

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΧΑΝΙΑ 2018

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΘΕΜΑ :

«Εκτίμηση τρωτότητας του υδροφορέα της λεκάνης Μοιρών,
Ηρακλείου Κρήτης, με χρήση της μεθόδου DRASTIC-LU»



ΦΟΙΤΗΤΡΙΑ : ΚΑΛΑΪΤΖΑΚΗ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑ (2011050031)
ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ: ΚΑΡΑΤΖΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

ΠΑΡΑΝΥΧΙΑΝΑΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΒΑΡΟΥΧΑΚΗΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ

ΑΝΑΠΛΗΡΩΜΑΤΙΚΟΣ: ΝΙΚΟΛΑΪΔΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου για τη στήριξη της ,στον κύριο Γεώργιο Καρατζά για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας , στον κύριο Βαρουχάκη Εμμανουήλ για την πολύτιμη στήριξη και βοήθεια του και στον κύριο Κριτσωτάκη Μαρίνο για τη βοήθεια και τις σημαντικές πληροφορίες που μου έδωσε. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω των κύριο Παρανυχιανάκη για την συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια των προπτυχιακών σπουδών του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης και έχει ως θέμα την τρωτότητα του υδροφορέα της λεκάνης των Μοιρών, μέσω της μεθόδου DRASTIC-LU, με χρήση του προγράμματος ArcMap του GIS.

Στο 1^ο κεφάλαιο γίνεται αρχικά αναφορά στη σημασία του υπόγειου νερού στον υδρολογικό κύκλο και στη συνέχεια αναλύεται το πρόβλημα ρύπανσης των υπόγειων υδάτων, καθώς και οι πηγές ρύπανσης και οι τρόποι αντιμετώπισης της.

Στο 2^ο κεφάλαιο αναφέρεται η έννοια της τρωτότητας καθώς και οι μέθοδοι εκτίμησης της και αναλύεται η μέθοδος DRASTIC-LU.

Στο 3^ο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή της περιοχής μελέτης και στο 4^ο και 5^ο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης και τα συμπεράσματα αυτής.

ABSTRACT

The present study was developed in the framework of the undergraduate studies of the Department of Environmental Engineering at the Technical University of Crete and deals with the vulnerability of the aquifer of Mires basin through the DRASTIC-LU method using the ArcMap program of GIS.

The first chapter refers to the importance of groundwater in the hydrological cycle and then analyzes the problem of groundwater pollution as well as the sources of pollution and how to deal with it.

The second chapter describes the concept of vulnerability and its estimation methods and analyzes the DRASTIC-LU method.

The third chapter presents a description of the study area and the 4th and 5th chapters present the results of the study and its conclusions respectively.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
ABSTRACT	3
Εισαγωγή	6
Κεφάλαιο 1:Ρύπανση του υπόγειου νερού	8
1.1. Υδρολογικός κύκλος.....	8
1.1.1. Μέρη του υδρολογικού κύκλου	9
1.1.1.1. Αποθήκευση νερού στη θάλασσα.....	10
1.1.1.2. Εξάτμιση	10
1.1.1.3. Εξατμισοδιαπνοή.....	10
1.1.1.4. Εξάχνωση.....	11
1.1.1.5. Αποθήκευση νερού στην ατμόσφαιρα.....	11
1.1.1.6. Συμπύκνωση	11
1.1.1.7. Κατακρημνίσματα	11
1.1.1.8. Αποθήκευση νερού σε πάγους και χιόνια	11
1.1.1.9. Απορροή από λιώσιμο χιονιού.....	12
1.1.1.10. Επιφανειακή απορροή	12
1.1.1.11. Ροή σε υδατορεύματα.....	12
1.1.1.12. Αποθήκευση γλυκού νερού.....	13
1.1.1.13. Διήθηση	13
1.1.1.14. Αποθήκευση υπόγειου νερού	13
1.1.1.15. Εκφόρτιση υπόγειου νερού.....	13
1.1.1.16. Πηγές	13
1.2. Υπόγεια ύδατα.....	14
1.3. Πηγές ρύπανσης υπόγειων υδάτων	14
1.4. Βασικές κατηγορίες ρύπων των υπόγειων υδάτων	15
1.5. Μηχανισμοί μεταφοράς ρύπων στα υπόγεια νερά	17
1.6. Προστασία υδροληπτικού έργου	19
1.7. Αντιμετώπιση της ρύπανσης	21
1.8. Κριτήρια ποιότητας νερού	22
Κεφάλαιο 2: Τρωτότητα υπόγειου νερού- Μέθοδος DRASTIC-LU.....	23
2.1. Η έννοια της τρωτότητας	23
2.2. Μέθοδοι εκτίμησης τρωτότητας	25
2.2.1. Μέθοδος DRASTIC-LU.....	25
Κεφάλαιο 3 : Περιοχή μελέτης.....	29
3.1. Πεδιάδα της Μεσαράς	29

3.2. Χρήσεις γης	30
3.3. Γεωλογία – Τοπογραφία	31
3.4. Υδρογεωλογία	32
3.5. Κλίμα περιοχής	34
3.6. Υδρολογικά χαρακτηριστικά	34
Κεφάλαιο 4: Εκτίμηση της τρωτότητας της περιοχής μελέτης	37
4.1. Πρακτική εφαρμογή της μεθόδου DRASTIC-LU	37
4.1.1. Εκτίμηση παράγοντα D.....	37
4.1.2. Εκτίμηση παράγοντα R.....	50
4.1.3. Εκτίμηση παράγοντα A.....	54
4.1.4. Εκτίμηση παράγοντα S	57
4.1.5. Εκτίμηση παράγοντα T	59
4.1.6. Εκτίμηση παράγοντα I	61
4.1.7. Εκτίμηση παράγοντα C.....	63
4.1.8. Εκτίμηση παράγοντα LU.....	65
4.2. Εκτίμηση τελικής τρωτότητας	67
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα	69
Βιβλιογραφία	75
Ξενόγλωσση βιβλιογραφία	76
Ηλεκτρονική βιβλιογραφία	76

Εισαγωγή

Το νερό είναι ένας μοναδικός φυσικός πόρος καθώς είναι απαραίτητο για την επιβίωση του ανθρώπου και των άλλων οργανισμών.

Συγκεκριμένα το υπόγειο νερό αποτελεί τη μεγαλύτερη δεξαμενή γλυκού νερού στον κόσμο. Μέχρι σήμερα χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο για τις ανάγκες ύδρευσης (75% περίπου των κατοίκων της Ευρωπαϊκής Ένωσης εξαρτώνται από τα υπόγεια αποθέματα για την παροχή νερού για ανθρώπινη κατανάλωση). Επίσης είναι ένας πολύ σημαντικός πόρος για την κάλυψη των αναγκών νερού στη βιομηχανία και τη γεωργία (άρδευση).

Ωστόσο είναι λάθος τα υπόγεια νερά να αντιμετωπίζονται μόνο ως μια δεξαμενή νερού καλής ποιότητας όπου θα αντλείται νερό για διάφορες χρήσεις, καθώς έχουν μεγάλη περιβαλλοντική αξία και είναι σημαντικό για το περιβάλλον να προστατευτούν. Τα υπόγεια ύδατα έχουν καταλυτικό ρόλο στον υδρολογικό κύκλο και είναι σημαντικά για τη διατήρηση υγροτόπων και ποταμών, ιδιαίτερα σε περιόδους ξηρασίας, καθώς εξασφαλίζουν τη μόνιμη ροή τους.

Τα τελευταία χρόνια οι περισσότεροι ποταμοί της Ευρώπης τροφοδοτούνται σε ποσοστό 50% της ετήσιας ροής τους από υπόγεια ύδατα. Το καλοκαίρι το ποσοστό φτάνει μέχρι και 90% σε κάποιους ποταμούς. Γι' αυτό το λόγο η υποβάθμιση της ποιότητας των υπόγειων υδάτων μπορεί να επηρεάσει άμεσα υδατικά και χερσαία οικοσυστήματα.

Τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί μείωση των υδάτινων πόρων καθώς και μόλυνση αυτών λόγω διαφόρων ανθρώπινων δραστηριοτήτων και της κλιματικής αλλαγής.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η περιοχή της Μεσαράς στην Κρήτη, η οποία βρίσκεται στο νότιο-κεντρικό τμήμα της και είναι η μεγαλύτερη πεδιάδα του νησιού. Η οικονομία και η ανάπτυξη της περιοχής βασίζεται κυρίως στον πρωτογενή τομέα με την καλλιέργεια εντατικών υδροβόρων καλλιεργειών και λιγότερο στον τουρισμό. Στην περιοχή οι κλιματικές συνθήκες είναι ξηροθερμικές ειδικά τη θερινή περίοδο γεγονός που δημιουργεί αυξημένη ζήτηση σε νερό. Τη θερινή περίοδο οι ανάγκες άρδευσης καλύπτονται αποκλειστικά από το υπόγειο νερό του υδροφορέα της λεκάνης, η εκμετάλλευση του οποίου άρχισε τη δεκαετία του 1980 με την ανόριξη κυρίως ιδιωτικών υδρογεωτρήσεων. (Μαρίνος Κριτωτάκης, 2009)

Σαν αποτέλεσμα τα υπόγεια νερά της Μεσαράς σήμερα, έχουν υποστεί τεράστια μείωση λόγω της υπερεκμετάλλευσης τους, σε συνδιασμό με τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής καθώς και μείωση της ποιότητας τους (ρύπανση), με καταστροφικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και την οικονομία της περιοχής.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι ο προσδιορισμός της τρωτότητας (Vulnerability) του υδροφορέα της λεκάνης των Μοιρών, όπου βρίσκονται στην περιοχή της Μεσαράς. Τρωτότητα είναι το μέτρο του πόσο εύκολα ή δύσκολα μπορεί η μόλυνση της επιφάνειας του εδάφους να φτάσει στον υδροφόρο ορίζοντα. Για τον υπολόγισμό της χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος DRASTIC-LU με χρήση του προγράμματος ArcMap του GIS δημιουργώντας χάρτες μορφής raster των διαφόρων παραγόντων που σχετίζονται με την επικινδυνότητα ρύπανσης των υπογείων υδάτων. Η μέθοδος DRASTIC-LU είναι μια Αμερικάνικη μέθοδος η οποία είναι αρκετά ευέλικτη ανάλογα με την περιοχή μελέτης και στηρίζεται στην υδρογεωλογική θεώρηση της εξεταζόμενης περιοχής, προερχόμενη από τα αρχικά των λέξεων D (depth of the water – βάθος στάθμης του υπόγειου νερού), R (recharge of the

aquifer – τροφοδοσία του υδροφόρου ορίζοντα), A (aquifer type – τύπος υδροφόρου ορίζοντα), S (soil – εδαφικό κάλυμμα), T (topography – τοπογραφία της επιφάνειας του εδάφους – κλίση), I (impact of the vadose zone – ρόλος της ακόρεστης ζώνης), C (hydraulic conductivity – περατότητα του υδροφορέα), LU (landuse- χρήση γης της περιοχής). Τα τελικά αποτελέσματα δείχνουν τα σημεία της περιοχής τα οποία είναι πιο ευάλωτα όσον αφορά τη μόλυνση του υπόγειου υδροφορέα των Μοιρών, υπολογίζοντας τις παραπάνω παραμέτρους με την δημιουργία διαφορετικών χαρτών για κάθε μια από αυτές με τα αντίστοιχα βάρη. Ο τελικός χάρτης της τρωτότητας προκύπτει μέσω του γραμμικού συνδυασμού των χαρτών και την επιλογή των κατάλληλων βαρών.

Επίσης, εκτός από την τρωτότητα της περιοχής τα τελικά αποτελέσματα μας δείχνουν προσεγγιστικά ποια σημεία της περιοχής μελέτης προσφέρονται για τον εμπλουτισμό του υπόγειου υδροφορέα καθώς τα σημεία του εδάφους όπου η τρωτότητα είναι μεγαλύτερη είναι πιο περατά. Αυτή τη στιγμή ένα έργο τεχνητού εμπλουτισμού του υπόγειου υδροφορέα, της λεκάνης των Μοιρών και κατά επέκταση της Μεσαράς, ο οποίος έχει στερέψει, είναι ζωτικής σημασίας όσον αφορά την ποσότητα και την ποιότητα του νερού.

Τέλος σκοπός είναι να αποδειχθεί συγκριτικά με άλλες μελέτες ότι η DRASTIC-LU είναι μία αξιόπιστη μέθοδος η οποία θα μπορούσε να αξιοποιηθεί μελλοντικά σε κάποια σχετική μελέτη στην περιοχή της Μεσαράς, συνδυαστικά με άλλες παραμέτρους για τον εμπλουτισμό και την αντιμετώπιση της μόλυνσης των υπόγειων νερών στην περιοχή, καθώς είναι μία εύκολα διαχειρίσιμη μέθοδος όπου παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα.

Κεφάλαιο 1:Ρύπανση του υπόγειου νερού

1.1. Υδρολογικός κύκλος

Ο υδρολογικός κύκλος είναι μια σειρά από διαδικασίες με τις οποίες το νερό κυκλοφορεί στη φύση μεταξύ θάλασσας-ατμόσφαιρας και ξηράς-θάλασσας , όπου εμφανίζεται όχι μόνο στην υγρή μορφή του αλλά σε όλες τις πιθανές καταστάσεις: υγρό, αέριο (υδρατμός) , στερεό (χιόνι, χαλάζι).

Στην ουσία ο υδρολογικός κύκλος δεν έχει κάποια συγκεκριμένη σειρά εμφανίσεων του νερού. Όμως η αρχή θα μπορούσε να θεωρηθεί η ατμόσφαιρα όπου το νερό συγκεντρώνεται με μορφή υδρατμών που προέρχονται από την εξάτμιση του νερού στις θάλασσες, λίμνες, ποταμούς, έδαφος, βλάστηση κ.λ.π.

Ένα μέρος του νερού που φτάνει στην επιφάνεια της γης συγκρατείται από τη βλάστηση, εξατμίζεται ή διαπνέεται από τα φυτά. Ένα άλλο μέρος του νερού διηθείται στο έδαφος και το υπόλοιπο απορρέει επιφανειακά προς ρέματα που καταλήγουν σε λίμνες και θάλασσες.(Γ.Τσακίρης,2013)

Κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την επιφανειακή απορροή είναι οι εξής:

- Κλιματικοί (ένταση βροχοπτώσεων, υγρασία, αέρας, άνεμοι, εξάτμιση)
- Γεωμορφολογικοί (κλίση λεκάνης απορροής, υδρογραφική πυκνότητα)
- Λιθολογικοί (είδος πετρωμάτων, περατότητα)
- Είδος της φυτοκάλυψης (Στραβόλαιμος Κυπριανός-Κωνσταντίνος,2017)

Κατά την πορεία αυτή του νερού ένα ποσοστό του εξατμίζεται. Το τμήμα του νερού που διηθείται αποθηκεύεται ως υπόγειο νερό το οποίο συχνά εμφανίζεται στην επιφάνεια της γης σε χαμηλότερα σημεία και στη συνέχεια καταλήγει επιφανειακά ή υπόγεια. Τέλος το νερό της θάλασσας καταλήγει στην ατμόσφαιρα με την εξάτμιση και έτσι κλείνει ο υδρολογικός κύκλος.(Γ.Τσακίρης, 2013)

Η κατείσδυση αποτελεί τη σημαντικότερη διεργασία για τον καθορισμό της υδροοικονομίας μιας περιοχής καθώς οφείλεται για τον εμπλουτισμό του υπόγειου υδροφορέα. Η ικανότητα κατείσδυσης εξαρτάται κυρίως από:

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

Ο συντελεστής κατείσδυσης εκφράζει το ποσοστό του νερού που κατεisdύει σε σχέση με την ολική βροχόπτωση. Οι τιμές του συντελεστή κατείσδυσης κυμαίνονται από 3% (φλύσσης, φυλλίτες, σχιστόλιθοι , γνεύσιοι , ηφαιστειακά πετρώματα) έως 60% (ανθρακικά πετρώματα).

Τέλος, το κλίμα και η γεωγραφική θέση της περιοχής είναι οι κύριες αιτίες για την ένταση και συχνότητα ενός υδρολογικού κύκλου. (Στραβόλαιμος Κυπριανός-Κωνσταντίνος,2017)

Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι μέσα στον υδρολογικό κύκλο μπορεί να συμβεί :

- Μεταφορά νερού
- Προσωρινή αποθήκευση
- Μεταβολή της κατάστασης του νερού (Γ.Τσακίρης,2013)

Στην εικόνα.1 απεικονίζεται σχηματικά ο υδρολογικός κύκλος .



Εικόνα 1. Υδρολογικός κύκλος (Τσακίρης, 1995)

1.1.1. Μέρη του υδρολογικού κύκλου

Η Γεωλογική υπηρεσία των ΗΠΑ (USGS) έχει διακρίνει 16 μέρη του υδρολογικού κύκλου:

1. Αποθήκευση νερού στη θάλασσα
2. Εξάτμιση
3. Εξατμισοδιαπνοή
4. Εξάχνωση
5. Αποθήκευση νερού στην ατμόσφαιρα
6. Συμπύκνωση
7. Κατακρημνίσματα

8. Αποθήκευση νερού σε πάγους και χιόνια
9. Απορροή από λιώσιμο χιονιού
10. Επιφανειακή απορροή
11. Ροή σε υδατορεύματα
12. Αποθήκευση γλυκού νερού
13. Διήθηση
14. Αποθήκευση υπόγειου νερού
15. Εκφόρτιση υπόγειου νερού
16. Πηγές (Κατσάβρια Βασιλική, 2012)

1.1.1.1. Αποθήκευση νερού στη θάλασσα

Το περισσότερο νερό που βρίσκεται σε κίνηση στον υδρολογικό κύκλο είναι αποθηκευμένο στη θάλασσα, κυρίως στους ωκεανούς. Από τα 1.386.000.000 κυβικά χιλιόμετρα νερού στη γη, περίπου τα 1.338.000.000 κυβικά χιλιόμετρα (96,5 %) βρίσκεται στους ωκεανούς. Το 88% του εξατιζόμενου νερού προέρχεται από τους ωκεανούς. Όμως κατά τη διάρκεια μεγάλων χρονικών περιόδων αλλάζει η ποσότητα του νερού. Τις ψυχρές κλιματικές περιόδους σχηματίζονται παγόβουνα και παγετώνες με αποτέλεσμα το νερό να είναι λιγότερο ενώ τις θερμές κλιματικές περιόδους συμβαίνει το αντίθετο. (Κατσάβρια Βασιλική, 2012)

1.1.1.2. Εξάτμιση

Εξάτμιση είναι η διεργασία μέσω της οποίας το νερό γίνεται από υγρό αέριο, ή αλλιώς υδρατμός, και αποτελεί το βασικό τρόπο με τον οποίο το νερό από υγρό ξαναμπαίνει στην ατμόσφαιρα και μαζί στον υδρολογικό κύκλο. Οι ωκεανοί, οι θάλασσες, οι λίμνες και τα ποτάμια παρέχουν περίπου το 90% της υγρασίας της ατμόσφαιρας, ενώ τα φυτά, μέσω της διαπνοής παρέχουν το υπόλοιπο 10%. Η θερμότητα (ενέργεια), που παρέχει ο ήλιος είναι απαραίτητη για την εξάτμιση. Η ενέργεια χρησιμοποιείται για να σπάσουν οι δεσμοί που κρατούν ενωμένα τα μόρια του νερού και γι' αυτό το νερό εξατμίζεται εύκολα στο σημείο βρασμού του (100°C), και εξατμίζεται πιο δύσκολα κοντά στο σημείο πήξης. Η εξάτμιση αφαιρεί θερμότητα από το περιβάλλον. Η εξάτμιση του θαλασσινού νερού είναι ο κύριος τρόπος με τον οποίο το νερό περνά στην ατμόσφαιρα. Όσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνεια των ωκεανών τόσο μεγαλύτερη είναι η εξάτμιση. Γενικά η ποσότητα νερού που εξατμίζεται παγκοσμίως είναι ίση με τη ποσότητα του νερού που επιστρέφει στην επιφάνεια της Γης με τη μορφή κατακρημνισμάτων.

1.1.1.3. Εξατμισοδιαπνοή

Εξατμισοδιαπνοή είναι ο συνδιασμός της εξάτμισης του νερού από το έδαφος που διαφεύγει στην ατμόσφαιρα και της διαπνοής από τα φύλλα των φυτών. Το νερό αυτό μπορεί να είναι υπόγειο που φτάνει από την επιφάνεια του εδάφους μέσω εδαφικών σωληνίσκων και στα φύλλα των φυτών μέσω του τριχοειδούς αγγειακού συστήματος των φυτών. Διαπνοή είναι στην ουσία η εξάτμιση του νερού από τα φύλλα των φυτών και εκτιμάται ότι το 10% της υγρασίας της ατμόσφαιρας προέρχεται από αυτήν. Οι παράγοντες που καθορίζουν τους ρυθμούς διαπνοής είναι :

- Θερμοκρασία (όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία τόσο μεγαλύτερη είναι η διαπνοή)
- Σχετική υγρασία (όσο αυξάνεται η σχετική υγρασία του αέρα που περιβάλλει το φυτό, ο ρυθμός διαπνοής πέφτει)
- Άνεμος (όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα αέρα κοντά στο φυτό, η διαπνοή αυξάνει)
- Τύπος φυτού (ανάλογα με το είδος του φυτού αλλάζει και το ποσοστό διαπνοής. Τα φυτά που μεγαλώνουν σε ξηρά κλίματα, όπως οι κάκτοι, διαπνέουν λιγότερο). (Κατσάβρια Βασιλική, 2012)

1.1.1.4. Εξάχνωση

Η εξάχνωση είναι η μετατροπή του νερού από τη στερεά μορφή (χιόνι, πάγος) σε υδρατμό χωρίς να περάσει πρώτα από την υγρή μορφή. Η παρατήρηση της εξάχνωσης είναι δύσκολη. Η εξάχνωση πραγματοποιείται πιο εύκολα όταν υπάρχουν συγκεκριμένες καιρικές συνθήκες, όπως ξηρή ατμόσφαιρα και άνεμος. Περισσότερο συμβαίνει σε μεγάλα υψόμετρα, όπου η ατμοσφαιρική πίεση είναι σχετικά μικρή. Για να συμβεί εξάχνωση χρειάζεται να απορροφηθεί ενέργεια, όπως συμβαίνει και με την εξάτμιση, και έτσι το φαινόμενο ευνοείται από την ηλιακή ακτινοβολία.

1.1.1.5. Αποθήκευση νερού στην ατμόσφαιρα

Στην ατμόσφαιρα υπάρχει πάντα νερό. Μπορεί η ατμόσφαιρα να μην είναι η μεγαλύτερη αποθήκη για το νερό, αλλά είναι η "υπερταχεία λεωφόρος" μέσω της οποίας το νερό μετακινείται σε παγκόσμια κλίμακα. Το νερό στην ατμόσφαιρα υπάρχει με τη μορφή νεφών όπου είναι και η πιο ορατή μορφή ατμοσφαιρικού νερού, αλλά υπάρχει και στην καθαρή ατμόσφαιρα με τη μορφή υδρατμών οι οποίοι δεν είναι ορατοί. (Κατσάβρια Βασιλική, 2012)

1.1.1.6. Συμπύκνωση

Συμπύκνωση είναι η διεργασία μετατροπής του νερού από την αέρια στην υγρή μορφή. Η συμπύκνωση είναι σημαντική για τον κύκλο του νερού, διότι επιτρέπει τον σχηματισμό των σύννεφων. Τα σύννεφα, παράγουν κατακρημνίσματα (βροχή, χιόνι, χαλάζι) τα οποία είναι και ο βασικός τρόπος με τον οποίο το νερό επιστρέφει στην επιφάνεια της Γης. Η συμπύκνωση είναι το αντίθετο της εξάτμισης.

1.1.1.7. Κατακρημνίσματα

Κατακρημνίσματα είναι η πτώση του νερού από τα σύννεφα είτε με τη μορφή βροχής, που είναι και το πιο σύνηθες, είτε με τη μορφή χιονιού ή χαλαζιού. Τα σύννεφα περιέχουν υδρατμούς και σταγονίδια τα οποία σχηματίζουν ορατά σύννεφα. Το νερό συνεχώς εξατμίζεται και συμπυκνώνεται στον αέρα. Το περισσότερο από αυτό το νερό δύσκολα πέφτει στην ατμόσφαιρα καθώς συγκρατείται από ανοδικά ρεύματα αέρα. Για να δημιουργηθούν κατακρημνίσματα πρέπει οι σταγόνες να είναι πολύ μεγάλες και βαριές ώστε να πέσουν υπό την επίδραση της βαρύτητας. Γενικά οι ποσότητες κατακρημνισμάτων μεταβάλλονται από περιοχή σε περιοχή αλλά και χρονικά. Ακόμα και σε μία πόλη μπορεί να αλλάζει ανάλογα το σημείο. (Κατσάβρια Βασιλική, 2012)

1.1.1.8. Αποθήκευση νερού σε πάγους και χιόνια

Το νερό που βρίσκεται αποθηκευμένο για μεγάλες χρονικές περιόδους στον πάγο, το χιόνι και τους παγετώνες, αποτελεί και αυτό μέρος του υδρολογικού κύκλου. Το μεγαλύτερο μέρος της μάζας του πάγου στη Γη, περίπου το 90%, βρίσκεται στην Ανταρκτική, ενώ οι πάγοι της Γροιλανδίας περιέχουν το υπόλοιπο 10% της παγκόσμιας μάζας πάγου.

1.1.1.9. Απορροή από λιώσιμο χιονιού

Η απορροή από το λιώσιμο του χιονιού προς τα υδατορεύματα αποτελεί παγκοσμίως σημαντικό παράγοντα για την κίνηση του νερού στον υδρολογικό κύκλο. Την άνοιξη, σε κρύα κλίματα η παροχή των ποταμών προέρχεται από το λιώσιμο πάγων και χιονιού. Το γρήγορο λιώσιμο του χιονιού προκαλεί καταστροφές όπως πλημμύρες, κατολισθήσεις και πτώσεις κατακερματισμένων βραχών. Γενικά και η απορροή από το λιώσιμο του χιονιού μεταβάλλεται χωρικά και χρονικά. Η έλλειψη του αποθηκευμένου νερού σε μορφή χιονιού το χειμώνα μπορεί να προκαλέσει έλλειψη διαθέσιμου νερού τον υπόλοιπο χρόνο και να επηρεάσει την ποσότητα του διαθέσιμου νερού στους κατάντη ταμιευτήρες πράγμα που επηρεάζει και το διαθέσιμο νερό για άρδευση και ύδρευση. (Κατσάβρια Βασιλική, 2012)

1.1.1.10. Επιφανειακή απορροή

Επιφανειακή απορροή είναι η απορροή των κατακρημνισμάτων πάνω από το έδαφος. Τις περισσότερες φορές το νερό που πέφτει στο έδαφος απορροφάται. Όμως σε περιπτώσεις κορεσμένου ή αδιαπέρατου εδάφους το νερό ρέει προς χαμηλά με τη μορφή απορροής. Όπως συμβαίνει με όλα τα μέρη του υδρολογικού κύκλου η επιφανειακή απορροή μεταβάλλεται χρονικά και χωρικά. Η απορροή εξαρτάται από το κλίμα της περιοχής, από τη γεωλογία και από το ανάγλυφο της. Από τα κατακρημνίσματα, το 1/3 απορρέει σε υδατορεύματα και γυρίζει στη θάλασσα, ενώ ένα μέρος αυτού χρησιμοποιείται για ανθρώπινη χρήση, ενώ τα 2/3 εξατμίζονται ή διηθούνται προς τα υπόγεια νερά. (Κατσάβρια Βασιλική, 2012)

1.1.1.11. Ροή σε υδατορεύματα

Η ροή στα υδατορεύματα αναφέρεται στην κίνηση του νερού σε ποτάμια, ρέματα ή ρυάκια. Τα ποτάμια είναι πολύ σημαντικά καθώς εκτός από θαυμάσιοι χώροι αναψυχής προσφέρουν πολλές χρήσεις όπως:

- Πηγή πόσιμου νερού
- Πηγή νερού για άρδευση
- Παραγωγή ηλεκτρισμού
- Μετακίνηση εμπορευμάτων
- Πηγή τροφής
- Απόρριψη επεξεργασμένων λυμάτων
- Τροφοδοσία υπόγειων υδροφορέων
- Επιστρέφουν στη θάλασσα το μεγαλύτερο τμήμα του νερού που εισέρχεται σε αυτά

Για να γίνει κατανοητός ο υδρολογικός κύκλος είναι σημαντική η έννοια των λεκανών απορροής των ποταμών. Λεκάνη απορροής είναι η εδαφική έκταση όπου βρίσκεται το ποτάμι και οι παραποτάμοι του, ακόμα και τα μικρά ρυάκια καταλήγουν σε αυτό. Πιο συγκεκριμένα λεκάνη απορροής είναι οι γεωγραφικές περιοχές όπου τα νερά συνεισφέρουν στην απορροή που περνά από τη θέση αυτή του υδατορεύματος. Οι λεκάνες απορροής είναι πολύ σημαντικές καθώς η ποσότητα και η ποιότητα του νερού στα ποτάμια εξαρτώνται από ότι συμβαίνει μέσα σε αυτές, είτε το χει προκαλέσει ο άνθρωπος, είτε όχι. Η ροή στα υδατορεύματα αλλάζει συνεχώς με το χρόνο. Ο βασικός παράγοντας ο οποίος επηρεάζει την παροχή του νερού είναι η απορροή των κατακρημνισμάτων από τη λεκάνη. Ακόμα και μακριά από τη ροή, η βροχή αυξάνει τη στάθμη του νερού των ποταμών, ακόμα και αν βρέξει πολύ ψηλά στη λεκάνη απορροής. Το μέγεθος του ποταμού εξαρτάται από το μέγεθος της λεκάνης απορροής του. Επίσης η στάθμη των μεγάλων ποταμών αλλάζει πιο αργά από τη στάθμη των μικρών. (Κατσάβρια Βασιλική, 2012)

1.1.1.12. Αποθήκευση γλυκού νερού

Το γλυκό νερό που βρίσκεται στην επιφάνεια του εδάφους είναι ένα από τα μέρη του υδρολογικού κύκλου που είναι ζωτικής σημασίας για τη ζωή πάνω στη γη. Το επιφανειακό νερό περιλαμβάνει υδατορεύματα, λίμνες, ταμειυτήρες και υγρότοπους γλυκού νερού. Λόγω της μεταβολής των εισροών και των εκροών η ποσότητα του νερού μεταβάλλεται συνεχώς στις λίμνες και τα ποτάμια. Τέλος λόγω φυσικών ή ανθρωπογενών διεργασιών η ποσότητα και η θέση του επιφανειακού νερού αλλάζει στο χώρο και το χρόνο. (Κατσάβρια Βασιλική, 2012)

1.1.1.13. Διήθηση

Διήθηση είναι η προς τα κάτω κίνηση του νερού από την επιφάνεια προς τα εδαφικά στρώματα και πετρώματα. Το υπόγειο νερό ξεκινά ως κατακρήμνισμα και στη συνέχεια διηθείται στο έδαφος. Ανάλογα με διάφορους παράγοντες ένα τμήμα του νερού που διηθείται παραμένει κοντά στην επιφάνεια ενώ ένα άλλο διηθείται βαθιά και τροφοδοτεί τους υπόγειους υδροφορείς. Το νερό μπορεί να ταξιδέψει μεγάλες αποστάσεις ή να μείνει αποθηκευμένο ως υπόγειο νερό για μεγάλα χρονικά διαστήματα πριν επανέλθει στην επιφάνεια μπαίνοντας σε ποτάμια ή θάλασσα. Όταν το νερό διηθείται στο υπέδαφος σχηματίζεται μια κορεσμένη και μια ακόρεστη ζώνη, όπου στην ακόρεστη υπάρχει και νερό και αέρας, ενώ στην κορεσμένη μόνο νερό. Το ανω μέρος της εδαφικής ζώνης είναι το έδαφος. (Κατσάβρια Βασιλική, 2012)

1.1.1.14. Αποθήκευση υπόγειου νερού

Το αποθηκευμένο υπόγειο νερό είναι αυτό που μένει κάτω από την επιφάνεια της γης για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Από πολύ παλιά μέχρι και σήμερα οι άνθρωποι χρησιμοποιούν αυτό το νερό κυρίως για ανάγκες άρδευσης και ύδρευσης. Το νερό αυτό συνεχίζει να αποτελεί μέρος του υδρολογικού κύκλου παρόλο που κινείται με μικρές ταχύτητες. Το περισσότερο νερό από αυτό προέρχεται από την κατακρήμνιση. Το υπόγειο νερό αποτελεί την κορεσμένη ζώνη η οποία βρίσκεται κάτω από την ακόρεστη. Η αποθήκη του υπόγειου νερού ονομάζεται υδροφορέας. (Κατσάβρια Βασιλική, 2012)

1.1.1.15. Εκφόρτιση υπόγειου νερού

Όπως προαναφέρθηκε ένα μέρος των κατακρημνισμάτων διηθείται και μετατρέπεται σε υπόγειο νερό. Ένα μέρος του νερού αυτού κινείται κοντά στην επιφάνεια και ξαναβγαίνει γρήγορα με την μορφή απορροής προς ποταμούς και θάλασσες. Σε αντίθεση, ένα άλλο μεγάλο μέρος συνεχίζει την πορεία του προς τα βαθύτερα στρώματα και κινείται υπόγεια. Η κατεύθυνση και η ταχύτητα του συγκεκριμένου νερού εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του υδροφορέα και από το πορώδες των στρώσεων. Αν το υπεδάφιο στρώμα επιτρέπει στο νερό να κινείται γρήγορα τότε μπορεί να διανύσει μεγάλες αποστάσεις μέσα σε μικρό χρονικό διάστημα, αλλιώς βυθίζεται σε βαθύτερα στρώματα και κάνει χιλιάδες χρόνια μέχρι να ξαναβγει στην επιφάνεια.

