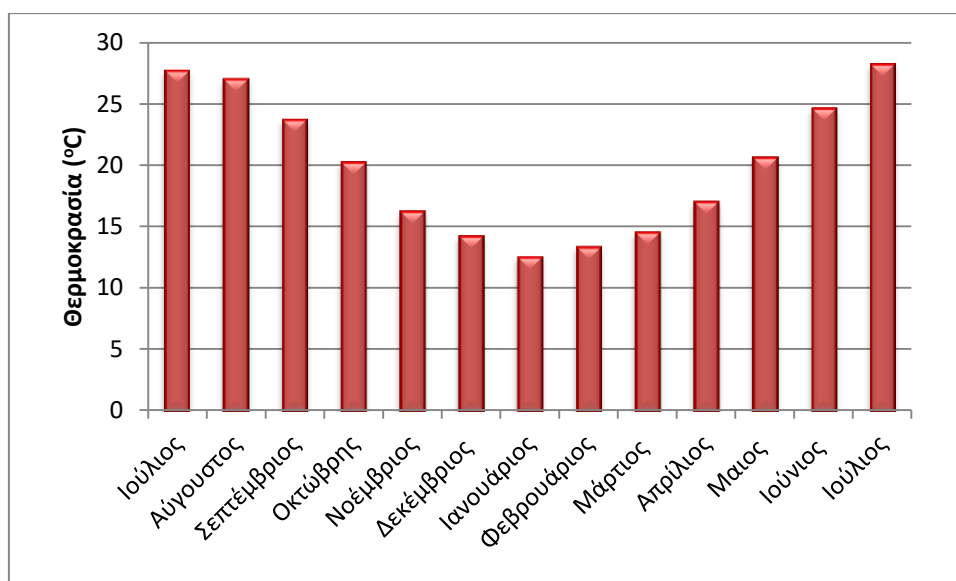
### 6.3 Κλιματολογικές Συνθήκες

Το κλίμα της Κρήτης χαρακτηρίζεται ως εύκρατο μεσογειακό, ενώ στους ορεινούς όγκους τείνει ως προς το ηπειρωτικό. Κατά τους χειμερινούς μήνες η μέση θερμοκρασία κυμαίνεται στους 12°C, ενώ τους καλοκαιρινούς στους 28 °C. Ηλιοφάνεια παρατηρείται όλους τους μήνες του έτους και η εμφάνιση νεφώσεων είναι μικρή και μειώνεται από τα ανατολικά προς τα δυτικά. Το ποσοστό της σχετικής υγρασίας βρίσκεται σε υψηλά επίπεδα, τον χειμώνα είναι περίπου 70% ενώ το καλοκαίρι είναι 60%. Στην Κρήτη παρατηρείται διακύμανση στην ετήσια βροχόπτωση, η οποία μεταβάλλεται γεωγραφικά δηλαδή αυξάνεται από τα ανατολικά προς τα δυτικά και από τα νότια προς τα βόρεια (Εικόνα 20). Σύμφωνα με τελευταίες μελέτες από τον όγκο του νερού των βροχοπτώσεων το μεγαλύτερο ποσοστό 82% χάνεται λόγω της εξατμισοδιαπνοής, το 18% εμπλουτίζει τον υπόγειο υδροφορέα, ενώ το ποσοστό αυτού που διαρρέει επιφανειακά θεωρείται αμελητέο (Kilili-Polychronaki 2001).



Εικόνα 20. Μηνιαία βροχομετρικά στοιχεία υδρολογικού έτους 2009-2010, από μετεωρολογικό σταθμό Πετροκεφάλι Μοιρών

Η περιοχή μελέτης έχει ένα μεταβατικό τύπο κλίματος μεταξύ του χερσαίου Μεσογειακού και του ερημοειδούς Μεσογειακού, στο οποίο υπάγεται και η νοτιοανατολική Κρήτη. Χαρακτηριστικό γνώρισμα των χειμερινών μηνών αυτού του τύπου κλίματος είναι η ηπιότητα που παρουσιάζουν κυρίως λόγω της άφιξης στην περιοχή θερμών και υγρών νοτιοδυτικών ανέμων. Ο Ιανουάριος χαρακτηρίζεται ως ο ψυχρότερος και υγρότερος μήνας με μέση ελάχιστη θερμοκρασία 12 °C. Το καλοκαίρι είναι ιδιαίτερα ξηρό με θερμότερους μήνες τον Ιούλιο και τον Αύγουστο όπου η μέση θερμοκρασία είναι 27 °C. Στην περιοχή των Μοιρών υπάρχει μετεωρολογικός σταθμός, από όπου ελήφθησαν τα κλιματολογικά στοιχεία της περιοχής μελέτης (Εικόνα 21).



Εικόνα 21. Μηνιαίες θερμοκρασίες υδρολογικού έτους 2009-2010, από μετεωρολογικό σταθμό Πετροκεφάλι Μοιρών

## 6.4 Γεωμορφολογικά Χαρακτηριστικά

### 6.4.1 Γεωλογική Δομή Κρήτης

Η γεωλογική δομή της Κρήτης χαρακτηρίζεται ως πολύπλοκη, αποτέλεσμα της γεωγραφικής της θέσης. Παρατηρείται η ανάπτυξη αλληπάλληλων τεκτονικών καλυμμάτων που κάθε ένα από αυτά συγκροτείται από διαφορετικούς λιθολογικούς σχηματισμούς με διαφορετική μεταφορική και παραμορφωτική ιστορία (Αλεξόπουλος 1990). Η διάταξη αυτή απορρέει από τις τεκτονικές διεργασίες κατά το Τριτογενές, με την υποβάθμιση της αφρικανικής λιθοσφαιρικής πλάκας κάτω από την ευρασιατική.

#### 6.4.2 Γεωλογική Δομή περιοχής μελέτης

Η περιοχή μελέτης, καθώς και η ευρύτερη πεδιάδα της Μεσσαράς, εκτείνεται από τα ανατολικά προς τα δυτικά στο νότιο τμήμα της λεκάνης του Ηρακλείου. Η λεκάνη αυτή αποτελεί τεκτονική τάφρο που ορίζεται από τις ρηξιγενείς ζώνες Μαλεβυζίου-Καμαρών-Γέργερης στα δυτικά από τα ρήγματα Καστελίου-Χερσονήσου-Ξενιάκου (ανατολικά) και των Αστερουσίων ορέων (νότια) (Κριτσωτάκης, 2009). Στην περιοχή μπορούν να εντοπισθούν δύο τεκτονικές ενότητες, με την πρώτη να περιλαμβάνει τους τεταρτογενείς και νεογενείς σχηματισμούς της λεκάνης και την δεύτερη τους προνεογενείς σχηματισμούς των οροσειρών του Ψηλορείτη, της Δίκτης και των Αστερουσίων ορέων, που αποτελούν και τα όρια της λεκάνης της Μεσσαράς. Σύμφωνα με τη γεωλογική τομή η μελετώμενη περιοχή αποτελείται από τις παρακάτω στρωματογραφικές και τεκτονικές ενότητες (από τις νεότερες προς τις παλαιότερες):

- Ολόκαινο: Αλουβιακές αποθέσεις, προϊόντα αποσάθρωσης, καλύπτουν μικρές εσωτερικές λεκάνες καθώς και κοίτες υδρορεμάτων. Κώνοι κορημάτων και πλευρικά κορήματα.
- Πλειοστόκαινο-Ολόκαινο: ποταμολιμναία κροκαλοπαγή, άμμοι, υλιόλιθοι και αργιλικά στρώματα αποτελούμενα κυρίως από μεταφερόμενα υλικά, καλύπτοντας κυρίως το κεντρικό πεδινό τμήμα της λεκάνης.
- Ανώτερο Πλειόκαινο-Πλειοστόκαινο: Σχηματισμός της «Αγίας Γαλήνης» κυρίως στην περιοχή Μοίρες-Καλυβιανή.
- Νεογενές :
  - Κατώτερο πλειόκαινο: σχηματισμός Φοινικιάς, αποτελείται κυρίως από λευκές μάργες με παρεμβολές αργίλων και άμμων, ασβεστόλιθοι, άργιλοι, κροκαλοπαγή, εμφανίζεται βορειοανατολικά των Μοιρών.
  - Ανώτερο Τορτόνιο-Μεσσήνιο: σχηματισμός της Αγίας Βαρβάρας, αποτελείται από βιοκλαστικούς, τοπικά κροκαλοπαγείς ή λατυποπαγείς ασβεστόλιθοι, μαργαικοί ασβεστόλιθοι και εναλλαγές ασβεστικών μαργών ή μαργαικών ασβεστόλιθων με παρεμβολές γύψων. Στο ανώτερο τμήμα του σχηματισμού εντοπίζονται ψαμμίτες και κροκαλοπαγή.
  - Τορτόνιο: σχηματισμός Αμπελούζου, ακανόνιστες εναλλαγές από θαλάσσια, υφάλμυρα, ποτάμια κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, ιλυόλιθους, μάργες και λιγνίτες).

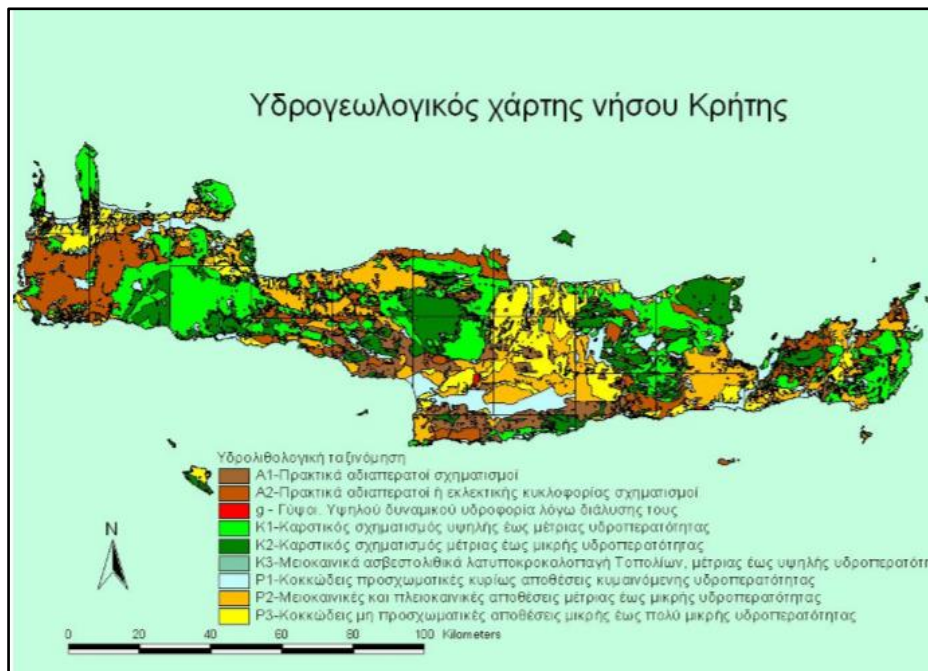
- Ανώτερο Σερβάλιο: σχηματισμός Σκινιά, αποτελείται από καλά στρωμένες θαλάσσιες και ιλυώδους αργίλους με παρεμβολές ψαμμιτών.
  - Μέσο Μειόκαινο: σχηματισμός Βιάννου, αποτελείται από σκούρες στρωματώδεις αργίλους με παρεμβολές ψαμμιτών και ασβεστόλιθων. Στα ανώτερα στρώματα του σχηματισμού παρατηρούνται παρεμβολές κροκαλοπαγών.
- Προνεογενείς σχηματισμοί
    - Το νότιο τμήμα της λεκάνης της Μεσσαράς, αποτελείται από Μεσοζωικά πετρώματα και επικρατεί κυρίως ο φλύσχης και τα ανθρακικά της ζώνης της Τρίπολης. Συναντώνται επίσης έντονα ρηγματωμένοι και ελαφρώς καρστικοποιημένοι ασβεστόλιθοι της ζώνης της Πίνδου.
    - Στο βορειοδυτικό τμήμα της λεκάνης της Μεσσαράς συναντώνται μεσοζωικά πετρώματα της ενότητας της Τρίπολης, της ενότητας των Φυλλιτών-χαλαζιτών και πετρώματα της Ιονίου ζώνης, πλακώδεις ασβεστόλιθοι και ασβεστικοί σχιστόλιθοι. Στα χαμηλότερα υψόμετρα εντοπίζονται πλευρικά κορήματα (λατύπες).

## 6.5 Υδρογεωλογικά Χαρακτηριστικά

### 6.5.1 Υδρογεωλογικές Συνθήκες Κρήτης

Η υδρολογία μια περιοχής καθορίζεται τόσο από την τεκτονική δομή όσο και την στρωματογραφία της. Στην Κρήτη εντοπίζονται τρεις κύριες υδρογεωλογικές ενότητες σύμφωνα με την υδρολιθολογική ταξινόμηση των γεωλογικών σχηματισμών (Εικόνα 22):

- Καρστικοί σχηματισμοί
- Πορώδεις σχηματισμοί
- Αδιαπέρατοι σχηματισμοί



Εικόνα 22. Υδρολιθικός Χάρτης Κρήτης, Διαχειριστική Μελέτη Κρήτης (Κριτσωτάκης 2009)

Καρστικοί σχηματισμοί : η κυκλοφορία του νερού γίνεται μέσω του δευτερογενούς πορώδους (ρωγμές, καρστικά κενά). Διακρίνονται σε :

- υψηλής ως μέτριας διαπερατότητας (K1) ασβεστόλιθοι, δολομίτες, κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι, μάρμαρα υψηλής ως μέτριας υδροπερατότητας. Σε αυτά τα συστήματα αναπτύσσονται υψηλού δυναμικού υπόγειες υδροφορίες , οι οποίες εκφορτίζονται μέσω μεγάλων καρστικών πηγών.
- Μέτριας ως μικρής υδροπερατότητας (K2) ασβεστόλιθοι μέτριας ως μικρής υδροπερατότητας. Η κυκλοφορία του νερού στους σχηματισμούς αυτούς ελέγχεται από τις παρεμβολές πυριτόλιθων, κερατόλιθων και αργιλικών σχιστόλιθων. Αναπτύσσονται μέσου ως μικρού δυναμικού υπόγειες υδροφορίες.
- Μειοκαινικά ασβεστολιθικά λατυποκροκαλοπαγή μέτριας ως υψηλής υδροπερατότητας (K3), παρουσιάζουν τόσο πρωτογενές όσο και δευτερογενές πορώδες. Αναπτύσσονται σημαντικές υδροφορίες που εκφορτίζονται μέσω αξιόλογων πηγών.

Πορώδεις σχηματισμοί η κυκλοφορία του νερού στους σχηματισμούς αυτούς πραγματοποιείται μέσω του πρωτογενούς πορώδους.

- Κοκκώδεις προσχωματικές αποθέσεις κυμαινόμενης υδροπερατότητας (Π1), κατατάσσονται κυρίως αλλουβιακές αποθέσεις, οι ποτάμιες και θαλάσσιες αναβαθμίσεις, τα κροκαλοπαγή. Στους σχηματισμούς αυτούς αναπτύσσονται αξιόλογες φρεάτιες υδροφορίες.

- Μειοκαινικές και πλειοκαινικές αποθέσεις μέτριας ως μικρής υδροπερατότητας (Π2), εντάσσονται κροκαλοπαγή και μαργαικοί ασβεστόλιθοι των νεογενών σχηματισμών. Εντοπίζονται στις παρυφές ορεινών ασβεστολιθικών όγκων και κάποιες φορές τροφοδοτούνται από αυτούς αν το επιτρέπει η πιεζομετρία της περιοχής. Αναπτύσσονται και σε αυτούς τους σχηματισμούς υδροφορίες μέσου ως μικρού δυναμικού.
- Κοκκώδεις μη προσχωματικές αποθέσεις μικρής ως πολύ μικρής υδροπερατότητας (Π3), εδώ κατατάσσονται πλειοκαινικές και μειοκαινικές μάργες όπως και ο αδιαίρετος σχηματισμός του νεογενούς. Αναμένεται η ανάπτυξη υδροφοριών στον αδιαίρετο σχηματισμό.

#### Αδιαπέρατοι σχηματισμοί

- Πρακτικά αδιαπέρατοι σχηματισμοί μικρής ως πολύ μικρής υδροπερατότητας (Α1), κατατάσσονται οι σχηματισμοί του φλύσχη και αργιλικά ιζήματα. Αναπτύσσονται κατά τόπους υδροφορίες μικρού ως μέσου δυναμικού.
- Πρακτικά αδιαπέρατοι ή εκλεκτικής κυκλοφορίας σχηματισμοί μικρής έως πολύ μικρής διαπερατότητας (Α2), περιλαμβάνονται μεταμορφωμένα και πυριγενή πετρώματα. Αναπτύσσονται και εδώ επιμέρους τοπικού χαρακτήρα υδροφορίες.

Χαρακτηριστικό της υδρογεωλογίας της Κρήτης είναι η ύπαρξη καρστικών πηγών τόσο με υφάλμυρο όσο και με καλής ποιότητας νερό. Πρέπει να επισημανθεί πως η ύπαρξη ρηξιγενών ζωνών επηρεάζει την εμφάνιση πηγών, δεδομένου ότι οι πηγές αυτές κείνται πάνω σε ρήγματα.

