



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΡΥΠΑΝΤΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ
ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ
ΤΟΥ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΟΥ ΔΕΙΚΤΗ GALDIT»**



Μάρθα Περδικάκη

Επιβλέπων Καθηγητής:

Α. Καλλιώρας, Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, 2014

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Ανδρέας Καλλιώρας (Επιβλέπων)

Λέκτορας, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, Τομέας Γεωλογικών Επιστημών, Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας

Θεοδώρα Ροντογιάννη

Καθηγήτρια, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, Τομέας Γεωλογικών Επιστημών, Εργαστήριο Γεωλογίας

Γεώργιος Αποστολόπουλος

Επικ. Καθηγητής, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, Τομέας Μεταλλευτικής, Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ –ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	12
2. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΩΝ	14
2.1 ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ	14
2.1.1 Η ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΓΛΥΚΟΥ-ΘΑΛΑΣΣΙΝΟΥ ΝΕΡΟΥ.....	15
2.1.2 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ- ΑΛΑΤΟΤΗΤΑ	18
2.1.3 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΥΔΡΟΜΑΣΤΕΥΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΣΤΗ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ	18
2.1.4 ΑΝΥΨΩΣΗ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ- ΚΩΝΟΣ ΚΑΤΑΠΤΩΣΗΣ	19
2.1.5 ΥΔΡΟΧΗΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ Υ.Ν. ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ	20
2.1.6 ΕΝΔΕΙΞΗ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ	21
2.2. ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ	22
2.2.1. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ.....	22
2.3 ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ ΣΤΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΜΕΣΟΓΕΙΟΥ	27
2.3.1 ΙΣΡΑΗΛ	27
2.3.2 ΙΤΑΛΙΑ	28
2.3.3 ΑΙΓΥΠΤΟΣ	29
2.3.4 ΙΣΠΑΝΙΑ	30
2.3.5 ΤΥΝΗΣΙΑ.....	31
2.3.6 ΕΛΛΑΔΑ.....	31
3. ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ	33
3.1 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΑ-ΔΗΜΟΓΡΑΦΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	33
3.1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	34
3.2 ΧΡΗΣΕΙΣ ΓΗΣ	35
4.ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ	40
4.1ΕΙΣΑΓΩΓΗ	40
4.2 ΒΡΟΧΟΜΕΤΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	41
5. ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	44
6.ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ.....	48
6.1 ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	48
6.2 ΥΠΟΓΕΙΕΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	49
7. ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ	53
7.1 ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ.....	53
7.2 ΕΡΕΥΝΑ ΠΕΔΙΟΥ	56
7.2 ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ- ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	56

7.2.1 ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ.....	56
7.2.2 ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ.....	64
8. ΑΞΙΟΛΟΓΙΣΗ ΤΗΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ GALDIT.....	70
8.1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ.....	70
8.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ-ΔΕΙΚΤΩΝ.....	72
8.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΑΛΛΟΥΒΙΑΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΟΥ ΘΟΡΙΚΟΥ....	77
8.3.1 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ GALDIT ΓΙΑ ΤΗΝ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΛΕΚΑΝΗ ΤΟΥ ΘΟΡΙΚΟΥ.....	77
9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	90
10. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	94
10.1.Ελληνική Βιβλιογραφία.....	94
10.2. Διεθνής Βιβλιογραφία.....	94

ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 3.1 Ζώνες Οικιστικού Ελέγχου.....	37
Πίνακας 4.2 Ύψη ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων (mm) καταγεγραμμένα στο βροχομετρικό σταθμό Λαυρίου για την περίοδο 1970-1978.....	41
Πίνακας 4.3 Ύψη ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων (mm) καταγεγραμμένα στο βροχομετρικό σταθμό Λαυρίου για την περίοδο 2009-2013.....	42
Πίνακας 6.1 Στάθμες- Πιεζομετρικά φορτία σημείων παρακολούθησης.....	51
Πίνακας 7.1 Πληροφορίες που απαιτούνται για τη χαρτογράφηση της τρωτότητας των υπόγειων νερών (Καλλέργης, 2000).....	55
Πίνακας 7.2 Αποτελέσματα επί τόπου μετρήσεων.....	59
Πίνακας 7.3 Αποτελέσματα Χημικών Αναλύσεων δειγμάτων.....	64
Πίνακας 7.4 Αναλύσεις Βαρέων Μετάλλων.....	69
Πίνακας 8.1 Βαρύτητα Παραμέτρων δείκτη GALDIT.....	71
Πίνακας 8.2 Βαθμονόμηση παραμέτρου G (Chachadi ,Lobo-Ferreira , 2001).....	72
Πίνακας 8.3 Βαθμονόμηση παραμέτρου A (Chachadi ,Lobo-Ferreira , 2001).....	73
Πίνακας 8.4 Βαθμονόμηση παραμέτρου L (Chachadi ,Lobo-Ferreira , 2001).....	74
Πίνακας 8.5 Βαθμονόμηση παραμέτρου D (Chachadi ,Lobo-Ferreira , 2001).....	74
Πίνακας 8.7 Βαθμονόμηση παραμέτρου T (Chachadi ,Lobo-Ferreira , 2001).....	76
Πίνακας 8.8 Βαθμονόμηση παραμέτρου G.....	77
Πίνακας 8.9 Συνολική βαρύτητα του παράγοντα W1×R1 για κάθε πηγάδι.....	78
Πίνακας 8.10 Βαθμονόμηση παραμέτρου A.....	79

Πίνακας 8.11 Συνολική βαρύτητα του παράγοντα W2×R2 για κάθε πηγάδι	79
Πίνακας 8.12 Βαθμονόμηση παραμέτρου L	80
Πίνακας 8.13 Συνολική βαρύτητα του παράγοντα W3×R3 για κάθε πηγάδι	81
Πίνακας 8.14 Βαθμονόμηση παραμέτρου D.....	82
Πίνακας 8.15 Συνολική βαρύτητα του παράγοντα W4×R4 για κάθε πηγάδι	83
Πίνακας 8.16 Βαθμονόμηση παραμέτρου I.....	85
Πίνακας 8.18 Βαθμονόμηση παραμέτρου T	86
Πίνακας 8.19 Συνολική βαρύτητα του παράγοντα W6×R6 για κάθε πηγάδι	87
Πίνακας 8.20 Δείκτης τρωτότητας GVI για κάθε σημείο παρακολούθησης.....	88

ΣΧΗΜΑΤΑ

Σχήμα 2.1. Υδραυλική σχέση γλυκού και αλμυρού νερού σε πειραματικό σωλήνα (U-tube). 15	15
Σχήμα 2.2. Κατανομή γλυκού-αλμυρού νερού σε παράκτιο υδροφορέα (Barlow, 2003).	16
Σχήμα 2.3: Διάγραμμα ροής κατά Glover	17
Σχήμα 2.4 Ανύψωση διεπιφάνειας (upconing) (Montgomery & Associates 2011).....	19
Σχήμα 2.5 Κατανομή χλωριόντων (Melloul & Goldenberg, 1997)	28
Σχήμα 2.6 Κατανομή χλωριόντων	30
(Garing et al., 2013).....	30
Σχήμα 2.7 Διαγράμματα ηλεκτρικής αγωγιμότητας-pH (Garing et al., 2013)	30
Εικόνα 2.9 Επεξεργασμένη δορυφορική εικόνα.....	32
(Αστάρας -Οικονομίδης,2006)	32
Σχήμα 2.8 Ζώνες θαλάσσιας διείσδυσης (Τζιμούρτας,2000)	32
Σχήμα 3.1 Ο δήμος της Λαυρεωτικής	33
Σχήμα 3.2 Η περιοχή έρευνας –λεκάνη Θορικού	34
Σχήμα 3.3 Χάρτης χρήσεων γης Λαυρεωτικής	36
Σχήμα 4.1 Μετεωρολογικός Σταθμός Λαυρίου.....	40
Σχήμα 4.2 Διακύμανση της ετήσιας βροχόπτωσης στο βροχομετρικό σταθμό Λαυρίου για την περίοδο 1970-1978.....	42
Σχήμα 4.3 Διακύμανση της ετήσιας βροχόπτωσης στο βροχομετρικό σταθμό Λαυρίου για την περίοδο 2009-2013.....	43
Σχήμα 4.4 Συσχέτιση της μηνιαίας βροχόπτωσης(mm) για τις δύο περιόδους διαθέσιμων δεδομένων(1970-1978 και 2009-2013).	43
Σχήμα 5.1 Ενδεικτική Γεωλογική τομή Καμάριζας-Λαυρίου (Stamatis et al., 2001)	45
Σχήμα 5.2 Γεωλογικός χάρτης Θορικού(Πηγή: ΙΓΜΕ,2000 με τροποποιήσεις)	47