1.1.1.16. Πηγές

Πηγές ονομάζονται τα σημεία που το υπόγειο νερό βγαίνει στην επιφάνεια. Δηλαδή το νερό υπερχειλίζει προς την επιφάνεια, όταν ένας υδροφορέας γεμίσει με νερό και δημιουργούνται οι πηγές. Υπάρχουν μικρές και μεγάλες πηγές οι οποίες μπορούν να δημιουργηθούν σε κάθε τύπου πέτρωμα αλλά είναι συνηθέστερες σε ασβεστόλιθο και δολομίτη οι οποίοι διαλύονται από το νερό, ιδιαίτερα όταν έχουν ρωγμές. Αυτά τα

πετρώματα έχουν μεγάλη διαπερατότητα και έτσι απορροφούν μεγάλες ποσότητες κατακρημνισμάτων με αποτέλεσμα να αυξάνεται η πιθανότητα εμφάνισης πηγών.

1.2. Υπόγεια ύδατα

Ο συνολικός όγκος νερού στη γη εκτιμάται γύρω στα 1360 εκατομμύρια κυβικά χιλιόμετρα εκ των οποίων τα 8 είναι υπόγεια νερά με ποσοστό 6% του συνόλου. Ο όγκος όμως αυτός των υπόγειων υδάτων αντιστοιχεί σε ποσοστό 98% του εκμεταλλεύσιμου νερού σε υγρή κατάσταση καθώς το ποσοστό του νερού των ποταμών και των λιμνών είναι μικρότερο του 0,03% του συνολικού όγκου. Όμως τα υπόγεια νερά βρίσκονται σε πολύ μεγάλα βάθη τα οποία δεν επιτρέπουν την χρήση τους λόγω της χαμηλής ποιότητας τους και της κοστοβόρας άντλησής τους. Η ανανέωση των εκμεταλλεύσιμων υπόγειων νερών γίνεται με τη διήθηση ενός ποσοστού των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, ενώ από την άλλη μεριά ένα μεγάλο τους τμήμα χάνεται καθώς εκφορτίζεται σε ωκεανούς και θάλασσες. (Γ.Τσακίρης,2013)

Τα τελευταία χρόνια όμως μελέτες έχουν συμπεράνει ότι αυξάνεται σταδιακά η θερμοκρασία και προβλέπεται μείωση των κατακρημνίσεων. Το γεγονός αυτό σε συνδιασμό με την υπερεκμετάλλευση των υπόγειων υδάτων έχει μειώσει κατά πολύ τα αποθέματα νερού καθώς και την ποιότητα του.

Επίσης η μόλυνση του νερού και η ρύπανση του εδάφους έχουν αναγνωριστεί ως ιδιαίτερα σημαντικά προβλήματα πάνω από 20 χρόνια. Η παρακολούθηση για την αποκατάσταση των μολυσμένων περιοχών αποδείχθηκε χρονοβόρα και πολύ δαπανηρή για το λόγο αυτό γίνεται όλο και πιο αναγκαία η δημιουργία μοντέλων ρύπανσης του υπεδάφους στον τομέα της λήψεως αποφάσεων για την αντιμετώπιση των προβλημάτων.

1.3. Πηγές ρύπανσης υπόγειων υδάτων

Οι κατηγορίες των πηγών ρύπανσης είναι οι εξής:

- I. Πηγές που έχουν σχεδιαστεί για απόρριψη διαφόρων ουσιών όπως:
 - Υπόγειες δεξαμενές αποχέτευσεων
 - Φρέατα αποχέτευσης
 - Χρήσεις γαιών

- II. Πηγές που έχουν σχεδιαστεί για την αποθήκευση, κατεργασία και ίσως και την απόρριψη ουσιών όπως:
 - ΧΥΤΑ
 - Χώροι εναπόθεσης αποβλήτων
 - Επιφανειακές κοιλότητες (λάκκοι,στέρνες, λιμνοθάλασσες)
 - Απόβλητα ορυχείων
 - Σωροί υλικών
 - Νεκροταφεία

- Χώροι ταφής ζώων
 - Υπεράνω του εδάφους δεξαμενές
 - Υπόγειες δεξαμενές
 - Χώροι ανοικτής καύσης
 - Χώροι ραδιενεργών αποβλήτων
- III. Πηγές που έχουν σχεδιαστεί να περιέχουν ουσίες κατά τη διάρκεια μεταφοράς τους όπως:
- Συστήματα σωληνώσεων
 - Υλικά που μεταφέρονται και μεταγγίζονται
- IV. Πηγές συνέπεια άλλων σχεδιασμένων δραστηριοτήτων όπως:
- Άρδευση
 - Χρήση μυκητοκτόνων
 - Χρήση λιπασμάτων
 - Απόβλητα από χώρους εκτροφής ζώων
 - Χρήση αλατιού για αποπαγοποίηση
 - Χρήση αποσκληριντικών ύδατος
 - Επιφανειακή απορροή
 - Διείσδυση από ατμοσφαιρικούς ρυπαντές
- V. Πηγές που γίνονται δίοδοι ρυπασμένου ύδατος προς τους υδροφορείς:
- Φρέατα παραγωγής
 - Φρέατα μετρήσεων και παρατηρήσεων
 - Εκσκαφές δομικών έργων
- VI. Φυσικές πηγές αποτέλεσμα ανθρωπίνων δραστηριοτήτων όπως:
- Αλληλοεπιδράσεις υπογείων και επιφανειακών υδάτων
 - Φυσικές διαρροές
 - Εισροή θαλάσσιου ύδατος εντός υδροφόρων «γλυκού» ύδατος.

1.4. Βασικές κατηγορίες ρύπων των υπόγειων υδάτων

Οι ρύποι του υπόγειου νερού χωρίζονται σε οργανικούς και ανόργανους. Οι οργανικοί ρύποι μεγάλου μοριακού βάρους κινούνται πιο αργά προς το υπόγειο νερό από αυτούς με μικρότερο μοριακό βάρος. Επίσης παίζει σημαντικό ρόλο στην μετακίνησή τους και η πυκνότητά τους.

Κάποιοι σημαντικοί οργανικοί και ανόργανοι ρύποι είναι οι εξής:

Οργανικοί

- BOD : Δεν είναι τόσο σημαντικής σημασίας όσο στα επιφανειακά ύδατα

- COD: Δύσκολο να μετρηθεί το πραγματικό λόγω του ότι μετράει και διαλυμένα μέταλλα
- TOC: Μέτρηση του ολικού οργανικού άνθρακα
- Μικροβιολογικοί ρύποι (COLIFORMS→ FECALSTREPTOCOCCI)
- Τοξικές και επικίνδυνες ουσίες (Hg,Cb,Fe,Cu,Pb,Zn,Cr,As)

Ανόργανοι

- Ολικά στερεά ή ολικό υπόλοιπο (TS), όπου είναι η μάζα των στερεών ανά μονάδα όγκου ύδατος που παραμένει μετά από εξάτμιση.
- Ολικά αιωρούμενα στερεά- Ολικά μη διαπερατά από το φίλτρο (TSS)- η μάζα ανά μονάδα όγκου που παραμένει στο φίλτρο.
- Ολικά διαλυμένα στερεά (TDS), όπου $TDS = TS - TSS$, συνήθως στην πλειοψηφία τους είναι ανόργανα άλατα
- Φώσφορος (απορρυπαντικά, λιπάσματα, απορρίματα)
- Νάτριο (σε υψηλά επίπεδα ελαττώνει την μεταβιβασιμότητα του εδάφους)
- Άζωτο

Τα τελευταία χρόνια έχει παρουσιάσει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην παρουσία των μη αναμίξιμων με το νερό υγρών ρύπων (NAPLs) στην ακόρεστη ζώνη. Τα υγρά αυτά εμφανίζουν μία χωριστή υγρή φάση στο υδάτινο περιβάλλον. Γενικά, τα NAPLs είναι υγρά τα οποία έχουν πυκνότητα μεγαλύτερη ή μικρότερη από του νερού και διακρίνονται στις εξής κατηγορίες :

- Τα LNAPLs που είναι τα μη αναμίξιμα με το νερό υγρά με πυκνότητα μικρότερη από το νερό(υγρά καύσιμα των υδρογονανθράκων όπως η βενζίνη, το πετρέλαιο θέρμανσης, η κηροζίνη) και σε
- DNAPLs που έχουν πυκνότητα μεγαλύτερη από το νερό [χλωριωμένοι υδρογονάνθρακες όπως οι τετραχλωράνθρακες, το 1,1,1 τριχλωροαιθάνιο, οι χλωροφαινόλες, τα χλωροβενζόλια, τα τετραχλωροαιθυλένια και τα πολυχλωριωμένα διφαινύλια (PCBs)].

Η σημασία των NAPLs στα υπόγεια νερά οφείλεται στην εμμονή τους κάτω από το έδαφος και την ικανότητα που έχουν να ρυπαίνουν μεγάλους όγκους νερού λόγω της μικρής δυνατότητας απομάκρυνσης τους.

Η μετακίνηση των ουσιών αυτών στο έδαφος εξαρτάται από τα εξής:

- Την ποσότητα που ελευθερώνεται στο έδαφος
- Τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους
- και τη δομή του εδάφους δια μέσου του οποίου μετακινούνται

Οι ραδιενεργοί ρύποι (ραδιονουκλείδια) είναι επικίνδυνοι όχι τόσο λόγω των χημικών τους ιδιοτήτ

ων, αλλά κυρίως λόγω της ραδιενέργειας που εκπέμπουν κατά τη μεταστοιχείωσή τους. Το πιο σύνηθες ραδιενεργό στοιχείο που εντοπίζεται στο υπόγειο νερό είναι το ραδόνιο, το οποίο είναι αέριο ευδιάλυτο στο νερό, προερχόμενο από τη λιθόσφαιρα.

Οι πιο σπουδαίοι μικροοργανισμοί στα υπόγεια νερά είναι τα παθογόνα βακτήρια, οι μύκητες και διάφορα άλλα παράσιτα. Τα σοβαρότερα προβλήματα υγείας που προκαλούνται από τους μικροοργανισμούς του υπόγειου νερού είναι ο τύφος, η χολέρα και η ηπατίτιδα. Οι πηγές των μικροοργανισμών είναι τα ανθρώπινα και ζωικά λύματα και απόβλητα.

1.5. Μηχανισμοί μεταφοράς ρύπων στα υπόγεια νερά

➤ Οι φυσικοί μηχανισμοί που συντελούν στη μεταφορά των ρύπων είναι:

- **Μεταφορά λόγω διαφοράς συγκεντρώσεων - Διάχυση**

Μία διαλυμένη ουσία στο νερό κινείται από μία περιοχή υψηλής συγκέντρωσης προς μία άλλη χαμηλής συγκέντρωσης. Αυτό είναι γνωστό ως 'μοριακή διάχυση' ή 'διάχυση'. Διάχυση συμβαίνει όσο υπάρχει μεταβολή συγκέντρωσης ακόμη και εάν το υγρό δεν κινείται.

- **Συμμεταφορά**

Διαλυμένες ουσίες μεταφέρονται με την ροή υπογείων υδάτων. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται 'συναγωγή'. Η ποσότητα της ουσίας που μεταφέρεται είναι συνάρτηση της συγκέντρωσής της στα υπόγεια ύδατα και της ποσότητας του νερού της υπόγειας ροής.

- **Μηχανική διασπορά**

Τα υπόγεια ύδατα κινούνται με ταχύτητες που μπορεί να είναι είτε μικρότερες είτε μεγαλύτερες από την μέση γραμμική ταχύτητα.

- **Υδροδυναμική διασπορά**

Εκφράζεται σαν το άθροισμα της μηχανικής διασποράς και της διάχυσης.

➤ Ενώ οι χημικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα είναι:

- **Σχηματισμός χημικών συμπλόκων:** Είναι μία διαδικασία κατά την οποία δύο ή περισσότερα ιόντα του διαλύματος συνδέονται και σχηματίζουν μία νέα ένωση η οποία μπορεί να παρουσιάζει μικρότερη ή μεγαλύτερη κινητικότητα από ότι τα ιόντα από τα οποία αποτελείται. Για παράδειγμα τα ιόντα των βαρέων μετάλλων σε συνδυασμό με χλώριο και οργανικές ενώσεις δημιουργούν ενώσεις που παραμένουν στο εδαφικό διάλυμα και παρουσιάζουν μεγαλύτερη κινητικότητα

επειδή δεν επηρεάζονται από τις διαδικασίες καθίζησης και προσρόφησης. Από την άλλη μεριά μειώνεται η κινητικότητά τους όταν συνδυαστούν με χουμικές οργανικές ουσίες και υδροξειδία μετάλλων που προσροφούνται από τα στερεά του εδάφους.

- **Εξουδετέρωση:** Το pH είναι ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τη διαλυτότητα των ουσιών μέσα στα υπόγεια νερά. Πολλές ενώσεις και στοιχεία, ιδιαίτερα τα κατιόντα έχουν μεγαλύτερη διαλυτότητα σε χαμηλό pH (όξινες συνθήκες). Από τα ιόντα μόνο το H^+ , Ca^{++} , NO_3^- και Cl^- μπορούν να βρεθούν στα υπόγεια νερά για όλη την κλίμακα τιμών του pH των φυσικών νερών. Η βασική ρυθμιστική ικανότητα των περισσοτέρων υδροφορέων είναι τα διαλυμένα ανθρακικά, τα οποία εξαρτώνται από την παρουσία ανθρακούχων υλικών στον υδροφορέα. Η ρυθμιστική ικανότητα των αλκαλικών διαλυμάτων ($pH > 9$) προέρχεται από το πυριτικό αργίλιο. Οι υδροφορείς με μικτή λιθολογική σύνθεση από πυριτικά και ανθρακικά υλικά παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη ρυθμιστική ικανότητα. Αντίθετα, πυριτικές ή χαλαζιακές άμμοι έχουν πολύ μικρή ρυθμιστική ικανότητα τόσο σε όξινες όσο και σε αλκαλικές συνθήκες. (Μενέλαος Ε.Θεοχάρης, 2013)
- **Διαδικασίες οξειδοαναγωγής.** Η διαδικασία αυτή παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στον έλεγχο της χημείας των υπόγειων νερών όσον αφορά το σίδηρο και άλλα μετακινούμενα στοιχεία. Στους ελεύθερους υδροφορείς, οι περιοχές εμπλουτισμού έχουν αερόβιες συνθήκες, ενώ στους κλειστούς οι συνθήκες είναι πλήρως ανοξικές. Οι διαλυμένες οργανικές ενώσεις των εκπλυμάτων συχνά κινούνται προς περιοχές με ανοξικές συνθήκες τόσο στην ακόρεστη ζώνη όσο και στα υπόγεια νερά που βρίσκονται ακριβώς κάτω από την πηγή ρύπανσης. Αν οι συνθήκες είναι αερόβιες στο υπόγειο νερό αναμένονται οι παρακάτω αντιδράσεις καθώς το νερό γίνεται ανοξικό: μείωση του διαλυμένου οξυγόνου και εξαφάνισή του, απονιτροποίηση, εμφάνιση των διαλυμένων ιόντων σιδήρου και Mn^{2+} αναγωγή των θεικών σε θειώδη, του διοξειδίου του άνθρακα σε μεθάνιο και του αζώτου σε αμμωνία. Η αύξηση του περιεχόμενου οξυγόνου στο αρχικά ανοξικό υπόγειο νερό οδηγεί στην παρακάτω σειρά αντιδράσεων: οξείδωση των διαλυμένων οργανικών ουσιών - μετατροπή των θειωδών σε θειικά - μετατροπή των υποσιδηρούχων (Fe^{2+}) σε σιδηρούχα (Fe^{3+}) ιόντα, με καταβύθιση των οξειδίων σιδήρου - 25 οξείδωση της αμμωνίας σε νιτρικά - οξείδωση του διαλυμένου μαγνησίου και καταβύθιση των υδροξειλικών μορφών. (Μενέλαος Ε.Θεοχάρης, 2013)
- **Κατακρήμνιση - επαναδιάλυση:** Η παρουσία υψηλών συγκεντρώσεων των ανιόντων, όπως των ανθρακούχων, φωσφορικών, υδροξειδίων, θεικών και πυριτικών μπορεί να οδηγήσει σε κατακρήμνιση των αδιάλυτων κατιόντων ειδικά των πολυσθενικών βαρέων μετάλλων. Εντούτοις, εάν η αντίδραση κατακρήμνισης περιλαμβάνει μεταβολή στο σθένος των κατιόντων ή δημιουργηθεί μεταβολή στην κατάσταση του οξυγόνου του διαλύματος, θα προκληθεί διαλυτοποίηση και επιστροφή κάποιων ιόντων στο διάλυμα. Το αρχικό pH και η μερική πίεση του διοξειδίου του άνθρακα είναι οι πιο σημαντικές παράμετροι που επηρεάζουν τη διαλυτότητα. (Μενέλαος Ε.Θεοχάρης)
- **Αντιδράσεις προσρόφησης:** Η διαδικασία ιοντοανταλλαγής (προσρόφηση) γίνεται όταν κατιόντα και σε μικρή έκταση κάποια ανιόντα του διαλύματος αντικαθιστούν άλλα κατιόντα από τα αργιλικά υλικά του εδάφους. Η απομάκρυνση των βαρέων μετάλλων με αυτή τη διαδικασία ελευθερώνει ισοδύναμες ποσότητες των υψηλότερης αλκαλικότητας μετάλλων, όπως Na, K, και Ca, στο εδαφικό διάλυμα. Η

μεταβολή στις συνθήκες χημικής ισορροπίας του διαλύματος με μείωση του pH ή με έκπλυση των αργιλωδών υλικών από πιο αραιό διάλυμα, μπορεί να οδηγήσει σε επιστροφή ορισμένων προσροφημένων κατιόντων στο διάλυμα (εκρόφηση).

- **Βιοχημικές διαδικασίες:** Η αναερόβια διάσπαση των οργανικών ουσιών σε μεθάνιο, διοξείδιο του άνθρακα και νερό είναι μια βιοχημική διαδικασία που συμβαίνει μέσα στις χωματερές και στους υδροφορείς όπου συνεχίζουν να υπάρχουν αναερόβιες συνθήκες. Αποικοδόμηση των οργανικών ουσιών γίνεται επίσης στις αερόβιες συνθήκες στα όρια των πλουμίων ρύπανσης. Στις ίδιες αντιδράσεις ανήκει η αξιοποίηση από το μικροβιακό πληθυσμό των υπόγειων νερών των ανόργανων στοιχείων N, C, P και S και ορισμένων ιχνοστοιχείων για τη σύνθεση των κυττάρων τους και έτσι τα απομακρύνουν μόνιμα από το εδαφικό διάλυμα. (Μενέλαος Ε.Θεοχάρης)

1.6. Προστασία υδροληπτικού έργου

Σε κάθε υδροληπτικό έργο καθορίζεται μια περίμετρος προστασίας για την ποιοτική προστασία του υπό εκμετάλλευση υδροφόρου ορίζοντα. Ανάλογα με τη νομοθεσία της κάθε χώρας, ποικίλουν τα κριτήρια καθορισμού της περιμέτρου προστασίας και περιλαμβάνουν ένα κατάλογο από απαγορευτικές ανθρώπινες δραστηριότητες που μπορεί να έχουν αρνητικές επιπτώσεις στην ποιότητα των υπόγειων νερών. Οι επιπτώσεις των διαφόρων πηγών ρύπανσης εξαρτώνται από την απόσταση από το υδροληπτικό έργο, τις ιδιότητες του ρύπου, καθώς και τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του υδροφόρου ορίζοντα και τη φύση των υλικών πάνω από αυτόν. Έτσι διακρίνονται οι εξής περιπτώσεις:

- 1) Ευνοϊκές συνθήκες: Το υδροφόρο στρώμα προστατεύεται από την παρουσία υλικών της ακόρεστης ζώνης με μεγάλη ικανότητα αυτοκαθαρισμού.
- 2) Μέτριες συνθήκες: Το υδροφόρο στρώμα έχει καλές ιδιότητες αυτοκαθαρισμού.
- 3) Δυσμενείς συνθήκες: Το υδροφόρο στρώμα έχει ελάχιστη ή καθόλου ικανότητα αυτοκαθαρισμού.

Όσο μικρότερη είναι η απόσταση της πηγής ρύπανσης από το υδροληπτικό έργο τόσο πιο μεγάλος είναι ο κίνδυνος για τον εκμεταλλευόμενο υπόγειο υδροφορέα. Έτσι η περιοχή προστασίας υποδιαιρείται σε επιμέρους ζώνες, που χωρίζονται ανάλογα με την επίδραση που μπορεί να έχει μια πηγή ρύπανσης. Οι ζώνες προστασίας καθορίζονται με βάση τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα και των ανώτερων οριζόντων που τον καλύπτουν, καθώς και την ικανότητα αυτοκαθαρισμού του εδαφικού ορίζοντα και της ακόρεστης ζώνης.

Οι ζώνες προστασίας ενός υδροληπτικού έργου είναι οι ακόλουθες:

1. Ζώνη προστασίας I (άμεσης προστασίας ή απαγορευμένη ζώνη) . Αυτή η ζώνη προστατεύει τον άμεσο χώρο γύρω από το υδροληπτικό έργο από οποιαδήποτε επίδραση προκύψει από επιφανειακό παράγοντα. Στην περίπτωση γεώτρησης περιλαμβάνει τον χώρο γύρω της σε ακτίνα 10-30 m. Στην περίπτωση πηγής περιλαμβάνει τις εγκαταστάσεις, την πλησιέστερη περιοχή ανάντη αυτής (>20 m) και τον χώρο κατάντη (2-5 m). Στη ζώνη I απαγορεύονται οι δραστηριότητες που αναφέρονται στις υποζώνες IIA, IIB, IIIA και IIIB,

καθώς επίσης και η κυκλοφορία οχημάτων, κάθε γεωργική δραστηριότητα και κάθε δραστηριότητα που επιδρά στον εδαφικό ορίζοντα και στην ακόρεστη ζώνη.

2. Ζώνη προστασίας II (ζώνη μικροβιολογικής προστασίας ή ζώνη 50 ημερών) : Η ζώνη αυτή προστατεύει το υδροληπτικό έργο από διάφορες ανθρώπινες δραστηριότητες, ιδιαίτερα από μια ενδεχόμενη μικροβιακή μόλυνση. Επειδή τα μικρόβια και ιδίως οι παθογόνοι μικροοργανισμοί έχουν χρόνο ζωής στον υδροφόρο ορίζοντα περίπου 50 ημέρες, ονομάζεται ζώνη μικροβιολογικής προστασίας ή ζώνη 50 ημερών. Η εξαφάνιση των μικροβίων εξαρτάται από την ταχύτητα ροής, τη λιθολογική σύσταση του υδροφορέα, τις διαδικασίες προσρόφησης, το χημισμό του υπόγειου νερού, το πάχος της ακόρεστης ζώνης κ.λπ. Ανάλογα με τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του υδροφόρου ορίζοντα (ταχύτητα υπόγειας ροής) υποδιαιρείται σε δύο υποζώνες:

- Υποζώνη IIA: Επεκτείνεται από τα όρια της ζώνης I μέχρι την ισόχρονη γραμμή των 10 ημερών. Η απόσταση αυτή πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 100 m, ανάντη του υδροληπτικού έργου. Εκατέρωθεν της γεώτρησης επεκτείνεται μέχρι τα όρια της ακτίνας επίδρασης της γεώτρησης, χωρίς να υπερβαίνει τα όρια της ζώνης ανάκτησης. Στην υποζώνη αυτή απαγορεύονται οι δραστηριότητες που αναφέρονται στις υποζώνες IIB, IIIA και IIIB, καθώς και κάθε γεωργική και κατασκευαστική δραστηριότητα.

Υποζώνη IIB: Επεκτείνεται από τα όρια της ισόχρονης γραμμής των 10 ημερών μέχρι τα όρια της ισόχρονης γραμμής των 50 ημερών. Στην υποζώνη αυτή απαγορεύεται κυρίως ότι αναφέρεται στις υποζώνες IIIA και IIIB, καθώς επίσης και η εγκατάσταση εργοστασίων, δημιουργία χώρων αναψυχής, βοσκή ζώων, μεταλλευτικά έργα και εκρήξεις, εγκατάσταση ιχθυοτροφείων, μεταφορά ραδιενεργών υλικών και ρύπων, δημιουργία λατομείων, αποθήκευση ορυκτελαίων και δομικών υλικών, χρησιμοποίηση λιπασμάτων, ανάπτυξη έργων υποδομής με παρεμβάσεις στο έδαφος κ.λπ.

3. Ζώνη προστασίας III (ζώνη χημικής προστασίας ή επιτηρούμενη ζώνη) : Καλύπτει την απομακρυσμένη περιοχή τροφοδοσίας της γεώτρησης και περιβάλλει τη ζώνη II. Η ζώνη αυτή προστατεύει τον υδροφόρο ορίζοντα από χημικές ουσίες και ραδιενεργά απόβλητα. Υποδιαιρείται σε δύο υποζώνες:

- Υποζώνη IIIA Επεκτείνεται σε απόσταση μέχρι 2000 m από το υδροληπτικό έργο. Όταν η ταχύτητα του υπόγειου νερού είναι μεγαλύτερη από 10 m/day και προκύπτει μεγάλη ακτίνα για τη ζώνη II, θα πρέπει η υποζώνη IIIA να καλύπτει τα όρια της ισόχρονης γραμμής των 50 ημερών. Στην υποζώνη αυτή απαγορεύεται η εγκατάσταση κτηνοτροφικών μονάδων, διύλιστηρίων, χώρων υγειονομικής ταφής απορριμμάτων, νεκροταφείων, χώρων διάθεσης λυμάτων και αποβλήτων, βιομηχανιών εφόσον τα απόβλητά τους δεν απορρίπτονται εκτός της υποζώνης IIIA και τέλος η χρήση φυτοφαρμάκων, εντομοκτόνων και λιπασμάτων.