#### **6.5.2 Υδρογεωλογικές Συνθήκες περιοχής μελέτης**

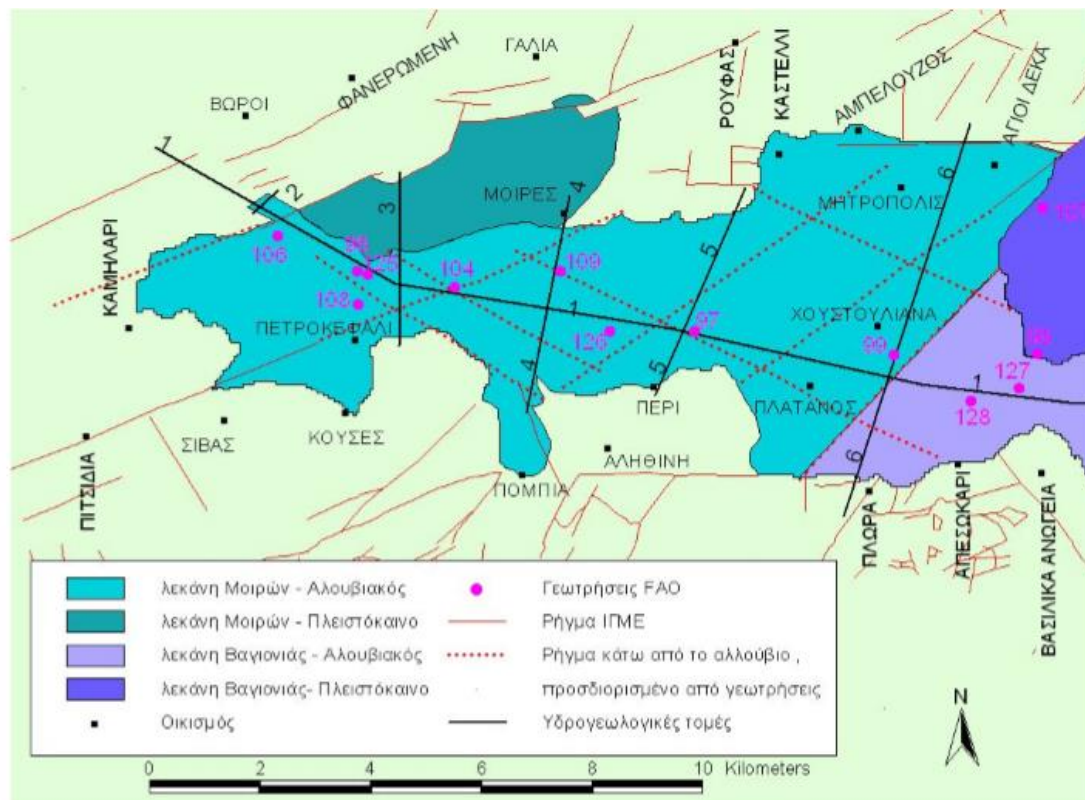
Η λεκάνη των Μοιρών είναι αποτέλεσμα βυθισμένων ρηξιτεμαχών της λεκάνης της Μεσσαράς και εκτείνεται μεταξύ του ρηξιτεμαχούς της Φαιστού και αυτού της Βαγιόνας. Η ίδια η λεκάνη αποτελείται από μικρότερα ρηξιτεμάχη διαφορετικών επιπέδων πάνω στα οποία επικάθονται πλειστοκαίνοι και αλλουβιακοί σχηματισμοί. Χαρακτηριστικό της λεκάνης των Μοιρών είναι η ύπαρξη πολλών ρηγμάτων καθόλη την έκτασή της, τα οποία επηρεάζουν και τις υδρογεωλογικές συνθήκες που επικρατούν σε αυτήν.

Τα όρια της υδρογεωλογικής λεκάνης ταυτίζονται με αυτά της πεδινής, ως βόρειο όριο ορίζεται η νοητή γραμμή μεταξύ Αγίων Δέκα-Καστέλι-Μοίρες-στένεμα Φαιστού, ως νότιο η νοητή γραμμή Πλάτανος-Πέρι-Πετροκεφάλι-Άγιος Ιωάννης, ως δυτικό η ζώνη της Φαιστού και ως ανατολικό θεωρείται η νοητή γραμμή Αγίων Δέκα-Απεσωκάρι.

Οι αλλουβιακές αποθέσεις αποτελούν το σημαντικότερο υδροφορέα της λεκάνης των Μοιρών, οι οποίες συναντώνται γύρω από τα υδρορεύματα του Γεροποτάμου και του Λιθαίου. Το πάχος του υδροφορέα δεν είναι σταθερό, με το μέγιστο να εντοπίζεται στη τεταρτογενή αποθετική τάφρο κυρίως πλησίον της σημερινής ροής του Γεροποτάμου. Ο αλλουβιακός αυτός υδροφορέας αποτελεί μια βαθειά και πλατιά τάφρο, όπου στο δυτικό όριο της λεκάνης διεισδύει στο στένεμα της Φαιστού. Λόγω της ανύψωσής του σε σχέση με τις λεκάνες των Μοιρών και του Τυμπακίου, τις διαχωρίζει και τις απομονώνει υδρογεωλογικά. Το στένεμα αυτό, προσεγγίζεται ως φαράγγι και είναι ο μόνος τρόπος σύνδεσης των επιφανειακών και υπόγειων νερών μεταξύ των δυο λεκανών. Το ύψωμα της Φαιστού θεωρείται ως αδιαπέρατος σχηματισμός, εμποδίζοντας την διαφυγή των υπόγειων νερών εκτός της λεκάνης των Μοιρών εκτός από το στένεμα αυτό.

Όσο αφορά τη σύσταση του αλλουβιακού υδροφορέα, αυτή μεταβάλλεται από ανατολικά προς τα δυτικά. Συγκεκριμένα, στο ανατολικό τμήμα της λεκάνης παρατηρούνται κυρίως χονδρόκοκκα υλικά (υδροφόρο) με ενστρώσεις αργιλικών και ιλύος (ανυδροφόρο), με πάχος μικρότερο των 5m. Στο τμήμα αυτό το επιφανειακό στρώμα αποτελείται κυρίως από χαλίκια και άμμο ευνοώντας έτσι την κατείσδυση. Από το κεντρικό τμήμα της λεκάνης και δυτικότερα μεταβάλλεται το πάχος και αυξάνεται το ποσοστό των ανυδροφόρων, έτσι το επιφανειακό στρώμα γίνεται περισσότερο αργιλικό με πάχος μεταξύ 20-30m. Σύμφωνα με την ανάλυση των καρότων από τις γεωτρήσεις αλλά και της γεωτεκτονικής κατάστασης της περιοχής, παρατηρήθηκε η ύπαρξη πηγών οι οποίες συνδέονται άμεσα με τα ρήγματα της περιοχής (Εικόνα 23).





Εικόνα 23. Υδρολιθικός Χάρτης Λεκάνης Μοιρών- θέσεις ρηγμάτων (Κριτσωτάκης 2009)

## 7 Διαδικασία Προσομοίωσης περιοχής μελέτης με χρήση του κώδικα Visual MODFLOW

### 7.1 Διαδικασία Προσομοίωσης υπόγειας ροής

Ο κύριος κατάλογος επιλογών του προγράμματος δίνει στον χρήστη την επιλογή εισαγωγής δεδομένων (Input) (όπου σχεδιάζεται, τροποποιείται και αστικοποιείται το μοντέλο καθώς και διάφορες παράμετροι), την επιλογή εκτέλεσης της προσομοίωσης Run, την επιλογή οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων Output, όπως αυτά προέκυψαν από την εκτέλεση του προγράμματος, καθώς και την επιλογή Setup με την οποία διαμορφώνονται τα χαρακτηριστικά της προσομοίωσης. Τα δεδομένα που εισάγονται αφορούν τα χαρακτηριστικά του υδροφορέα, τις αρχικές και οριακές συνθήκες, τον χρόνο προσομοίωσης κ.ά. Έτσι δημιουργείται ένα ομοίωμα της περιοχής μελέτης και το πρόγραμμα υπολογίζει το υδραυλικό ύψος, την ταχύτητα και την διεύθυνση κίνησης του νερού και την συγκέντρωση μιας ουσίας, η οποία διακινείται στο υπόγειο νερό. Στην συνέχεια παρουσιάζεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την εισαγωγή των δεδομένων.



Αρχικά, για την κατασκευή του μοντέλου έγινε ψηφιοποίηση της περιοχής μελέτης με την βοήθεια του προγράμματος ArcGIS. Στην συνέχεια γίνεται η εισαγωγή των βασικών παραμέτρων του εννοιολογικού μοντέλου. Αναλυτικότερα, γίνεται επιλογή των μονάδων των μεταβλητών (units) όπως παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 2), ο ορισμός του τύπου ροής σε Transient flow, διότι η ροή μεταβάλλεται κατά την διάρκεια των περιόδων μελέτης και του χρόνου προσομοίωσης για σταθερή κατάσταση (steady state simulation time) ίσος με 1000 days.

**Πίνακας 2. Μονάδες Μέτρησης MODFLOW**

Παράμετροι	Μονάδες
Μήκος	meters
Χρόνος	days
Υδραυλική Αγωγιμότητα	m/sec
Παροχή	m <sup>3</sup> /sec
Εμπλουτισμός	mm/year
Μάζα	kilogram
Συγκέντρωση	milligrams/liter

Οι επιλογές αυτές γίνονται σε αρχικό στάδιο και παραμένουν αμετάβλητες κατά την διάρκεια της προσομοίωσης. Με την συμπλήρωση των παραπάνω στοιχείων διαμορφώθηκαν τα κύρια χαρακτηριστικά του μοντέλου, ενώ στην συνέχεια χρησιμοποιώντας την εντολή Input εισάγονται οι υπόλοιπες παράμετροι.

#### Χωρική διακριτοποίηση υδροφορέα

Η έκταση της λεκάνης των Μοιρών ανέρχεται σε 50,3 km<sup>2</sup> (Κριτσωτάκης 2009), με δεδομένες τις διαστάσεις αυτές ο υδροφορέας αναπαριστάται με κάνναβο 50 γραμμών (κατά τον άξονα x), 50 στηλών (κατά τον άξονα y) και τριών επιπέδων-layers (κατακόρυφος άξονας). Επίσης ορίσθηκε ως τελικό βάθος του υδροφορέα Zmin=-150.0m, ενώ εναρκτήριο σημείο μετρήσεων Zmax=0.0 m (Εικόνα 24). Ο κώδικας Modflow χρησιμοποιεί την αριθμητική μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών για την κατασκευή του καννάβου, όπως παρουσιάσθηκε στην 5.5 .

Model Domain

Background Map

☐ Import a site map

Grid

Columns(j)

50

Xmin

0

[m]

Xmax

1000

[m]

Rows(i)

50

Ymin

0

[m]

Ymax

1000

[m]

Layers(k)

3

Zmin

-150

[m]

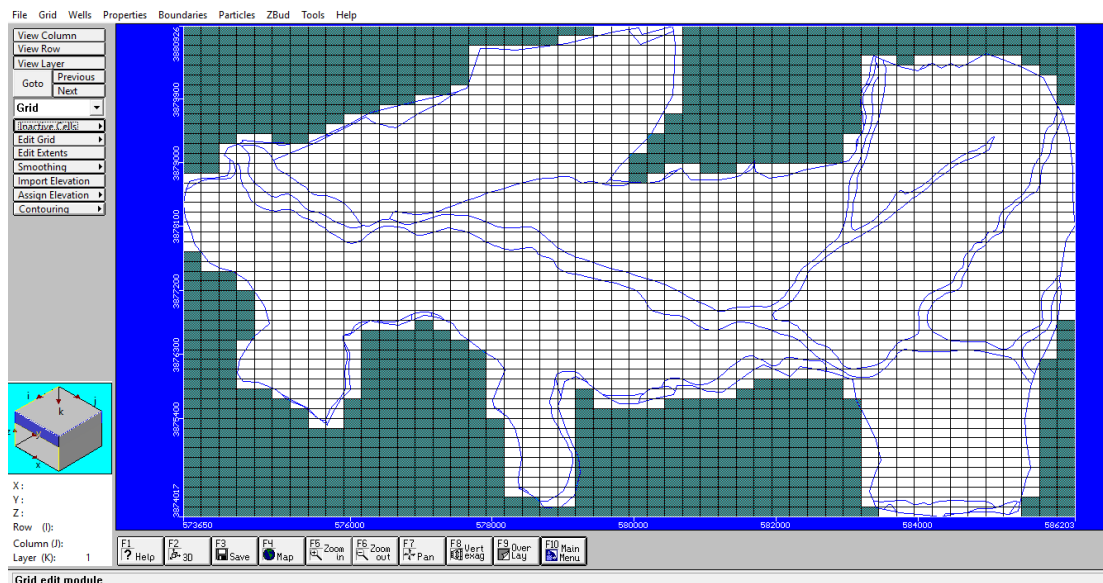
Zmax

0

[m]

Εικόνα 24. Παράθυρο δημιουργίας καννάβου MODFLOW

Στην συνέχεια καταχωρείται ο χάρτης(bitmap) της περιοχής μέσω της επιλογής *Import a site map*. Ακολουθεί η γεωαναφορά του χάρτη συμπληρώνοντας τις κατάλληλες συντεταγμένες (X,Y). Τέλος γίνεται η καταχώρηση του υψομέτρου της περιοχής με την επιλογή *Import Elevation*. Το πάχος της περιοχής διαμορφώνεται από το 60m που συναντώνται στην εκβολή της λεκάνης ανατολικά, έως και τα 200m που συναντώνται στα βορειανατολικά της λεκάνης. Σημαντικό βήμα κατά την κατασκευή του καννάβου είναι απενεργοποίηση των κελιών (inactive cells), στα οποία δεν επιθυμείται η επίλυση των εξισώσεων από το μοντέλο καθώς αυτά δεν είναι εντός της περιοχής μελέτης (γκρι χρώμα). Στην Εικόνα 25 απεικονίζεται ο κάρναβος προσομοίωσης όπως προέκυψε από την παραπάνω διαδικασία .



Εικόνα 25. Αποτέλεσμα χωρικής διακριτοποίησης λεκάνης Μοιρών

Στην συνέχεια παρουσιάζεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την διαμόρφωση του μοντέλου προσομοίωσης με την χρήση των υπορουτίνων του κώδικα Modflow.

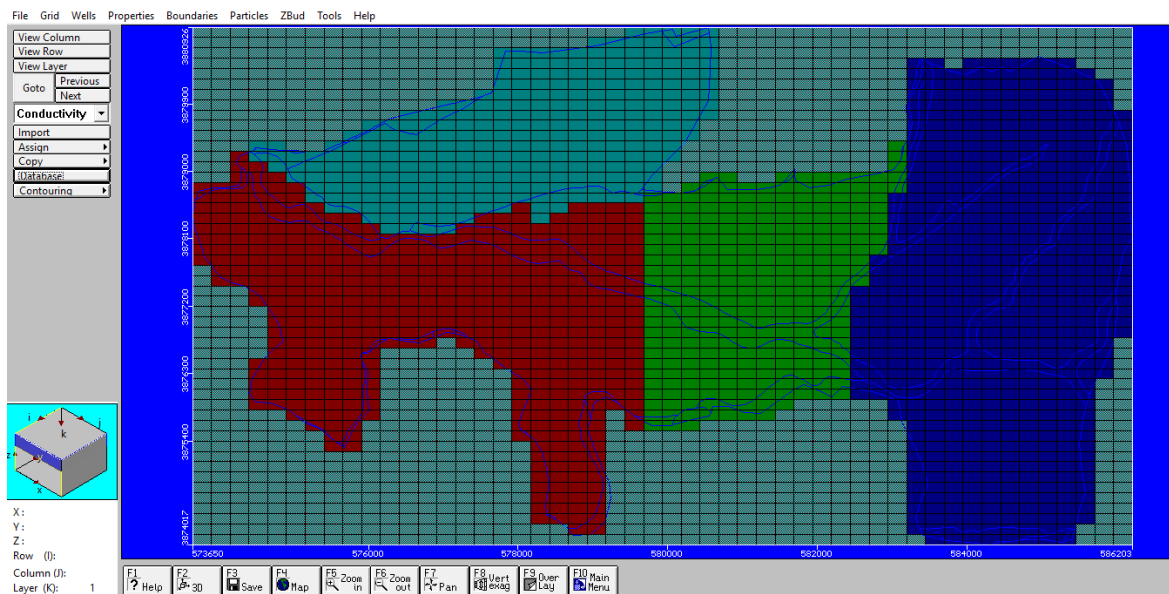
### Υδραυλική Αγωγιμότητα ( Hydraulic Conductivity)

Σε αρχικό στάδιο οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας λήφθηκαν από προηγούμενη μελέτη στην περιοχή (Βαρουχάκης 2015), οι τιμές προέκυψαν από τέσσερα πηγάδια άντλησης τα οποία εκτείνονται στην περιοχή. Με βάση τα δεδομένα αυτά η περιοχή χωρίστηκε σε 4 ζώνες υδραυλικής αγωγιμότητας (Εικόνα 26), με τις τιμές κάθε ζώνης να παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3. Ζώνες Υδραυλικής Αγωγιμότητας (Βαρουχάκης 2015)

Conductivity						
	Zone	Kx [m/s]	Ky [m/s]	Kz [m/s]	Active	Distribution Array
	2	0.000509	0.000509	5.09E-5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	3	0.000743	0.000743	7.43E-5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	4	0.001005	0.001005	0.0001005	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	5	0.00109	0.00109	0.000109	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Να σημειωθεί ότι η υδραυλική αγωγιμότητα έχει τις ίδιες τιμές για τις κατευθύνσεις x και y, ενώ για την κατεύθυνση z οι τιμές ελαττώνονται κατά μια τάξη μεγέθους.



Εικόνα 26. Ζώνες Υδραυλικής αγωγιμότητας κατά την κατασκευή του μοντέλου

### Πηγάδια Άντλησης (Pumping Wells)

Ο αριθμός των πηγαδιών άντλησης για τα οποία υπάρχουν επαρκή δεδομένα είναι 58. Για κάθε πηγάδι είναι γνωστές οι συντεταγμένες του (X,Y) καθώς και ο ρυθμός άντλησης σε ( $\text{m}^3/\text{h}$ ). Για την ορθή εισαγωγή των δεδομένων αυτών στο μοντέλο θεωρείται πως κατά την υγρή περίοδο (0-180) ο ρυθμός άντλησης αντιστοιχεί στο 30 % της δεδομένης τιμής, ενώ το 70% αυτής αφορά την ξηρή περίοδο (180-360) λόγω των αυξημένων αναγκών. Τα ονόματα και τα στοιχεία κάθε πηγαδιού άντλησης παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα.

Σύμφωνα με τα δεδομένα αυτά, εισάγονται τα πηγάδια άντλησης στην λεκάνη μελέτης επιλέγοντας την ένδειξη *Add Well* της υπορουτίνας *Pump Wells*. Στο παράθυρο εισαγωγής των στοιχείων άντλησης συμπληρώνονται τα απαραίτητα στοιχεία όπως παρουσιάζονται στην ακόλουθη εικόνα (Εικόνα 27).

Edit Well

Model coordinates
World coordinates

Well Name 44 X=583118 (m) Y=3877809 (m) Z=0.77 (m)

Screened Intervals

Screen Bottom (m)	Screen Top (m)
-140	-60
*	

Pumping Schedule

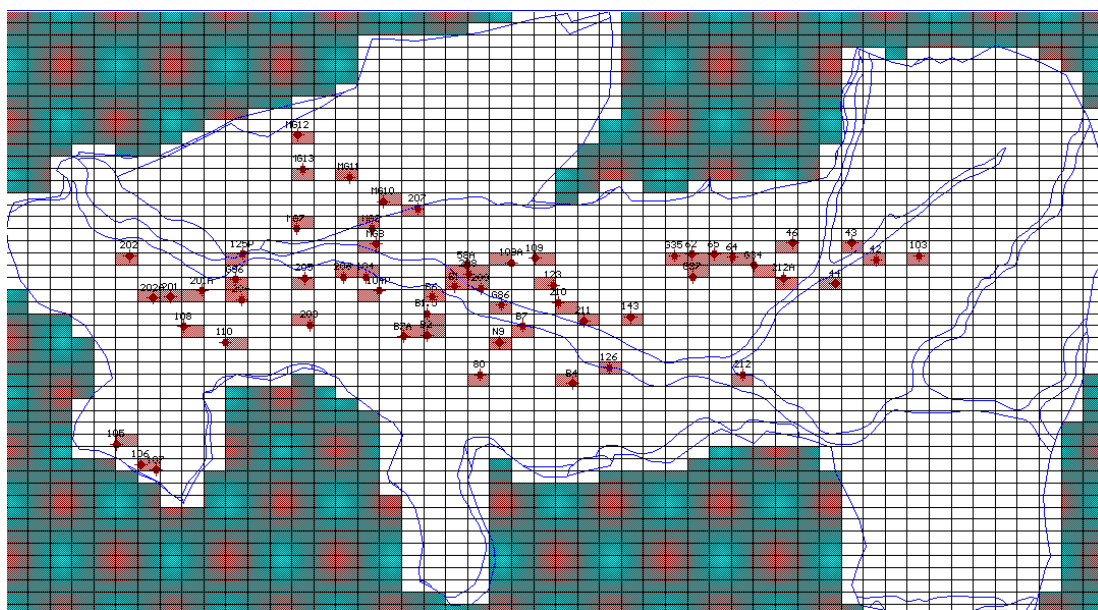
Start (day)	End (day)	Rate (m <sup>3</sup> /d)
0	180	-180
180	360	-420
*		

Display as:
☒ Elevation
☐ Depth To

☒ Active

Εικόνα 27. Παράθυρο καταχώρησης στοιχείων αντλητικών πηγαδιών, MODFLOW

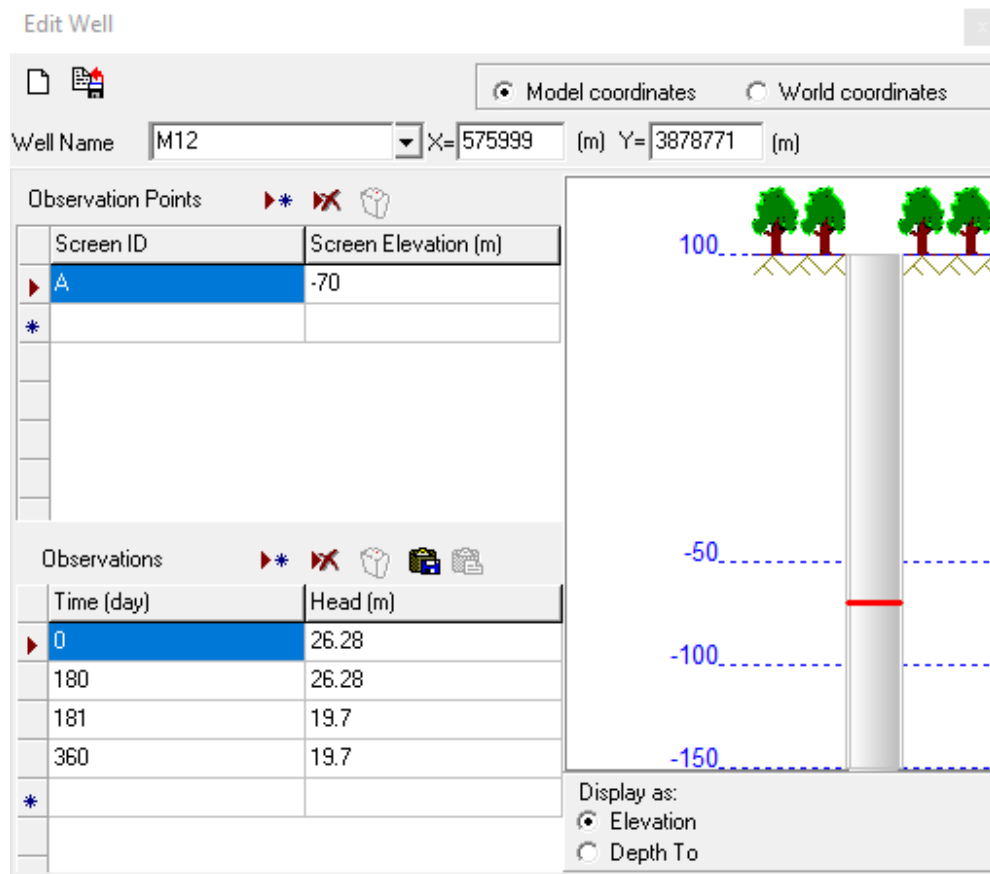
Να επισημανθεί, όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα, ότι η απαιτούμενη τιμή παροχής άντλησης για κάθε περίοδο εισάγεται με αρνητικό πρόσημο δηλώνοντας έτσι πως ποσότητα νερού απομακρύνεται από τον υδροφόρα. Μεγάλος αριθμός γεωτρήσεων συναντάται στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης (Εικόνα 28), λόγω των αυξημένων καλλιεργειών που εντοπίζονται στην συγκεκριμένη περιοχή.



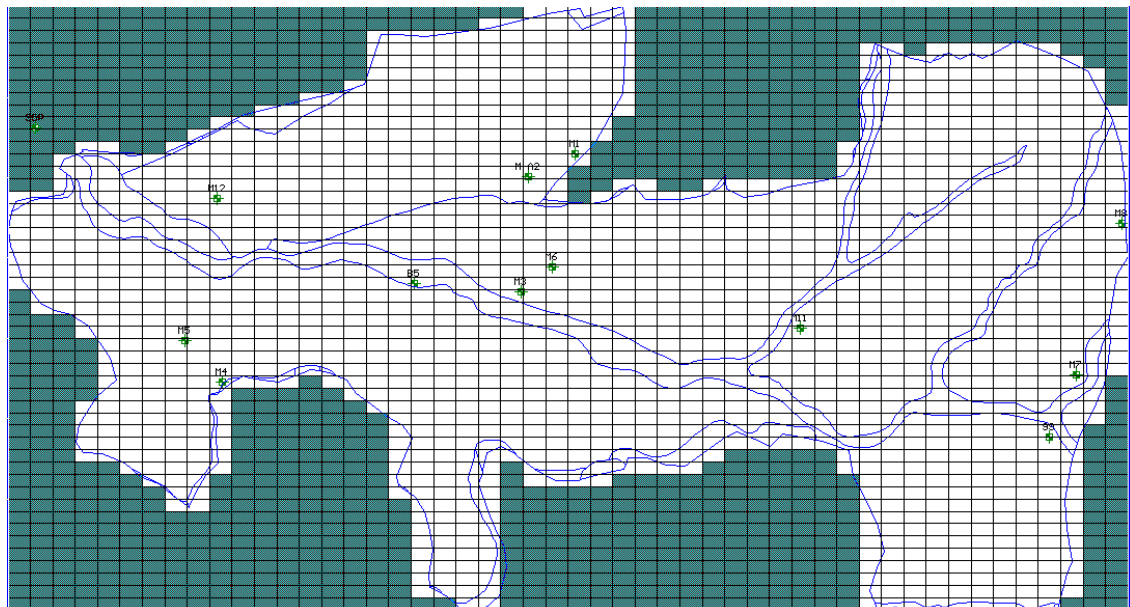
Εικόνα 28. Χωρική Κατανομή πηγαδιών άντλησης στην λεκάνη των Μοιρών

### Εισαγωγή Πηγαδιών Παρατήρησης

Τα δεδομένα για τα πηγάδια παρατήρησης αφορούν τις συντεταγμένες (X,Y) καθώς και μετρήσεις της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα τόσο για την υγρή όσο και για την ξηρή περίοδο. Τα δεδομένα αυτά παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα. Η εισαγωγή των δεδομένων αυτών στο μοντέλο γίνεται με την επιλογή *Add Well* της υπορουτίνας *Head Observation*. Όμοια με την διαδικασία που ακολουθήθηκε για τα πηγάδια άντλησης συμπληρώνονται τα απαραίτητα στοιχεία και για τα πηγάδια παρατήρησης (Εικόνα 29). Η κατανομή τους στην περιοχή μελέτης παρουσιάζεται στην Εικόνα 30.



Εικόνα 29. Παράθυρο καταχώρησης στοιχείων πηγαδιών παρατήρησης, MODFLOW



Εικόνα 30. Χωρική Κατανομή πηγαδιών παρατήρησης στάθμης νερού στην λεκάνη των Μοιρών

Οριακές συνθήκες (Boundary Condition):

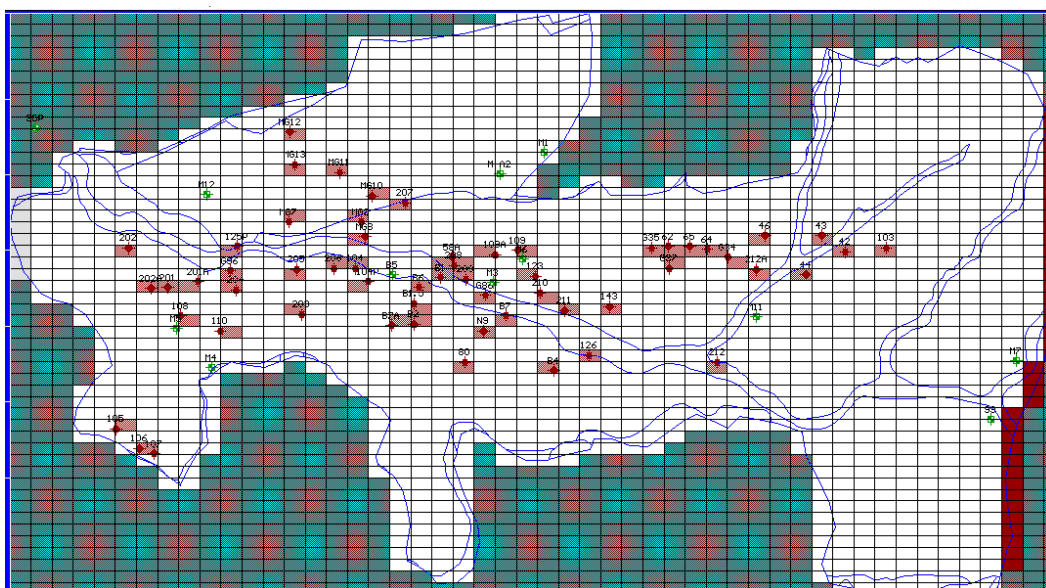


- Constant Head

Στο ανατολικό τμήμα της λεκάνης εισάγονται τα υδραυλικά ύψη που αντιπροσωπεύουν κατά εκτίμηση το υδραυλικό ύψος του ύδατος που εισέρχεται στην περιοχή (Εικόνα 31). Λόγω των γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής, δεν εντοπίζεται εισροή στην λεκάνη πέραν του τμήματος αυτού. Δημιουργήθηκαν τρία groups ώστε να προσεγγίσουν καλύτερα τα επιθυμητά αποτελέσματα. Αρχικά οι τιμές εισάγονται κατά εκτίμηση για κάθε εποχιακή περίοδο, στην συνέχεια όμως τροποποιούνται ώστε να βαθμονομηθεί το μοντέλο σύμφωνα με τα δεδομένα του υδραυλικού ύψους από τα πηγάδια παρατήρησης.

- Drain (Τοίχος αποστράγγισης)

Χρησιμοποιώντας την υπορουτίνα *Drain* στο παράθυρο εισαγωγής στοιχείων συμπληρώνεται το ύψος του τοίχους αποστράγγισης ανά περίοδο καθώς και η αγωγιμότητα του ρήγματος αυτού που προκύπτει ως το γινόμενο της υδραυλικής αγωγιμότητας της περιοχής επί το μήκος του κάθε κελιού. Στην λεκάνη των Μοιρών, η μοναδική διαφυγή των υπόγειων νερών γίνεται μέσω του στενέματος της Φαιστού στο δυτικό άκρο της λεκάνης (Εικόνα 31).



Εικόνα 31. Απεικόνιση των οριακών συνθηκών της περιοχής μελέτης, Constand Head (κόκκινο) και Drain (γκρι)

- Recharge (Εμπλουτισμός)

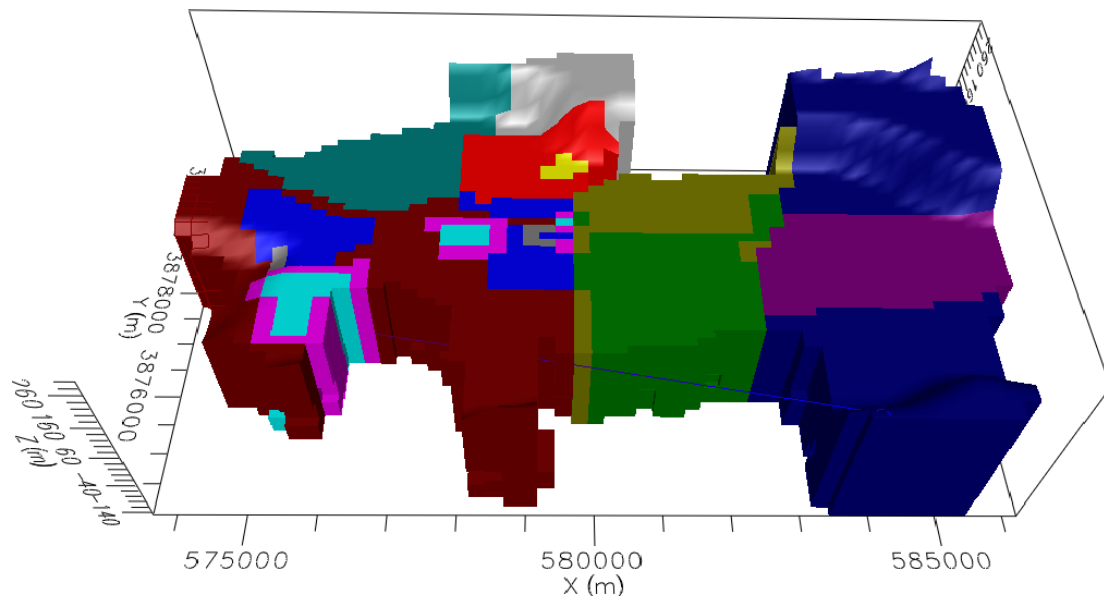
Ο εμπλουτισμός του υδροφόρου ορίζοντα της περιοχής γίνεται μέσω των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων που καταλήγουν στην επιφάνεια του εδάφους. Η συνολική ποσότητα βροχόπτωσης που αντιστοιχεί στο έτος 2008 είναι 947 mm/year σύμφωνα με τα δεδομένα των μετεωρολογικών σταθμών της περιοχής. Εκτιμάται πως ο όγκος βροχόπτωσης κατανέμεται ομοιόμορφα στην περιοχή

μελέτης. Από την ποσότητα αυτή, γίνεται η εκτίμηση ότι το 65% παρατηρείται την υγρή περίοδο (0-180days) ενώ το υπόλοιπο 35% την ξηρή περίοδο (180-360days). Επίσης σύμφωνα με τελευταίες μελέτες στην περιοχή των Μοιρών (Kilili-Polychronaki, 2001), έχει προσδιορισθεί πως το 82% από μία μέση ετήσια βροχόπτωση απομακρύνεται μέσω της εξατμισοδιαπνοής, το 18 % κατεισδύει ενώ η επιφανειακή απορροή είναι απειροελάχιστη. Με βάση τα παραπάνω υπολογίζεται η επιφανειακή τροφοδοσία που αντιστοιχεί στην υγρή και ξηρή περίοδο. Χρησιμοποιώντας την υπορουτίνα *Recharge* και την επιλογή *Assign* εισάγονται τα παραπάνω δεδομένα σε όλη την έκταση της λεκάνης.

## 7.2 Βαθμονόμηση του μοντέλου υπόγειας ροής

Με την εισαγωγή των παραπάνω δεδομένων έχουν ορισθεί όλες οι απαραίτητες παράμετροι για την περιοχή μελέτης. Ακολουθεί η ρύθμιση του μοντέλου (calibration), που έχει ως στόχο την εξαγωγή αποτελεσμάτων με τις μικρότερες δυνατές αποκλίσεις από τα αντίστοιχα μετρούμενα δεδομένα. Για την ρύθμιση ενός μαθηματικού μοντέλου χρησιμοποιούνται κυρίως δύο μέθοδοι. Η πρώτη αφορά την αυτοματοποιημένη βελτιστοποίηση με την χρήση κατάλληλων αλγορίθμων βελτιστοποίησης και η δεύτερη ακολουθεί την διαδικασία της δοκιμής και σφάλματος (trial and error). Στην παρούσα εργασία για την βαθμονόμηση χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος δοκιμής και σφάλματος.

Κατά την διαδικασία αυτή, μεταβάλλονται οι αρχικές παράμετροι και οριακές συνθήκες του μοντέλου μέχρι να επιτευχθεί η βέλτιστη συμφωνία μεταξύ αποτελεσμάτων και μετρούμενων τιμών. Συγκεκριμένα, κατά την βαθμονόμηση ήταν αναγκαία η δημιουργία περισσότερων ζωνών υδραυλικής αγωγιμότητας έναντι των τεσσάρων αρχικών (Εικόνα 32).