- Υποζώνη IIIB Επεκτείνεται μέχρι τα όρια του υπόγειου υδροκρίτη. Στην υποζώνη αυτή απαγορεύεται η εγκατάσταση εργοστασίων που αποβάλλουν ραδιενεργές ουσίες, χημικών και μεταλλευτικών εργοστασίων, πυρηνικών αντιδραστηρίων και ελαιοτριβείων. Επίσης απαγορεύεται η διάθεση στο έδαφος τοξικών ουσιών, φυτοφαρμάκων, εντομοκτόνων, φαινολών κ.λπ., καθώς και η μεταφορά ουσιών που ρυπαίνουν. Η απόσταση των ορίων IIIA/IIIB δεν πρέπει να είναι μικρότερη από 1000 m.

1.7. Αντιμετώπιση της ρύπανσης

Η αποκατάσταση της ρύπανσης των υπόγειων υδάτων σε αποδεκτά πρότυπα ποιότητας είναι μια διαδικασία που περιλαμβάνει, στις περισσότερες περιπτώσεις, τον συνδιασμό διαφόρων μεθόδων για τη μέγιστη απόδοση της διαδικασίας επεξεργασίας. Οι προσεγγίσεις αποκατάστασης των υπόγειων υδάτων από τη μόλυνση μπορεί να επιτευχθεί κυρίως με τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις :

- Απομάκρυνση των υπόγειων υδάτων , όπου συνήθως γίνεται περαιτέρω επεξεργασία τους
- Επιτόπια επεξεργασία καθαρισμού
- Καθαρισμός νερού σε μία περιορισμένη περιοχή γύρω από το φρεάτιο άντλησης .

Οι κυριότερες μέθοδοι και τεχνικές απορρύπανσης των υδροφορέων και του εδάφους είναι οι εξής (Καλλέργης, 2000) :

- Έλεγχος της πηγής ρύπανσης με μείωση του όγκου του ρυπαντή και φυσική-χημική εξουδετέρωση του:**
 - Ελαχιστοποίηση ή πρόληψη της ρύπανσης των υδροφορέων
 - Μείωση του όγκου του ρυπαντή ή εξουδετέρωση του φυσικού ή χημικού του χαρακτήρα
- Συστήματα υδρογεωτρήσεων**, όπως συστοιχίες ρηχών γεωτρήσεων , βαθιές γεωτρήσεις, υδραυλικός φραγμός, σύνθετα συστήματα, συστήματα αφαίρεσης μη αντιδρώντων ρυπαντών (υδρογονάνθρακες) :
 - Έλεγχος της υδραυλικής κλίσης και μέσω αυτής, της υπόγειας ροής με άντληση ή έκχυση νερού
 - Απόλυση του μολυσμένου νερού ή/και του επιπλέοντος ρυπαντή (υδρογονάνθρακες)
- Συστήματα σύλληψης**, όπως στραγγιστήρια (συλλεκτήρια συστήματα σταγγιδίων-στραγγιστήρια εκτόνωσης) και τάφροι συλλογής με άντληση ή βαρυτική ροή :

Τα συστήματα σύλληψης, είναι εσκαφές στην κορεσμένη ζώνη, εξοπλισμένες με σωλήνα. Η εκσκαφή μπορεί να είναι ανοιχτή ή πληρωμένη με χαλίκι, πάνω από το σωλήνα. Οι ανοιχτές εκσκαφές μπορεί να είναι ενεργές (άντληση) ή παθητικές (βαρυτική ροή). Προσομοιώνονται με συστοιχίες γεωτρήσεων άντλησης, που δημιουργούν έναν εκτεταμένο κώνο κατάπτωσης σε όλο το μήκος της εκσκαφής.
- Έλεγχος των επιφανειακών νερών** (φυσική εξουδετέρωση, επένδυση, αποχέτευση και συνδιασμός) :

Ελαχιστοποίηση των αφίξεων επιφανειακών νερών και της κατείσδυσης, μέσω αποχέτευσης, επένδυσης-στεγανοποίησης ή/και εξουδετέρωση του ρυπαντή με προσρόφηση.
- Φραγμοί (στεγανοί)**, όπως πασσαλοσανίδες, κουρτίνες στεγανοποίησης και διαφράγματα από υδαρές υλικό:

Διοχέτευση υλικού μικρής υδροπερατότητας στο υπέδαφος, όπως πασσαλοσανίδες (άμεση στεγανοποίηση), τιμεντενέσεις, διοχέτευση ενέματος σε πηγάδια ή τάφρους (απαιτείται περίοδος στερεοποίησης).

- vi. **Επεξεργασία του υπόγειου νερού στην επιφάνεια ή στο υπέδαφος:**
Αεροδιαχωρισμός οργανικών ρυπαντών, αεροδιασπορά, βιοαπορύπανση, προσρόφηση από ενεργό άνθρακα. Για την αφαίρεση των μετάλλων και των ανόργανων ρυπαντών χρησιμοποιείται η χημική καθίζηση. (Κατσάβρια Βασιλική, 2012)

1.8. Κριτήρια ποιότητας νερού

Για οποιαδήποτε χρήση του νερού, η κατάλληλότητα του εξαρτάται από την ποιότητα του ανάλογα με τη χρήση για την οποία προορίζεται. Σήμερα έχουν καθοριστεί παγκόσμια κριτήρια ποιότητας του νερού ανάλογα με τη χρήση του που ονομάζονται σταθερότυπα.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι βασικότερες χημικές παράμετροι του υπόγειου νερού:

pH	Το φυσικό νερό έχει pH = 7. Συνήθως η τιμή του pH στο υπόγειο νερό κυμαίνεται από 7,2 – 7,7										
Ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC)	Το ενδεικτικό επίπεδο της αγωγιμότητας στο πόσιμο νερό είναι 400 mS/cm										
Σκληρότητα	<p>Το υπόγειο νερό με βάση τη σκληρότητα του χαρακτηρίζεται ως (Sawyer – McCarty, από Καλλέργη, 1986) :</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Χαρακτηρισμός</th><th>Ισοδύναμο CaCO₃ σε mg/L</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Μαλακό</td><td>0-75</td></tr> <tr> <td>Μέτρια σκληρό</td><td>76-150</td></tr> <tr> <td>Σκληρό</td><td>150-300</td></tr> <tr> <td>Πολύ σκληρό</td><td>>300</td></tr> </tbody> </table>	Χαρακτηρισμός	Ισοδύναμο CaCO ₃ σε mg/L	Μαλακό	0-75	Μέτρια σκληρό	76-150	Σκληρό	150-300	Πολύ σκληρό	>300
Χαρακτηρισμός	Ισοδύναμο CaCO ₃ σε mg/L										
Μαλακό	0-75										
Μέτρια σκληρό	76-150										
Σκληρό	150-300										
Πολύ σκληρό	>300										
Κατιόντα⁺⁺											
- Ασβέστιο (Ca ²⁺)	Η περιεκτικότητα του στα υπόγεια νερά κυμαίνεται συνήθως από 10 έως 100 mg/L.										
- Μαγνήσιο (Mg ²⁺)	Η περιεκτικότητα του στα υπόγεια νερά υπολογίζεται συνήθως στα 50 mg/L.										
- Κάλιο (K ⁺)	Γενικά η συγκέντρωση του στο υπόγειο νερό είναι μικρότερη των 10 mg/L.										
- Νάτριο (Na ⁺)	Η μέση συγκέντρωση του στα υπόγεια νερά είναι μικρότερη των 200 mg/L.										
Ανιόντα⁺⁺											
- Θειικά (SO ₄ ⁻²)	η συγκέντρωση του στα υπόγεια νερά δεν υπερβαίνει τα 300 mg/L.										
- Όξινα ανθρακικά (HCO ₃)	Παρουσιάζεται με συγκεντρώσεις στο υπόγειο νερό που είναι συνήθως μικρότερες από 500 mg/L.										

Πίνακας 1. Βασικότερες χημικές παράμετροι του υπόγειου νερού

Κεφάλαιο 2: Τρωτότητα υπόγειου νερού- Μέθοδος DRASTIC-LU

2.1. Η έννοια της τρωτότητας

Τρωτότητα ή ρυπαντική επιδεκτικότητα ή ευαλωσιμότητα (vulnerability) υπόγειων νερών ή υδροφορέων είναι η ευαισθησία απέναντι στους ρύπους. Η τρωτότητα ανά τα χρόνια έχει πάρει διαφορετικούς ορισμούς.

- Αρχικά η έννοια της τρωτότητας εισήχθη για πρώτη φορά από τον Margat το 1968 στη Γαλλία για να εκφράσει το ποσοστό που το φυσικό περιβάλλον προστατεύει τα υπόγεια νερά από τη ρύπανση. Οι βασικές παράμετροι που έλαβε υπόψη ο Margat ήταν το βάθος του υπόγειου νερού, η διαπερατότητα, η ταχύτητα του υπόγειου νερού και η σχέση υπόγειων και επιφανειακών νερών. Από τότε όμως ο ορισμός της τρωτότητας άλλαξε.
- Οι Olmer & Rezac (1974) ορίζουν την τρωτότητα «ως τον βαθμό έκθεσης των υπόγειων νερών σε κίνδυνο υποβάθμισης από φυσικές ουσίες». Οι Villumsen et al. (1983) θεωρούν την ποιότητα των υπόγειων νερών ως δείκτη τρωτότητας και δίνει έμφαση στη δυναμική των διαφόρων παραγόντων που επηρεάζουν αυτή.
- Οι Bachmat & Collin (1987) όρισαν την τρωτότητα ως «την ευαισθησία της ποιότητας των υπόγειων νερών σε επιπτώσεις από τις ανθρώπινες δραστηριότητες, όπως καταδεικνύεται από τις αλλαγές της ποιότητας των υπόγειων νερών».

Η έννοια της τρωτότητας συνδέεται με την ιδέα ότι το φυσικό περιβάλλον μπορεί να προστατεύσει σε κάποιο βαθμό το υπόγειο νερό, σαν αποτέλεσμα κάποιες περιοχές να είναι πιο ευάλωτες από κάποιες άλλες. Η τρωτότητα έχει να κάνει με το πόσο εύκολα ένας ρύπος, ο οποίος εισάγεται στην επιφάνεια του εδάφους, θα φτάσει στο υπόγειο νερό ανάλογα με τις χρήσεις γης της περιοχής, τα χαρακτηριστικά του ρύπου και την ευαισθησία του υδροφορέα. Έτσι η τρωτότητα του υπόγειου νερού είναι συνάρτηση τόσο των χαρακτηριστικών του υδροφόρου συστήματος, όσο και της απόστασης από την πηγή ρύπανσης, των χαρακτηριστικών του ρύπου και άλλων παραγόντων που μπορεί πιθανά να αυξήσουν το ρυπαντικό φορτίο του συγκεκριμένου ρυπαντή. Αντίθετα η ευαισθησία του υδροφορέα (aquifer sensitivity) έχει σχέση με την ευκολία με την οποία ένας ρύπος μεταναστεύει από την επιφάνεια του εδάφους στον υδροφορέα, είναι ανεξάρτητη των χρήσεων γης και συνδέεται άμεσα με τις γεωλογικές συνθήκες της περιοχής, της ακόρεστης και κορεσμένης ζώνης. Συμπερασματικά, η τρωτότητα δεν ταυτίζεται με την ευαισθησία (τρωτότητα \neq ευαισθησία).

Η τρωτότητα διακρίνεται σε:

- ειδική (specific) που αναφέρεται σε συγκεκριμένο ρυπαντή ή ομάδα ρυπαντών και
- σε γενική ή ιδιοτρωτότητα (intrinsic) που σχετίζεται αποκλειστικά με τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα και του υπερκείμενου εδάφους, χωρίς εξειδίκευση σε κάποιο ρυπαντή.

Σύμφωνα με τους Rao and Alley (1996) η ευαισθησία του υδροφορέα (aquifer sensitivity) ταυτίζεται με τη γενική τρωτότητα (intrinsic vulnerability). Επίσης είναι σημαντικό να

αναφερθεί ότι η έννοια της τρωτότητας δεν συνδέεται μόνο με τη ρύπανση ή τη μόλυνση των υπόγειων νερών, αλλά και με την ποσότητα αυτών, καθώς και με την επίδραση ακραίων καιρικών φαινομένων.

Στην ακόρεστη ζώνη το νερό κινείται πολύ αργά και λαμβάνουν χώρα διαδικασίες όπως προσρόφηση και ανταλλαγή κατιόντων, χημικές αντιδράσεις, μείωση παθογόνων μικροοργανισμών κ.ά. Για το λόγο αυτό η ακόρεστη ζώνη παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στη μείωση της ρύπανσης του υπόγειου υδροφορέα. Ο βαθμός εξασθένησης των ρύπων στην ακόρεστη ζώνη εξαρτάται από τη λιθολογία της, την κοκκομετρία, το πάχος, τα χαρακτηριστικά του ρύπου, τη συγκέντρωσή του κ.λ.π. Στην εδαφική ζώνη και ιδιαίτερα στη ζώνη των ριζών μεγάλες ποσότητες χημικών στοιχείων εξασθενούν και αποδομούνται από μικροοργανισμούς. Οπότε σύμφωνα με τα παραπάνω η έννοια της τρωτότητας πρέπει να αντιμετωπίζεται σε τρία στάδια (Στουρνάρας, 1997):

1. Το στάδιο της δυναμικής εισόδου του ρύπου στο υδατικό σύστημα, που συνδέεται με τις υδρογεωλογικές συνθήκες και τη συμπεριφορά του ρύπου.
2. Το στάδιο της παραμονής του ρύπου στο υδατικό σύστημα που συνδέεται με τις φυσικοχημικές ιδιότητες του ρύπου και τις υδρογεωλογικές και υδραυλικές συνθήκες του υδροφορέα.
3. Το στάδιο της άφιξης του ρύπου στο υδροληπτικό έργο, αν γίνεται εκμετάλλευση του υδροφόρου ορίζοντα.

Σε πολλές χώρες δημιουργούνται χάρτες τρωτότητας σε κλίμακα νομού ή περιφέρειας ή ακόμα και σε ολόκληρη τη χώρα, στους οποίους φαίνονται οι περιοχές με αυξημένη ή μη πιθανότητα ρύπανσης των υπόγειων υδροφορέων. Οι χάρτες αυτοί είναι μια ειδική κατηγορία υδρογεωλογικών χαρτών και πρέπει να ενημερώνονται σε τακτά χρονικά διαστήματα. Οι πληροφορίες για την ποιότητα των νερών συλλέγονται κυρίως από σταθμούς ελέγχου (monitoring stations), που εγκαθίστανται κατόπιν υδρογεωλογικής έρευνας και αναγνώρισης των αιτιών ρύπανσης.

Οι πληροφορίες που απαιτούνται για τη χαρτογράφηση της τρωτότητας μιας περιοχής είναι οι εξής:

- Μορφολογία
- Βλάστηση
- Κλιματολογία
- Ιδιότητες εδαφών
- Υδρολογία
- Υδρογεωλογία (κορεσμένη/ακόρεστη ζώνη)
- Χρήσεις νερού
- Χημεία (Υδροχημεία, χαρακτηριστικά ρύπων)
- Ανθρώπινες επεμβάσεις στο περιβάλλον

2.2. Μέθοδοι εκτίμησης τρωτότητας

Οι χρησιμοποιούμενες μέθοδοι για την εκτίμηση της τρωτότητας διακρίνονται σε: - Μέθοδοι βαθμονόμησης (rating methods). Περιλαμβάνουν μεθόδους δεικτών (index methods) και υβριδικές μεθόδους (hybrid methods), που συνδυάζουν μεθόδους δεικτών με στατιστικές μεθόδους [Στατιστικές μέθοδοι (statistical methods) και Μέθοδοι προσομοίωσης (simulating models)]. Οι στατιστικές μέθοδοι περιλαμβάνουν απλή περιγραφική στατιστική των συγκεντρώσεων διαφόρων επιλεγμένων ρυπαντών (NO_3 , As), καθώς και ανάλυση συσχέτισης (π.χ. συγκέντρωση νιτρικών ιόντων με το βάθος). Μπορεί επίσης να εφαρμοσθεί σύνθετη ανάλυση συσχέτισης (λογιστική ανάλυση συσχέτισης, logistic regression analysis), που ενσωματώνει τα αποτελέσματα μερικών παραμέτρων και προβλέπει τις πιθανότητες εμφάνισης της ρύπανσης. Οι μέθοδοι προσομοίωσης επιλύουν αριθμητικά τις εξισώσεις κίνησης του υπόγειου νερού (νόμος Darcy και εξίσωση της συνέχειας). Το MODFLOW και το MT3D είναι αρκετά δημοφιλείς κώδικες και επιλύουν τις εξισώσεις ροής και τις εξισώσεις εξέλιξης των ρύπων, αντίστοιχα, και συχνά χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της τρωτότητας. Οι κυριότερες τεχνικές και μέθοδοι βαθμονόμησης είναι οι εξής: DRASTIC (Aller et al., 1987), GOD (Foster, 1987), AVI (Van Stempvoort et al., 1992), SINTACS (Civita, 1994), ISIS (Civita & Regibus, 1995), DASTI (Ben Kabbour et al., 2004). Σύγκριση των παραπάνω μεθόδων έγινε από τους Corniello et al. (1997), Gogu et al. (2003) και προέκυψε μεγάλο εύρος στα παραγόμενα αποτελέσματα. Οι ανωτέρω μέθοδοι για την εκτίμηση της τρωτότητας χρησιμοποιούν ένα αριθμό παραμέτρων που κυμαίνεται από 2 (AVI) έως 7 (DRASTIC, SINTACS). Η μέθοδος DRASTIC, τροποποιημένη, έχει εφαρμοσθεί στον ελληνικό χώρο (Βουδούρης & Μανδηλαράς, 2005, Γκεμιτζή κ.ά, 2005, Panagoroulos et al., 2005). Η μεθοδολογία DRASTIC (Aller et al., 1987) ανήκει στις μεθόδους δεικτών και χρησιμοποιείται ευρύτατα για την εκτίμηση του κινδύνου ρύπανσης των υπόγειων νερών με βάση υδρογεωλογικές παραμέτρους. Το μοντέλο DRASTIC θεωρεί ότι:

- 1) κάθε ρύπος εισάγεται από την επιφάνεια του εδάφους,
- 2) ο ρύπος εισάγεται στο υπόγειο νερό από την κατείσδυση του νερού της βροχόπτωσης

2.2.1. Μέθοδος DRASTIC-LU

Σύμφωνα με τους Aller et al. (1987), μία από της πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους χαρτογράφησης της τρωτότητας των υπόγειων υδάτων είναι η DRASTIC, που αναπτύχθηκε από την Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος των ΗΠΑ για την εκτίμηση της τρωτότητας των υπόγειων υδάτων.

Οι χάρτες τρωτότητας των υπόγειων υδάτων είναι πολύτιμοι χάρτες που δείχνουν ποσοτικά ή ποιοτικά, ορισμένα χαρακτηριστικά του υπόγειου περιβάλλοντος προσδιορίζοντας την ευαισθησία των υπόγειων υδάτων στη μόλυνση.

Οι χάρτες αυτοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αποτελεσματικό προκαταρκτικό εργαλείο για το σχεδιασμό, την πολιτική και τα επιχειρησιακά επίπεδα της διαδικασίας λήψης αποφάσεων σχετικά με τη διαχείριση των υπόγειων υδάτων και την προστασία τους.

Η ευαισθησία των υπογείων υδάτων στη μόλυνση αξιολογείται χρησιμοποιώντας το τροποποιημένο μοντέλο DRASTIC-LU. Οι παράμετροι όπως το βάθος στάθμης του υπόγειου νερού, η επαναφόρτιση του υδροφόρου ορίζοντα, ο τύπος υδροφόρου

ορίζοντα,εδαφολογικά μέσα, τοπογραφία, ρόλος της ακόρεστης ζώνης,η υδραυλική αγωγιμότητα του υδροφορέα και οι χρήσεις γης εξετάζονται για την προετοιμασία του χάρτη τρωτότητας υδροφόρου ορίζοντα. Όσο υψηλότερος είναι ο δείκτης DRASTIC-LU,τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα μόλυνσης των υπόγειων υδάτων (Arzu Firat Ersoy and Fatma Gültekin, 2013)

Η μέθοδος DRASTIC-LU είναι ευέλικτη και ο χρήστης έχει τη δυνατότητα τροποποίησης της, προσθέτοντας παραμέτρους ή αλλάζοντας τις τιμές της βαρύτητας. Η λέξη DRASTIC-LU προκύπτει από τα ακρωνύμια των: D (Depth) βάθος της στάθμης του υπόγειου νερού, R (Recharge) ενεργή κατείσδυση, A (Aquifer) υδροφόρο μέσο, S (Soil) έδαφος, T (Topography) κλίση αναγλύφου, I (Impact of the vadose zone) επίδραση της ακόρεστης ζώνης , C (Hydraulic Conductivity of the aquifer) συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας ή υδροπερατότηταςκαι LU(Landuse) χρήση γης. Οι παραπάνω παράμετροι διαμορφώνουν το δείκτη DRASTIC-LU, που υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση :

$$DL=D_rD_w + R_rR_w + A_rA_w + S_rS_w + T_rT_w + I_rI_w + C_rC_w +LU_rLU_w \quad (1)$$

Ο δείκτης r εκφράζει την τιμή της παραμέτρου και ο δείκτης w τη βαρύτητα της καθεμίας (Alaam. Al-Abadietal., 2013). Για κάθε παράμετρο υπάρχουν δύο τιμές βαρύτητας, μία για εφαρμογή της μεθόδου σε περίπτωση οικιακών και βιομηχανικών ρύπων (γενική, Typical DRASTIC-LU) και μία για χρήση φυτοφαρμάκων σε αρδευόμενες περιοχές (ειδική, Pesticide DRASTIC-LU). Οι παράμετροι με τη μεγαλύτερη βαρύτητα (5) είναι το βάθος της στάθμης του υπόγειου νερού (D), η επίδραση της ακόρεστης ζώνης (I), οι χρήσεις γης(LU) και το έδαφος στην ειδική περίπτωση των φυτοφαρμάκων (S) .Οι τιμές των παραμέτρων (δείκτης r) κυμαίνονται από 1 (ελάχιστο δυναμικό ρύπανσης) έως 10 (μέγιστο δυναμικό ρύπανσης). Η βαρύτητα κάθε παραμέτρου (δείκτης w) στη μεθοδολογία DRASTIC-LU σύμφωνα με τους Aller et al. (1987) παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.

Παράμετρος	Βάρος(Typical DRASTIC-LU)	Βάρος (Pesticide DRASTIC-LU).
D Βάθος στάθμης υπόγειου νερού	5	5
R Ενεργή κατείσδυση	4	4
A Υδροφορέας	3	3
S Έδαφος	2	5
T Κλίση αναγλύφου	1	3
I Επίδραση ακόρεστης ζώνης	5	3
C Συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας	3	2
LU Χρήση γης	5	5

Πίνακας 2: Βαρύτητα παραμέτρων στη μέθοδο DRASTIC-LU σύμφωνα με τους Aller et al. (1987)

Οπότε η σχέση (1) γίνεται :

$$DL=5D_r + 4R_r + 3A_r + 2S_r + T_r + 5I_r + 3C_r +5LU_r \quad (2), \text{ (γενική, Typical DRASTIC-LU)}$$

$$DL=5D_r + 4R_r + 3A_r + 5S_r + 3T_r + 3I_r + 2C_r +5LU_r \quad (3), \text{ (ειδική, Pesticide DRASTIC-LU)}$$

Βάθος στάθμης υπόγειου νερού (D)

Το βάθος της στάθμης του υπόγειου νερού (D) είναι σημαντικό, κυρίως επειδή καθορίζει το βάθος του υλικού μέσω του οποίου πρέπει να μετακινηθεί ένας μολυσματικός παράγοντας πριν φθάσει στον υδροφόρο ορίζοντα και μπορεί να συμβάλει στον προσδιορισμό του χρόνου κατά τον οποίο διατηρείται η επαφή με το περιβάλλον (Aller et al., 1987). Οι περιοχές με ρηχά υδατοθέσια παρουσιάζουν μεγαλύτερη πιθανότητα η μολυσματική ουσία να φθάσει στην επιφάνεια των υπογείων υδάτων σε αντίθεση με τους βαθιούς υδροφόρους ορίζοντες, εάν τα επικαλυπτόμενα υλικά είναι τα ίδια. Το βάθος στο νερό είναι επίσης σημαντικό επειδή παρέχει τη μέγιστη δυνατότητα οξείδωσης από ατμοσφαιρικό οξυγόνο. Ως εκ τούτου, το βάθος στα υπόγεια ύδατα έχει το μέγιστο βάρος (5) για τον προσδιορισμό της τρωτότητας χρησιμοποιώντας τη μέθοδο DRASTIC-LU .

Ενεργή κατείσδυση (R)

Η πρωταρχική πηγή υπογείων υδάτων είναι η κατακρήμνιση που διηθείται μέσω της επιφάνειας του εδάφους και διεισδύει στην επιφάνεια του νερού. Η ενεργή κατείσδυση (R) είναι η ποσότητα της επιφάνειας της μονάδας ύδατος του εδάφους που διεισδύει στην επιφάνεια του και φτάνει στον υπόγειο υδροφορέα. Αυτό είναι το κύριο μέσο που μεταφέρει το ρύπο στα υπόγεια ύδατα. Όσο περισσότερο υπάρχει, τόσο μεγαλύτερες είναι οι πιθανότητες να μεταφερθεί η μολυντική ουσία στα υπόγεια ύδατα. Στις περιοχές όπου δεν υπάρχει οριοθετημένο περιβάλλον, η επαναφόρτιση στον υδροφόρο ορίζοντα συμβαίνει συνήθως πιο εύκολα και η πιθανότητα μόλυνσης είναι γενικά μεγαλύτερη σε περιοχές με περιορισμένους υδροφόρους ορίζοντες. Ο συντελεστής κατείσδυσης είναι συνάρτηση του ύψους βροχής, της κλίσης του ανάγλυφου και της περατότητας του εδάφους.

Υδροφόρο μέσο (A)

Αναφέρεται στο ενοποιημένο ή μη ενοποιημένο μέσο που χρησιμεύει ως υδροφόρος ορίζοντας. Ένας υδροφόρος ορίζοντας ορίζεται ως μια υποβρύχια μονάδα που παράγει επαρκείς ποσότητες νερού για ανθρώπινη χρήση. Το υλικό του υποστρώματος καθορίζει την κινητικότητα του μολυσματικού παράγοντα διαμέσου αυτού. Η αύξηση του χρόνου μετακίνησης του ρύπου διαμέσου του υγρού προκαλεί περισσότερη εξασθένηση του μολυσματικού παράγοντα. Τα μέσα υδροφορέων (A) ασκούν σημαντικό έλεγχο επί της οδού και του μήκους διαδρομής που πρέπει να ακολουθήσει ο ρύπος. Το μήκος διαδρομής είναι ένας σημαντικός έλεγχος (μαζί με την αγωγιμότητα και την κλίση) για τον προσδιορισμό του διαθέσιμου χρόνου για διαδικασίες εξασθένησης όπως η προσρόφηση, η αντιδραστικότητα και η διασπορά. Γενικά, όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος των κόκκων και τα περισσότερα κατάγματα ή ανοίγματα μέσα στον υδροφορέα, τόσο μεγαλύτερη είναι η διαπερατότητα, τόσο μικρότερη είναι η ικανότητα εξασθένησης και, κατά συνέπεια, το μεγαλύτερο δυναμικό ρύπανσης.

Έδαφος (S)

Το έδαφος θεωρείται συνήθως η ανώτερη ζώνη της γης . Έχει ένα σημαντικό αντίκτυπο στην ποσότητα νερού επαναπλήρωσης που μπορεί να εισχωρήσει στο έδαφος και επομένως να επηρεάσει την ικανότητα ενός ρύπου να μετακινηθεί κατακόρυφα στην ακόρεστη ζώνη . Σε γενικές γραμμές, το δυναμικό ρύπανσης ενός εδάφους επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τον τύπο του υπάρχοντος στρώματος και το μέγεθος των κόκκων του εδάφους (Umar et al., 2009). Επιπλέον, όπου η εδαφική ζώνη είναι αρκετά παχιά, η διαδικασία εξασθένησης της διήθησης, της βιοαποικοδόμησης, η πτητικοποίηση μπορεί να είναι αρκετά σημαντική. Στο έδαφος και ιδιαίτερα στις ρίζες το ρυπαντικό φορτίο εξασθενεί και πολλές ουσίες αποικοδομούνται από μικροοργανισμούς.

Κλίση αναγλύφου (T)

Η τοπογραφία (T) αναφέρεται στην κλίση μιας περιοχής. Οι περιοχές με χαμηλή κλίση τείνουν να συγκρατούν το νερό για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Αυτό επιτρέπει μεγαλύτερη διείσδυση ή επαναφόρτιση νερού και αυξημένο δυναμικό μετανάστευσης ρύπων. Περιοχές με απότομες πλαγιές, με μεγάλες ποσότητες απορροής και μικρές ποσότητες διήθησης, είναι λιγότερο ευάλωτες στη μόλυνση των υπόγειων υδάτων . Οι περιοχές χαμηλής κλίσης είναι ευάλωτες καθώς το νερό μπορεί να συγκεντρωθεί και να εισχωρήσει στην υπόγεια επιφάνεια αυτών των περιοχών.

Επίδραση της ακόρεστης ζώνης (I)

Η ακόρεστη ζώνη παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στη μείωση της ρύπανσης, λόγω της αργής κίνησης του νερού καθώς και διαφόρων διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα σε αυτή, όπως προσρόφηση και ανταλλαγή κατιόντων, χημικές αντιδράσεις, μείωση παθογόνων μικροοργανισμών κ.ά. Ο βαθμός εξασθένησης των ρύπων στην ακόρεστη ζώνη εξαρτάται από τη λιθολογία της, την κοκκομετρία της, το πάχος της, τα χαρακτηριστικά του ρύπου, τη συγκέντρωσή του κ.λπ.