Conductivity

Zone	K <sub>x</sub> [m/s]	K <sub>y</sub> [m/s]	K <sub>z</sub> [m/s]
2	0.000509	0.000509	5.09E-5
3	0.000743	0.000743	7.43E-5
4	0.0001005	0.0001005	1.005E-5
5	0.00109	0.00109	0.000109
6	0.0509	0.0509	0.00509
7	7.43E-5	7.43E-5	7.43E-6
8	1.005E-5	1.005E-5	1.005E-6
9	1.09E-5	1.09E-5	1.09E-6
10	0.000109	0.000109	1.09E-5
12	0.109	0.109	0.0109
13	1.005E-6	1.005E-6	1.005E-7
14	0.0109	0.0109	0.00109
15	1.005E-7	1.005E-7	1.005E-8

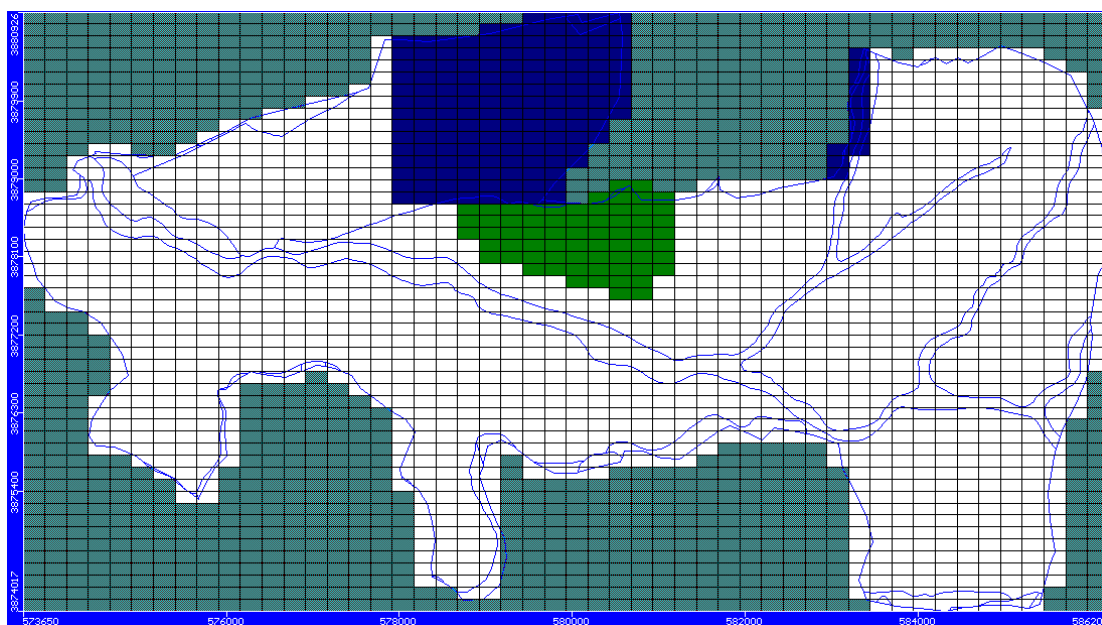
Εικόνα 32. Τρισδιάστατη απεικόνιση των ζωνών της υδραυλικής αγωγιμότητας

Επίσης τροποποιήθηκε, σε πολλές γεωτρήσεις και συγκεκριμένα σε αυτές που εντοπίζονται στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης των Μοιρών, ο ρυθμός άντλησης. Παρατηρήθηκε η ανάγκη αύξησης της δεδομένης τιμής προκειμένου να συγκλίνουν τα αποτελέσματα των υδραυλικών υψών με τα δεδομένα των μετρήσεων από τα πηγάδια παρατήρησης. Τέλος, μεταβλήθηκαν και οι αρχικές τιμές που είχαν εισαχθεί στο μοντέλο για τις οριακές συνθήκες (Constant Head, Drain) της περιοχής. Τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 8.

### 7.3 Επαλήθευση μοντέλου υπόγειας ροής

Μετά την ολοκλήρωση της βαθμονόμησης και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων, είναι απαραίτητη η επαλήθευση (validation) του μοντέλου για τον έλεγχο της αξιοπιστίας του. Κατά την διαδικασία αυτή, συγκρίνονται τα αποτελέσματα του μοντέλου με αντίστοιχες μετρήσεις για διαφορετική χρονική περίοδο από αυτή της βαθμονόμησης. Η σύγκλιση των αποτελεσμάτων της επαλήθευσης με τις μετρούμενες τιμές, φανερώνει την αξιοπιστία χρήσης του μοντέλου για μελλοντικές μελέτες.

Στην παρούσα εργασία η επαλήθευση εξετάζει τα δεδομένα για το υδρολογικό έτος 2009, όπου παρέχονται τιμές για την υγρή και ξηρή περίοδο. Το χρονικό διάστημα της επαλήθευσης ξεκινά με το τέλος της ρύθμισης, συνεπώς ως αρχική συνθήκη θεωρείται η κατανομή του φορτίου της τελευταίας μέρας της βαθμονόμησης. Κατά την διαδικασία της επαλήθευσης εισάγονται τα δεδομένα βροχόπτωσης για το έτος 2009, οι τιμές άντλησης για κάθε περίοδο και προσαρμόζονται οι οριακές συνθήκες του μοντέλου. Όσο αφορά την εισαγωγή των δεδομένων εμπλουτισμού λόγω βροχόπτωσης ακολουθείται η διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω γνωρίζοντας πως ο συνολικός όγκος βροχής που πέφτει στην περιοχή είναι 803 mm/year. Η μείωση του όγκου της βροχής οδηγεί στην αύξηση του ρυθμού άντλησης από τις γεωτρήσεις για την κάλυψη των αναγκών, σε σχέση με την προηγούμενη χρονιά (Βαρουχάκης,2015). Συνεπώς για την προσομοίωση της υπόγειας ροής για το έτος 2009, χρειάστηκε η τροποποίηση των δεδομένων άντλησης. Επίσης, κρίθηκε απαραίτητη και η προσθήκη δυο επιπλέον ζωνών εμπλουτισμού (μπλέ και πράσινη) λόγω βροχόπτωσης για την καλύτερη προσομοίωση (Εικόνα 33). Οι ζώνες αυτές χρησιμοποιήθηκαν για την αυξομείωση της έντασης της βροχόπτωσης στην συγκεκριμένη περιοχή, διατηρώντας όμως το συνολικό ύψος βροχής στην λεκάνη σταθερό.



Εικόνα 33. Ζώνες εμπλουτισμού υδροφορέα λόγω βροχόπτωσης για το υδρολογικό έτος 2009

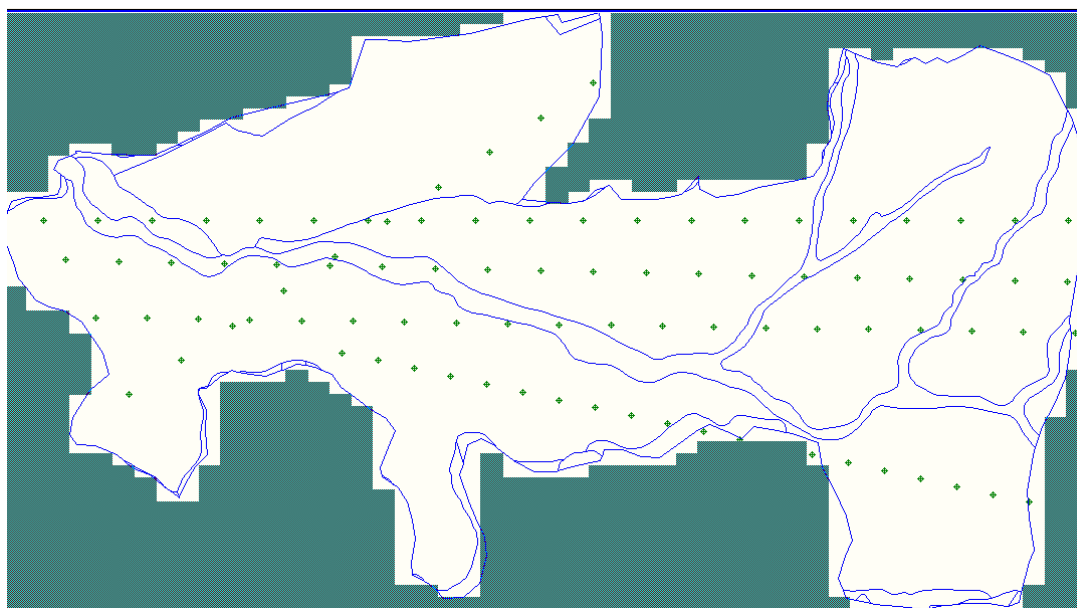
Με την ολοκλήρωση των παραπάνω τροποποιήσεων ολοκληρώθηκε η διαδικασία της επαλήθευσης του μοντέλου. Τα αποτελέσματα αυτής παρουσιάζονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 8.

### 7.2.3 Διαδικασία Προσομοίωσης της μεταφοράς νιτρικών ιόντων

Η προσομοίωση της μεταφοράς των νιτρικών ιόντων πραγματοποιείται με την χρήση του πακέτου MT3DMS, που αποτελεί υποπρότυπο του προγράμματος Visual MODFLOW. Πρέπει να τονισθεί, πως η προσομοίωση της μεταφοράς των νιτρικών βασίζεται στα αποτελέσματα της προσομοίωσης της υπόγειας ροής για την περιοχή μελέτης. Γνωρίζοντας πως κύρια πηγή νιτρικών ιόντων στην λεκάνη των Μοιρών είναι η χρήση των λιπασμάτων για την κάλυψη των αγροτικών αναγκών, μελετάται αρχικά το είδος των καλλιεργειών.

Στην περιοχή καλλιεργούνται κυρίως ελαιόδεντρα και οπωροκηπευτικά σε θερμοκήπια, η λίπανση των οποίων διαφέρει. Οι ελαιοκαλλιέργειες λιπαίνονται σε τρεις δόσεις ετησίως. Η βασική λίπανσή τους πραγματοποιείται μεταξύ Δεκεμβρίου και Φεβρουαρίου, όπου χρησιμοποιούνται 3-5 kg αζώτου ανά δέντρο. Επιπλέον λίπανση με 1-2 kg αζώτου ανά δέντρο γίνεται τον Ιούνιο, για την σκλήρυνση του πυρήνα, και τον Αύγουστο με στόχο την αύξηση της σάρκας και την ελαιογένεση. Όσο αφορά την λίπανση των οπωροκηπευτικών αυτή πραγματοποιείται κυρίως μεταξύ Μαρτίου-Απριλίου και ξανά τον Αύγουστο, η απαραίτητη ποσότητα αζώτου εξαρτάται από το είδος καλλιέργειας. Για την προσομοίωση της μεταφοράς των νιτρικών θα χρησιμοποιηθούν τα διαθέσιμα δεδομένα συγκέντρωσης για τον Μάιο 2008 και Οκτώβριο 2008. Ως αρχικές συγκεντρώσεις (initial concentration) εισάγονται αυτές του Μαΐου και με την βαθμονόμηση του μοντέλου θα προσεγγιστούν αυτές του Οκτωβρίου.

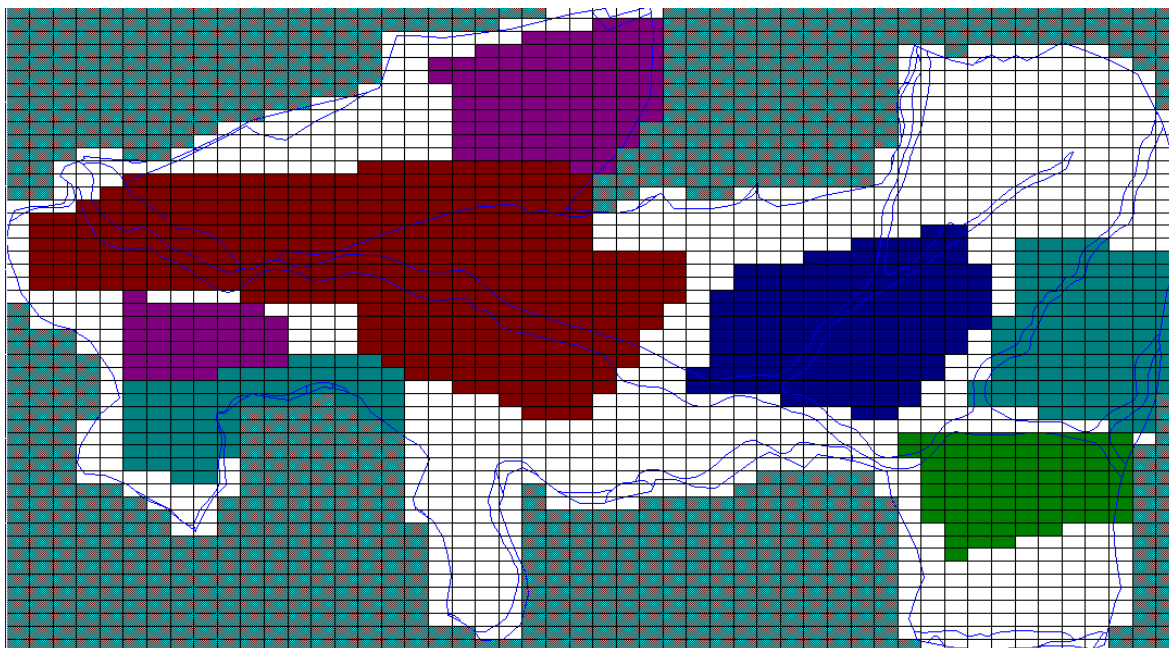
Απαραίτητο βήμα για την προσομοίωση της μεταφοράς μάζας στο λογισμικό Visual MODFLOW, είναι η παρακολούθηση των μορίων του ρυπαντή (Particle Tracking). Κατά το στάδιο αυτό, καθορίζονται στην περιοχή μελέτης τα σημεία εμφάνισης των μορίων, που μπορούν να θεωρηθούν ως πηγές (Εικόνα 34). Σκοπός αυτής της διαδικασίας είναι ο εντοπισμός των σημείων από όπου θα πραγματοποιηθεί η εξάπλωση της συγκέντρωσης στον υπόγειο υδροφόρα.



Εικόνα 34. Χωρική κατανομή μορίων (particles) στην περιοχή μελέτης

Στην συνέχεια, εισάγονται στο μοντέλο οι δεδομένες τιμές συγκέντρωσης των νιτρικών, που αντιστοιχούν στον Μάιο του 2008 ως αρχικές συγκεντρώσεις (Initial Concentration) (Εικόνα 35) . Κατά την περίοδο της προσομοίωσης (180-360 days), πραγματοποιείται δυο φορές λίπανση των καλλιεργειών, όπως προαναφέρθηκε. Η λίπανση εισάγεται ως επιφανειακή εισροή νιτρικών (recharge concentration) στην κορεσμένη ζώνη. Γνωρίζοντας την αρχική και τελική συγκέντρωση των νιτρικών ιόντων στην περιοχή μελέτης, προσαρμόζονται οι συγκεντρώσεις που εισέρχονται στο σύστημα κατά τις δυο περιόδους των λιπάνσεων, σύμφωνα με την μέθοδο της δοκιμής και σφάλματος. Θεωρώντας αρχή της προσομοίωσης την χρονική στιγμή 180 days που αντιστοιχεί στον Μάιο, η πρώτη λίπανση γίνεται μετά από 30 days και η δεύτερη μετά από 90 days. Η τελευταία μέρα της περιόδου 360days αντιστοιχεί στον Οκτώβριο 2008. Κατά την ξηρή περίοδο 180-360 days η επιφανειακή κατείσδυση είναι ίση με 59,66 mm/year.





Εικόνα 35. Αρχικές τιμές συγκέντρωσης Μαΐου 2008

Τελευταίο στάδιο στην διαδικασία αυτή, είναι η εισαγωγή στο μοντέλο των πηγαδιών παρατήρησης της συγκέντρωσης (Concentration Observation Wells). Η εισαγωγή των δεδομένων, είναι ίδια με αυτή που ακολουθήθηκε για τα πηγάδια παρατήρησης και άντλησης στην προσομοίωση της υπόγειας ροής (Εικόνα 36). Η χωρική κατανομή των πηγαδιών αυτών παρουσιάζεται στην Εικόνα 37. Αναλυτικά τα στοιχεία (ονόματα, συντεταγμένες, μετρούμενες συγκεντρώσεις) για τα πηγάδια παρατήρησης παρουσιάζονται στο Παράρτημα.



**Edit Well**

Well Name:  X=  (m) Y=  (m) n/a

Species Name:

Observation Points

Screen ID	Screen Elevation (m)
A	-70
*	

Observations

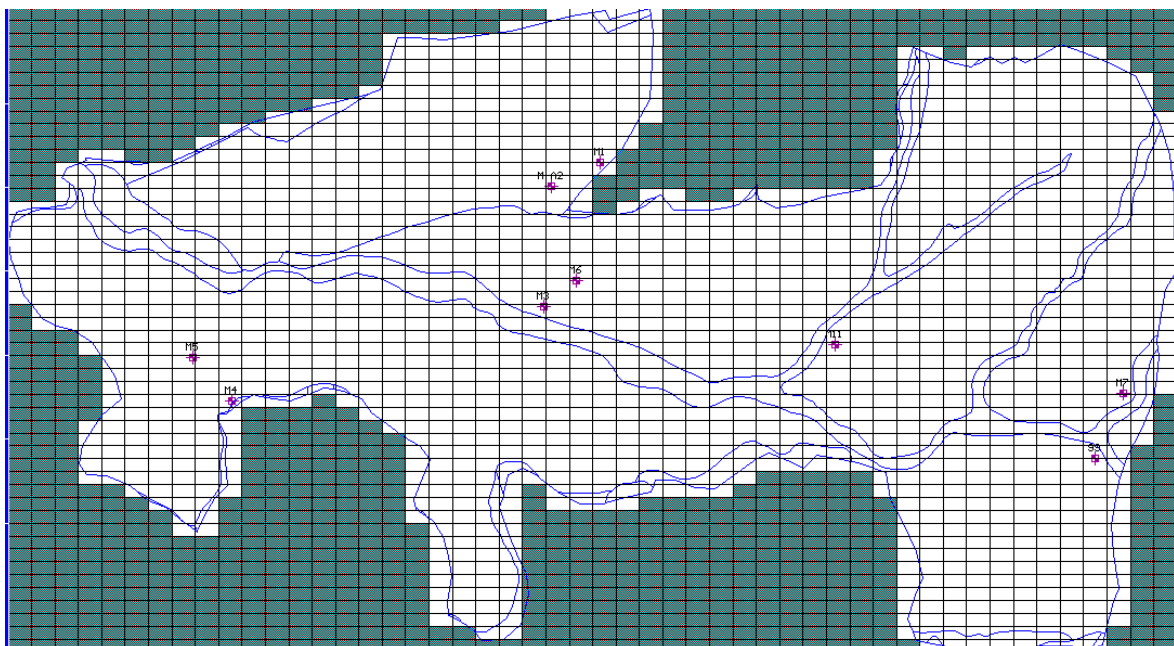
Time (day)	Conc001 (mg/L)
0	0
180	15.5
360	22.4
*	

Display as:

☒ Elevation  
☐ Depth To

OK Cancel

Εικόνα 36. Παράθυρο καταχώρησης δεδομένων πηγαδιών παρατήρησης της συγκέντρωσης, MODFLOW



Εικόνα 37. Χωρική Κατανομή πηγαδιών παρατήρησης συγκέντρωσης στην λεκάνη των Μοιρών

## 8 Παρουσίαση και Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

### 8.1 Αποτελέσματα Βαθμονόμησης Μοντέλου

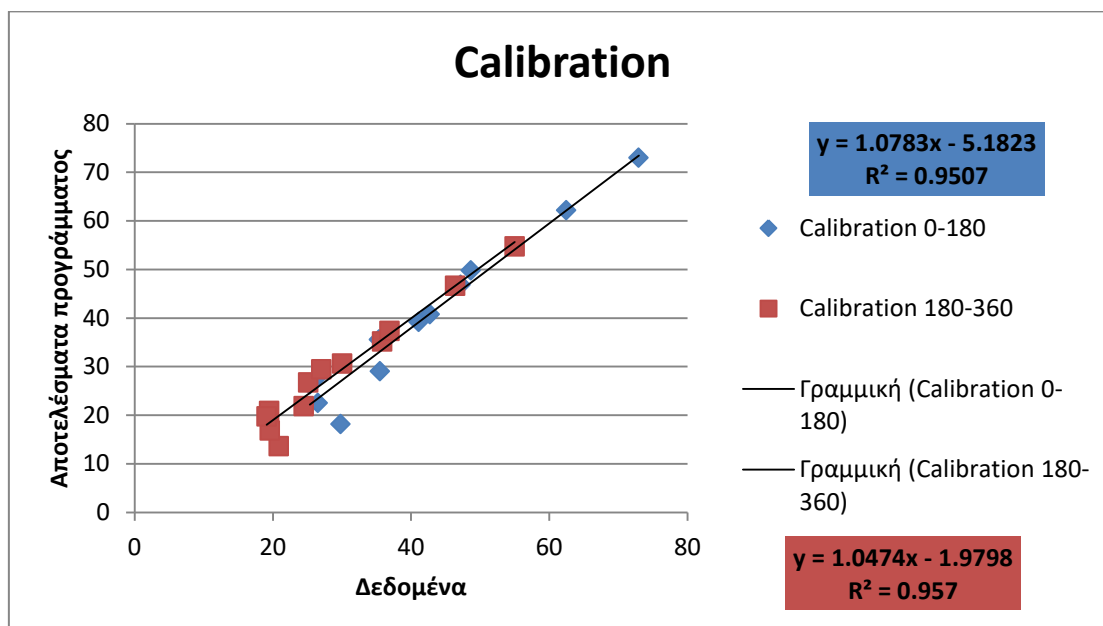
Σύμφωνα με την διαδικασία που περιγράφηκε στις ενότητες 7.1 και 7.2 για την μοντελοποίηση την υπόγειας ροής του υδρολογικού έτους 2008, προέκυψαν οι τιμές του υδραυλικού ύψους του υπόγειου νερού. Στον Πινάκα 4 δίνονται τα αποτελέσματα αυτά για τα πηγάδια παρατήρησης καθώς και οι αποκλίσεις τους από τις αντίστοιχες δεδομένες τιμές.

Πίνακας 4. Αποτελέσματα Υδραυλικού ύψους για το υδρολογικό έτος 2008

	Δεδομένες Τιμές (m)		Αποτελέσματα Βαθμονόμησης (m)		Απόκλιση από Δεδομένη Τιμή (m)	
	0-180	180-360	0-180	180-360	0-180	180-360
<b>WELLS</b>						
<b>M8</b>	72,93	54,7	72,95	55	-0.02	-0.3
<b>M7</b>	46,78	35,1	47,17	35,83	-0.39	-0.73
<b>99</b>	62.15	46,6	62,45	46,41	-0.3	0.19
<b>M11</b>	49.73	37,3	48,66	36,88	1.07	0.42
<b>M6</b>	29	21,8	35,52	24,49	-6.52	-2.69
<b>M3</b>	35,55	26,7	35,37	25,13	0.18	1.57
<b>B5</b>	18,12	13,6	29,81	20,86	-11.69	-7.26
<b>M1</b>	39,15	29,4	41,10	27,02	-1.95	2.38
<b>M-A2</b>	40,75	30,6	42,75	30,03	-2	0.57
<b>M4</b>	22,45	16,8	26,55	19,57	-4.1	-2.77
<b>M5</b>	27,71	20,80	26,41	19,48	1.3	1.32
<b>M12</b>	26.28	19,70	25,36	19,11	0.92	0.59

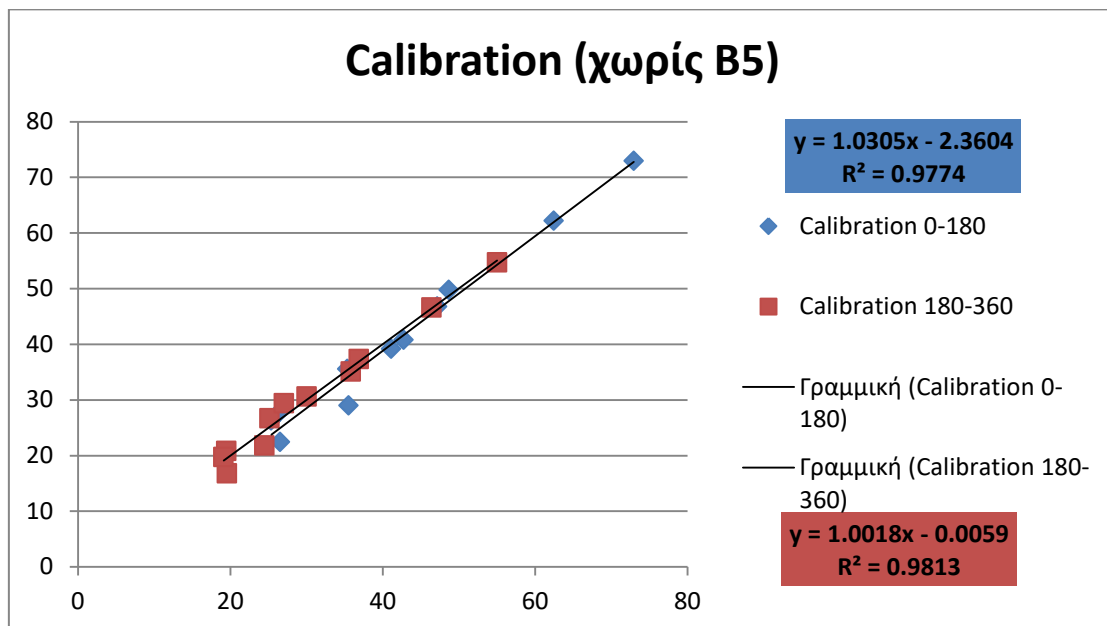
Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα, παρατηρείται ότι η τιμή της μετρούμενης στάθμης των γεωτρήσεων και του αποτελέσματος της προσομοίωσης, συγκλίνουν για τις περισσότερες περιπτώσεις (Διάγραμμα 1).

**Διάγραμμα 1. Σύγκριση Αποτελεσμάτων Βαθμονόμησης και Δεδομένων τιμών για την υγρή και ξηρή περίοδο 2008.**

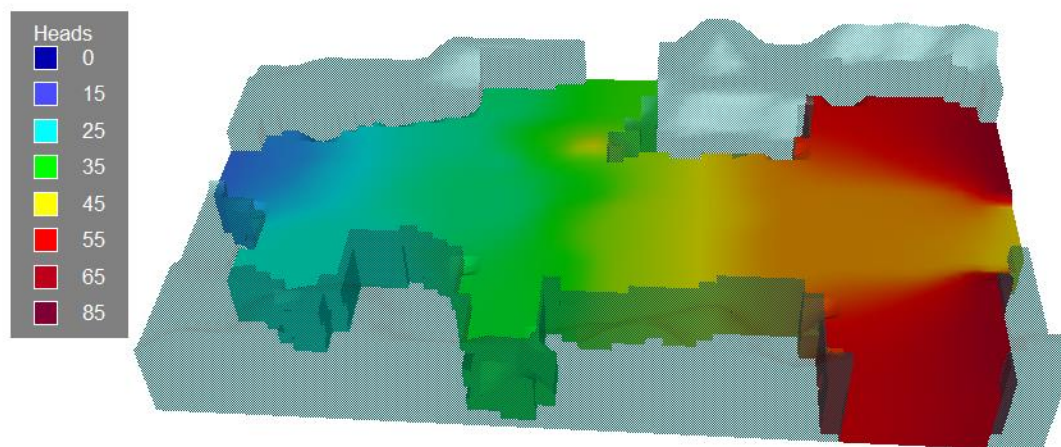


Παρατηρώντας τις αποκλίσεις των πηγαδιών, εξαίρεση αποτελεί το πηγάδι B5 που παρουσιάζει μεγάλες διαφορές από τις αντίστοιχες πραγματικές τιμές. Η διαφορά αυτή οφείλεται είτε σε λάθος δεδομένα που μπορεί να προκύψουν αν η μέτρηση της στάθμης του υδροφορέα παρθεί ενώ αυτός δεν βρίσκεται σε ηρεμία, είτε λόγω της παρουσίας κάποιου ρήγματος στην περιοχή. Σύμφωνα με την μελέτη της γεωλογικής και τεκτονικής δομής της περιοχής φαίνεται η ύπαρξη ρήγματος στην περιοχή άντλησης του πηγαδιού αυτού. Για τους παραπάνω λόγους αποφασίσθηκε η αφαίρεση του πηγαδιού από τη συνέχεια της προσομοίωσης. Συνεπώς βελτιώθηκε και η προσέγγιση των αποτελεσμάτων όπως φαίνεται και στο ακόλουθο διάγραμμα (Διάγραμμα 2).

**Διάγραμμα 2. Σύγκριση Αποτελεσμάτων Βαθμονόμησης και Δεδομένων τιμών χωρίς το πηγάδι B5, για την υγρή και ξηρή περίοδο 2008.**



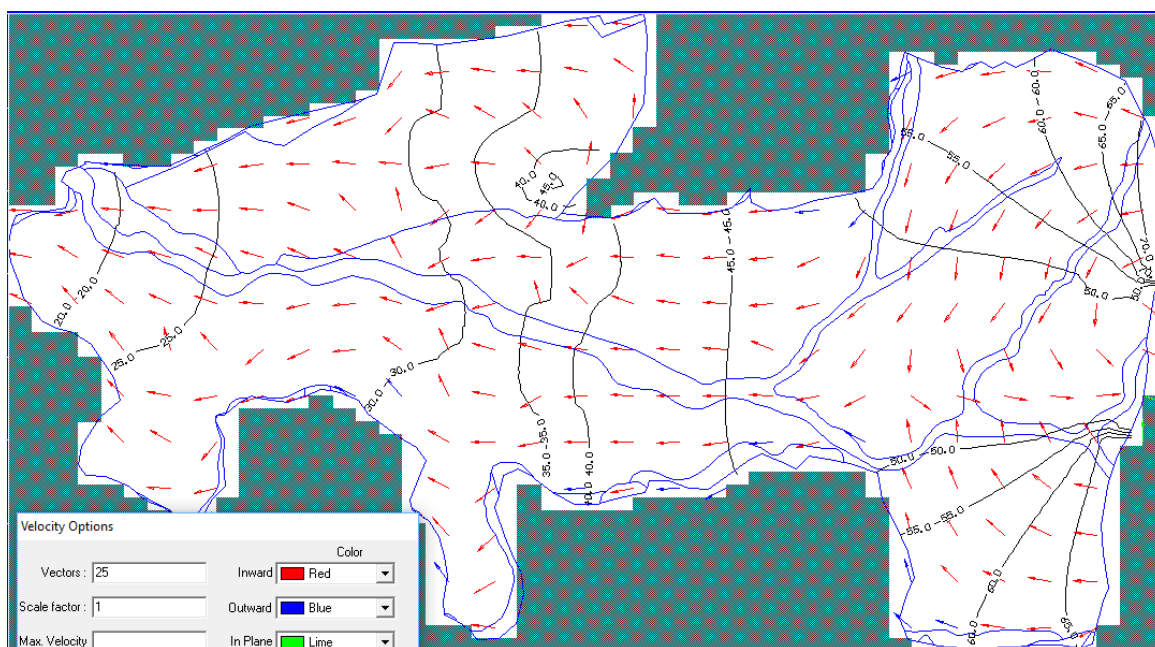
Το λογισμικό Visual MODFLOW, παρέχει στον χρήστη την δυνατότητα αναπαράστασης των αποτελεσμάτων των υδραυλικών υψών σε τρισδιάστατη απεικόνιση. Στην συνέχεια παρουσιάζεται ο τρισδιάστατος πιεζομετρικός χάρτης για την υγρή περίοδο του υδρολογικού έτους 2008 (Εικόνα 38).



**Εικόνα 38. Πιεζομετρικός χάρτης περιοχής μελέτης υγρής περιόδου έτος 2008**

Όπως φαίνεται και από την διαβάθμιση των χρωμάτων το ύψος του νερού μειώνεται από τα ανατολικά προς τα δυτικά. Η μείωση αυτή ήταν αναμενόμενη μελετώντας τα γεωμορφολογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής. Το υπόγειο νερό κινείται από τις περιοχές με μεγαλύτερο υψόμετρο σε αυτές με μικρότερο καταλήγοντας στο στένεμα της Φαιστού, που αποτελεί την μοναδική διέξοδο από την λεκάνη των Μοιρών. Η μέγιστη τιμή υδραυλικού ύψους που συναντάται στο ανατολικό όριο της λεκάνης αντιστοιχεί στα 65,3m και η ελάχιστη που συναντάται στο δυτικό όριο της λεκάνης αντιστοιχεί στα 20,9m.

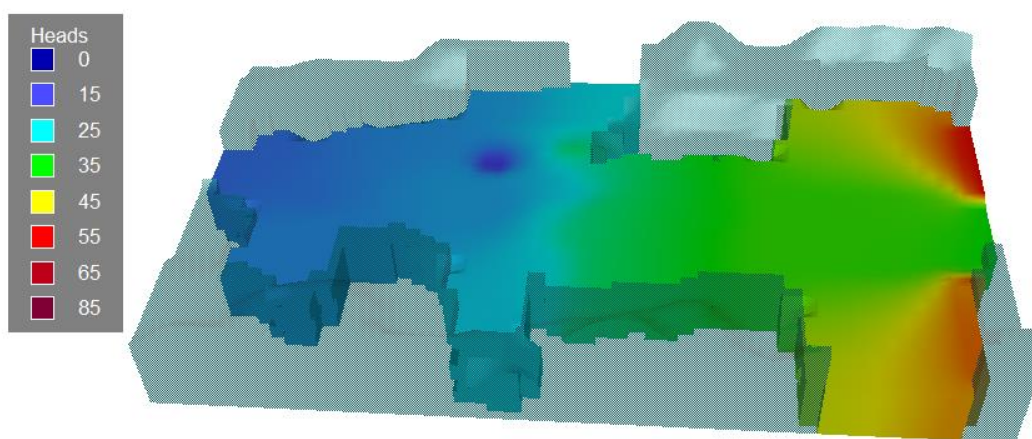
Η ακριβέστερη κίνηση που ακολουθεί το υπόγειο νερό απεικονίζεται στην Εικόνα 39, με τα βέλη της διεύθυνσης ταχύτητας ροής. Στο ανατολικό όριο της λεκάνης παρατηρείται η αναστροφή του νερού, δηλαδή η κίνησή του προς τα ανατολικά. Η κίνηση αυτή δικαιολογείται από την ύπαρξη ορεινών όγκων βόρεια και νότια της περιοχής αυτής, οδηγώντας το νερό και προς την λεκάνη της Βαγιόνας που βρίσκεται ανατολικά της λεκάνης των Μοιρών.



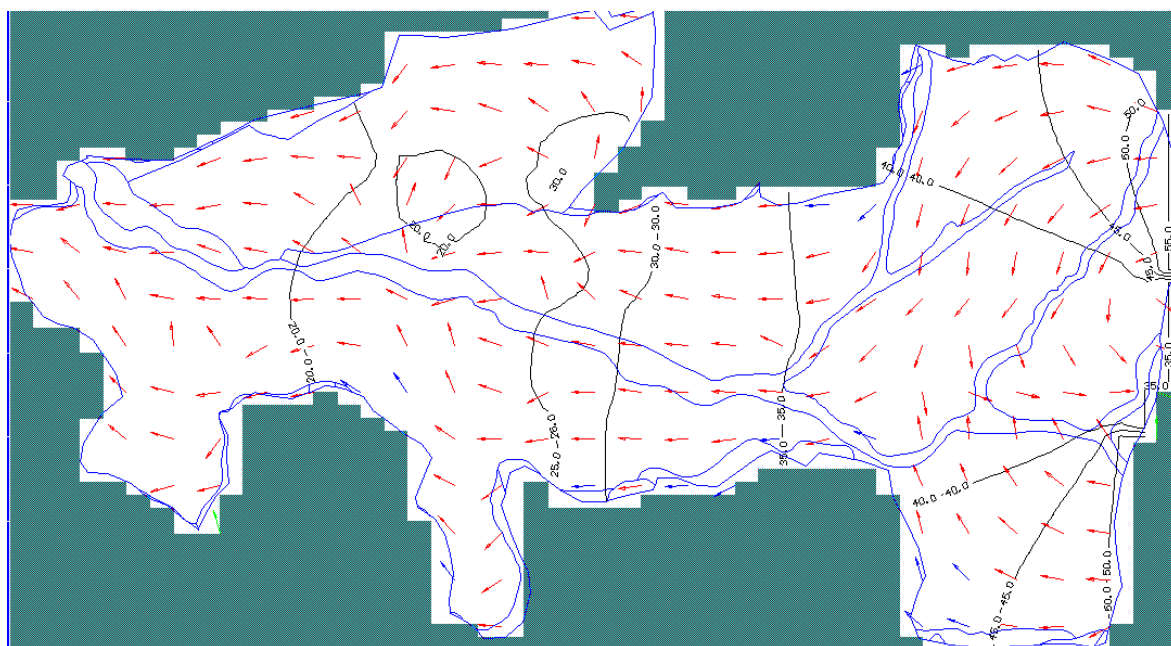
Εικόνα 39. Διεύθυνση ταχύτητας ροής για την υγρή περίοδο του υδρολογικού έτους 2008.

Κατά την ξηρή περίοδο του έτους 2008, παρατηρείται μείωση των υδραυλικών υψών ως αποτέλεσμα της μείωσης του όγκου βροχόπτωσης και συνεπώς των αυξημένων αναγκών για άρδευση (Εικόνα 40). Κατά την περίοδο αυτή, το μέγιστο υδραυλικό ύψος συναντάται στο ανατολικό όριο της λεκάνης και είναι ίσο με 56,8m, ενώ το ελάχιστο στο δυτικό όριο και ισούται με 17 m. Επίσης παρουσιάζεται η διεύθυνση κίνησης του νερού που αντιστοιχεί στην ξηρή περίοδο (Εικόνα 41).