Υδραυλική αγωγιμότητα (C)

Η υδραυλική αγωγιμότητα (C) αναφέρεται στην ικανότητα των υδροφοβικών υλικών να μεταφέρουν νερό, το οποίο με τη σειρά του ελέγχει το ρυθμό στον οποίο τα υπόγεια ύδατα θα ρέουν κάτω από ένα δεδομένο υδραυλικό υπόστρωμα. Ο ρυθμός με τον οποίο ρέουν τα υπόγεια ύδατα ελέγχει επίσης την ταχύτητα με την οποία ένας μολυντής θα απομακρυνθεί από το σημείο στο οποίο εισέρχεται στον υδροφόρο ορίζοντα. Ένας υδροφόρος ορίζοντας με υψηλή αγωγιμότητα είναι ευάλωτος σε σημαντική μόλυνση, καθώς το νερό της μόλυνσης μπορεί να μετακινηθεί εύκολα μέσω του υδροφόρου ορίζοντα. Η υδραυλική αγωγιμότητα ελέγχεται από την ποσότητα και τη διασύνδεση κενών χώρων εντός του υδροφόρου ορίζοντα.

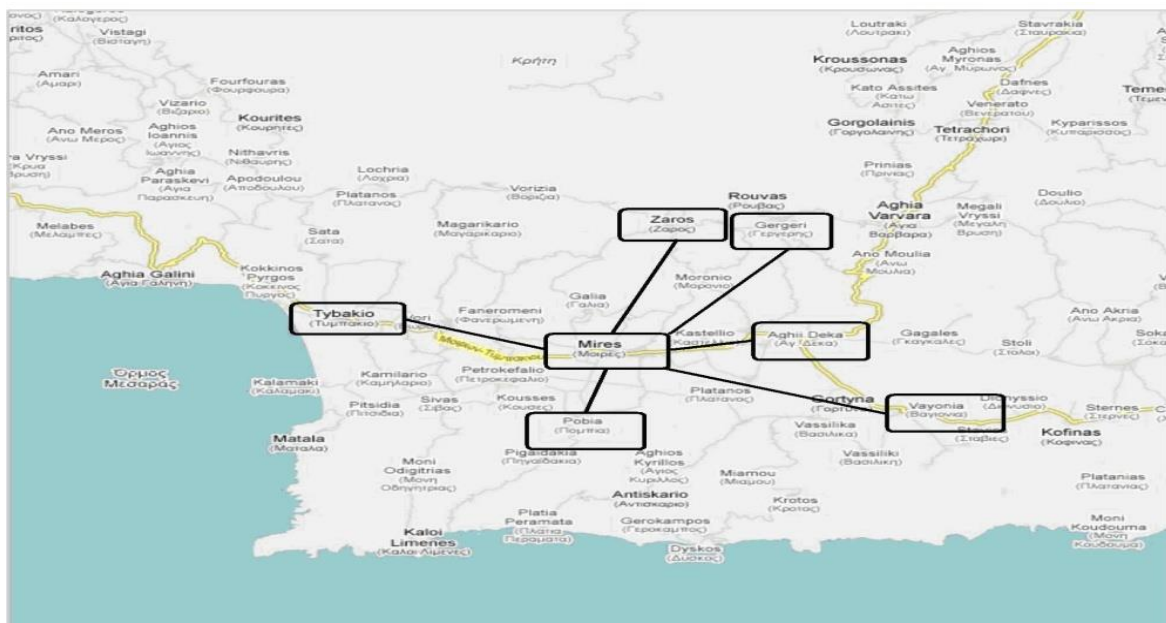
Χρήση γης (LU)

Το πρότυπο χρήσης γης (LU) έχει ισχυρό αντίκτυπο στην ποιότητα των υπόγειων υδάτων. Επομένως, το μοντέλο χρήσης γης περιλαμβάνεται στη χαρτογράφηση τρωτότητας. Μεγαλύτερο βάρος παίρνουν οι αστικές περιοχές λόγω βιομηχανικής μόλυνσης και οικιακών αποβλήτων και οι γεωργικές εκτάσεις λόγω μόλυνσης από φυτοφάρμακα και υπεράντλησης υπόγειου νερού και λιγότερο η άγρινη γη και η φυσική βλάστηση.

Κεφάλαιο 3 : Περιοχή μελέτης

3.1. Πεδιάδα της Μεσαράς

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 Μεσαρά είναι η μεγαλύτερη πεδιάδα της νότιας Κρήτης περίπου 50km από το Νομό Ηρακλείου και καλύπτει μια έκταση 398 km². Η εν λόγω πεδιάδα εκτείνεται από ανατολικά προς δυτικά στη νότια ακτή της Κρήτης. Βόρεια συνορεύει με την οροσειρά του Ψηλορείτη, ενώ νότια με την οροσειρά των Αστερουσίων. Πρόκειται για μια παράλια πεδιάδα καθώς νοτιοδυτικά βρέχεται από τον ομώνυμο κόλπο, που αποτελεί τμήμα του Λιβυκού πελάγους. Ο Γεροπόταμος, είναι ένας ποταμός ο οποίος διασχίζει αυτή την πεδιάδα και εκβάλλει στον κόλπο της Μεσαράς, στο δήμο Τυμπακίου. Επίσης υπάρχουν δύο παραπόταμοι που καταλήγουν στον Γεροπόταμο ο Κουτσουλίδης και ο ποταμός Μάγερας, στο δήμο Τυμπακίου. Τα τελευταία χρόνια στην περιοχή έχει δημιουργηθεί και μια τεχνητή λίμνη, το φράγμα της Φανερωμένης, με σκοπό την άρδευση ολόκληρης σχεδόν της πεδιάδας. Άλλος κοντινός ποταμός είναι ο Πλατύς, ο οποίος έρχεται από το νομό Ρεθύμνης και εκβάλλει στην Αγία Γαλήνη.



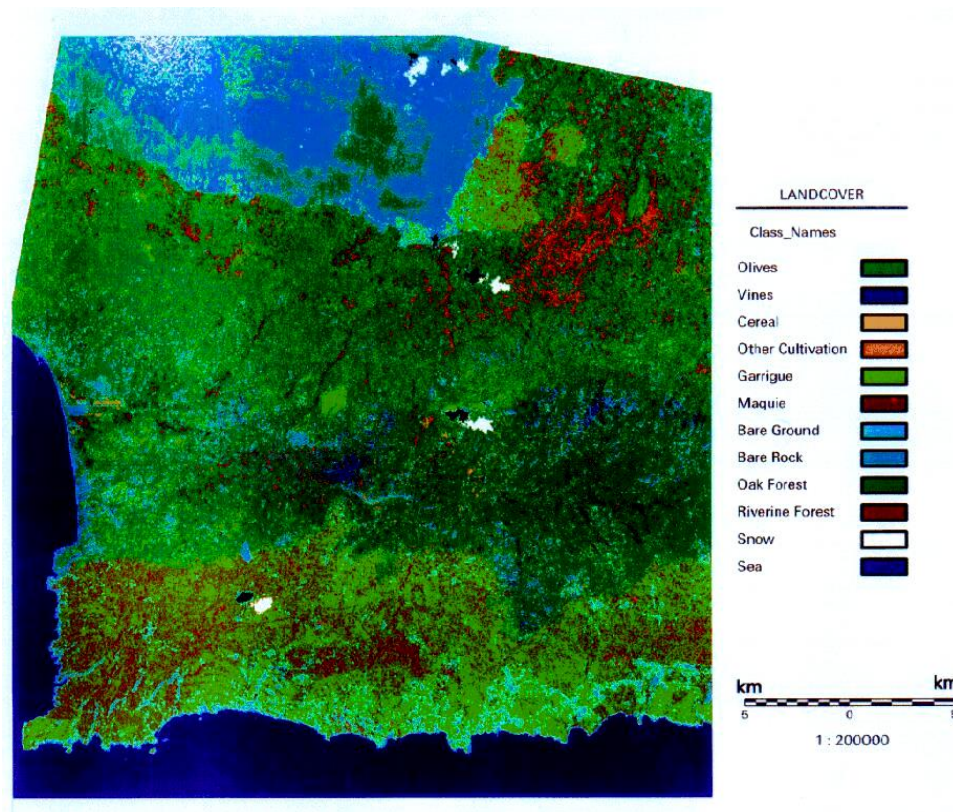
Χάρτης 1. Περιοχή Μεσαράς

Η πεδιάδα αποτελεί τη σημαντικότερη γεωργική περιοχή της Κρήτης, καθώς 250km² της συνολικής έκτασης της καλλιεργούνται. Η πεδιάδα της Μεσαράς έχει πληθυσμό περίπου 40.000 κατοίκους και κατά κύριο λόγο είναι αγροτική περιοχή.

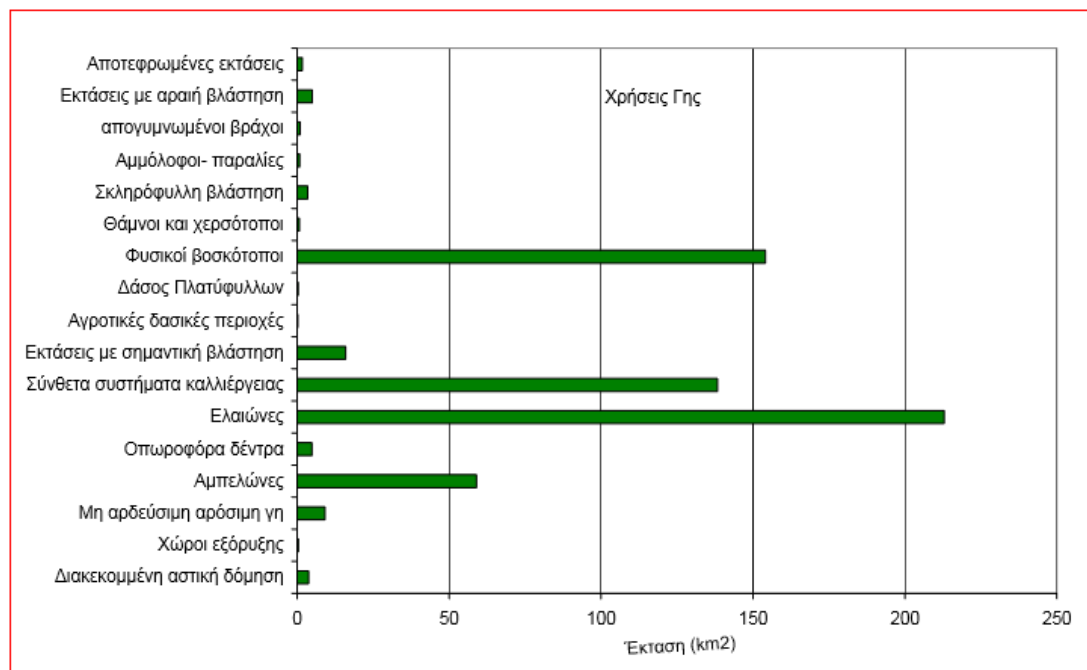
Στην περιοχή η κύρια πηγή άρδευσης είναι τα υπόγεια νερά καθώς το καλοκαίρι η πηγή επιφανειακών υδάτων είναι περιορισμένη. Για αυτό το λόγο το πρόβλημα υπερ-άντλησης στην περιοχή είναι αυξημένο ειδικά τα τελευταία 20 χρόνια όπου η ζήτηση έχει αυξηθεί σημαντικά. Έτσι υπάρχει και το πρόβλημα της πτώσης της στάθμης του υπόγειου νερού. (Βαρουχάκης, 2012)

3.2. Χρήσεις γης

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η Μεσαρά είναι η σημαντικότερη περιοχή της Κρήτης καθώς το μεγαλύτερο μέρος της έκτασης της καλλιεργείται (από τα 398 km² τα 250km² καλλιεργούνται). Οι καλλιεργήσιμες εκτάσεις καλύπτονται κυρίως από ελαιώνες και αμπελώνες, ενώ η υπόλοιπη έκταση χρησιμοποιείται για την καλλιέργεια λαχανικών, εσπεριδοειδών και δημητριακών. Για την ακρίβεια το 75% των καλλιεργειών είναι ελιές, 10% αμπέλια, 2% εσπεριδοειδή και 13% είναι λαχανικά (κυρίως υπαίθριες καλλιέργειες και μερικά θερμοκήπια). Όσον αφορά τις δασικές εκτάσεις, στα νότια και ανατολικά του Ψηλορείτη έχουν κηρυχθεί προστατευμένες περιοχές. Στις πλαγιές του Ψηλορείτη διαμορφώνεται ένα βραχώδες τοπίο με ελάχιστη βλάστηση. (Βαρουχάκης, 2012)



Χάρτης 2. Χρήσεις γης στην πεδιάδα της Μεσαράς, (Βαρουχάκης, 2012)



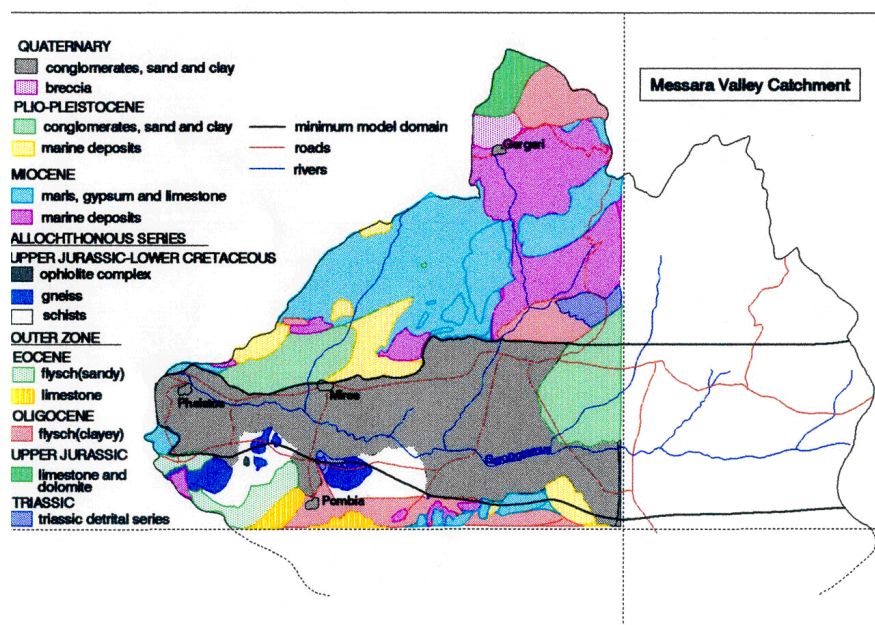
Διάγραμμα 1.Γράφημα χρήσεων γης Μεσαράς

3.3. Γεωλογία – Τοπογραφία

Η δυτική Μεσαρά περιλαμβάνει μια πεδιάδα 112km^2 , περίπου 25km μήκους και 3km πλάτους, όπου στο βόριο και νότιο τμήμα της υπάρχουν απότομες βουνοπλαγιές το υψόμετρο των οποίων κυμαίνεται από 1700m σε 600m στο βορά και από τη δύση προς την ανατολή. Η υψηλότερη κορυφή βρίσκεται στην οροσειρά Ίδη στα 2540m η οποία αποτελείται κυρίως από ασβεστόλιθους. Στο νότιο τμήμα βρίσκεται η οροσειρά των Αστερούσιων, το υψόμετρο των οποίων φτάνει τα 600 στα δυτικά και στα 1200 στα ανατολικά. Στην περιοχή της Φαιστού δυτικά της πεδιάδος η λεκάνη απορροής του ποταμού Γεροπόταμου βρίσκεται 30m από την επιφάνεια της θάλασσας. Η λεκάνη απορροής των βόρειων ορεινών όγκων έχει έκταση 160 km^2 ενώ των νότιων 126 km^2 .

Όσον αφορά τις γεωλογικές αποθέσεις στην περιοχή υπάρχει ανομοιογένεια έτσι υπάρχουν αρκετές εναλλαγές των υδρογεωλογικών χαρακτηριστικών ακόμα και σε μικρές αποστάσεις. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί είναι κυρίως τεταρτογενείς αλλουβιακοί άργιλοι, ιλύς, άμμος και αμμοχάλικα με πάχος που φτάνει μέχρι 100 ή και περισσότερο μέτρα. Οι βορινές πλαγιές αποτελούνται κυρίως από ιλύς και μάργα νεογενών σχηματισμών ενώ οι νότιες πλαγιές είναι κυρίως σχιστόλιθοι και ασβεστόλιθοι μεσοζωικών σχηματισμών. Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται ο χάρτης της γεωλογίας της περιοχής των Μοιρών. Η απορροή

περιορίζεται σε ένα κανάλι το οποίο βρίσκεται σε ένα αδιαπέρατο τριτογενές στρώμα κοντά στην περιοχή της Φαιστού στα Δυτικά της λεκάνης απορροής. Η γεωλογία της περιοχής παρουσιάζεται στο σχήμα 3.



Χάρτης 3. Γεωλογικός χάρτης της πεδιάδας της Μεσσαράς.(Βαρουχάκης, 2012)

3.4. Υδρογεωλογία

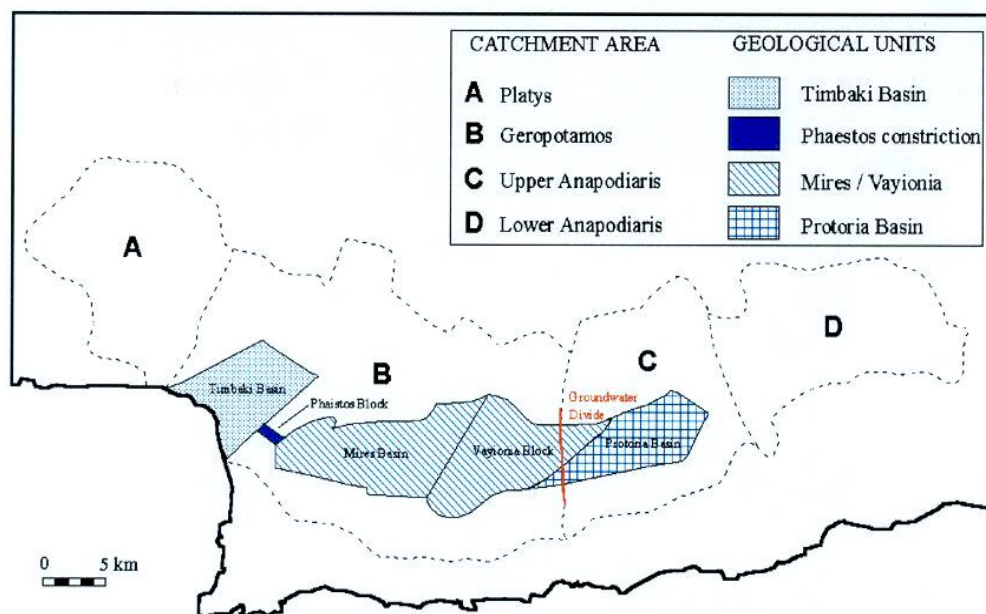
Η περιοχή μελέτης περιλαμβάνει την υδρολογική λεκάνη των Μοιρών. Η υδρολογική λεκάνη των Μοιρών έχει έκταση 50.3 km², κατά προσέγγιση 14km μήκος και περίπου 3km πλάτος. Αποτελείται από τεταρτογενή έως νεογενή αλλουβιακά ιζήματα, τα οποία διαμορφώνουν μια εξαιρετικά μεταβλητή και σύνθετη διά-στρωματική αλληλουχία χαλικιών, αμμοχάλικων, άμμου, ιλύς, ιλύς-άμμου και αργίλων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία ενός συστήματος πολλαπλών υδροφόρων στρωμάτων στα οποία τα διαπερατά στρώματα άμμου και αμμοχάλικου διαχωρίζονται τοπικά πλευρικά και κάθετα από λιγότερο διαπερατά στρώματα αργίλων και ιλύς.

Επίσης υπάρχουν ρήγματα, με κατεύθυνση από τα ανατολικά προς τα δυτικά ή σε κάποιο κανάλι διάβρωσης που βρίσκεται στα κατώτερα πλειστόκαινα ιζήματα. Η παρουσία εκτενών ρηγμάτων παράλληλα και εγκάρσια στην πεδιάδα έχει προκαλέσει μεταβλητότητα στο πάχος των αλλοούβιων σχηματισμών σε ολόκληρη την υδρολογική λεκάνη.

Το πάχος της κορεσμένης ζώνης κυμαίνεται σε λιγότερο των 20m μέχρι και πάνω από 100, στο χαμηλότερο μέρος της υδρολογικής λεκάνης. Ο υδροφορέας περιλαμβάνει μια εναλλασσόμενη ακολουθία αργίλων, ιλύς, άμμων και αμμοχάλικων, ωστόσο σίγουρα υπάρχει και μεγάλο ποσοστό αδιαπέρατου υλικού.

Στα ανατολικά του αλουβιακού υδροφορέα του Γεροποτάμου τα υλικά των αποθέσεων είναι περισσότερο χοντρόκοκκα με ενστρώσεις αργιλικών και ιλύος, πάχους μικρότερο των 5 m. Το επιφανειακό στρώμα αποτελείται κυρίως από χαλίκια και άμμο. Στο κατάντη τμήμα, περίπου από το ύψος των Μοιρών και δυτικότερα, το πάχος και το ποσοστό των ανυδροφόρων είναι μεγαλύτερο και το επιφανειακό στρώμα γίνεται περισσότερο αργιλικό (Κριτσωτάκης, 2009; Vardavas et al., 1996). Η περιοχή καλύπτεται από ερυθρά κροκαλοπαγή άμμους και αργίλους ποταμολιμναίας προέλευσης όπου μπορεί να αναπτυχθεί πλούσια υπόγεια υδροφορία, ιδιαίτερα στις περιοχές που επικρατούν τα κροκαλοπαγή.

Με την παρακολούθηση γεωτρήσεων έχει παρατηρηθεί ότι το υδατικό δυναμικό της λεκάνης μειώνεται συνεχώς τα τελευταία 35 χρόνια. Ο υδροφορέας δέχεται νερό τους χειμερινούς μήνες από τους χείμαρρους του Γεροποτάμου και του Λιθαίου. Επίσης υπόγεια πλευρική τροφοδοσία πιθανά να υπάρχει και από την περιοχή δυτικά του οικισμού Μοιρών και να έχει σχέση με τους προ-νεογενείς ανθρακικούς σχηματισμούς. (Βαρουχάκης, 2012)



Χάρτης 4. Οι κυριότερες υδρολογικές λεκάνες της πεδιάδας της Μεσσαράς (Βαρουχάκης, 2012)

3.5. Κλίμα περιοχής

Το κλίμα της πεδιάδας είναι υπό-υγρό με ήπιους υγρούς χειμώνες και ξηρά, θερμά καλοκαίρια. Το μεγαλύτερο ποσοστό της βροχόπτωσης (περίπου 40%) εμφανίζεται τους μήνες Δεκέμβριο και Ιανουάριο ενώ το μικρότερο από τον Ιούνιο μέχρι τον Αύγουστο όπου οι βροχοπτώσεις είναι αμελητέες. Επίσης υπολογίζεται ότι περίπου το 65% του νερού χάνεται λόγω εξατμισοδιαπνοής, 10% λόγω επιφανειακής απορροής και μόνο το 25% κατεισδύει για την ανανέωση των αποθεμάτων των υπόγειων υδάτων. Η εξατμισμό σύμφωνα με τους σταθμούς μέτρησης υπολογίζεται σε $1500 \pm 300 \text{ mm}$ το χρόνο ενώ οι άνεμοι είναι κυρίως δυτικοί. Η μέση χειμερινή θερμοκρασία είναι 12°C ενώ το καλοκαίρι 28°C . Η σχετική υγρασία κατά την διάρκεια του χειμώνα είναι περίπου 70% ενώ το καλοκαίρι περίπου 60%. Για την λεκάνη των Μοιρών συγκεκριμένα η εξατμισοδιαπνοή είναι περίπου 82%, η επιφανειακή απορροή μηδενική και η κατείσδυση 18%. (Βαρουχάκης, 2012)

3.6. Υδρολογικά χαρακτηριστικά

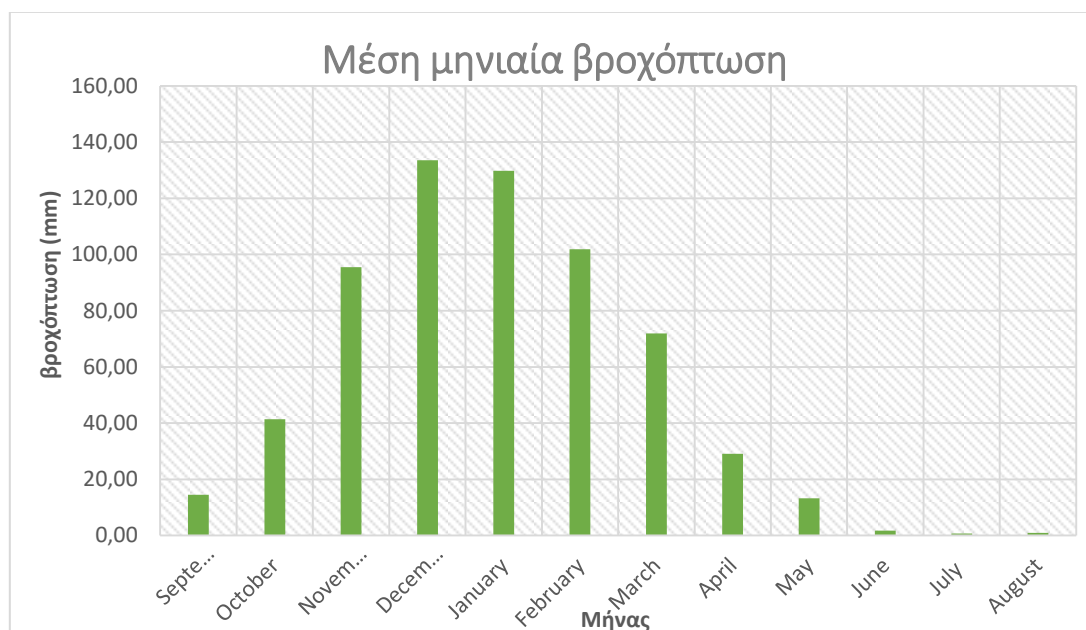
Η βροχόπτωση στην περιοχή αυξάνεται με το υψόμετρο από περίπου 500mm στην πεδιάδα σε περίπου 800mm στις πλαγιές της και 1100mm στα Αστερούσια βουνά. Το διάγραμμα 2 παρουσιάζει τις μέσες ετήσιες βροχοπτώσεις στην περιοχή των Μοιρών για τα έτη 2007 ως 2016. Όπως παρατηρείται από το διάγραμμα το ξηρότερο υδρολογικό έτος ήταν το 2015-2016 και το υγρότερο το 2014-2015, δηλαδή τον προηγούμενο χρόνο από το πιο ξηρό έτος. Το διάγραμμα 3 απεικονίζει τις μέσες μηνιαίες βροχοπτώσεις στην πεδιάδα της Μεσαράς. Η υγρή περίοδος διαρκεί από το Νοέμβριο μέχρι τον Μάρτιο ή τον Απρίλιο ενώ η ξηρή περίοδος από τον Ιούνιο μέχρι τον Οκτώβριο.

Το κυρίως μέσο επιφανειακής απορροής της πεδιάδας είναι ο ποταμός Γεροπόταμος στο στενό της Φαιστού στα δυτικά. Σε αυτό το σημείο το υψόμετρο είναι 30m επάνω από τη επιφάνεια της θάλασσας. Ο ποταμός Γεροπόταμος έρεε συνεχώς, και στο δυτικό άκρο της λεκάνης απορροής στην Φαιστό υπήρχε ένας υγρότοπος. Όμως η πτώση της στάθμης των

υπόγειων υδάτων είχε σαν αποτέλεσμα την αποξήρανση του υγρότοπου, την απουσία ροής στον ποταμό κατά τη ξηρή περίοδο του έτους 1990 όπως επίσης και κατά τη διάρκεια του υδρολογικού έτους 1992-1993. Αυτή ήταν την πρώτη φορά που η κοίτη του ποταμού παρέμεινε ξηρή σύμφωνα με τα ιστορικά στοιχεία. Η μέση ετήσια απορροή υπολογίστηκε με βάση τα ιστορικά στοιχεία από το 1967 σε 16.88 Mm³, ενώ η υψηλότερη μέση μηνιαία απορροή παρατηρείται τον μήνες Ιανουάριο και το Φεβρουάριο και η χαμηλότερη του μήνες Ιούλιο και Αύγουστο.



Διάγραμμα 2. Μέση ετήσια βροχόπτωση στις Μοίρες



Διάγραμμα 3. Μέση μηνιαία βροχόπτωση στην πεδιάδα της Μεσαράς (ΤΥΠ, 2002-2009)

Στην πεδιάδα της Δυτικής Μεσαράς περιλαμβάνονται τόσο μεγάλα όσο και μικρότερα υδροφόρα στρώματα σύνθετων υδρογεωλογικών ιδιοτήτων. Η στάθμη τους φτάνει στο μέγιστο τον Μάρτιο ή τον Απρίλιο ενώ στην συνέχεια παρατηρείται συνεχή πτώση της έως την ανανέωση των αποθεμάτων την χειμερινή περίοδο. Τα υδροφόρα στρώματα παρουσίαζαν υψηλή αποδοτικότητα με το δυναμικό άντλησης να είναι υψηλό, περίπου $300\text{m}^3/\text{hr}$ στις αρχές της δεκαετίας του '70. Στις μέρες μας όμως έχει μειωθεί σε περίπου ένα δέκατο αυτού.

Οι πλευρικές εκροές υπόγειων υδάτων από την πεδιάδα είναι μικρές σε σχέση με το μέγεθος των αντλήσεων που πραγματοποιούνται στην περιοχή. Ένα εκτενές δίκτυο γεωτρήσεων έχει εγκατασταθεί από το 1984 και υπολογίζεται ότι περίπου $10\text{Mm}^3/\text{yr}$ υπόγειων υδάτων αντλούνταν από τα υδροφόρα στρώματα πριν από την εγκατάσταση του δικτύου, ενώ στην συνέχεια περίπου $40\text{Mm}^3/\text{yr}$.

Η τόσο μεγάλη άντληση όμως είχε σαν αποτέλεσμα την τεράστια πτώση 35 m της στάθμης του υδροφορέα. Τα τελευταία χρόνια υπάρχει πολύ μικρή επιφανειακή απορροή και τα αποθέματα υπόγειων υδάτων μειώνονται συνεχώς. Πριν από την εγκατάσταση του συστήματος άρδευσης η ετήσια επιφανειακή απορροή της πεδιάδας ήταν περίπου $20\text{Mm}^3/\text{yr}$ το οποίο αντιστοιχεί σε 50mm της ετήσιας βροχόπτωσης. Υπολογίζεται ότι η ετήσια ανανέωση των αποθεμάτων των υπόγειων υδάτων ήταν περίπου $60\text{Mm}^3/\text{yr}$ (150mm.) και οι απώλειες λόγω εξατμισοδιαπνοής ήταν περίπου $160\text{Mm}^3/\text{yr}$ (400mm.) (Κριτσωτάκης, 2009).

Οι υψηλότερες τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας καταγράφονται στην υδρολογική λεκάνη των Μοιρών, όπου οι διαπερατότητες κυμαίνονται μεταξύ 10 και $120\text{m}/\text{day}$ υποδηλώνοντας την παρουσία μεγάλου αριθμού σειρών αμμοχάλικου στον αλλουβιακό σχηματισμό. Οι λιγότερο διαπερατές περιοχές βρίσκονται στην περιοχή της υδρολογικής λεκάνης της Βαγιονιάς, όπου η αραιή παρουσία αμμοχάλικου σημαίνει ότι οι τιμές μειώνονται και η μέση τιμή τους είναι μόνο $1\text{m}/\text{d}$. Μικρότερες επίσης τιμές εμφανίζονται στη βόρεια πλευρά της υδρολογικής λεκάνης των Μοιρών, όπου τα κατώτερα πλειστόκαινα πετρώματα παρόμοια με εκείνα που βρίσκονται στην περιοχή της Βαγιονιάς αποσαθρώνονται.

Γενικά η συμπεριφορά του υδροφορέα δείχνει ότι αν και ανομοιογενής και τοπικά περιορισμένος, σε επίπεδο πεδιάδας συμπεριφέρεται και χαρακτηρίζεται ως ελεύθερος.

Ο αλλουβιακός υδροφορέας της Λεκάνης των Μοιρών είναι ο σημαντικότερος της Μεσαράς. Το πάχος του είναι κυμαινόμενο και το μεγαλύτερο απαντάται στη τεταρτογενή αποθετική τάφρο που ευρίσκεται περίπου στη σημερινή ροή του Γεροποτάμου και του Λιθαίου. Η υδροχωρητικότητα του υπολογίζεται σε 86 Mm^3 όγκο νερού (60 Mm^3 στον υδροφόρο και 26 Mm^3 στον ανυδροφόρο), με βάση τα γεωτρητικά δεδομένα του FAO του έτους 1972. (Βαρουχάκης, 2012)

Όμως ο σημερινός πραγματικός όγκος αποθήκευσης του αλλουβιακού υδροφορέα των Μοιρών, λόγω της πτώσης της στάθμης που έχει προέλθει από την υπερεκμετάλλευση του, είναι μικρότερος και εκτιμάται με πρώτη προσέγγιση στο ύψος των 55 Mm^3 (Κριτσωτάκης, 2009).

Κεφάλαιο 4: Εκτίμηση της τρωτότητας της περιοχής μελέτης

4.1. Πρακτική εφαρμογή της μεθόδου DRASTIC-LU

Όπως έχει ήδη αναφερθεί ο υπολογισμός της τρωτότητας της περιοχής μελέτης έγινε μέσω της μεθόδου DRASTIC-LU με τη χρήση του ArcMap στο GIS, καθώς είναι μία μέθοδος που εξετάζει πολλούς παράγοντες για τον υπολογισμό της και έχει εφαρμοστεί με επιτυχία στο εξωτερικό αλλά και στην Ελλάδα.

4.1.1. Εκτίμηση παράγοντα D

Για τον παράγοντα D, δηλαδή το βάθος της στάθμης του υπόγειου νερού χρησιμοποιήθηκαν πιεζομετρικές μετρήσεις για ξηρή και υγρή περίοδο στην περιοχή των Μοιρών από το έτος 2007 έως το 2014. Καθώς δεν υπήρχαν όλες οι μετρήσεις σε κάποιες γεωτρήσεις για όλα τα έτη κάποιες στάθμες υπολογίστηκαν γραμμικά μέσω του Excel. Στη συνέχεια υπολογίστηκε ο μέσος όρος για όλα τα έτη σε κάθε γεώτρηση ξεχωριστά. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες και είναι σε m.

long	lat	z	DRY_07_08	WET_07_08	DRY_08_09	WET_08_09	DRY_09_10	WET_09_10	DRY_10_11	WET_10_11
575630	3877172	38	6	14	6,08	14,19	6,23	14,54	6,61	15,43
579134	3879506	70	10,5	24,5	10,64	24,83	10,91	25,45	11,57	27
577572	3879025	85	12,07	28,16	26,4	35,24	17,1	25,2	13,3	31,03
577037	3879122	83	11,78	27,48	28,5	38	18,3	23,8	12,98	30,28
577961	3878749	87	12,36	28,84	8,6	11,45	9	13,5	13,62	31,77
577831	3878441	65	9,16	21,38	19,98	28,48	18,52	25,9	10,1	23,56
576972	3878441	70	9,89	23,07	8,6	24,85	15,1	19,6	10,9	25,42
578350	3878668	75	10,61	24,77	31,9	42,5	27,3	35,4	11,7	27,29
580004	3879268	136	19,48	45,46	29,4	39,15	28,6	38,08	21,47	50,07
579485	3879009	97	13,81	32,23	30,6	40,75	32,6	42,3	15,22	35,51
578917	3878020	60	8,43	19,68	18,75	26,88	17,36	24,39	9,29	21,69
579696	3878101	72	10,18	23,75	21,7	30,73	20,15	28,08	11,22	26,17
579956	3877598	65	9,16	21,38	15	20,05	13,8	18,2	10,1	23,56
580783	3877436	73	10,32	24,09	21,4	28,52	15,7	20,44	11,38	26,54
581285	3878133	80	11,34	26,47	20,4	27,2	17,9	22,4	12,5	29,16
581480	3878150	86	12,21	28,5	21,1	28,15	21,9	24,08	13,46	31,4
581496	3877890	80	11,34	26,47	18,9	25,2	17,9	22,4	12,5	29,16
581950	3878117	86	12,21	28,5	33,9	45,15	30,7	42,7	13,46	31,4
583312	3878279	108	15,41	35,96	36,2	48,31	31	40,25	16,98	39,62
583118	3877809	96	13,67	31,89	37,5	50	32,4	48,4	15,06	35,13
584075	3878133	112	15,99	37,32	37,6	50,15	42	51,2	17,63	41,11
586053	3878344	133	19,04	44,44	36,73	50,3	34,33	46,42	20,99	48,95
585550	3877809	128	18,31	42,74	35,5	48,7	33,16	44,91	20,19	47,09
575059	3878133	38	5,24	12,22	15,4	20,59	16,3	20,4	5,77	13,47
575675	3877323	38	5,24	12,22	13,33	19,82	12,25	17,75	5,77	13,47

576080	3876706	36	4,95	11,55	12,84	19,18	11,78	17,15	5,45	12,72
574913	3875977	58	8,14	19,01	31,9	42,52	35,6	46,2	8,97	20,94
575367	3875685	63	8,87	20,7	35,3	47,13	29,6	38,4	9,78	22,81
576340	3877631	46	6,4	14,94	18,7	24,91	15,6	19,5	7,05	16,46
577069	3877874	51	7,13	16,63	19,8	26,4	11	14,28	7,85	18,33
577118	3877339	50	6,98	16,29	15,9	21,2	15,2	18,5	7,69	17,95
577913	3877728	57	8	18,67	11,3	15	13,1	15,96	8,81	20,57
578204	3877809	57	8	18,67	13,6	18,12	11,3	15,12	8,81	20,57
578464	3877225	54	7,56	17,65	14,4	19,23	11,4	17,08	8,33	19,45
578772	3877777	61	8,58	20,02	13,8	18,45	40,9	51,1	9,46	22,06
579064	3876771	59	8,29	19,34	41,1	54,75	12,2	18,2	9,13	21,32
580118	3876674	65	9,16	21,38	21,9	29,15	38,9	58	10,1	23,56
585323	3876090	98	13,96	32,57	46,6	62,15	34,1	44,3	15,38	35,88
585619	3876792	97	15	35	15,2	35,47	15,58	36,35	16,53	38,56
582531	3877315	72	7,5	17,5	7,6	17,74	7,79	18,18	8,26	19,28
579403	3877722	53	7,5	17,5	7,6	17,74	7,79	18,18	8,26	19,28
578852	3877008	43	6	14	6,08	14,19	6,23	14,54	6,61	15,43
576052	3876704	58	8,14	19,01	16,8	22,45	12,5	16,24	8,97	20,94
575999	3878771	26	3,49	8,15	19,7	26,28	14,8	18,5	3,85	21,32

Πίνακας 3. Βάθος στάθμης υπόγειου νερού 2007-2011 για υγρά και ξηρή περίοδο

long	lat	z	DRY_11_12	WET_11_12	DRY_12_13	WET_12_13	DRY_13_14	WET_13_14
575630	3877172	38	7,78	18,15	4,51	10,51	3,99	9,31
579134	3879506	70	13,61	31,77	7,88	18,4	6,98	16,3
577572	3879025	85	15,64	36,51	9,06	21,14	8,03	18,73
577037	3879122	83	15,27	35,63	8,84	20,63	7,83	18,28
577961	3878749	87	16,02	37,39	9,28	21,65	8,22	19,18
577831	3878441	65	11,88	27,72	6,88	16,05	6,09	14,22
576972	3878441	70	12,82	29,92	7,43	17,32	6,58	15,35
578350	3878668	75	13,76	32,12	7,97	18,59	7,06	16,48
580004	3879268	136	25,25	58,94	14,62	34,13	12,96	30,24
579485	3879009	97	17,91	41,79	10,37	24,2	9,19	21,44
578917	3878020	60	10,93	25,52	6,34	14,78	5,61	13,09
579696	3878101	72	13,2	30,8	7,64	17,83	6,77	15,8
579956	3877598	65	11,88	27,72	6,88	16,05	6,09	14,22
580783	3877436	73	13,38	31,24	7,75	18,09	6,87	16,03
581285	3878133	80	14,7	34,31	8,52	19,87	7,54	17,6
581480	3878150	86	15,83	36,95	9,17	21,4	8,12	18,96
581496	3877890	80	14,7	34,31	8,52	19,87	7,54	17,6
581950	3878117	86	15,83	36,95	9,17	21,4	8,12	18,96
583312	3878279	108	19,98	46,63	11,57	27	10,25	23,92
583118	3877809	96	17,72	41,35	10,26	23,94	9,09	21,21
584075	3878133	112	20,73	48,38	12	28,02	10,64	24,82
586053	3878344	133	24,69	57,62	14,29	33,36	12,67	29,56
585550	3877809	128	23,75	55,42	13,75	32,09	12,19	28,43
575059	3878133	38	6,79	15,85	3,94	9,17	3,48	8,13
575675	3877323	38	6,79	15,85	3,94	9,17	3,48	8,13
576080	3876706	36	6,41	14,97	3,72	8,67	3,29	7,68

574913	3875977	58	10,56	24,64	6,12	14,27	5,42	12,64
575367	3875685	63	11,5	26,84	6,66	15,54	5,9	13,77
576340	3877631	46	8,3	19,36	4,81	11,21	4,26	9,93
577069	3877874	51	9,24	21,56	5,35	12,48	4,74	11,06
577118	3877339	50	9,05	21,12	5,25	12,23	4,64	10,84
577913	3877728	57	10,37	24,2	6,01	14,01	5,32	12,42
578204	3877809	57	10,37	24,2	6,01	14,01	5,32	12,42
578464	3877225	54	9,8	22,88	5,68	13,25	5,03	11,74
578772	3877777	61	11,12	25,96	6,44	15,03	5,71	13,32
579064	3876771	59	10,75	25,08	6,23	14,52	5,51	12,87
580118	3876674	65	11,88	27,72	6,88	16,05	6,09	14,22
585323	3876090	98	18,09	42,23	10,48	24,45	9,29	21,67
585619	3876792	97	19,45	45,38	11,26	26,28	9,98	23,28
582531	3877315	72	9,72	22,69	5,63	13,14	4,99	11,64
579403	3877722	53	9,72	22,69	5,63	13,14	4,99	11,64
578852	3877008	43	7,78	18,15	4,51	10,51	3,99	9,31
576052	3876704	58	10,56	24,64	6,12	14,27	5,42	12,64
575999	3878771	26	4,53	10,57	2,63	6,12	2,32	5,42

Πίνακας 4. Βάθος στάθμης υπόγειου νερού 2011-2014 για υγρή και ξηρή περίοδο

long	lat	z	M_O
575630	3877172	38	9,81
579134	3879506	70	17,17
577572	3879025	85	21,26
577037	3879122	83	21,26
577961	3878749	87	17,21
577831	3878441	65	17,14
576972	3878441	70	16,2
578350	3878668	75	21,96
580004	3879268	136	31,99
579485	3879009	97	26,28
578917	3878020	60	15,91
579696	3878101	72	18,85
579956	3877598	65	15,29
580783	3877436	73	17,98
581285	3878133	80	19,28
581480	3878150	86	20,8
581496	3877890	80	19,03
581950	3878117	86	24,89
583312	3878279	108	28,79
583118	3877809	96	27,69
584075	3878133	112	31,26
586053	3878344	133	33,81
585550	3877809	128	32,59
575059	3878133	38	11,2
575675	3877323	38	10,52
576080	3876706	36	10,02
574913	3875977	58	20,49
575367	3875685	63	20,91

576340	3877631	46	12,96
577069	3877874	51	13,28
577118	3877339	50	13,06
577913	3877728	57	13,12
578204	3877809	57	13,32
578464	3877225	54	13,11
578772	3877777	61	18,71
579064	3876771	59	18,52
580118	3876674	65	21,07
585323	3876090	98	29,37
585619	3876792	97	24,52
582531	3877315	72	12,26
579403	3877722	53	12,26
578852	3877008	43	9,81
576052	3876704	58	14,19
575999	3878771	26	10,55

Πίνακας 5. Μέσος όρος στάθμης για το 2007-2014

Στη συνέχεια αφού περάστηκαν τα σημεία στο ArcMap και συμπληρώθηκε ο πίνακας , δημιουργήθηκε μία συνεχή επιφάνεια χρησιμοποιώντας αυτά τα σημεία μέσω του GeostatisticalAnalyst στο GIS.

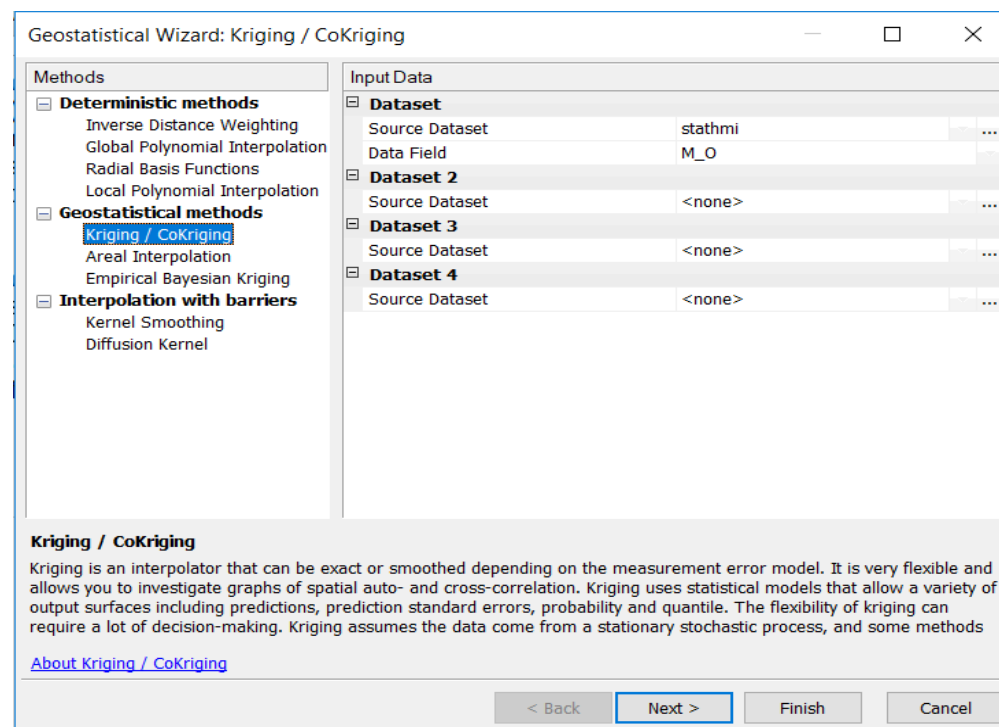
Οι γεωστατιστικές μέθοδοι βασίζονται σε στατιστικά μοντέλα που περιλαμβάνουν αυτοσυσχέτιση (στατιστικές σχέσεις μεταξύ των μετρούμενων σημείων). Αυτές οι τεχνικές έχουν την ικανότητα να παράγουν επιφάνειες πρόβλεψης και μπορούν επίσης να παρέχουν ένα μέτρο της ακρίβειας αυτών των προβλέψεων.

Τα βασικά βήματα για τη δημιουργία του χάρτη των μέσων όρων της στάθμης του υπόγειου νερού μέσω του Geostatistical Analyst είναι τα εξής:

1. Geostatistical Analyst -> Geostatistical Wizard ->Geostatistical methods - >Geostatistical Kriging/CoKriging
2. Kriging Type -> Ordinary , Output Surface Type -> Prediction
3. Model #1 ->Gaussian ,καθώς το μέσο σφάλμα βγαίνει κοντά στο 0 και πιο μικρό συγκριτικά με τα άλλα μοντέλα τα οποία και ελέγχθηκαν. Επίσης , show points -> Averaged
4. Finish ->τελικός χάρτης

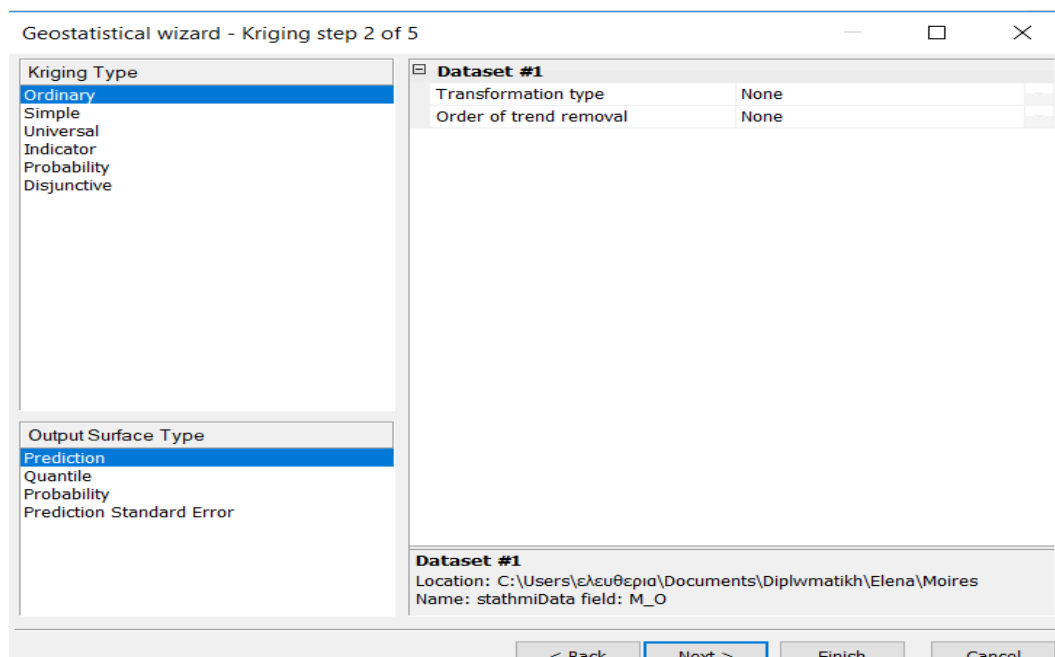
Παρακάτω φαίνεται όλη η διαδικασία σε εικόνες από το ArcMap και ο χάρτης της στάθμης του υπόγειου νερού.

1.



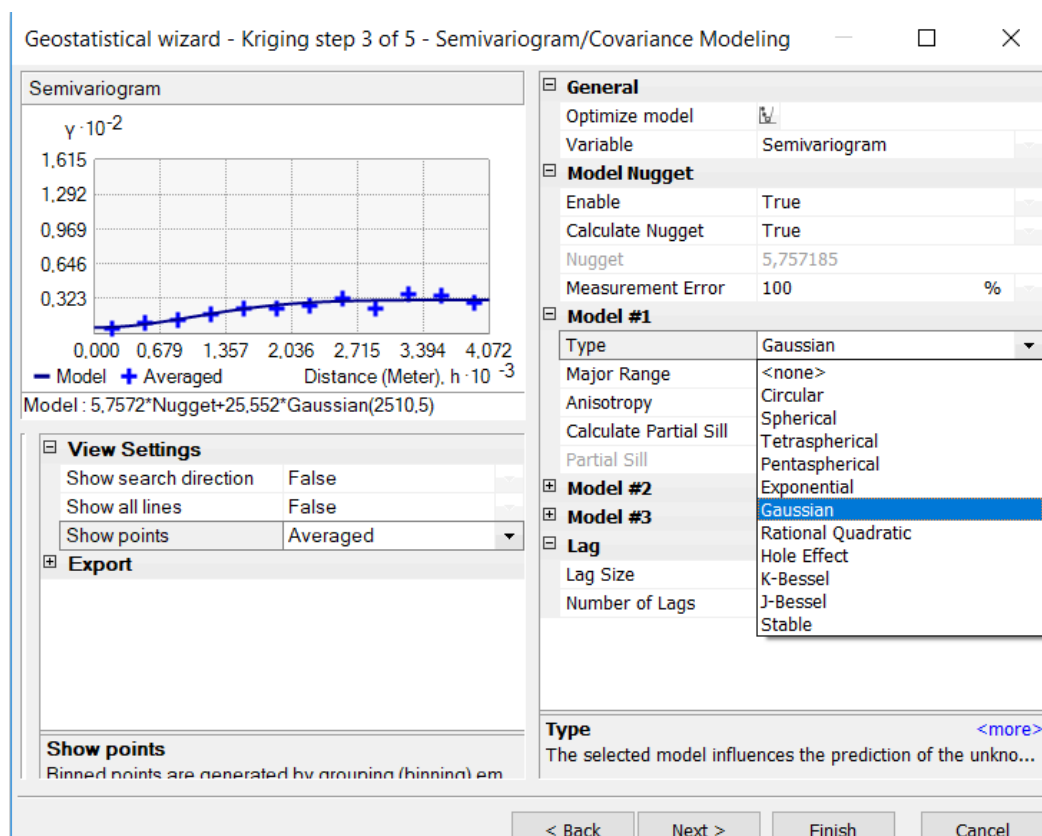
Εικόνα 2. Δημιουργία επιφάνειας για τον μ.ο της στάθμης του υπόγειου νερού- βημα 1

2.



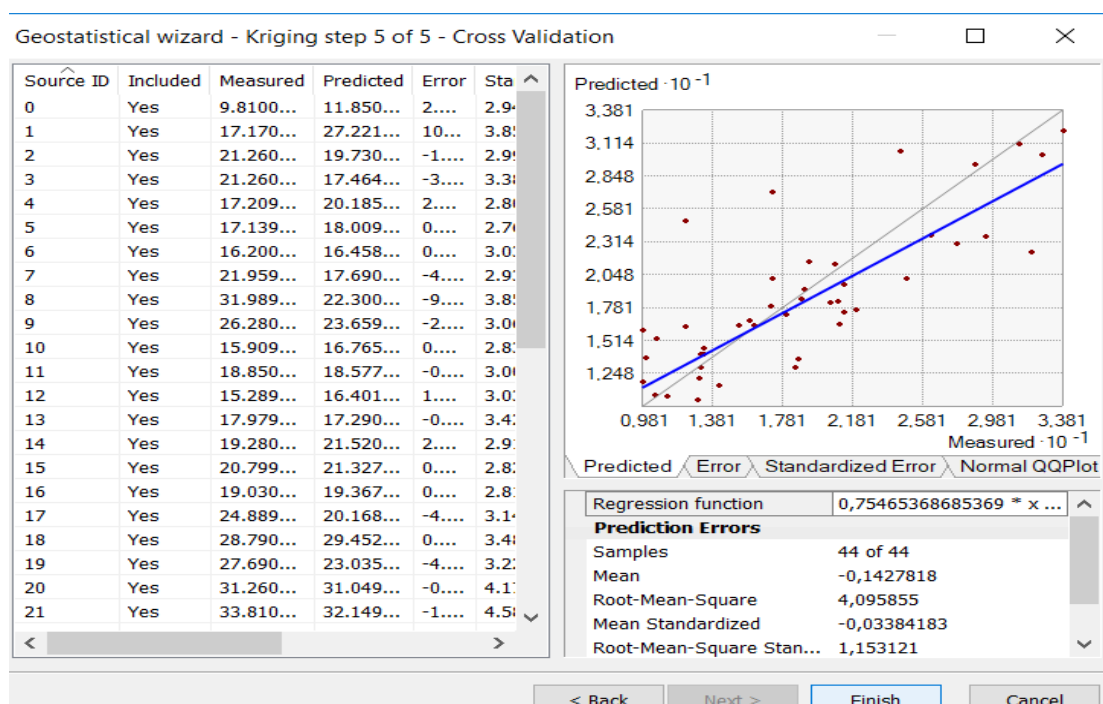
Εικόνα 3. Δημιουργία επιφάνειας για τον μ.ο της στάθμης του υπόγειου νερού- βήμα 2

3.



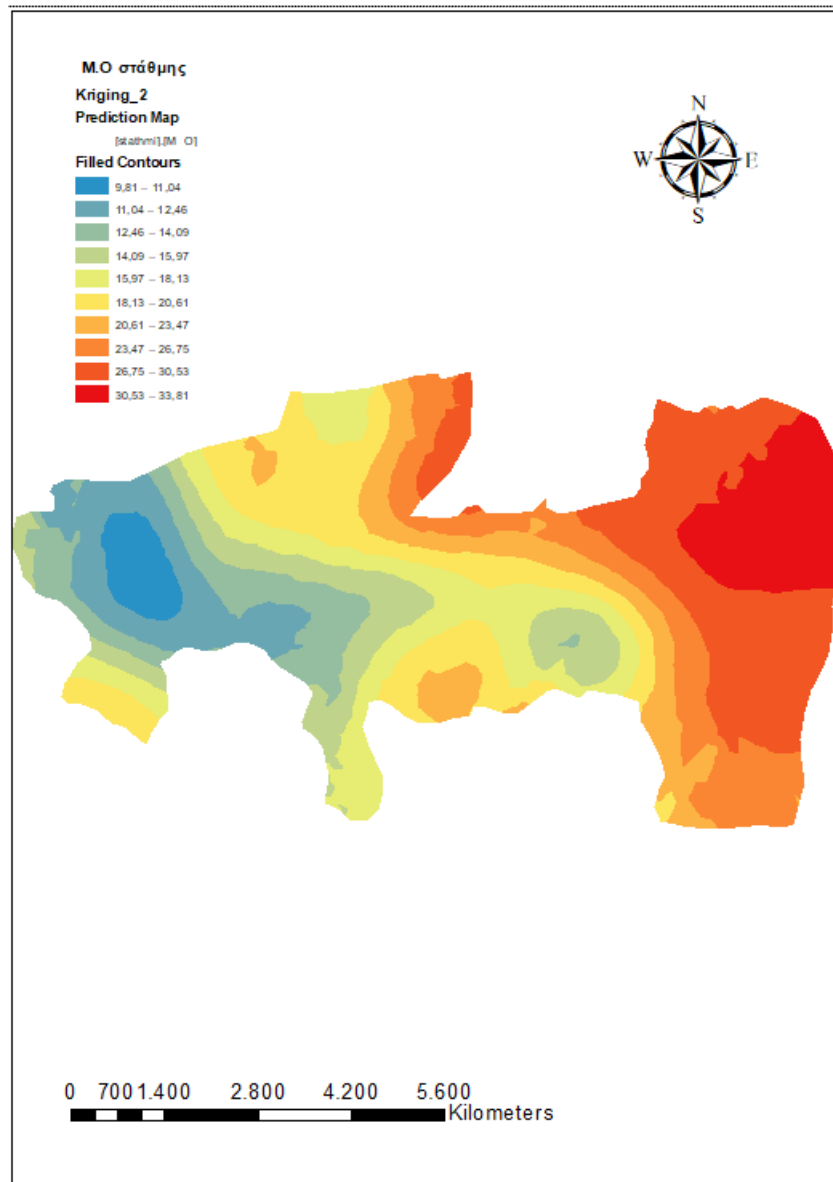
Εικόνα 4. Δημιουργία επιφάνειας για τον μ.ο της στάθμης του υπόγειου νερού- βήμα 3

4.