Εικόνα 40. Πιεζομετρικός Χάρτης περιοχής μελέτης ξηρής περιόδου έτος 2008



Εικόνα 41. Διεύθυνση ταχύτητας ροής για την υγρή περίοδο του υδρολογικού έτους 2008

## 8.2 Αποτελέσματα Επαλήθευσης Μοντέλου

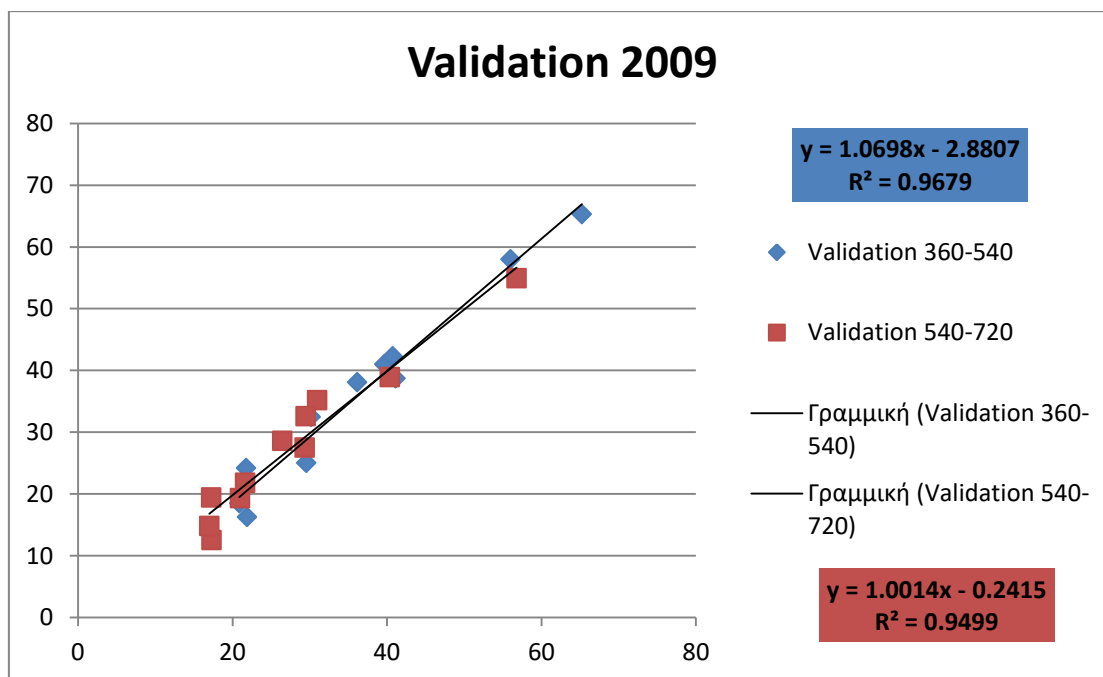
Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 7.3, κατά την διαδικασία επαλήθευσης εξετάζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου για μια περίοδο διαφορετική από εκείνη της βαθμονόμησης. Η περίοδος αυτή είναι το υδρολογικό έτος 2009, για το οποίο τα αποτελέσματα του υδραυλικού ύψους τόσο για την υγρή όσο και για την ξηρή περίοδο παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.

Πίνακας 5. Αποτελέσματα υδραυλικών υψών για το υδρολογικό έτος 2008

WELLS	Δεδομένες Τιμές (m)		Αποτελέσματα Επαλήθευσης (m)		Απόκλιση από Δεδομένη Τιμή (m)	
	360-540	540-720	360-540	540-720	360-540	540-720
M8	65.3	54.9	65.25	56.8	0.05	-1.9
M7	41	27.5	39.68	29.37	1.32	-1.87
99	58	38.9	56.02	40.37	1.98	-1.47
M11	38.7	35.2	41.15	31	-2.45	4.2
M6	25	19.3	29.56	21	-4.56	-1.7
M3	32.5	21.8	30.15	21.67	2.35	0.13
M1	38.08	28.6	36.17	26.47	1.91	2.13
M-A2	42.3	32.6	40.77	29.5	1.53	3.1
M4	16.24	12.5	21.9	17.3	-5.66	-4.8
M5	24.2	19.4	21.8	17.25	2.4	2.15
M12	18.5	14.8	20.9	17	-2.4	-2.2

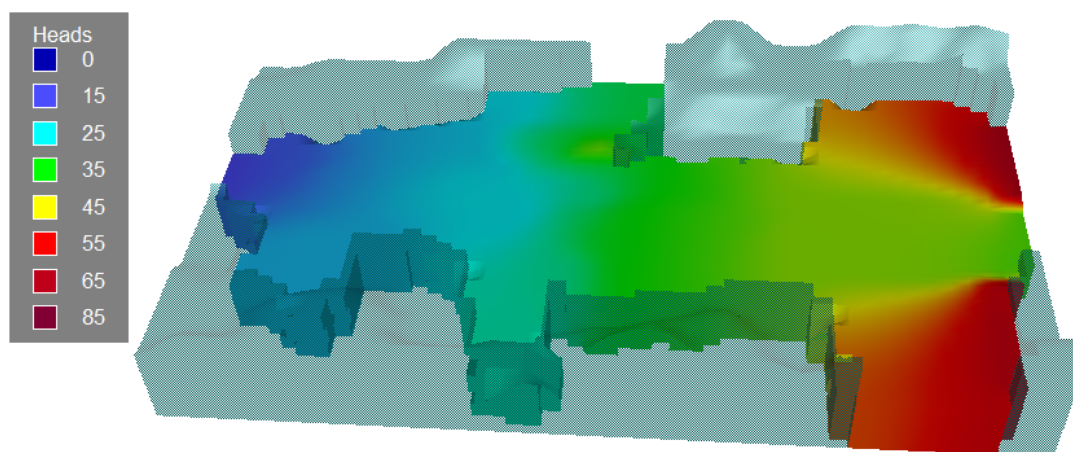
Εξετάζοντας τις τιμές που προέκυψαν από την διαδικασία της επαλήθευσης με τα αντίστοιχα δεδομένα από τα πηγάδια παρατήρησης, συμπεραίνεται πως η προσομοίωση παρουσιάζει ικανοποιητική ακρίβεια και για το έτος 2009 (Διάγραμμα 3). Προκύπτει ότι το μοντέλο που εξετάζει την υπόγεια ροή της λεκάνης των Μοιρών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μελλοντικές προσομοιώσεις.

Διάγραμμα 3. Σύγκριση Αποτελεσμάτων Βαθμονόμησης και Δεδομένων τιμών για την υγρή και ξηρή περίοδο 2009.



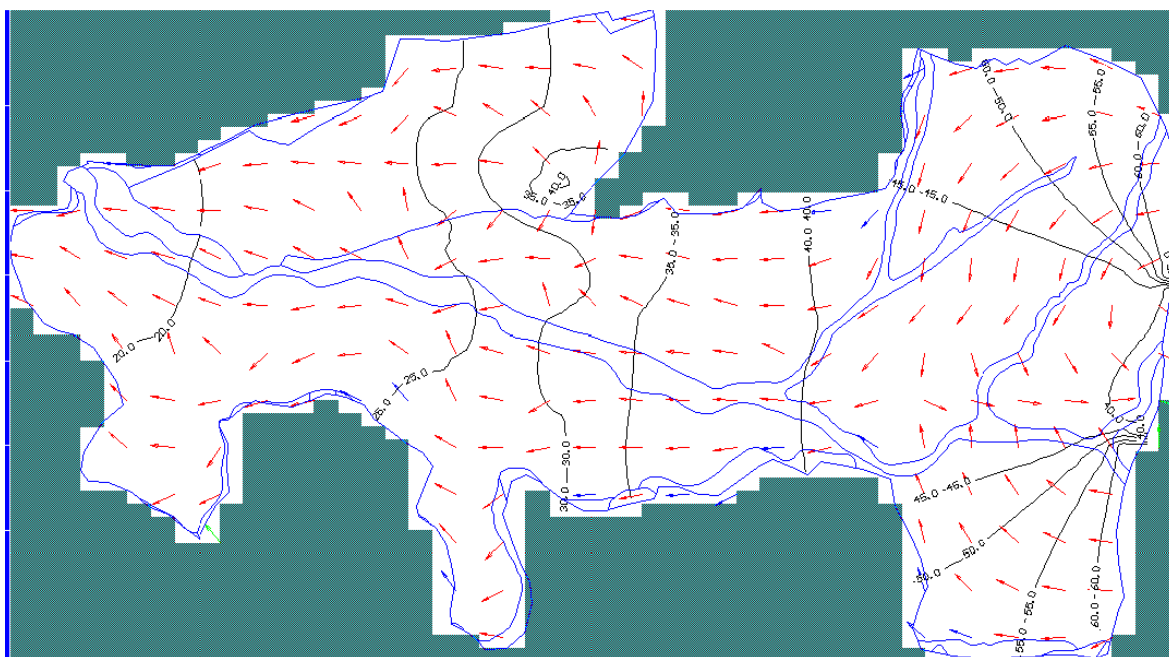


Στην συνέχεια παρουσιάζεται ο τρισδιάστατος πιεζομετρικός χάρτης της περιοχής μελέτης ύστερα από την διαδικασία της επαλήθευσης για την υγρή περίοδο (360-540) του 2009 (Εικόνα 42). Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η κίνηση του νερού ακολουθεί την αναμενόμενη πορεία, από τα ανατολικά προς τα δυτικά. Κατά την περίοδο αυτή, το μέγιστο υδραυλικό ύψος παρατηρείται στο ανατολικό όριο της λεκάνης και ισούται με 57m, ενώ το ελάχιστο εντοπίζεται στο δυτικό όριο και ισούται με 15 m.



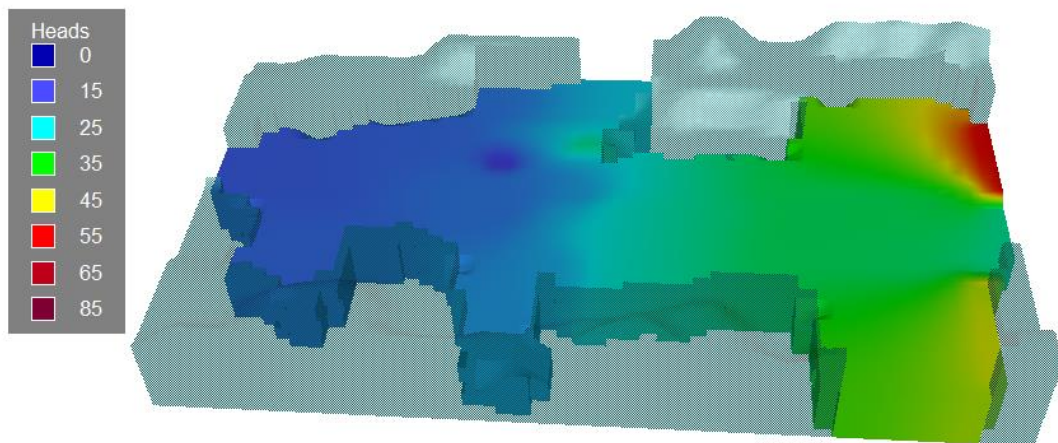
Εικόνα 42. Πιεζομετρικός Χάρτης περιοχής μελέτης υγρής περιόδου έτους 2009

Η διεύθυνση της ταχύτητας ροής για την υγρή περίοδο του 2009 (Εικόνα 43), δεν παρουσιάζει σημαντικές διαφορές από την αντίστοιχη του 2008.

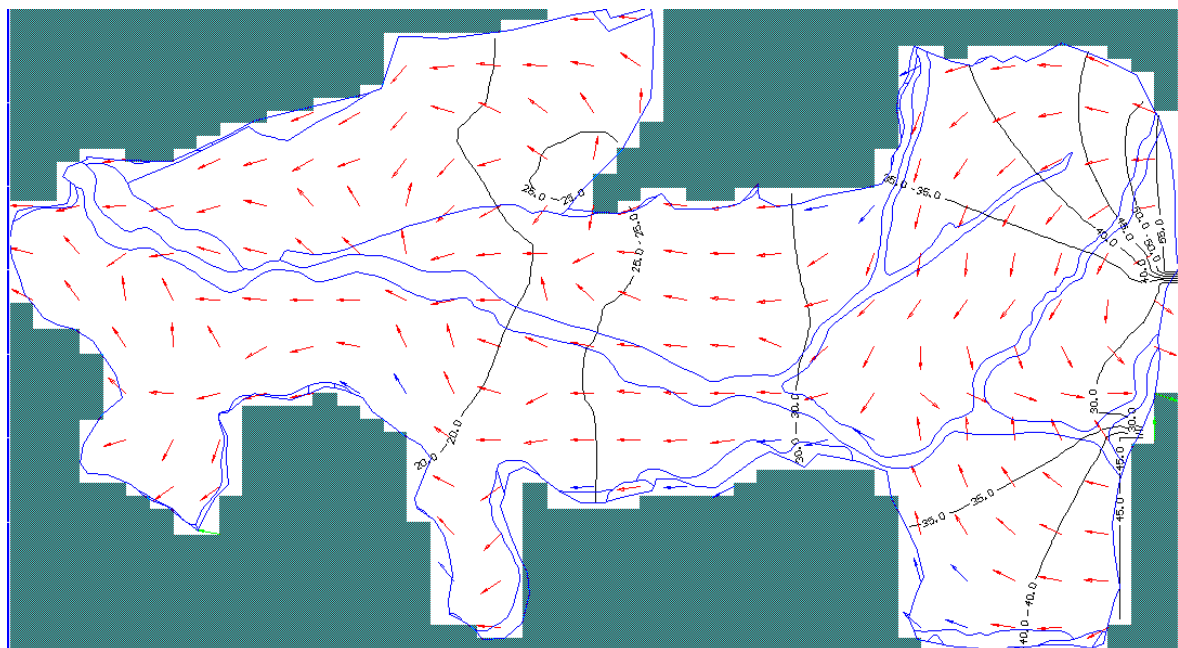


Εικόνα 43. Διεύθυνση ταχύτητας ροής για την υγρή περίοδο του υδρολογικού έτους 2009

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της επαλήθευσης, στην Εικόνα 44 παρουσιάζεται και η διακύμανση του υδραυλικού ύψους στην περιοχή μελέτης κατά την ξηρή περίοδο του 2009. Κατά την ξηρή περίοδο του 2009 το μέγιστο υδραυλικό στην λεκάνη των Μοιρών είναι ίσο με 56,8 m και το ελάχιστο ίσο με 16 m. Επίσης ακολουθεί και απεικόνιση της διεύθυνσης ταχύτητας ροής του υπόγειου νερού, χωρίς να παρουσιάζει διαφορές σε σχέση με τις προηγούμενες περιόδους (Εικόνα 45).



Εικόνα 44. Πιεζομετρικός Χάρτης περιοχής μελέτης ξηρής περιόδου έτος 2009



Εικόνα 45. Διεύθυνση ταχύτητας ροής για την ξηρή περίοδο του υδρολογικού έτους 2009

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του υδρολογικού έτους 2008 και 2009, παρατηρείται πτώση στάθμης του υδροφορέα στην λεκάνη των Μοιρών. Η πτώση αυτή είναι αποτέλεσμα της μείωσης του όγκου της βροχής από 947 σε 803 mm/year σε συνδυασμό με την αύξηση των αρδευτικών ρυθμών, προκειμένου να καλυφθούν οι αγροτικές κυρίως ανάγκες. Κατά μέσο όρο η πτώση στάθμης που παρατηρείται σε όλη την έκταση της λεκάνης των Μοιρών ανέρχεται στα 5,5 m.

### 8.3 Αποτελέσματα Προσομοίωσης μεταφοράς νιτρικών ιόντων

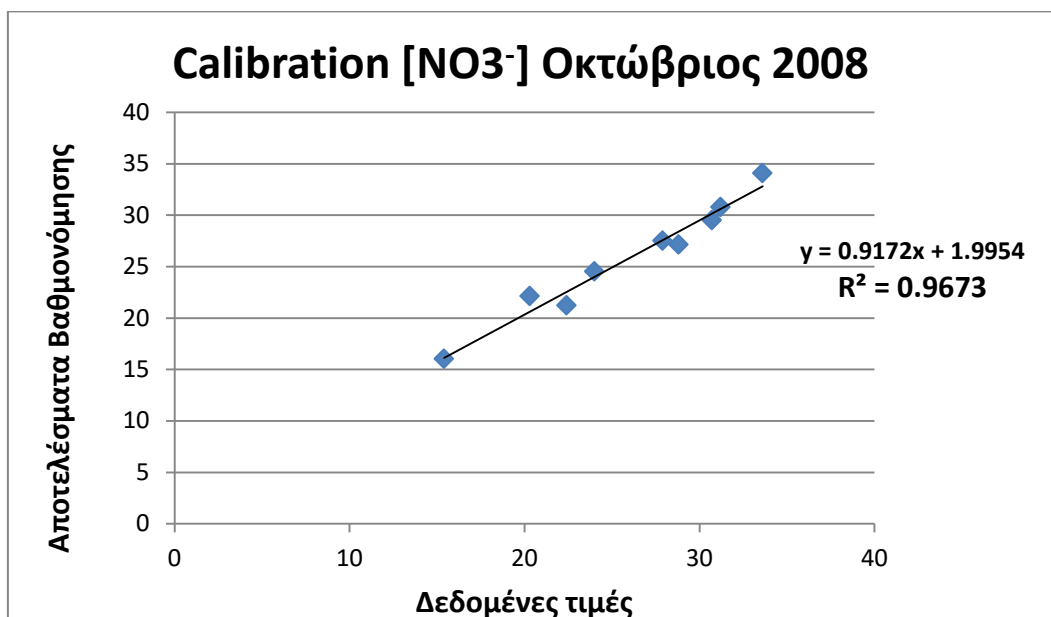
Έπειτα από την διαδικασία εισαγωγής δεδομένων για την ρύπανση λόγω νιτρικών ιόντων στην λεκάνη των Μοιρών, προέκυψαν οι τιμές της συγκέντρωσης για τον Οκτώβριο 2008. Στον Πίνακα 6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτά καθώς και οι αποκλίσεις τους από τις αντίστοιχες δεδομένες συγκεντρώσεις.

**Πίνακας 6. Αποτελέσματα συγκέντρωσης νιτρικών ιόντων**

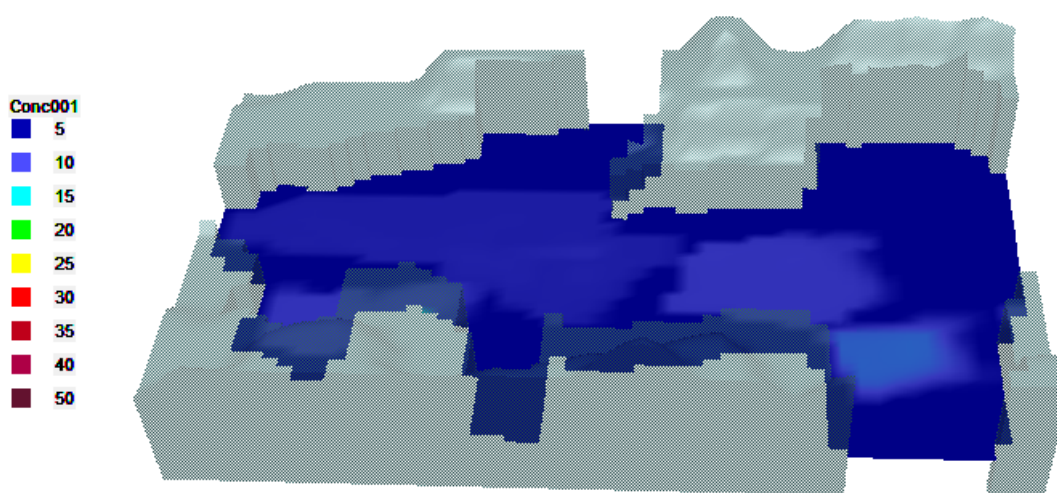
	Δεδομένες τιμές	Αποτελέσματα προσομοίωσης	% Απόκλιση
Well Name	[NO <sub>3</sub> ] Οκτώβριος 2008 (mg/l)	[NO <sub>3</sub> ] Οκτώβριος 2008 (mg/l)	
M7	33,6	34,1	1,37
99	20,3	22,1	8,97
M11	22,4	21,2	5,31
M6	27,9	27,5	1,40
M3	31,2	30,8	1,31
M4	24,0	24,5	2,17
M5	30,7	29,5	3,88
M1	28,8	27,1	5,80
MA2	15,4	16,0	3,96

Από τον παραπάνω πίνακα και το Διάγραμμα 4, συμπεραίνεται πως η διαδικασία προσομοίωσης έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Διάγραμμα 4. Σύγκριση Αποτελεσμάτων Βαθμονόμησης και Δεδομένων τιμών συγκεντρώσεων



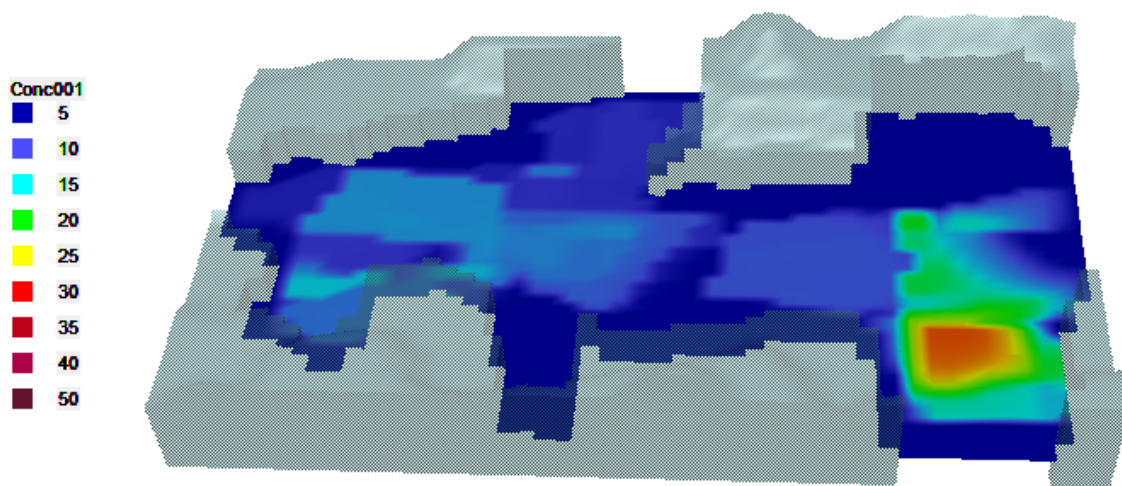
Στην συνέχεια παρουσιάζεται τρισδιάστατα μεταβολή της συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων, όπως προέκυψε από την προσομοίωση. Στην Εικόνα 46 φαίνεται η συγκέντρωση των νιτρικών στην περιοχή μελέτης την περίοδο του Μαΐου 2008, όπου εισήχθησαν στο μοντέλο οι αρχικές συγκεντρώσεις (initial concentration). Κατά την περίοδο αυτή, η μέγιστη συγκέντρωση που παρατηρείται σύμφωνα με τις τιμές από τα πηγάδια παρατήρησης της συγκέντρωσης είναι 18 mg/l, ενώ η ελάχιστη 6,2 mg/l.



Εικόνα 46. Τρισδιάστατη απεικόνιση κατανομής συγκέντρωσης Μάιος 2008

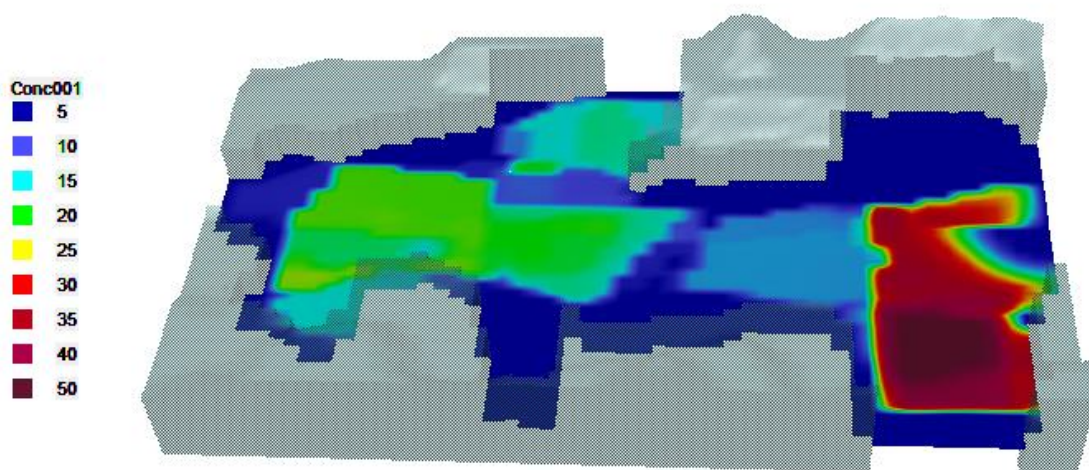


Στην Εικόνα 47, φαίνεται η μεταβολή στις συγκεντρώσεις των νιτρικών ύστερα από την πρώτη λίπανση τον Ιούνιο του 2008. Παρατηρείται η μεταβολή σε σχέση με τις αρχικές συγκεντρώσεις, όπως φαίνεται και από την μεταβολή των χρωμάτων. Κατά την περίοδο αυτή, η μέγιστη συγκέντρωση που εντοπίζεται στην περιοχή είναι ίση με 25 mg/l, ενώ η ελάχιστη ίση με 13,15 mg/l.



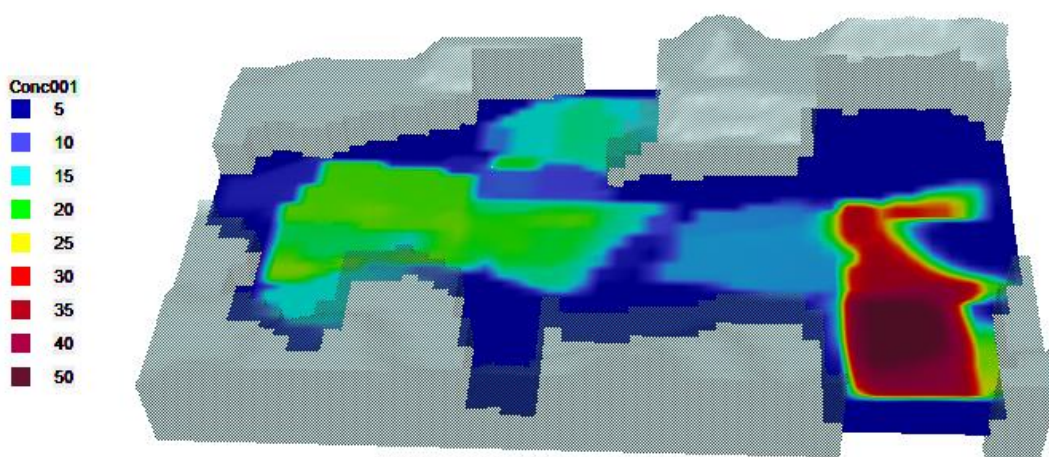
Εικόνα 47. Τρισδιάστατη απεικόνιση κατανομής συγκέντρωσης Ιούνιος 2008

Τον Αύγουστο, πραγματοποιείται η δεύτερη κατά σειρά λίπανση των καλλιεργειών, χρησιμοποιώντας την ίδια ποσότητα αζώτου. Η κατανομή των συγκεντρώσεων παρουσιάζεται στην Εικόνα 48. Όπως γίνεται αντιληπτό, παρατηρείται μεγάλη αύξηση των συγκεντρώσεων των νιτρικών. Η μέγιστη συγκέντρωση που παρατηρείται είναι ίση με 49 mg/l, ενώ η ελάχιστη είναι ίση με 16,1 mg/l.



Εικόνα 48. Τρισδιάστατη απεικόνιση κατανομής συγκέντρωσης Αυγούστος 2008

Τέλος στην Εικόνα 49 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της προσομοίωσης, που αφορά τις συγκεντρώσεις για τον Οκτώβριο του 2008. Στο τέλος της προσομοίωσης η μέγιστη συγκέντρωση νιτρικών ιόντων στην λεκάνη των Μοιρών είναι ίση με 34 mg/l και η ελάχιστη αντίστοιχα 16 mg/l.

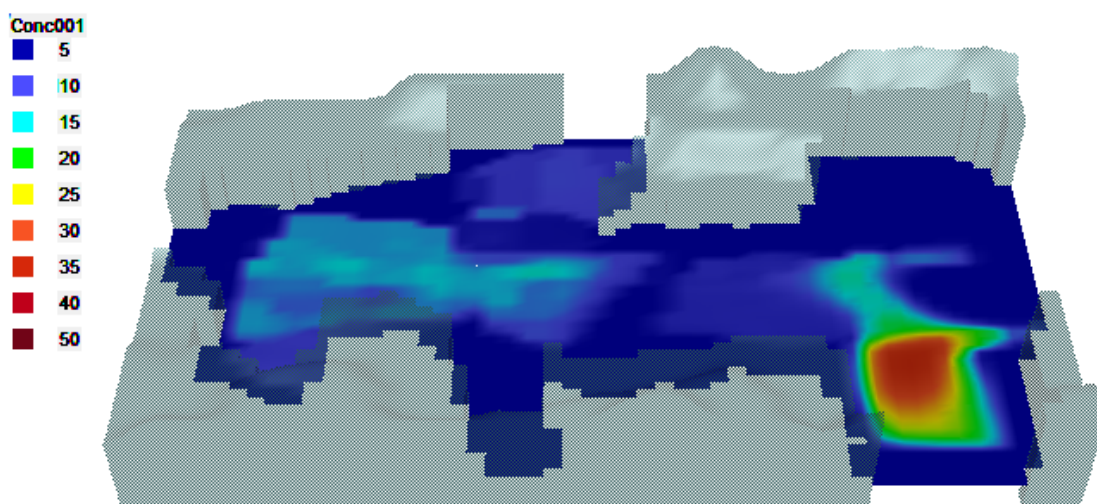


Εικόνα 49. Τρισδιάστατη απεικόνιση κατανομής συγκέντρωσης Οκτώβριος 2008

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα και την κατανομή της συγκέντρωσης των νιτρικών, παρατηρείται σημαντική συσσώρευσή τους στο νοτιανατολικό τμήμα της λεκάνης. Η συσσώρευση αυτή πέρα από την χρήση λιπασμάτων για τις ανάγκες των καλλιεργειών, είναι αποτέλεσμα της ανάστροφης κίνησης του νερού όπως αυτή παρουσιάσθηκε στα αποτελέσματα της προσομοίωσης της υπόγειας ροής, και της ύπαρξης ελαιοτριβείων που επιβαρύνουν με νιτρικά. Όπως προκύπτει από

την προσομοίωση της μεταφοράς των νιτρικών, οι συγκεντρώσεις στην λεκάνη κινούνται σε υψηλά επίπεδα. Κατά την πρώτη περίοδο λίπανσης η μέγιστη συγκέντρωση αντιστοιχεί σε 25 mg/l, η οποία αποτελεί και το ενδεικτικό όριο συγκέντρωσης νιτρικών σε επιφανειακά νερά που χρησιμοποιούνται ως πόσιμα σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Ένωση.

Κατά την δεύτερη περίοδο λίπανσης, η συγκέντρωση των νιτρικών αυξάνεται σημαντικά φθάνοντας τα 49mg/l στο νοτιανατολικό άκρο της λεκάνης. Ως ανώτατο επιτρεπτό όριο συγκέντρωσης νιτρικών έχουν ορισθεί τα 50 mg/l, συνεπώς είναι φανερό το έντονο πρόβλημα νιτρορύπανσης που υπάρχει στην περιοχή. Στο τέλος της διάρκειας της προσομοίωσης, οι τιμές των συγκεντρώσεων έχουν μειωθεί, καθώς δεν έχει επαναληφθεί κάποια λίπανση και ο ρύπος έχει αρχίσει να εξασθενεί. Το πρόγραμμα παρέχει την δυνατότητα ελέγχου της κατανομής της συγκέντρωσης των νιτρικών μετά το τέλος της προσομοίωσης. Συγκεκριμένα όπως φαίνεται και στην ακόλουθη εικόνα (Εικόνα 50), φαίνεται η κατανομή των νιτρικών για τον μήνα Απρίλιο, δηλαδή μετά το πέρας ενός εξαμήνου από το τέλος της παραπάνω προσομοίωσης, σημαντικό είναι να αναφέρουμε πως στην ακόλουθη κατανομή δεν έχουν ληφθεί υπόψη οι λιπάνσεις των καλλιεργειών που ακολουθούν.



Εικόνα 50. Τρισδιάστατη απεικόνιση κατανομής συγκέντρωσης Απρίλιος 2009

Όπως παρατηρούμε ο ρύπος έχει εξασθενήσει σε μεγαλύτερο βαθμό συγκριτικά με τον μήνα Οκτώβριο. Η μέγιστη τιμή της συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων που εντοπίζεται στην περιοχή ανέρχεται στα 30,4 mg/l ενώ η ελάχιστη στα 3,16 mg/l.

Παρόλα αυτά, λόγω τους είδους των καλλιεργειών στην περιοχή και των περιόδων λίπανσής τους, θα ακολουθήσουν και άλλες λιπάνσεις με μεγαλύτερες ποσότητες αζώτου κυρίως για τα ελαιόδεντρα. Έτσι η συγκέντρωση των νιτρικών θα αυξηθεί ξανά και ίσως ξεπεράσει τις παραπάνω τιμές. Γίνεται φανερή η ανάγκη



διαχείρισης του φαινομένου της νιτρορύπανσης, μειώνοντας της χρησιμοποιούμενες ποσότητες λιπασμάτων ιδιαίτερα στις προβληματικές περιοχές της λεκάνης και ελέγχου της ποιότητας των αρδευόμενων υδάτων στην περιοχή αυτή.

## **9 Συμπεράσματα-Προτάσεις**

### **9.1 Συμπεράσματα**

Η πεδιάδα των Μοιρών και η ευρύτερη περιοχή της Μεσσαράς, αποτελεί μια από τις σημαντικότερες αγροτικές περιοχές της Κρήτης. Οι απαιτήσεις για μεγιστοποίηση της παραγωγής έχει ως αποτέλεσμα την μεγάλη ζήτηση σε νερό για την άρδευση των καλλιεργειών και την εκτεταμένη χρήση λιπασμάτων όλη τη διάρκεια του έτους. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, μελετήθηκε η κίνηση των υπόγειων υδάτων της περιοχής και η μεταφορά της συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων, με τη χρήση του λογισμικού πακέτου Visual MODFLOW.

Μέσω του μοντέλου αυτού αναπαράχθηκε η υπόγεια ροή στον υδροφορέα σύμφωνα με τα δεδομένα για το υδρολογικό έτος 2008 και στη συνέχεια ελέγχθηκε η αποτελεσματικότητα του μοντέλου για το έτος 2009. Συγκεκριμένα έγινε εκτίμηση των υδραυλικών υψών σε όλη την έκταση του υδροφορέα και της διεύθυνσης της ταχύτητας ροής. Παρατηρήθηκαν οι αναμενόμενες διαφοροποιήσεις των υδραυλικών υψών μεταξύ της υγρής και ξηρής περιόδου του έτους, λόγω των αυξανόμενων αναγκών κατά τους θερινούς μήνες. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη διαδικασία της βαθμονόμησης και επαλήθευσης έδωσαν χαμηλά υδραυλικά ύψη για τον υδροφορέα της λεκάνης των Μοιρών. Το γεγονός αυτό είναι αποτέλεσμα της ύπαρξης μεγάλου αριθμού νόμιμων γεωτρήσεων στην περιοχή, αλλά και της διάνοιξης σημαντικού αριθμού ιδιωτικών και παράνομων γεωτρήσεων, προκειμένου να καλυφτούν οι ανάγκες σε νερό. Η υπερεκμετάλλευση του υπόγειου υδροφορέα συνδυαστικά με τις υδρογεωλογικές και κλιματικές συνθήκες, έχουν ως αποτέλεσμα την σταδιακή εξάντληση των υπόγειων υδάτων. Με βάση τα δεδομένα πεδίου και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, υπολογίστηκε ότι η μέση πτώση στάθμης του υπόγειου υδροφορέα για την λεκάνη των Μοιρών ισούται με 4 m για τα έτη 2008-2009.

Η μελέτη της μεταφοράς του ρύπου βασίστηκε στο μοντέλο της υπόγειας ροής. Θεωρώντας αρχική συγκέντρωση νιτρικών τις τιμές που αντιστοιχούν στον Μάιο του 2008, προσομοιώθηκαν αυτές του Οκτωβρίου 2008, θεωρώντας δύο περιόδους λίπανσης κατά την περίοδο αυτή. Με τα αποτελέσματα της μεταφοράς των νιτρικών, μπορεί να εκτιμηθεί η επικινδυνότητα ρύπανσης του υπό μελέτη υδροφορέα. Σύμφωνα με την διακύμανση της συγκέντρωσης, κατά τις περιόδους λίπανσης παρατηρείται μεγάλη αύξηση των νιτρικών ιόντων στην λεκάνη των Μοιρών. Συγκεκριμένα κατά την δεύτερη περίοδο λίπανσης η συγκέντρωση των

νιτρικών φθάνει σχεδόν τα 50 mg/l, που αποτελεί το ανώτατο επιτρεπτό όριο σύμφωνα με τα νομοθετικά όρια. Τον Οκτώβριο του 2008, στο τέλος της προσομοίωσης, η συγκέντρωση των νιτρικών έχει μειωθεί, με την μέγιστη να ισούται με 34 mg/l. Παρά την μείωση αυτή, η τιμή ξεπερνά το ενδεικτικό όριο των 25 mg/l νιτρικών σε επιφανειακά νερά, που έχει θεσπιστεί σε εθνικό και ευρωπαϊκό επίπεδο. Επομένως, γίνεται εμφανής η άμεση ανάγκη περιορισμού της χρήσης των αζωτούχων λιπασμάτων και εξάπλωσης της ρύπανσης του υδροφορέα. Η αντιμετώπισης της νιτρορύπανσης μπορεί να επιτευχθεί με την ενημέρωση αγροτών για τις μεθόδους ορθής γεωργικής πρακτικής, τον συστηματικό έλεγχο αυτών και την ενίσχυση της ανάπτυξης βιολογικών καλλιεργειών.