Εικόνα 5. Δημιουργία επιφάνειας για τον μ.ο της στάθμης του υπόγειου νερού- βημα 4

Προσαρμόζουμε το αποτέλεσμα στην περιοχή μελέτη μας, κάνοντας Extent και στη συνέχεια μετατρέπουμε το αρχείο σε raster και έτσι προκύπτει ο παρακάτω χάρτης :



Χάρτης 5. Μέσος όρος στάθμης του υπόγειου νερού

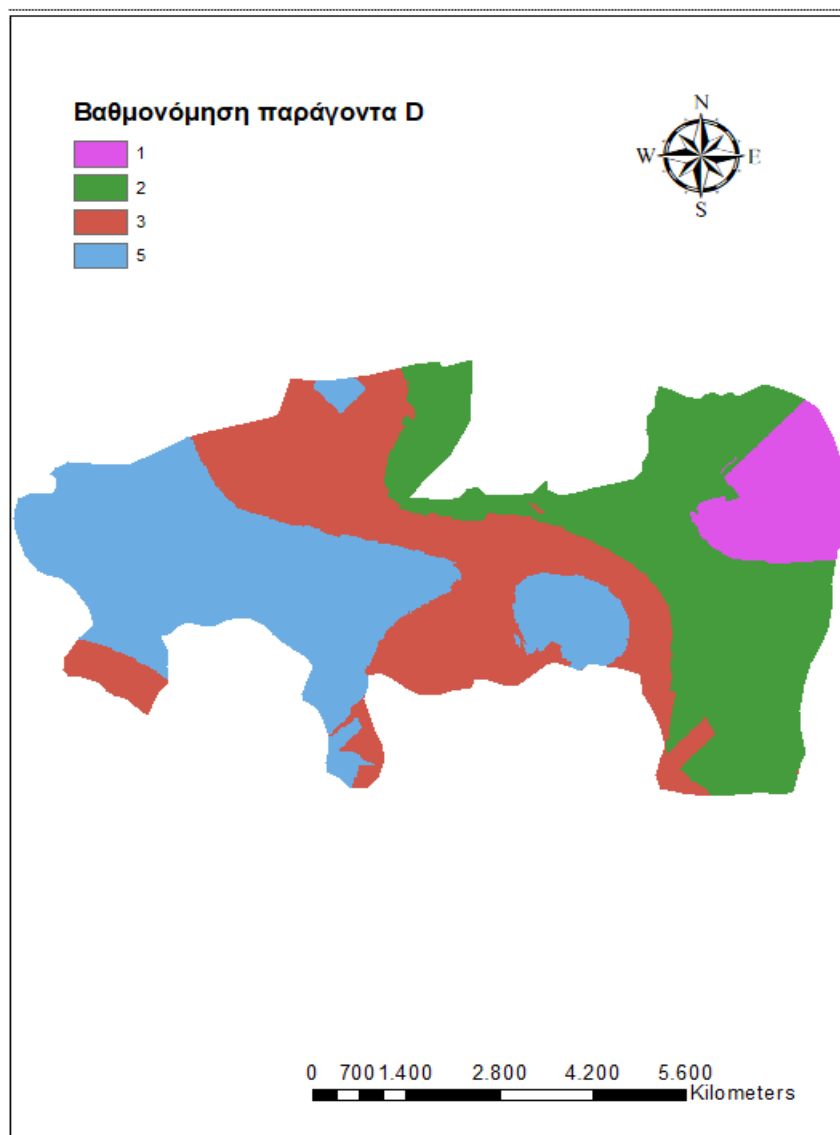
Στο συγκεκριμένο χάρτη υπάρχουν δέκα τάξεις βαθών στάθμης του υπόγειου νερού, με τιμές 9,81-33,81 m. Τα μεγαλύτερα βάθη εντοπίζονται βορειοανατολικά της περιοχής ενώ τα χαμηλότερα δυτικά.

Στη συνέχεια, κάνουμε Reclass στον χάρτη των βαθών για τη βαθμονόμηση της παραμέτρου D ώστε να μελετήσουμε την τρωτότητα της περιοχής με βάση το συγκεκριμένο παράγοντα.

Με βάση τις τιμές που έχω από 9- 15,2 m δίνω το βάρος 5, από 15-23 m το βάρος 3, από 23-31 m το βάρος 2 και για μεγαλύτερο από 31 m το βάρος 1. Τα βάρη αυτά δόθηκαν με τη βοήθεια του παρακάτω πίνακα:

Depth to water (D) (feet)	0-5	10
	5-15	9
	15-30	7
	30-50	5
	50-75	3
	75-100	2
	>100	1

Πίνακας 6.Βαθμονόμηση παράγοντα D (Alleretal. 1987)



Χάρτης 6. Βαθμονόμηση παράγοντα D

Παρατηρούμε ότι στις μεγαλύτερες στάθμες η τρωτότητα είναι μικρότερη, ενώ στις μικρότερες το αντίθετο. Αυτό συμβαίνει γιατί ο ρύπος κατεισδύει ευκολότερα σε μικρά βάθη καθώς ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται πιο κοντά στο πεδίο όπου είναι ενεργός ο ρύπος. Παρατηρούμε λοιπόν ότι η τρωτότητα είναι μεγάλη δυτικά των Μοιρών και μικρότερη ανατολικά.

4.1.2. Εκτίμηση παράγοντα R

Για τον παράγοντα R δηλαδή την ενεργή κατείσδυση, χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις βροχοπτώσεων για ξηρή και υγρή περίοδο στην περιοχή των Μοιρών από το έτος 2007 έως το 2014. Στη συνέχεια υπολογίστηκε ο μέσος όρος για όλα τα έτη σε κάθε σταθμό ξεχωριστά και μετά πολλαπλασιάζοντας τις τιμές αυτές με τον συντελεστή κατύσδεισης (18%), υπολογίστηκε η ενεργή κατύσδειση . Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες και είναι σε mm.

NAME	X	Y	Z	WET_07_08	DRY_07_08	WET_08_09	DRY_08_09	WET_09_10	DRY_09_10
Ag. Varvara	590910,3	3887874	570	656,46	281,34	741,23	317,67	891,7	92,5
Gergeri	584536,3	3887230	450	580,16	248,64	726,81	311,49	719,6	15
Ag. Kyrillos	583036,3	3870700	450	393,4	168,6	497,9	54,6	617,5	158,3
Pompia	578536,3	3874150	150	513,6	0	854,3	92,3	870,2	589,2
Zaros	581798,6	3887788	500	564,9	242,1	702,8	301,2	1010,4	372
Asimi	600049,1	3877943	200	385,49	165,21	393,33	168,57	579,2	29,8
Kapetaniana	594138,4	3869421	800	484,19	207,51	568,75	243,75	830,3	92,7
Lagolia	571666,3	3884860	140	449,4	192,6	541,31	231,99	666	91,1
Morwni	582134	3883486	400	522,83	224,07	670,46	287,34	725	97,2
Vagionia	591039,6	3874936	190	478,2	67,5	594,2	27,6	621,3	5,3
Vorizia	577227,7	3889597	520	650,09	278,61	962,78	412,62	1055	90,9

Πίνακας 7. Βροχόπτωση για ξηρή και υγρή περίοδο από το 2007-2010

NAME	X	Y	Z	WET_10_11	DRY_10_11	WET_11_12	DRY_11_12	WET_12_13	DRY_12_13
Ag. Varvara	590910,3	3887874	570	665,4	92,3	843,6	6,2	521,7	3,3
Gergeri	584536,3	3887230	450	730,2	133,8	1266	319,2	683,4	0
Ag. Kyrillos	583036,3	3870700	450	592	90	818,8	7,6	515,3	3,7
Pompia	578536,3	3874150	150	560	90	745,9	11,8	472,8	6,2
Zaros	581798,6	3887788	500	1007,4	139,2	1064,3	16	501,4	4,5
Asimi	600049,1	3877943	200	636	78,4	696	8,4	531,9	2,7
Kapetaniana	594138,4	3869421	800	559	100	824,9	7,2	509,5	3,6
Lagolia	571666,3	3884860	140	546,5	28	792,3	33,4	554,5	49,2
Morwni	582134	3883486	400	658	19	924,4	50,3	729,1	0
Vagionia	591039,6	3874936	190	555	95	875,4	4,3	542,6	2,1
Vorizia	577227,7	3889597	520	921,6	78,7	1502,4	80,9	1073,3	0

Πίνακας 8. Βροχόπτωση για ξηρή και υγρή περίοδο από το 2010-2013

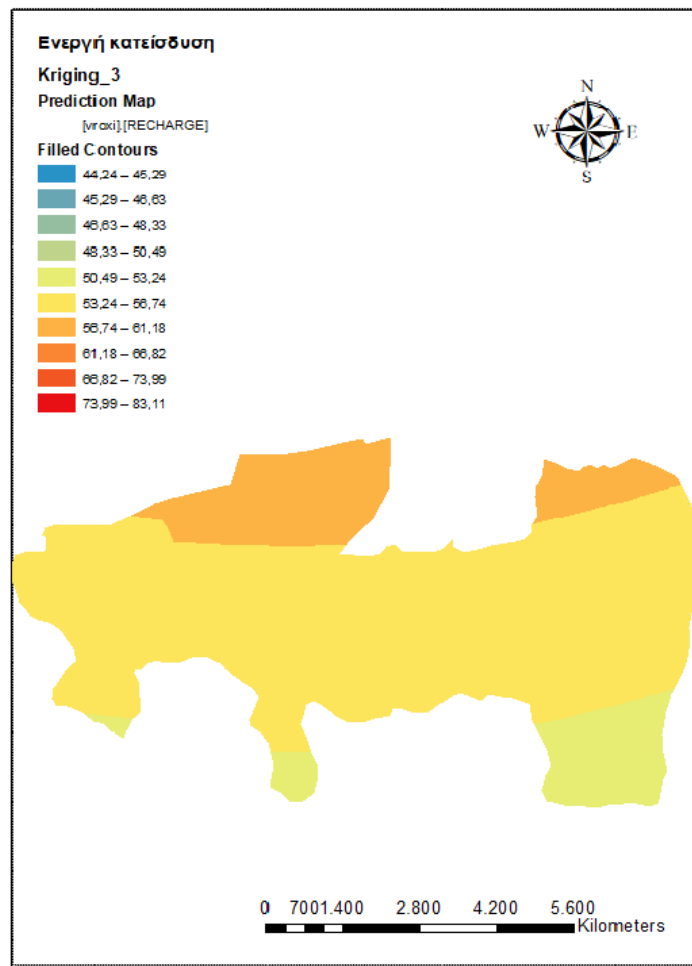
NAME	X	Y	Z	WET_13_14	DRY_13_14
Ag. Varvara	590910,3	3887874	570	586,4	109
Gergeri	584536,3	3887230	450	425,5	10,3
Ag. Kyrillos	583036,3	3870700	450	435,1	8,5
Pompia	578536,3	3874150	150	401,3	14,8
Zaros	581798,6	3887788	500	422,1	10,9
Asimi	600049,1	3877943	200	447,5	6,1
Kapetaniana	594138,4	3869421	800	429,9	8,5
Lagolia	571666,3	3884860	140	382,5	73
Morwni	582134	3883486	400	504,1	59,5
Vagionia	591039,6	3874936	190	455,1	4,7
Vorizia	577227,7	3889597	520	564,2	85,8

Πίνακας 9. Βροχόπτωση για ξηρή και υγρή περίοδο για το 2013-2014

NAME	X	Y	Z	M_O_B	RECHARGE
Ag. Varvara	590910,3	3887874	570	414,91	62,24
Gergeri	584536,3	3887230	450	440,72	66,11
Ag. Kyrillos	583036,3	3870700	450	311,52	46,73
Pompia	578536,3	3874150	150	373,03	55,95
Zaros	581798,6	3887788	500	454,23	68,13
Asimi	600049,1	3877943	200	294,9	44,24
Kapetaniana	594138,4	3869421	800	347,84	52,18
Lagolia	571666,3	3884860	140	330,84	49,63
Morwni	582134	3883486	400	390,81	58,62
Vagionia	591039,6	3874936	190	309,16	46,37
Vorizia	577227,7	3889597	520	554,06	83,11

Πίνακας 10. Μέσος όρος βροχόπτωσης και ενεργή κατέλσδυση περιοχής μελέτης

Ακριβώς με την ίδια διαδικασία, όπως στις στάθμες, έγινε ο χάρτης της ενεργής κατείσδυσης στο ArcMap του GIS με γεωστατιστική ανάλυση. Η μόνη διαφορά είναι στο Trend Type όπου εφαρμόστηκε το K-Bessel. Έτσι ακολουθώντας τη διαδικασία αυτή προκύπτει ο παρακάτω χάρτης.

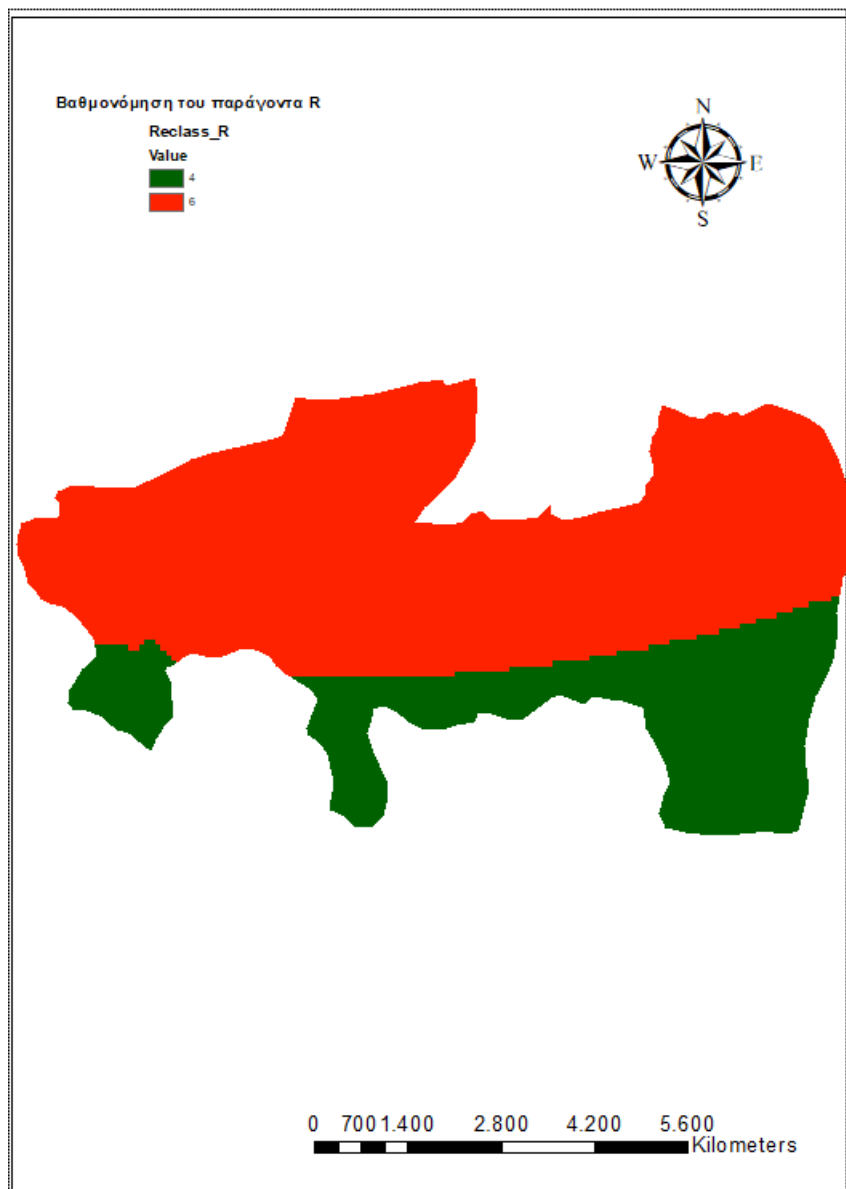


Χάρτης 7. Ενεργή κατείσδυση στην περιοχή μελέτης

Παρατηρούμε ότι η ενεργή κατείσδυση, άρα και η βροχόπτωση στην προκειμένη περίπτωση είναι μεγαλύτερη στο βόρειο τμήμα της περιοχής, όμως και στο κέντρο οι τιμές είναι πολύ κοντά με αυτές στο βόρειο τμήμα της περιοχής, ενώ στο νότιο παίρνει τις μικρότερες τιμές. Οι τιμές που δεν εμφανίζεται το χρώμα τους είναι επειδή τα σημεία των μετρήσεων βροχόπτωσης δεν είναι γειτονικά.

Στη συνέχεια, κάνουμε Reclass στον χάρτη της ενεργής κατεύσεως για τη βαθμονόμηση της παραμέτρου R ώστε να μελετήσουμε την τρωτότητα της περιοχής με βάση τον συγκεκριμένο παράγοντα.

Με βάση τις τιμές της περιοχής για τιμές μικρότερες του 65 mm αντιστοιχεί το βάρος 4 και για μεγαλύτερες του 65 mm το βάρος 6 (Τα βάρη αυτά δόθηκαν, βάση της περιοχής μελέτης). Παρακάτω φαίνεται ο χάρτης της βαθμονόμησης του παράγοντα R.



Χάρτης 8. Βαθμονόμηση παράγοντα R

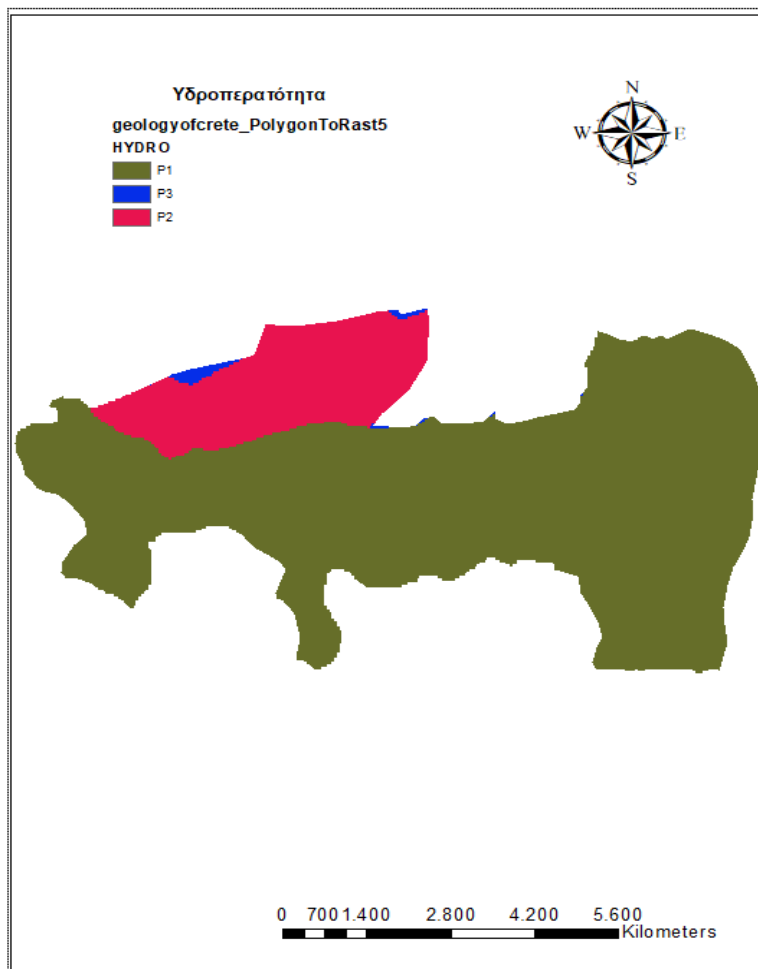
Όπως φαίνεται στο χάρτη η μεγαλύτερη τρωτότητα εμφανίζεται στο βόρειο και στο κεντρικό τμήμα της περιοχής και μάλιστα παίρνουν το ίδιο βάρος καθώς όπως προαναφέρθηκε οι τιμές είναι πολύ κοντινές. Στο κομμάτι αυτό η κατείσδυση αλλά και η βροχόπτωση είναι μεγαλύτερη οπότε είναι λογικό η τρωτότητα του εδάφους να είναι μεγαλύτερη καθώς ο ρύπος παρνάει πιο εύκολα στο υπόγειο νερό. Στο νότιο κομμάτι η τρωτότητα είναι μικρότερη.

4.1.3. Εκτίμηση παράγοντα Α

Το υδροφόρο μέσο ταξινομείται βάση της υδροπερατότητας των γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής. Στην περιοχή μελέτης υπάρχουν οι εξής κατηγορίες υδροπερατότητας :

- Κοκκώδεις προσχωματικές κυρίως αποθέσεις κυμαινόμενης υδροπερατότητας (P1). Στη κατηγορία αυτή ανήκουν οι αλλουβιακές αποθέσεις, οι ποτάμιες και θαλάσσιες αναβαθμίδες, τα κροκαλοπαγή ποτάμιας προέλευσης, τα πλευρικά κορήματα και οι κώνοι κορημάτων όταν έχουν σημαντική εξάπλωση. Αναπτύσσονται, κατά θέσεις, αξιόλογες φρεάτιες υδροφορίες. Κοντά στη θάλασσα οι υδροφορίες αυτές έχουν υποστεί κατά θέσεις, υποβάθμιση εξαιτίας της υφαλμύρισης.
- Μειοκαινικές και πλειοκαινικές αποθέσεις μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας (P2). Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται τα κροκαλοπαγή και οι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι των νεογενών σχηματισμών που φιλοξενούν επιμέρους υπόγειες υδροφορίες μέσου έως μικρού δυναμικού.
- Κοκκώδεις μη προσχωματικές αποθέσεις μικρής έως πολύ μικρής υδροπερατότητας (P3). Στη κατηγορία αυτή ανήκουν οι πλειοκαινικές και μειοκαινικές μάργες, καθώς και ο αδιαίρετος σχηματισμός του νεογενούς. Τοπικά στον αδιαίρετο σχηματισμό των νεογενών αναμένεται η ανάπτυξη ασθενών υδροφοριών μέσα σε παρεμβολές κροκαλοπαγών ή μαργαϊκών ασβεστολίθων. Κατά θέσεις στις νεογενείς αποθέσεις αναπτύσσονται στρώματα γύψου που παρουσιάζουν αξιόλογη υδροφορία εντόνως όμως υποβαθμισμένη εξαιτίας των θειϊκών ιόντων.

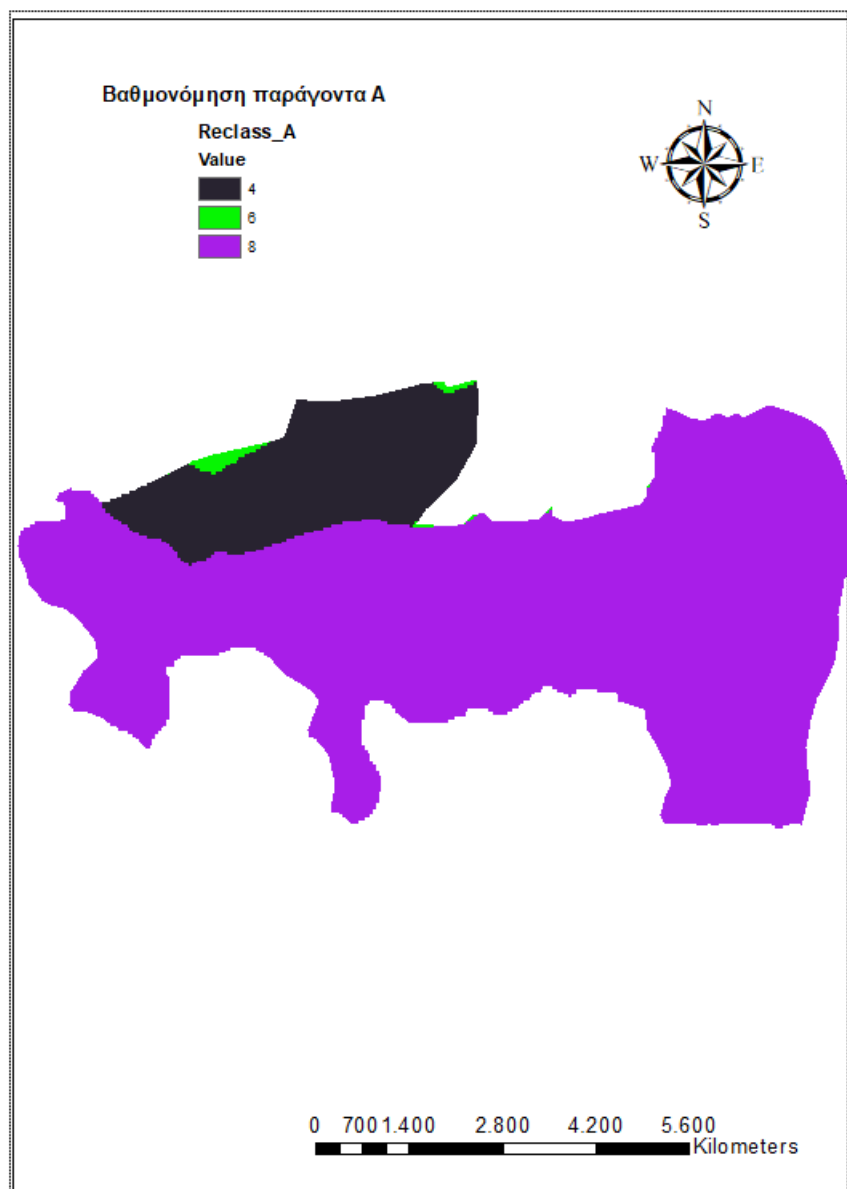
Παρακάτω παρουσιάζεται ο χάρτης υδροπερατότητας (μορφής raster) της περιοχής μελέτης.



Χάρτης 9. Υδροπερατότητα περιοχής μελέτης

Παρατηρούμε ότι το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής μελέτης είναι υδροπερατότητας P1 και μόνο στο βόρειο-δυτικό τμήμα εμφανίζεται η κατηγορία P2 και ελάχιστα η κατηγορία P3.

Όσον αφορά τη βαθμονόμηση του παράγοντα A, η κατηγορία P1 παίρνει το βάρος 8, η P2 το βάρος 6 και η P3 το βάρος 4. Οπότε κάνουμε Reclass στον χάρτη της υδροπερατότητας για τη βαθμονόμηση της παραμέτρου A ώστε να μελετήσουμε την τρωτότητα της περιοχής με βάση τον συγκεκριμένο παράγοντα.



Χάρτης 10. Βαθμονόμηση παράγοντα Α

Παρατηρούμε ότι η τρωτότητα είναι μεγαλύτερη στα σημεία όπου η υδροπερατότητα είναι υψηλή κάτι που είναι λογικό καθώς ο ρύπος περνάει πολύ πιο ευκολα λόγω των συγκεκριμένων γεωλογικών σχηματισμών.

4.1.4. Εκτίμηση παράγοντα S

Στην περιοχή μελέτης τα εδαφικά στρώματα που υπάρχουν είναι τα εξής :

- Αλλουβιακά αποθέματα εν αναμείξει με REGOSOLS [αποθέσεις άμμου, χαλικιών και άλλων φερτών υλικών που παράγονται εξαιτίας της ροής ύδατος σε ένα ποτάμιο περιβάλλον εν αναμείξη με REGOSOLS (περιέχει όλα τα εδάφη που δεν μπορούν να φιλοξενηθούν σε καμία από τις άλλες ομάδες και τα χαρακτηρίζει η χαμηλή ικανότητα συγκράτησης νερού)]
- Αλλοθιγενή ορφνά και ορφνέρυθρα αλκαλικά μεσογειακά (εκτός από άμμο και χαλίκια υπάρχουν και αποθέσεις αργίλου η οποία κάνει την περατότητα του εδάφους μικρότερη)

Τα εδαφικά στρώματα της περιοχής των Μοιρών παρουσιάζονται στον παρακάτω χάρτη (μορφής raster) :



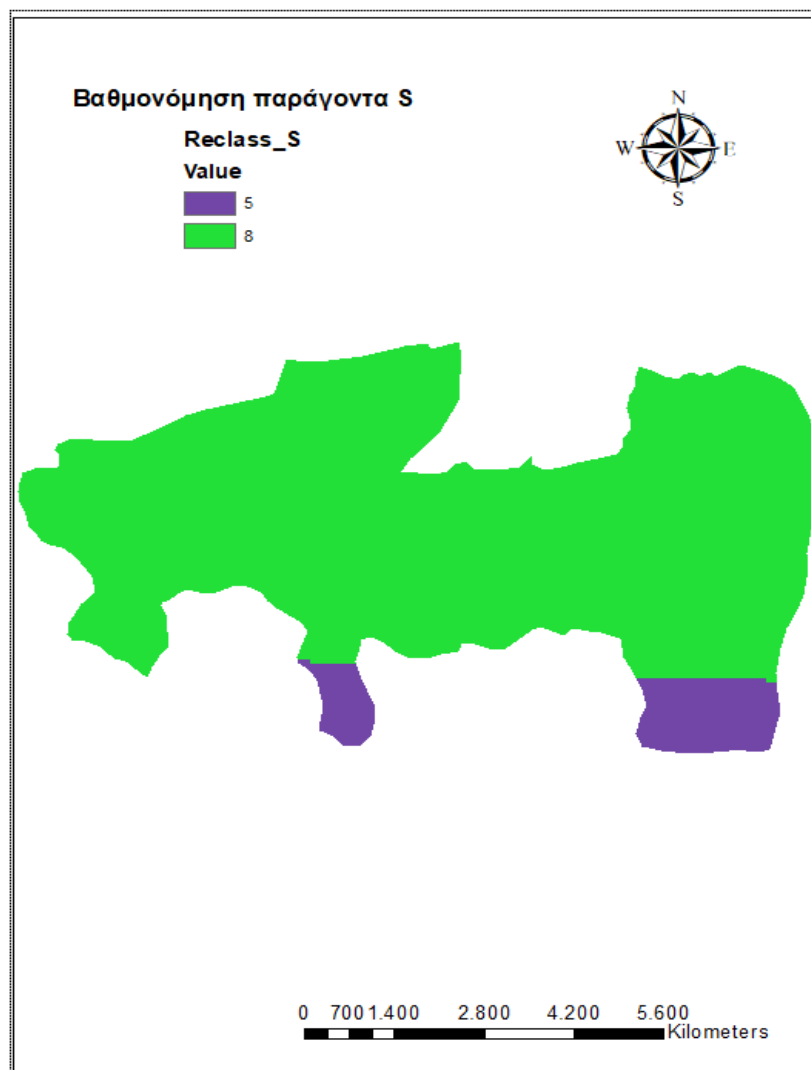
Χάρτης 11. Εδαφικά στρώματα Μοιρών

Όσον αφορά τη βαθμονόμηση του παράγοντα S, τα αλλουβιακά αποθέματα εν αναμείξει με REGOSOLS παίρνουν βάρος 8, ενώ τα Αλλοθιγενή ορφνά και ορφνέρυθρα αλκαλικά μεσογειακά παίρνουν βάρος 5. Τα βάρη αυτά δόθηκαν με τη βοήθεια του παρακάτω πίνακα:

Soil media (S)	Soil thin or absent	10
	Gravel	10
	Sand	9
	Peat	8
	Shrinking and/or aggregated clay	7
	Sandy loam	4
	LoamSilty loam	5
	Clay loam	4
	Muck	3
		2
	Non-shrinking and non-aggregated clay	1

Πίνακας 11. Βαθμονόμηση παράγοντα S (Alleretal. 1987)

Οπότε κάνω Reclass στον χάρτη 9 για τη βαθμονόμηση της παραμέτρου S ώστε να μελετήσουμε την τρωτότητα της περιοχής με βάση τον συγκεκριμένο παράγοντα.