Ως γενικό συμπέρασμα προκύπτει η ανάγκη εκπόνησης μελετών και έργων για την αιφορική διαχείριση και διατήρηση της ποιότητας και ποσότητας των υπόγειων υδάτων και γενικότερα των υδάτινων πόρων. Η διαχείριση αυτή θα πρέπει να εξασφαλίζει την κάλυψη των αναγκών των διάφορων χρηστών, χωρίς όμως να επιβαρύνει την ποιότητα των υπόγειων νερών και να συντελεί στην εξάντληση των διαθέσιμων αποθεμάτων τους. Για την διατήρηση του υδατικού δυναμικού μιας περιοχής θα πρέπει να μελετάται τόσο το μοντέλο των υπόγειων υδάτων όσο και αυτό των επιφανειακών, για τον αποτελεσματικό σχεδιασμό διαχειριστικών πλάνων. Ταυτόχρονα θα πρέπει να εξετάζεται η επίδραση αυτών στην ποιότητα κυρίως του υπόγειου νερού, καθώς όπως παρουσιάσθηκε και παραπάνω η αποκατάστασή του είναι χρονοβόρα και δαπανηρή, με σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και τον άνθρωπο.

## 9.2 Προτάσεις

Ως προς τις δυνατότητες μελλοντικής έρευνας, αρχικά θα μπορούσε να μελετηθεί η συμπεριφορά της υπόγειας ροής για την λεκάνη των Μοιρών, στην περίπτωση που το Φράγμα της Φανερωμένης λειτουργούσε ομαλά και μπορούσε να συνεισφέρει με την μορφή τεχνητού εμπλουτισμού. Όπως έχει αναφερθεί, το Φράγμα της Φανερωμένης βρίσκεται στο βόρειο τμήμα της λεκάνης των Μοιρών και έχει χωρητικότητα ταμιευτήρα 20.000.000 κ.μ. νερού. Αν και το έργο παραδόθηκε το 2005 δεν έχει καταφέρει να καλύψει τις συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες για άρδευση των περιοχών της πεδιάδας της Μεσσαράς. Θα μπορούσε να μελετηθεί λοιπόν η συμπεριφορά του υδροφόρου ορίζοντα της λεκάνης, χρησιμοποιώντας την προσομοίωση της υπάρχουσας διπλωματικής εργασίας και επεκτείνοντάς την εισάγοντας τα δεδομένα τεχνητού εμπλουτισμού από το Φράγμα της Φανερωμένης. Ο εμπλουτισμός των υδροφορέων μπορεί να γίνει είτε με εμπλουτισμό απευθείας στην επιφάνεια, είτε απευθείας στο υπέδαφος είτε με τον συνδυασμό των παραπάνω μεθόδων. Ανεξάρτητα της μεθόδου, μέσω του τεχνητού εμπλουτισμού επιτυγχάνονται τα εξής:

- Η αύξηση της ποσότητας προς εκμετάλλευση και δημιουργία προσωρινής υπόγειας αποθήκης για μελλοντική εκμετάλλευση,

- η αποκατάσταση της υδρολογικής ισορροπίας υδροφορέων που έχει παρατηρηθεί υπεράντληση,
- η άνοδος της στάθμης κυρίως σε παράκτιες περιοχές για την αποφυγή του φαινομένου της υφαλμύρισης,
- η μεταβολή της ποιότητας του υπόγειου νερού, με ανάμειξη του με νερό καλύτερης ποιότητας ,
- η διατήρηση της στάθμης σε πηγές άντλησης νερού (γεωτρήσεις) κ.ά.

Συνεπώς, προσομοιώνοντας την υπόγεια ροή θα μπορούσαν να προκύψουν συμπεράσματα αν η μελλοντική ορθή λειτουργία του Φράγματος θα μπορούσε να συνεισφέρει στην εξασθένηση του προβλήματος της υπερεκμετάλλευσης των υπόγειων υδάτων στην λεκάνη των Μοιρών αλλά και γενικότερα στην πεδιάδα της Μεσσαράς.

Μια ακόμα έρευνα που θα μπορούσε να γίνει μελλοντικά βασιζόμενη στην υπάρχουσα προσομοίωση, είναι η μελέτη της μεταβολής του υδατικού ισοζυγίου λόγω κλιματικής αλλαγής. Πληθώρα ερευνών έχουν επικεντρωθεί στην εκτίμηση του όγκου των βροχοπτώσεων, της θερμοκρασίας, της υγρασίας, της επιφανειακής απορροής, της κατείσδυσης και της εξατμισοδιαπνοής σε βάθος 30ετίας και 50ετίας για περιοχές της Ελλάδας. Εισάγοντας τα δεδομένα αυτά, θα μπορούσε να μελετηθεί η επίπτωση των μελλοντικών αυτών αλλαγών στην υπόγεια ροή. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, ύστερα από κατάλληλη αξιολόγηση, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τον σχεδιασμό της ορθολογικής διαχείρισης των υδάτινων πόρων, ώστε αποφευχθούν πιθανόν δυσμενείς μελλοντικές επιπτώσεις.

## Βιβλιογραφία

Anderson, M. P., and Woessner, W. W. (1992). *Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport*. California: Academic Press.

Barnes, G. (2005). *Εδαφομηχανική: Αρχές και Εφαρμογές*. 2<sup>η</sup> Αγγλική Έκδοση. Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.

Bear, J. (1979). *Hydraulics of Groundwater*. McGraw-Hill.

Crank, J. (1956). *The Mathematics of Diffusion*. Oxford University Press, London.

Driscoll, F. G. (1986). *Groundwater and Wells*. 2<sup>nd</sup> Edition. Johnson Screens, St. Paul, Minnesota.

Fetter, C. W. (1994). *Applied Hydrogeology*. 3<sup>rd</sup> Edition. Macmillan College Publishing, New York.

Freeze, R.A., and Cherry, J.A. (1979). *Groundwater*, Prentice-Hall.

Zheng, C., and Wang, P. P. (1999). *MT3DMS: A Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model*. U.S. Army Corps of Engineers, Washington.

McDonald, M.G., and Harbaugh, A.W. (1988). *A modular three-dimensional finite-difference ground water flow model*. Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey.

Michigan Department of Environmental Quality (2014). *Remediation And Redevelopment Division Resource Materials*.

Terzaghi, K., Peck, R. B. (1967). *Soil mechanics in engineering practice*.

Varouchakis, E. (2015). *Integrated Water Resources Analysis at Basin Scale: A Case Study in Greece*. American Society of Civil Engineers.

Varouchakis, E., Karatzas, G., and Giannopoulos, G. (2015). *Impact of irrigation scenarios and precipitation projections on the groundwater resources of Viannos Basin at the island of Crete, Greece*. Environ. Earth. Sci.

Αντωνίου, Μ. (2015). *Βελτιστοποίηση Διαχείρισης Υπόγειων Υδατικών Πόρων με σύνδεση του αλγορίθμου αναζήτησης αρμονίας και του τρισδιάστατου μοντέλου υπόγειας ροής MODFLOW*. Μεταπτυχιακή εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.

Αντωνόπουλος, Β. Ζ. (1999). *Ποιότητα και ρύπανση υπόγειων νερών*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.

Βουδούρης, Κ. Σ. (2009). *Υδρογεωλογία Περιβάλλοντος: Υπόγεια Νερά και Περιβάλλον*. Εκδόσεις Τζιόλα

Γιδαράκος, Ε., Αϊβαλιώτου Μ. (2005). *Τεχνολογίες αποκατάστασης εδαφών και υπόγειων υδάτων από επικίνδυνους ρύπους*. Εκδόσεις Ζυγός, Θεσσαλονίκη.

Ινστιτούτο Εγγείων Βελτιώσεων (2012). *Θεματικός Οδηγός για την Ορθολογική Διαχείριση Αρδευτικών Νερών*. Θεσσαλονίκη.

Ιορδανίδης, Η. Γ. (2010). *Διερεύνηση της νιτρορύπανσης λεκάνης απορροής από αγροτικές δραστηριότητες*. Διδακτορική διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.

Καββαδάς, Μ. Ι. (2009). *Στοιχεία Εδαφομηχανικής*. Εκδόσεις ΑΡΗΣ ΣΥΜΕΩΝ, Αθήνα.

Καβαλιεράτου, Σ. (2007). *Ανάλυση και Διερεύνηση της Βιώσιμης Διαχείρισης των Υπόγειων Νερών με Μαθηματικά Μοντέλα σε Περιβάλλον GIS*. Διδακτορική διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.

Καλλέργη, Γ. Α. (2001). *Εφαρμοσμένη Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία*. 2<sup>η</sup> Έκδοση. Έκδοση Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας, Αθήνα.

Καλογεράκης, Ν. (2013). *Βιολογικές Μέθοδοι Εξυγίανσης Περιβάλλοντος*. Διδακτικές Σημειώσεις, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

Καρατζάς, Γ. Π. (2016). *Ροή Υπόγειων Υδάτων και Μεταφορά Ρύπων*. Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

Κουτούπα-Ρεγκάτου, Ε. (2008). *Δίκαιο του Περιβάλλοντος*. 3<sup>η</sup> Έκδοση επανυξημένη. Εκδόσεις Σάκκουλα, Αθήνα.

Κριτσωτάκης, Μ. Ν. (2009). *Διαχείριση Υδάτινων Πόρων Μεσσαράς Κρήτης*. Διδακτορική διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

Κυλίλη-Πολυχρονάκη, Α. (2001). *Υδρογεωλογική Μελέτη Περιοχής Δήμου Μοιρών του Νομού Ηρακλείου*. Ι.Γ.Μ.Ε, Ρέθυμνο.

Κωτσιοπούλου, Π. (2013). *Διαχρονική εξέλιξη της Ρύπανσης των Υπόγειων υδάτινων Σχηματισμών από νιτρικά γεωργικής προέλευσης στο Αργολικό πεδίο, συνέχεια παλαιότερων μελετών*. Μεταπτυχιακή εργασία, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Μυτιλήνη.

Λατινόπουλος, Π., Θεοδοσίου, Ν. (2017). *Εκμετάλλευση και προστασία των υπόγειων υδατικών πόρων*. Διδακτικές Σημειώσεις, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.

Προδρόμου, Π. (2016). *Simultaneous Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification by klebsiella sp. BWM5*. Μεταπτυχιακή εργασία, Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου, Λεμεσός.

Υπουργείο Γεωργίας, Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Τμήμα Γεωργίας (2010). *Οι υδατικές ανάγκες των αρδευόμενων καλλιεργειών*. Έκδοση 9. Λευκωσία, Κύπρος.

Υπουργείο Περιβάλλοντος Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής, (2012). *Ποιότητα Επιφανειακών και Υπόγειων Υδάτων της Χώρας, Περίοδος Αναφοράς 2000-2008*. 2<sup>η</sup> Έκδοση. Αθήνα.

WWF Ελλάς, (2012). *Η Ελλάδα τότε και τώρα. Διαχρονική Χαρτογράφηση των Καλύψεων γης 1987-2007*.

#### Διαδικτυακές Πηγές

Government of Canada, Environment and Climate Change of Canada (2013). *The Hydrologic Cycle*. <https://www.ec.gc.ca/eau-water>

USGS-Science of a changing world. <https://water.usgs.gov>

State of Ohio, Environmental Protection Agency (2007). *Ground Water Flow and Fate and Transport Modeling*. Chapter 14, [http://epa.ohio.gov/Portals/28/documents/TGM-14\\_final1107W.pdf](http://epa.ohio.gov/Portals/28/documents/TGM-14_final1107W.pdf)

Μακρόπουλος, Χ., Κουτσογιάννης, Δ. (2005). Ο υδρογεωλογικός κύκλος.  
<https://water.usgs.gov/edu/watercyclegreek.html>

Μετεωρολογικός Σταθμός Πετροκεφαλίου Μοιρών,  
<http://penteli.meteo.gr/stations/moires/>

Νιτρορύπανση, <http://www.ypeka.gr/?tabid=250>

Μέθοδοι Εξυγίανσης Υπόγειων Υδροφορέων:

- ([www.wsr.it/en/products/remediation-systems](http://www.wsr.it/en/products/remediation-systems))
- ([www.rewordit.org](http://www.rewordit.org))
- clu-in.org

[www.mesaralive.gr](http://www.mesaralive.gr)

<https://www.e-mesara.gr>

<https://www.epa.gov>



## Παράρτημα

Πίνακας 7. Στοιχεία γεωτρήσεων άντλησης

Well Name	Easting (m)	Northing (m)	Abstraction rate (m <sup>3</sup> /h)
105	574913	3875977	20
202	575059	3878133	100
106	575188	3875750	20
202A	575334	3877647	90
107	575367	3875685	20
201	575529	3877663	120
108	575675	3877323	100
201A	575886	3877728	100
110	576161	3877144	150
G96	576275	3877858	50
204	576340	3877631	100
125P	576356	3878150	60
MG7	576972	3878441	25
MG12	576980	3879512	20
MG13	577037	3879122	30
205	577069	3877874	80
203	577118	3877339	100
206	577507	3877890	80
MG11	577572	3879025	15
104	577767	3877890	80
MG9	577831	3878441	50
MG8	577880	3878263	60
104P	577913	3877728	80
MG10	577961	3878749	25
B7A	578188	3877209	80
207	578350	3878668	100
B2	578464	3877225	150
B1.5	578464	3877468	80
B6	578512	3877663	150
B1	578772	3877777	120
58A	578917	3878020	40
208	578934	3877922	100
80	579064	3876771	80
209	579080	3877760	120
N9	579291	3877144	80
G86	579307	3877566	80
109A	579421	3878052	90
B7	579550	3877323	80

109	579696	3878101	80
123	579907	3877793	50
210	579956	3877598	60
B4	580118	3876674	12
211	580248	3877387	50
126	580539	3876852	150
143	580783	3877436	60
G35	581285	3878133	40
62	581480	3878150	40
G37	581496	3877890	60
65	581739	3878150	50
64	581950	3878117	50
212	582064	3876771	70
G34	582193	3878020	50
212A	582534	3877874	30
46	582631	3878279	50
44	583118	3877809	25
43	583312	3878279	30
42	583588	3878085	25
103	584075	3878133	25

Πίνακας 8. Στοιχεία γεωτρήσεων παρατήρησης υδραυλικού ύψους

Well Name	X	Y	Groundwater level 2008 wet meters above sea level	Groundwater level 2008 dry	Groundwater level 2009 wet	Groundwater level 2009 dry
95P	573956	3879560	18	13.5	20.72	13.88
B5	578204	3877809	18.12	13.59	15.96	12.77
M-A2	579485	3879009	40.75	30.56	42.3	32.57
M1	580004	3879268	39.15	29.36	38.08	28.56
99	585323	3876090	62.15	46.61	58	38.86
M11	582531	3877315	49.73	37.30	38.7	35.22
M12	575999	3878771	26.28	19.71	18.5	14.8
M3	579403	3877722	35.55	26.66	32.5	21.78

<b>M4</b>	57605 2	3876704	22.45	16.84	16.24	12.51
<b>M5</b>	57563 0	3877172	27.71	20.78	24.2	19.36
<b>M6</b>	57975 5	3878002	29	21.75	25	19.25
<b>M7</b>	58561 9	3876792	46.78	35.09	41	27.47
<b>M8</b>	58613 6	3878492	72.93	54.70	65.3	54.85

Πίνακας 9. Στοιχεία γεωτρήσεων παρατήρησης συγκέντρωσης νιτρικών ιόντων

Well Name	X	Y	[NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ] Μάϊος 2008 ppm	[NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ] Οκτώβριος 2008 ppm
<b>M-A2</b>	579485	3879009	12,4	15,4
<b>M1</b>	580004	3879268	6,2	28,8
<b>99</b>	585323	3876090	18,6	20,3
<b>M11</b>	582531	3877315	15,5	22,4
<b>M3</b>	579403	3877722	12,4	31,2
<b>M4</b>	576052	3876704	9,3	24
<b>M5</b>	575630	3877172	6,2	30,7
<b>M6</b>	579755	3878002	12,4	31,2
<b>M7</b>	585619	3876792	9,3	33,6

Πίνακας 10. Τιμές της συμπληρωματικής συνάρτησης σφάλματος (error function)  $\operatorname{erfc}(x)$

$x$	$\operatorname{erf}(x)$	$\operatorname{erfc}(x)$
0	0	1.0
0.05	0.056372	0.943628
0.1	0.112463	0.887537
0.15	0.167996	0.832004
0.2	0.222703	0.777297
0.25	0.276326	0.723674
0.3	0.328627	0.671373
0.35	0.379382	0.620618
0.4	0.428392	0.571608
0.45	0.475482	0.524518
0.5	0.520500	0.479500
0.55	0.563323	0.436677
0.6	0.603856	0.396144
0.65	0.642029	0.357971
0.7	0.677801	0.322199
0.75	0.711156	0.288844
0.8	0.742101	0.257899
0.85	0.770668	0.229332
0.9	0.796908	0.203092
0.95	0.820891	0.179109
1.0	0.842701	0.157299
1.1	0.880205	0.119795
1.2	0.910314	0.089686
1.3	0.934008	0.065992
1.4	0.952285	0.047715
1.5	0.966105	0.033895
1.6	0.976348	0.023652
1.7	0.983790	0.016210
1.8	0.989091	0.010909
1.9	0.992790	0.007210
2.0	0.995322	0.004678
2.1	0.997021	0.002979
2.2	0.998137	0.001863
2.3	0.998857	0.001143
2.4	0.999311	0.000689
2.5	0.999593	0.000407
2.6	0.999764	0.000236
2.7	0.999866	0.000134
2.8	0.999925	0.000075
2.9	0.999959	0.000041
3.0	0.999978	0.000022
$\infty$	1.00000	0.00000