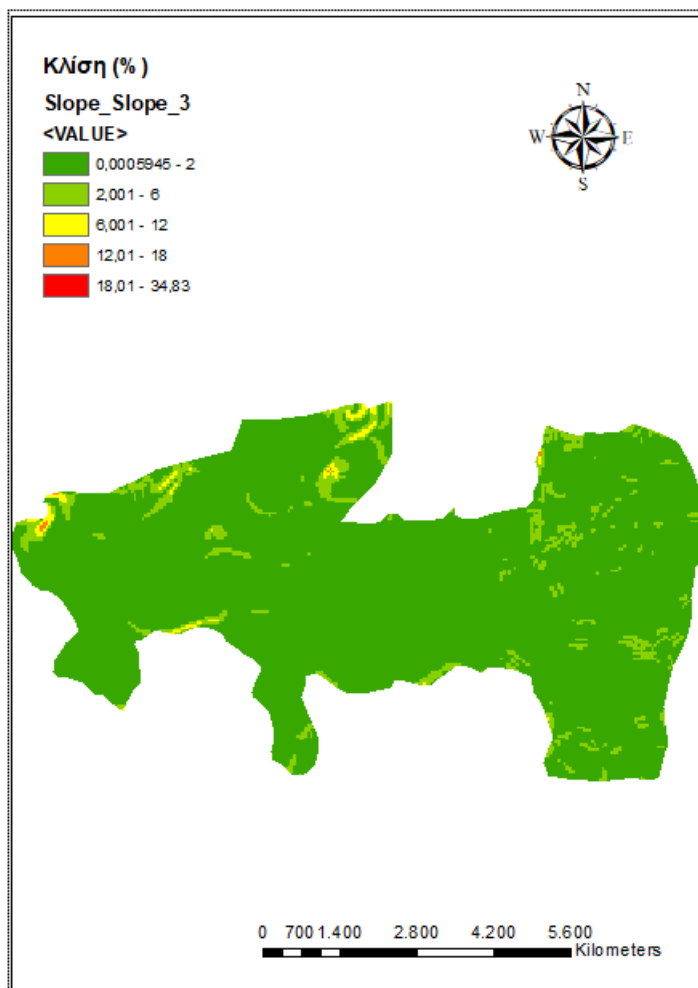


Χάρτης 12. Βαθμονόμηση παράγοντα S

Δόθηκε μικρότερο βάρος τρωτότητας στο νότιο κομμάτι της περιοχής καθώς το έδαφος είναι αργιλικό με αποτέλεσμα να μην είναι τόσο περατό όσο το υπόλοιπο κομμάτι της περιοχής των Μοιρών.

4.1.5. Εκτίμηση παράγοντα T

Για τον υπολογισμό των κλίσεων της περιοχής των Μοιρών χρησιμοποιήθηκε το αρχείο EU-DEM το οποίο είναι ένα σύνολο δεδομένων raster 3D με υψόμετρα που έχουν καταγραφεί περίπου κάθε 30 μέτρα. Με τη βοήθεια του εργαλείου Slope (3DAnalyst) του ArcMap στο GIS υπολογίστηκαν αρχικά οι κλίσεις σε degree και στη συνέχεια σε ποσοστό επί τοις εκατό. Παρακάτω παρουσιάζεται ο χάρτης κλίσεων ποσοστού επί τοις εκατό.



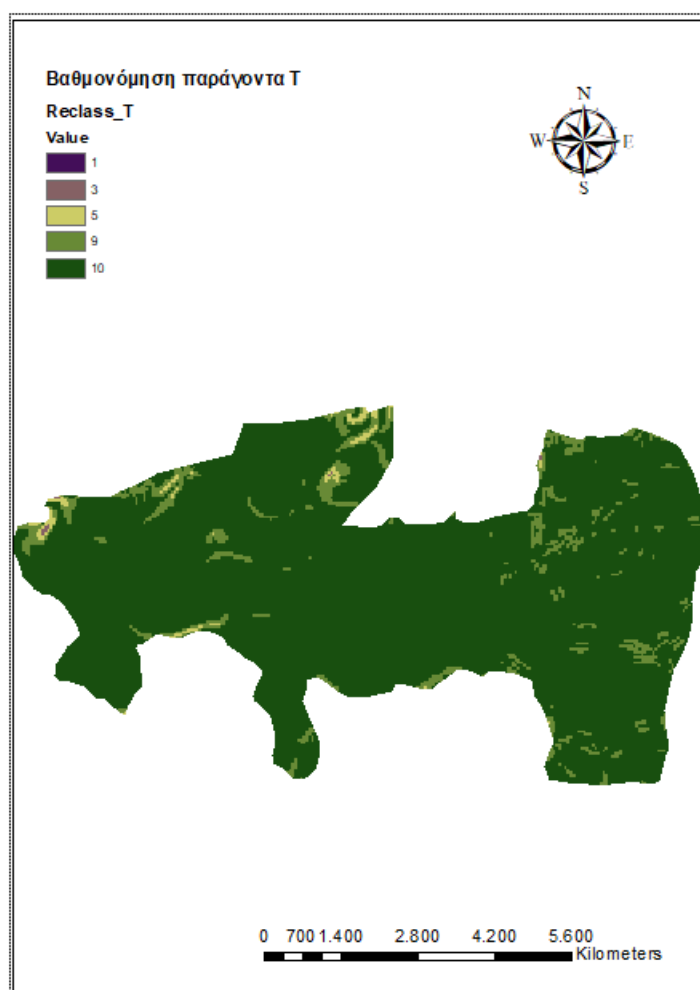
Χάρτης 13. Κλίσεις(%) περιοχής μελέτης

Για την βαθμονόμηση του παράγοντα T, από 0-2 % δίνω το βάρος 10, από 2-6 % το βάρος 9, από 6-12 % το βάρος 5, από 12-18 % το βάρος 3 και για >18 % το βάρος 1. Τα βάρη αυτά δόθηκαν σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα :

Topography (T) (slope%)	0-2	10
	2-6	9
	6-12	5
	12-18	3
	>18	1

Πίνακας 12. Βαθμονόμηση παράγοντα T (Alleretal. 1987)

Έτσι κάνω Reclass στο χάρτη 11 και προκύπτει ο παρακάτω χάρτης βαθμονόμησης του παράγοντα T.



Χάρτης 14. Βαθμονόμηση παράγοντα T

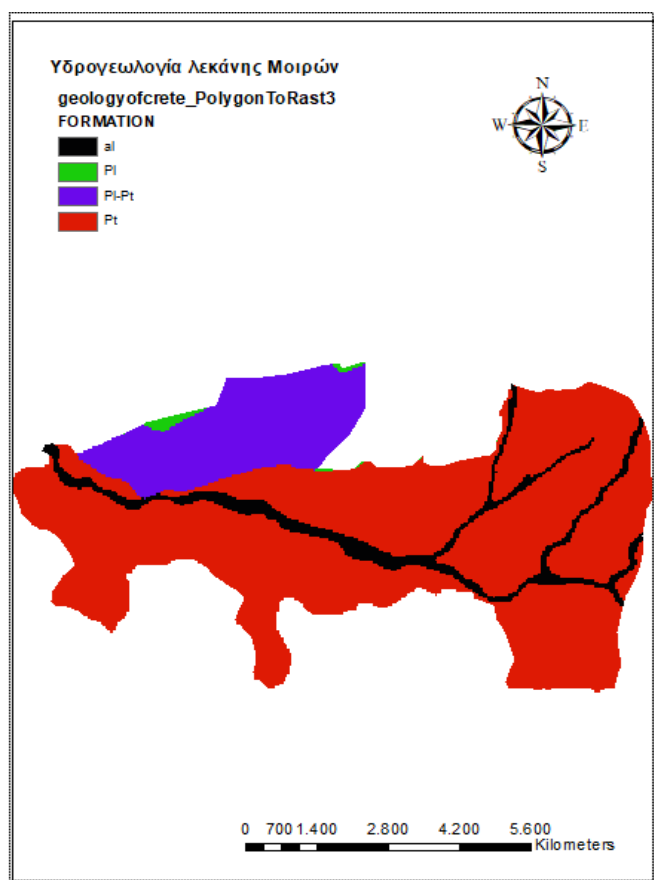
Σε περιοχές με μικρή κλίση δηλαδή στο μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής μελέτης η τρωτότητα είναι μεγάλη, γιατί ο ρύπος κατεισδύει ευκολότερα σε σχεδόν επίπεδες επιφάνειες. Αντίθετα, σε περιοχές με μεγάλη κλίση η τρωτότητα είναι μικρή, γιατί ο ρυθμός μεταφοράς του ρύπου είναι μεγαλύτερος από εκείνον της κατεΐσδυσής του. Τέλος

υπάρχουν και περιοχές ενδιάμεσης τρωτότητας που αντιστοιχούν σε ενδιάμεσες κλίσεις, άρα και σε μέτρια τρωτότητα.

4.1.6. Εκτίμηση παράγοντα I

Η υδρολογική λεκάνη των Μοιρών αποτελείται από τεταρτογενή έως νεογενή αλλουβιακά ιζήματα, τα οποία διαμορφώνουν μια εξαιρετικά μεταβλητή και σύνθετη διά-στρωματική αλληλουχία χαλικιών, αμμοχάλικων, άμμου, ιλύς, ιλύς-άμμου και αργίλων (χάρτης 13) . Πιο συγκεκριμένα αποτελείται από:

- al (Αλλουβιακές αποθέσεις. Σύγχρονες αποθέσεις εσωτερικών λεκανών και παράκτιες αποθέσεις στις κοίτες και τις εκβολές των χειμάρρων. Αργιλοαμμώδη χαλαρά εν γένει υλικά αποτελούμενα από αργίλους, άμμους και κροκαλοατύπες)
- Pl (Πλειοκαινικές αποθέσεις αποτελούμενες από μαργαϊκούς ψαμμίτες, μάργες, μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, κροκαλοπαγή και παρεμβολές γύψων. Κατά θέσεις παρατηρείται επικράτηση των μαργών, μαργαϊκών ασβεστόλιθων και των κροκαλοπαγών)
- Pt (Πλειστόκαινο αδιαίρετο (κροκαλοπαγή, άμμοι, μάργες, ψαμμίτες, άργιλοι, βιοκλαστικοί ασβεστόλιθοι)
- Pl- Pt (Κυρίως μάργες, αλλά και άμμοι, κροκαλοπαγή κ.λ.π.)



Χάρτης 15. Υδρογεωλογία λεκάνης Μοιρών

Για την εκτίμηση της επίδρασης της ακόρεστης ζώνης (I) δίνω τα εξής βάρη :

aI→ 8 βαθμοί

Pt→ 8 βαθμοί

PI→ 7 βαθμοί

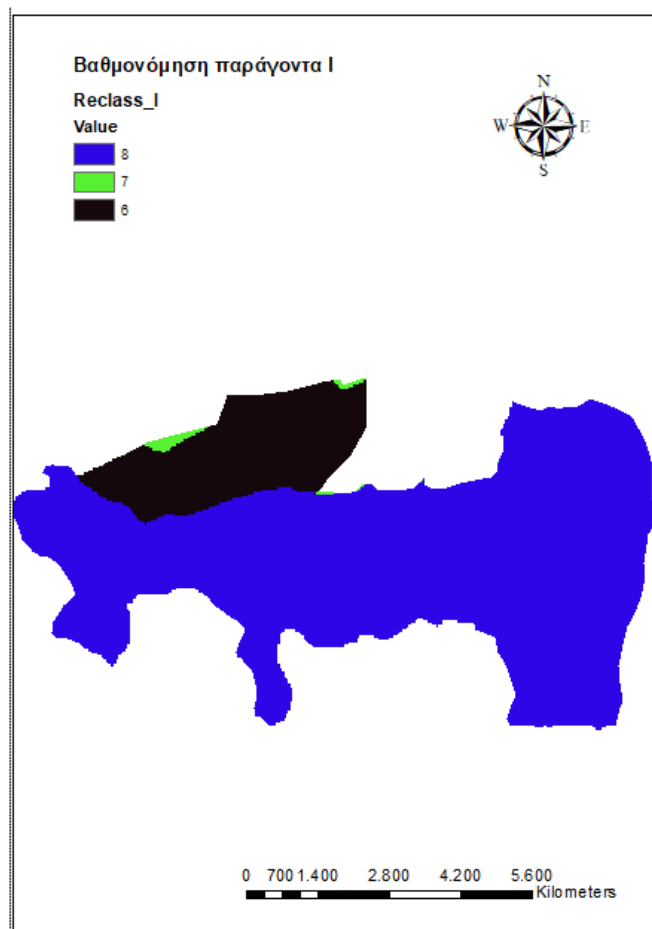
PI-Pt→ 6 βαθμοί

Η παραπάνω βαθμονόμηση έγινε, βάση της περιοχής μελέτης και με τη βοήθεια του παρακάτω πίνακα:

Impact of vadose zone (I)	Silt/clay	1
	Shale	3
	Limestone	6
	Sandstone	6
	Bedded limestone, Sandstone, shale	6
	Sand and gravel with significant silt and clay	6
	Metamorphic/igneous sand and gravel	4
	Basalt	8
	Karst limestone	9
		10

Πίνακας 13. Βαθμονόμηση παράγοντα I (Aller et al. 1987)

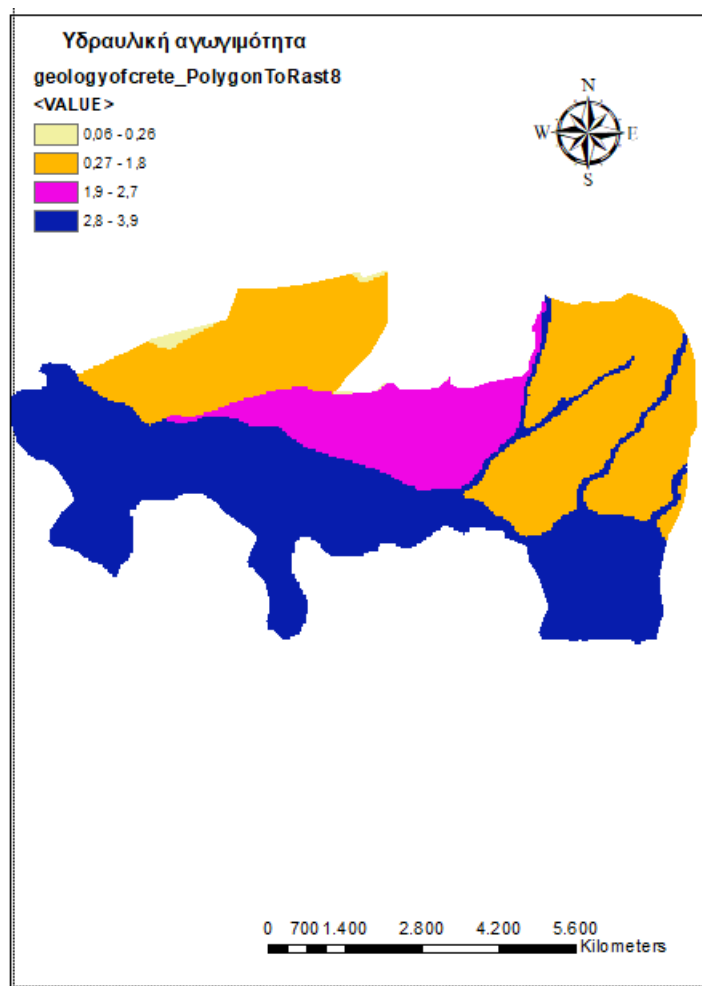
Κάνω Reclass και προκύπτει ο παρακάτω χάρτης βαρών για τον παράγοντα I.



Χάρτης 16. Βαθμονόμηση παράγοντα I

4.1.7. Εκτίμηση παράγοντα C

Η υδραυλική αγωγιμότητα της περιοχής παρουσιάζεται στον παρακάτω χάρτη μορφής raster.



Χάρτης 17. Υδραυλική αγωγιμότητα περιοχής μελέτης

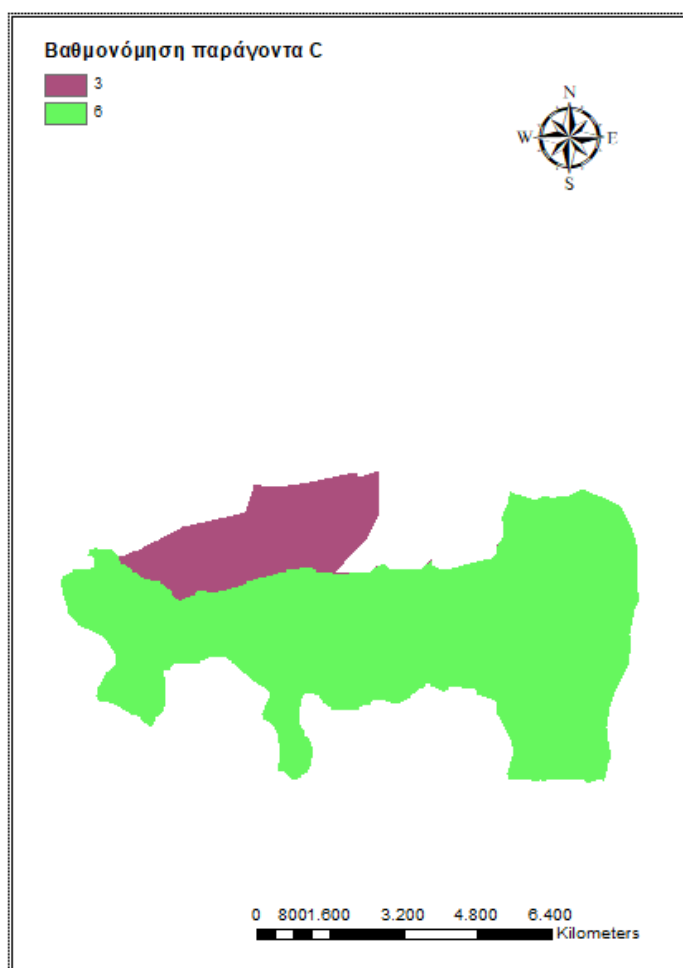
Παρατηρούμε ότι νότια των Μοιρών εμφανίζεται η μεγαλύτερη υδραυλική αγωγιμότητα και νοτιοδυτικά η μικρότερη. Μεσαίες τιμές παρατηρούνται κεντρικά των Μοιρών.

Για την βαθμονόμηση του παράγοντα C τα βάρη ανάλογα την υδραυλική αγωγιμότητα είναι τα εξής:

$1 > C > 5 \text{ m/h} \rightarrow 6 \text{ βαθμοί}$

$C < 0,5 \text{ m/h} \rightarrow 3 \text{ βαθμοί}$

Από 0,5-1 m/h δεν υπάρχουν τιμές. Η βαθμονόμηση έγινε βάση της περιοχής μελέτης. Ο χάρτης των βαρών για τον παράγοντα C παρουσιάζεται παρακάτω .

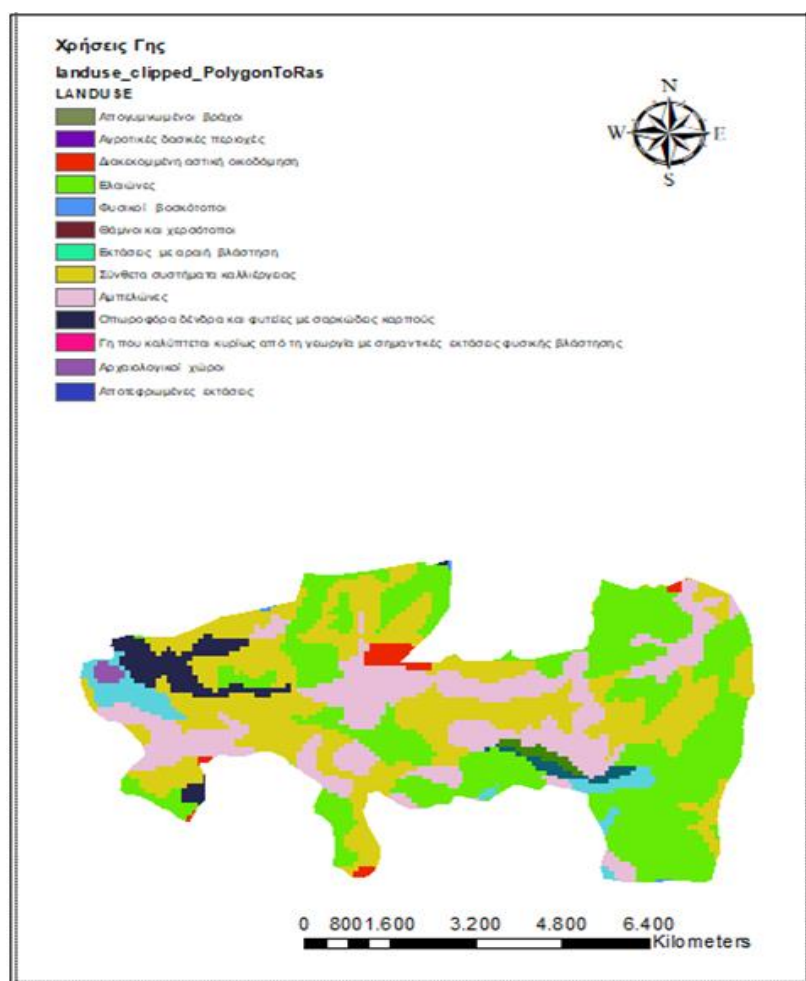


Χάρτης 18. Βαθμονόμηση παράγοντα C

Παρατηρούμε ότι στις περιοχές που η υδραυλική αγωγιμότητα είναι μεγάλη, η τρωτότητα είναι αυξημένη. Αυτό συμβαίνει επειδή πρόκειται για ελεύθερο υδροφόρο ορίζοντα με μεγάλη περατότητα, που διευκολύνει την κατείσδυση του ρύπου και αντιστοιχεί σε αλλουβιακούς σχηματισμούς.

4.1.8. Εκτίμηση παράγοντα LU

Οι χρήσεις γης της περιοχής μελέτης παρουσιάζονται στον παρακάτω χάρτη μορφής raster.



Χάρτης 19. Χρήσεις γης Μοιρών

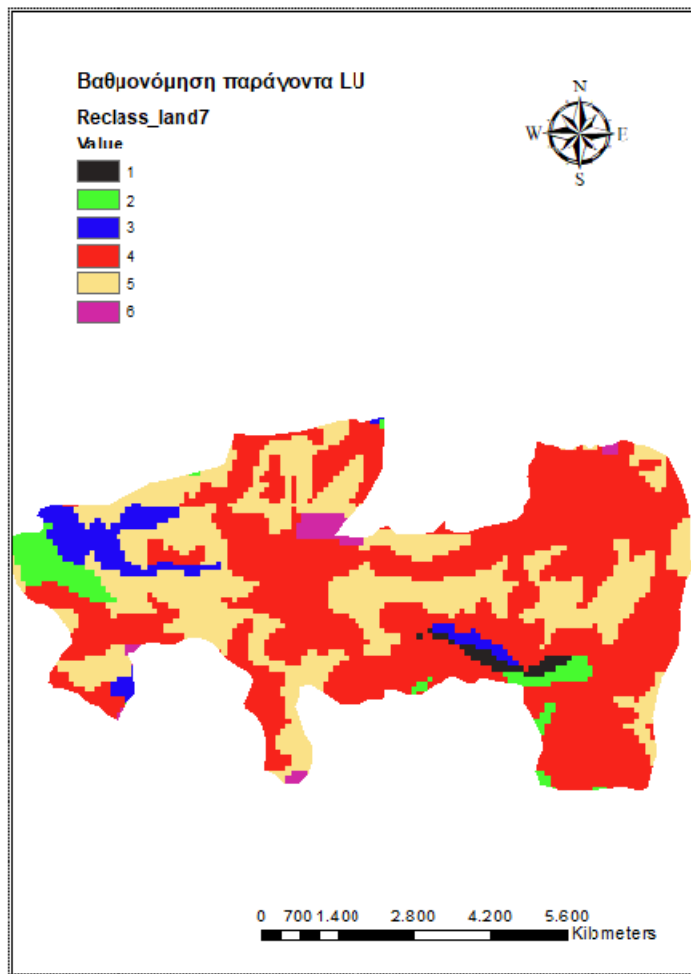
Στον χάρτη μπορούμε να δούμε ότι το μεγαλύτερο κομμάτι της περιοχής μελέτης είναι καλλιεργήσιμες εκτάσεις όπως ελαιώνες, αμπελώνες και σύνθετα συστήματα καλλιέργειας. Η βαθμονόμηση για τον παράγοντα LU φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Βάρος	Χρήση γης
1	Απογυμνωμένοι βράχοι/Αποτεφρωμένες εκτάσεις
2	Θάμνοι και χερσότοποι/Εκτάσεις με αραιή βλάστηση /Αρχαιολογικοί χώροι/Φυσικοί βοσκότοποι
3	Αγροτικές δασικές περιοχές/Οπωροφόρα δένδρα και φυτείες με σαρκώδεις καρπούς/Γη που καλύπτεται κυρίως από τη γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης
4	Ελαιώνες/ Αμπελώνες
5	Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας
6	Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση

Πίνακας 14. Αντιστοιχία βαρών ανάλογα με τη χρήση γης

Γενικά όσον αφορά τη βαθμονόμηση αυτής της παραμέτρου, στις περισσότερες μελέτες, οι αστικές περιοχές παίρνουν το μεγαλύτερο βάρος λόγω βιομηχανικών και οικιακών αποβλήτων, μετά ακολουθούν οι καλλιεργήσιμες περιοχές, στη συνέχεια οι δασικές και τέλος οι άγονες που παίρνουν το μικρότερο βάρος. Βάση αυτής της λογικής δόθηκαν τα παραπάνω βάρη ανάλογα τη χρήση γης.

Οπότε κάνω Reclass και προκύπτει ο παρακάτω χάρτης βαθμονόμησης του παράγοντα LU.



Χάρτης 20. Βαθμονόμηση παράγοντα LU

4.2. Εκτίμηση τελικής τρωτότητας

Οι παράμετροι D,R,A,S,T,I,C,LU, οι οποίοι υπολογίστηκαν παραπάνω διαμορφώνουν την τελική τρωτότητα DL μέσω του τύπου :

$$DL = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w + LU_r LU_w,$$

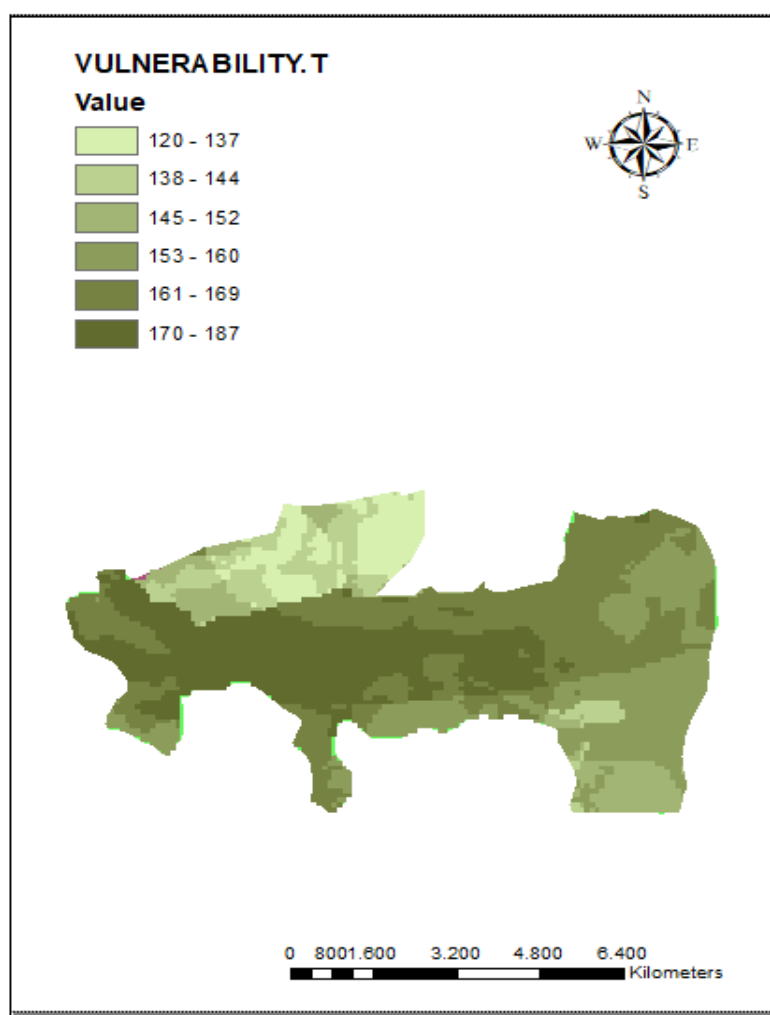
όπου ο δείκτης r εκφράζει την τιμή της παραμέτρου και ο δείκτης w τη βαρύτητα της καθεμιάς. Ανάλογα με τις δύο ταξινομήσεις κατά Aller ο τύπος διαμορφώνεται ως εξής:

$$DL = 5D_r + 4R_r + 3A_r + 2S_r + T_r + 5I_r + 3C_r + 5LU_r, \text{ (γενική, Typical DRASTIC-LU)}$$

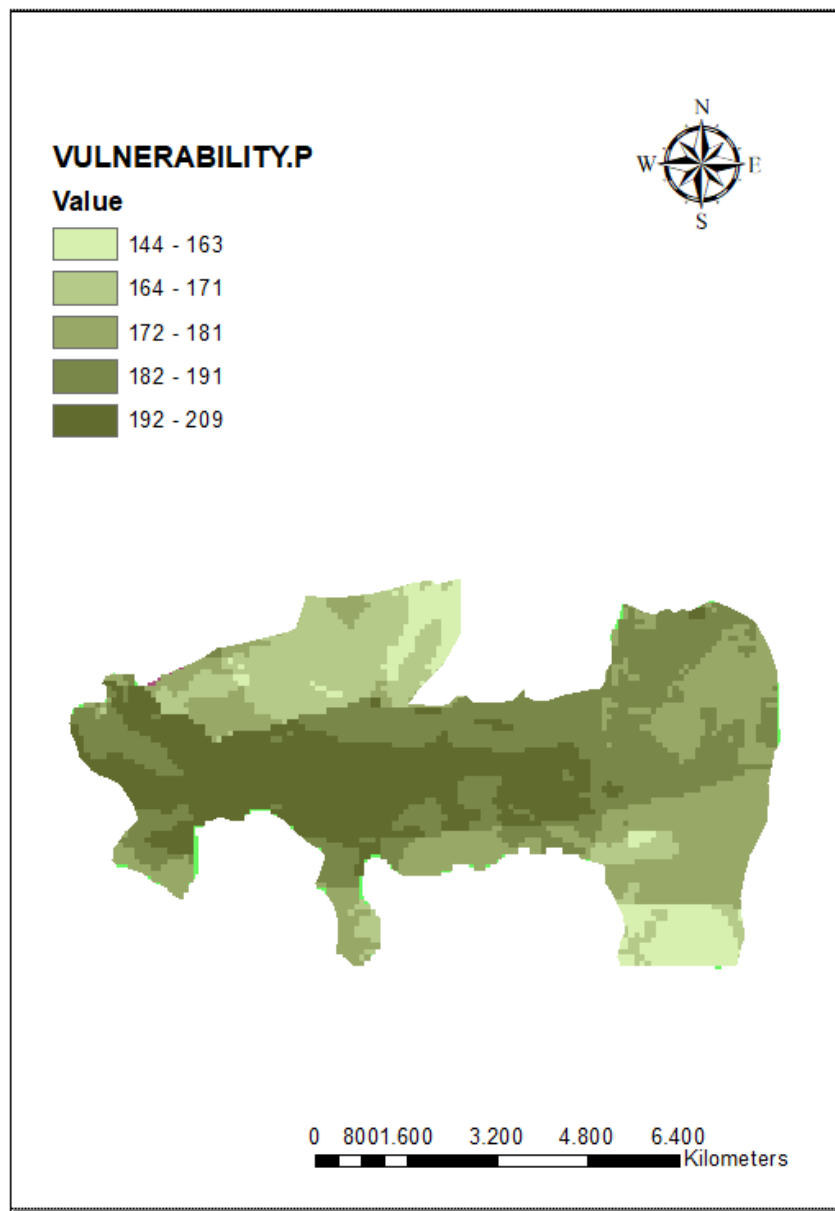
$$DL = 5D_r + 4R_r + 3A_r + 5S_r + 3T_r + 3I_r + 2C_r + 5LU_r, \text{ (ειδική, Pesticide DRASTIC-LU)}$$

Οι υπολογισμοί μεταξύ των χαρτών του κάθε παράγοντα έγιναν μέσω του “Raster Calculator” του Map Algebra που ανήκει στα Spatial Analyst Tools.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι χάρτες γενικής και ειδικής τρωτότητας της περιοχής μελέτης.



Χάρτης 21. Γενική τρωτότητα περιοχής μελέτης



Χάρτης 22. Ειδική τρωτότητα περιοχής μελέτης

Και στις δύο περιπτώσεις (χάρτης 21 & 22) παρατηρούμε ότι η μικρότερη τρωτότητα εντοπίζεται βόρειο-δυτικά και νότιο-ανατολικά της περιοχής των Μοιρών, ενώ η μεγαλύτερη στην περιοχή γύρω από τον ποταμό Γεροπόταμο.

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα

Η περιοχή της Μεσαράς και συγκεκριμένα η πεδιάδα των Μοιρών είναι μια από της σημαντικότερες αγροτικές περιοχές της Κρήτης. Τα τελευταία χρόνια λόγω της μεγάλης ζήτησης σε νερό, κυρίως για άρδευση, υπάρχει τεράστιο πρόβλημα στον υπόγειο υδροφόρα της περιοχής ο οποίος έχει στερέψει. Εκτός από την μείωση των υπόγειων υδάτων υπάρχει σημαντικό πρόβλημα όσον αφορά την ποιότητα του νερού, κυρίως λόγω φυτοφαρμάκων.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η γενική τρωτότητα (βιομηχανικοί και οικιακοί ρύποι) και η ειδική τρωτότητα (ρύποι λόγο φυτοφαρμάκων σε αρδευόμενες περιοχές) του υδροφόρα της λεκάνης των Μοιρών, μέσω του τροποποιημένου μοντέλου DRASTIC-LU κατά Aller με χρήση του προγράμματος ArcMap του GIS.

Στην περιοχή μελέτης το πρόβλημα ρύπανσης αφορά την δεύτερη περίπτωση, δηλαδή τη μόλυνση λόγο φυτοφαρμάκων. Παρόλα αυτά, οι δύο χάρτες της ειδικής και γενικής τρωτότητας βλέπουμε ότι είναι σχεδόν οι ίδιοι, με τη διαφορά ότι ο χάρτης ειδικής τρωτότητας φαίνεται να είναι πιο λεπτομερής.

Παρατηρώντας τους τελικούς χάρτες τρωτότητας, τα σημεία τα οποία η τρωτότητα είναι μεγαλύτερη είναι αυτά που είναι κοντά στον ποταμό. Το αποτέλεσμα αυτό είναι λογικό καθώς στην περιοχή αυτή, τα υλικά των αποθέσεων είναι περισσότερο χοντροκοκκα με ενστρώσεις αργιλικών και ιλύος και το επιφανειακό στρώμα αποτελείται κυρίως από χαλίκια και άμμο. Αν εξετάσουμε όλους τους παράγοντες που εκτιμήθηκαν στην μέθοδο DRASTIC-LU, στην περιοχή όπου η τρωτότητα είναι μεγαλύτερη, παρατηρούμε τα εξής:

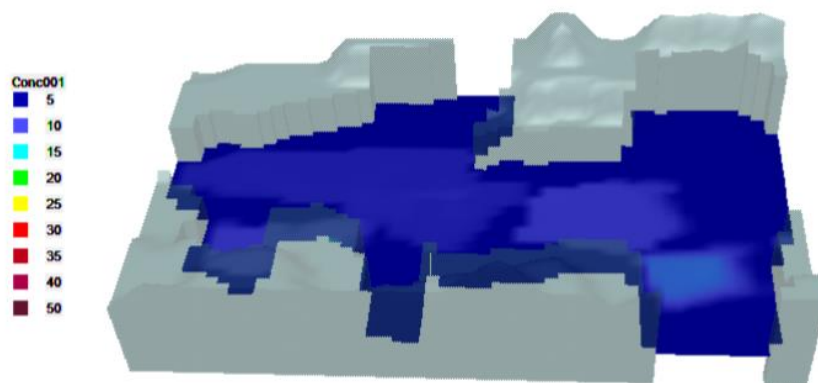
1. Το βάθος της στάθμης του υπόγειου νερού (παράγοντας D) είναι μικρό, για την ακρίβεια το μικρότερο στην περιοχή (10-18m), καθώς όσο μικρότερη είναι η στάθμη του νερού τόσο πιο εύκολα κατεισδύει ο ρύπος.
2. Επίσης η ενεργή κατείσδυση (παράγοντας R), είναι μεγάλη (περίπου 55 mm), άρα ο ρύπος κατεισδύει πιο εύκολα στα συγκεκριμένα σημεία.
3. Στα σημεία αυτά απαντώνται κοκκώδεις προσχωματικές αποθέσεις κυμαινόμενης υδροπερατότητας (P1), δηλαδή αλλουβιακές αποθέσεις, ποτάμιες και θαλάσσιες αναβαθμίδες και κροκαλοπαγή ποτάμιας προέλευσης. Έτσι στα σημεία με μεγάλη υδροπερατότητα (παράγοντας A) παρατηρούμε και μεγάλη τρωτότητα.
4. Όσον αφορά τη γεωλογία (παράγοντας S), υπάρχουν αλλουβιακά αποθέματα εν αναμείξει με REGOSOLS τα οποία έχουν χαμηλή ικανότητα συγκράτησης του νερού.
5. Η κλίση (παράγοντας T) είναι πολύ μικρή (0,0006-2 %)
6. Όσον αφορά την ακόρεστη ζώνη (παράγοντας I) στην περιοχή με τη μεγαλύτερη τρωτότητα υπάρχουν αλλουβιακές αποθέσεις, οι οποίες είναι αργιλοαμμώδη χαλαρά εν γένει υλικά αποτελούμενα από αργίλους, άμμους και κροκαλοατύπες) και πλειοκαινικές αποθέσεις αποτελούμενες από μαργαϊκούς ψαμμίτες, μάργες, μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, κροκαλοπαγή και παρεμβολές γύψων.
7. Μεγάλες τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας (παράγοντας C) , από 1,8-3,9 m/h.
8. Τέλος οι χρήσεις γης (παράγοντας LU) στην περιοχή αυξημένης τρωτότητας είναι αμπελώνες, ελαιώνες και σύνθετα συστήματα καλλιεργειών, δηλαδή αρδεύσιμες περιοχές όπου γίνεται μεγάλη χρήση φυτοφαρμάκων.

Τα παραπάνω αποτελέσματα δείχνουν ότι η μέθοδος DRASTIC-LU, έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα καθώς όλοι οι παράγοντες είναι σε βαθμό όπου η τρωτότητα είναι μεγαλύτερη για καθέναν ξεχωριστά.

Για να επαληθευτεί όμως το αποτέλεσμα θα πρέπει να δούμε αν τα σημεία στην περιοχή μελέτης που αντιμετωπίζουν πρόβλημα αντιστοιχούν με τα σημεία που φαίνεται να είναι πιο τρωτά. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διπλωματικής εργασίας της Μοσχοπούλου Έλενας με τίτλο «Μοντελοποίηση της Υπόγειας Ροής και Μεταφοράς Ρύπου στην πεδιάδα των Μοιρών Ηρακλείου με τη χρήση του προσομοιωτή Visual MODFLOW».

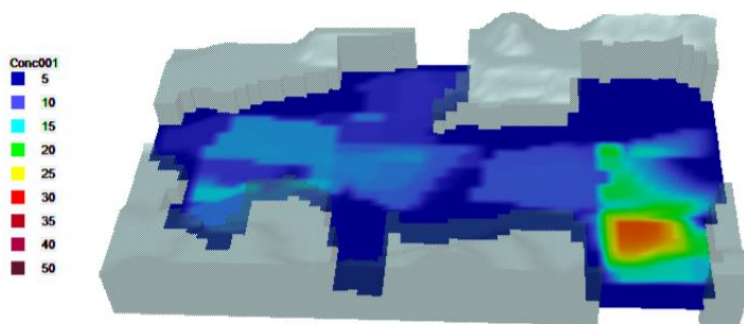
Στην περιοχή των Μοιρών ο κύριος ρύπος είναι τα νιτρικά ιόντα λόγω των λιπασμάτων.

Παρακάτω παρουσιάζεται η μεταβολή της συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων, όπως προέκυψε από την προσομοίωση. Στην Εικόνα 6 φαίνεται η συγκέντρωση των νιτρικών στην περιοχή μελέτης την περίοδο του Μαΐου 2008. Κατά την περίοδο αυτή, η μέγιστη συγκέντρωση που παρατηρείται είναι 18 mg/l, ενώ η ελάχιστη 6,2 mg/l.



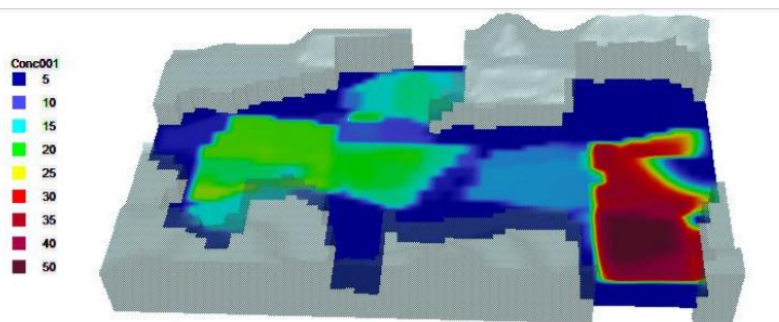
Εικόνα 6. Τρισδιάστατη απεικόνιση κατανομής συγκέντρωσης Μάιος 2008 (Μοσχοπούλου Έλενα, 2017)

Στην Εικόνα 7, φαίνεται η μεταβολή στις συγκεντρώσεις των νιτρικών ύστερα από την πρώτη λίπανση τον Ιούνιο του 2008. 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.



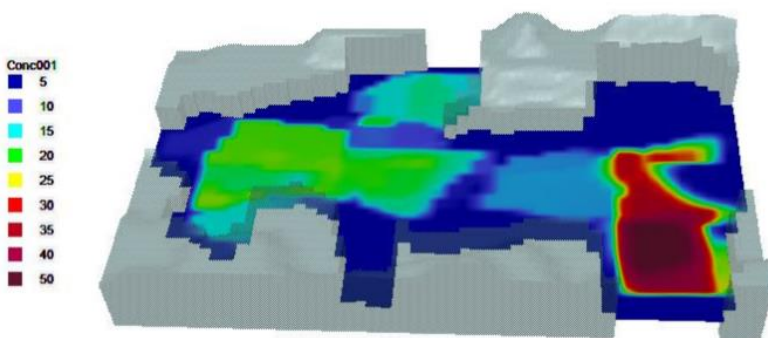
Εικόνα 7. Τρισδιάστατη απεικόνιση κατανομής συγκέντρωσης Ιούνιος 2008 (Μοσχοπούλου Έλενα, 2017)

Μετά τη δεύτερη κατά σειρά λίπανση των καλλιεργειών, τον Αύγουστο, χρησιμοποιώντας την ίδια ποσότητα αζώτου, 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 8).



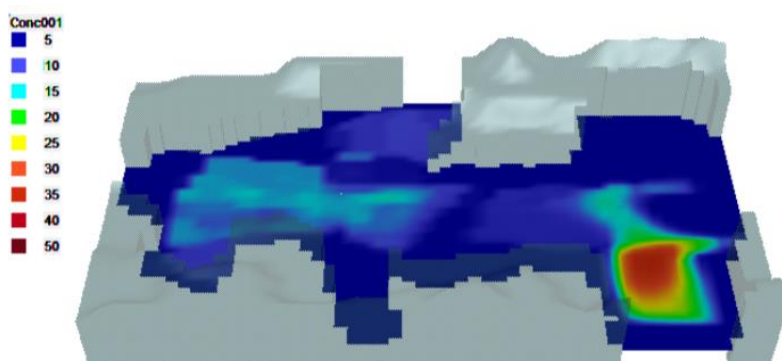
Εικόνα 8. Τρισδιάστατη απεικόνιση κατανομής συγκέντρωσης Αύγουστος 2008 (Μοσχοπούλου Έλενα, 2017)

Στην εικόνα 9 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της προσομοίωσης, που αφορά τις συγκεντρώσεις για τον Οκτώβριο του 2008. Η μέγιστη συγκέντρωση νιτρικών ιόντων στην λεκάνη των Μοιρών είναι ίση με 34 mg/l και η ελάχιστη αντίστοιχα 16 mg/l.



Εικόνα 9. Τρισδιάστατη απεικόνιση κατανομής συγκέντρωσης Οκτώβριος 2008 (Μοσχοπούλου Έλενα, 2017)

Τέλος στην εικόνα 10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της κατανομής των νιτρικών, για τον Απρίλιο του 2009, χωρίς να έχουν ληφθεί υπόψη οι ενδιάμεσες λιπάνσεις των καλλιεργειών.



Εικόνα 10. Τρισδιάστατη απεικόνιση κατανομής συγκέντρωσης Απρίλιος 2009 (Μοσχοπούλου Έλενα, 2017)

Αν συγκρίνουμε τα αποτελέσματα των δύο μελετών, βλέπουμε ότι έχουν κοντινά αποτελέσματα. Οι περιοχές που εμφανίζουν αυξημένη τρωτότητα είναι και αυτές οι οποίες έχουν μεγαλύτερα ποσοστά νιτρικών. Η διαφορά εντοπίζεται κυρίως στο νοτιο-ανατολικό τμήμα των Μοιρών το οποίο εμφανίζει τα μεγαλύτερα ποσοστά νιτρικών, ενώ στο χάρτη της τελικής τρωτότητας δεν είναι αυτό το τμήμα της περιοχής με τη μεγαλύτερη τρωτότητα.

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. (Μοσχοπούλου Έλενα, 2017)

Το πρόβλημα ρύπανσης στην περιοχή συνδέεται άμεσα με την συνεχή πτώση του υδροφορέα. Για αυτόν τον λόγο, ο τεχνητός εμπλουτισμός του υπόγειου υδροφορέα είναι αναγκαίος για την ποιότητα και την ποσότητα του νερού στην περιοχή των Μοιρών και γενικότερα της Μεσαράς. Η μέθοδος DRASTIC-LU, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε μια μελέτη εμπλουτισμού του υπόγειου υδροφορέα σε συνδιασμό με άλλες μεθόδους και παραμέτρους. Μια μελέτη τεχνητού εμπλουτισμού έγινε από την Ελένη Ιωαννίδου με τίτλο «Assessing Managed Aquifer Recharge (MAR) suitability in the Mesara Valley (Crete, Greece) following a GIS-based approach» («Αξιολόγηση της καταλληλότητας της διαχειριζόμενης επαναφόρτισης υδροφορέων (MAR) στην κοιλάδα της Μεσαράς (Κρήτη, Ελλάδα) με προσέγγιση μέσω GIS»).

Το MAR είναι η σκόπιμη επαναφόρτιση κατάλληλων υδροφορέων για την ανάκτηση ή την επίτευξη περιβαλλοντικών οφελών για την εξασφάλιση επαρκούς προστασίας του περιβάλλοντος και της ανθρώπινης υγείας.

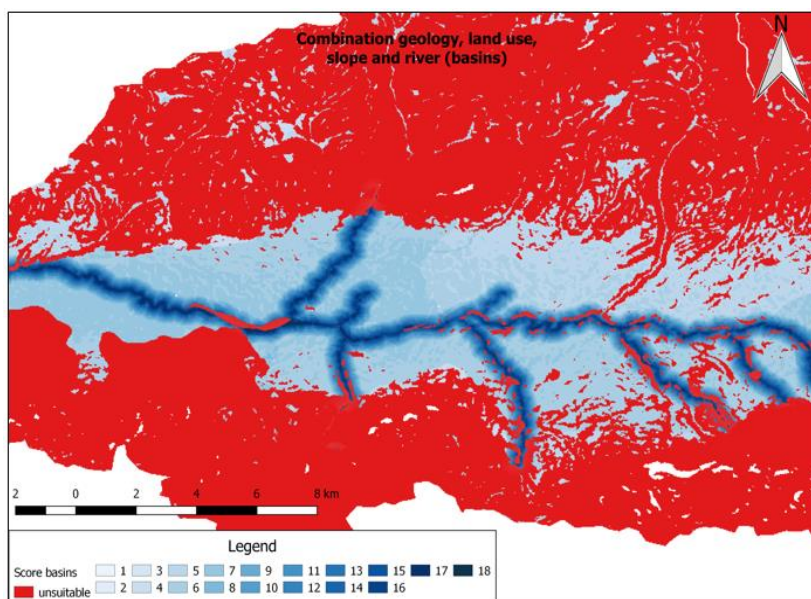
Στη μελέτη αυτή συλλέγονται όλες οι σχετικές πληροφορίες, χωρικά κατανεμημένων ή σημειακών δεδομένων, που απαιτούνται για την εκτίμηση της καταλληλότητας του MAR στην λεκάνη των Μοιρών και της Βαγιονιάς στην κοιλάδα της Μεσαράς και γίνεται αξιολόγηση της καταλληλότητας του MAR με την παραγωγή χαρτών που απεικονίζουν ζώνες με χαμηλό, μεσαίο και υψηλό δυναμικό (MAR). Οι χάρτες αυτοί παράγονται σύμφωνα με μια προσέγγιση βασισμένη στο GIS, όπου οι βαθμολογίες αποδίδονται με βάση την ιδιοκτησία (τοπογραφική, υδρογεωλογική, κλπ.) που αξιολογείται. Αυτοί οι χάρτες εξάγουν ένα χρήσιμο, για αρχή στοιχείο ταυτοποίησης των περιοχών όπου πρέπει να διενεργηθούν επιπρόσθετες δοκιμές πεδίου για ακριβή εύρεση κατάλληλων θέσεων για εφαρμογή του MAR. Δηλαδή χρησιμοποιείται μία μέθοδος με βάρη όπως ακριβώς γίνεται στη μέθοδο DRASTIC-LU, για την εκτίμηση της τελικής τρωτότητας της περιοχής μελέτης. Οι παράμετροι οι οποίοι χρησιμοποιούνται στη μελέτη καταλληλότητας του MAR είναι οι εξής:

1. Χρήσεις γης
2. Κλίσεις περιοχής μελέτης
3. Γεωλογία
4. Απόσταση από τον Γεροπόταμο

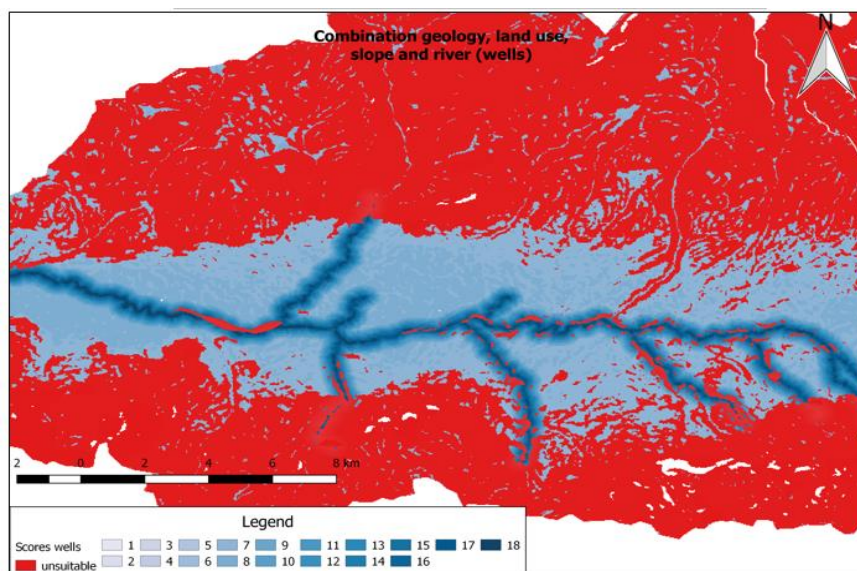
Οι παράμετροι αυτοί ελέγχονται για δύο περιπτώσεις:

- Χρήση λεκανών διήθησης
- Χρήση φρεατίων διήθησης

Τα τελικά αποτελέσματα φαίνονται στην εικόνα 11 και 12.



Εικόνα 11. Καταλληλότητα χάρτη με βαθμολογίες για τις λεκάνες διήθησης (συμπεριλαμβανομένης της απόστασης από το ποτάμι), (Ελένη Ιωαννίδου, 2016)



Εικόνα 12. Καταλληλότητα χάρτη με βαθμολογίες για τα φρεάτια διήθησης (συμπεριλαμβανομένης της απόστασης από το ποτάμι), (Ελένη Ιωαννίδου, 2016)

Από τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής, συγκριτικά με τη μελέτη της τρωτότητας, παρατηρούμε ότι τα σημεία όπου υπάρχει μεγαλύτερη καταλληλότητα για τεχνητό εμπλουτισμό είναι αυτά που εμφανίζουν και μεγάλη τρωτότητα. Αυτό είναι ένα λογικό αποτέλεσμα καθώς τα σημεία που είναι πιο τρωτά, τα οποία είναι σε μικρή απόσταση από τον ποταμό, είναι πιο περατά από τα υπόλοιπα.

Συμπερασματικά, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της DRASTIC-LU με αυτά των παραπάνω μελετών, η DRASTIC-LU δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα, παρόλα αυτά δεν πρέπει να χρησιμοποιείται μόνη της σε μία μελέτη, αλλά πρέπει να συνδιάζεται με άλλες παραμέτρους καθώς από μόνη της δεν είναι αξιόπιστη. Το σημαντικό είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα έργο τεχνητού εμπλουτισμού στην περιοχή της Μεσαράς σε συνδιασμό με κάποιο μοντέλο καταλληλότητας MAR και με μετρήσεις της υπάρχουσας ρύπανσης στην περιοχή.

Βιβλιογραφία

- Ποιότητα Νερού και Ρύπανση Υδατικών Πόρων (Βασίλης Αντωνόπουλος , Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής, Τμήμα Γεωπονίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης)
- ΥΔΑΤΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ:Ι.Τεχνική Υδρολογία & Εισαγωγή στη Διαχείριση Υδατικών Πόρων (Γ.Τσακίρης, Αθήνα 2013)
- Μοντελοποίηση ροής υπογείων υδάτων και μεταφορά ρύπου σε προσχωματικό παράκτιο υδροφορέα της περιφέρειας Αττικής (Στραβόλαμος Κυπριανός-Κωνσταντίνος, Χανιά 2017)
- ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ- Τύχη και Μεταφορά Ρύπων στον Αέρα, Νερό και Εδαφος (JeraldL. Schnoor)
- ΡΟΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΡΥΠΩΝ (Πανεπιστημιακές Σημειώσεις ,Πολυτεχνείο Κρήτης, σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος , Γεώργιος Π. Καρατζάς)
- ΡΥΠΑΝΣΗ ΥΔΑΤΙΝΩΝ ΠΟΡΩΝ , (Μενέλαος Ε.Θεοχάρης, ΤΕΙ Ηπείρου, τμήμα Φυτικής Παραγωγής, Άρτα 2013)
- Εργαστήριο Διαχείρισης Υδατικών Πόρων και Παράκτιας Μηχανικής, Υδρολογία , (Ι.Τσάνης, 2017)
- «ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΚΟΚΚΩΔΟΥΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ ΟΡΙΖΟΝΤΑ ΣΤΟ ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΤΟΥ ΟΡΟΠΕΔΙΟΥ ΤΗΣ ΤΡΙΠΟΛΗΣ» , (ΛΙΩΛΙΑ ΔΗΜΗΤΡΑ – ΜΑΡΙΑ, ΜΠΟΖΙΚΑ ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ, Αθηνά 2017)
- «Γεωστατιστική Ανάλυση Υδρολογικών Δεδομένων από την Πεδιάδα της Μεσαράς Νήσου Κρήτης», (Βαρουχάκης Εμμανουήλ,2012)
- ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ «ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ & ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ» , Διδακτορική διατριβή- Διαχείριση Υδατικών Πόρων, Μεσαράς, Κρήτης, Μαρίνος Ν. Κριτσωτάκης , Χανιά 2009)
- Μοντελοποίηση της Υπόγειας Ροής και Μεταφοράς Ρύπου στην πεδιάδα των Μοιρών Ηρακλείου με τη χρήση του προσομοιωτή Visual MODFLOW, (Μοσχοπούλου Ελένη, Χανιά 2017)
- Εκτίμηση της τρωτότητας υπόγειων νερών , (ΚΑΤΣΑΒΡΙΑ ΒΑΣΙΛΙΚΗ, Θεσσαλονίκη 2012)

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

- DRASTIC-based methodology for assessing ground water vulnerability in the Gümüşhacıköy and Merzif on basin (Arzu Firat Ersoy and Fatma Gültekin, Amasya, Turkey 2013)
- A GIS-based DRASTIC model for assessing intrinsic groundwater vulnerability in north eastern Missan governorate, southern Iraq (Alaa M. Al-Abadi, Ayser M. Al-Shamma'a, Mukdad H. Aljabbari, 2017)
- Technical Report: Assessing Managed Aquifer Recharge (MAR) suitability in the Mesara Valley (Crete, Greece) following a GIS-based approach (Ελένη Ιωαννίδου, 2016)

Ηλεκτρονική βιβλιογραφία

- http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg887e/PDF/XYTA_7.pdf , αναζήτηση: 1 Ιουνίου 2018
- <http://varvakeio-lykeio.gr/files/project-%20του%20nerou%20oi%20dromoi.pdf>, αναζήτηση : 10 Ιουνίου 2018