Σχήμα 6.1 Σημεία μέτρησης στάθμης στον αλλουβιακό υδροφορέα του Θορικού.....	49
Σχήμα 6.2 Κατανομή πιεζομετρικού φορτίου στην υδρολογική λεκάνη του Θορικού.	52
Σχήμα 7.1 Πλήρες δίκτυο πηγαδιών στη Λεκάνη Θορικού.....	57
Σχήμα 7.2 Σημεία Δειγματοληψίας στη Λεκάνη του Θορικού.....	57
Σχήμα 7.3 Κατανομή Ειδικής Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας στον αλλουβιακό υδροφορέα του Θορικού (μετρήσεις 2014)	60
Σχήμα 7.4 Κατανομή pH στον αλλουβιακό υδροφορέα του Θορικού (μετρήσεις 2014)	62
Σχήμα 7.5 Συσχέτιση Ειδικής Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας και pH.....	62
Σχήμα 7.6 Κατανομή της θερμοκρασίας στον αλλουβιακό υδροφορέα του Θορικού (μετρήσεις 2014)	63
Σχήμα 7.7 Κατανομή ιόντων χλωρίου στον αλλουβιακό υδροφορέα του Θορικού	65
Σχήμα 7.8 Σχέση Ειδικής ηλεκτρικής Αγωγιμότητας (SEC) και συγκέντρωσης Χλωριόντων(μετρήσεις 2014)	66
Σχήμα 7.9 Κατανομή θειικών ιόντων στον αλλουβιακό υδροφορέα του Θορικού.....	67
Σχήμα 7.10 Κατανομή νιτρικών ιόντων στον αλλουβιακό υδροφορέα του Θορικού	68
Σχήμα 8.1 Κατανομή της συνολικής βαρύτητας W2xR2 στον αλλουβιακό υδροφορέα του Θορικού	80
Σχήμα 8.2 Κατανομή της συνολικής βαρύτητας W3xR3 στον αλλουβιακό υδροφορέα του Θορικού	82
Σχήμα 8.3 Κατανομή της συνολικής βαρύτητας W4xR4 στον αλλουβιακό υδροφορέα του Θορικού	84
Σχήμα 8.4 Κατανομή της συνολικής βαρύτητας W5xR5 στον αλλουβιακό υδροφορέα του Θορικού	86
Σχήμα 8.5 Κατανομή της συνολικής βαρύτητας W6xR6 στον αλλουβιακό υδροφορέα του Θορικού	87
Σχήμα 8.6 Κατανομή του δείκτη τρωτότητας (GVI) στην περιοχή του Θορικού.	89

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία, ανατέθηκε από το εργαστήριο τεχνικής γεωλογίας και Υδρογεωλογίας τη Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών Του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και εκπονήθηκε υπό την επίβλεψη του κ. Ανδρέα Καλλιώρα, Λέκτορα του τομέα Γεωλογικών επιστημών της Σχολής Μηχ. Μετ. Μετ. του Ε.Μ.Π.. Το θέμα που πραγματεύεται η διπλωματική εργασία είναι η διερεύνηση του φαινομένου της θαλάσσιας διείσδυσης των παράκτιων υδροφορέων και παράλληλα ο έλεγχος της τρωτότητας τους με τη χρήση του πολυκριτηριακού δείκτη GALDIT. Η περιοχή που διερευνήθηκε είναι η υδρολογική λεκάνη του Θορικού στα νοτιοανατολικά της Αττικής.

Για τη διεξαγωγή της διπλωματικής, πραγματοποιήθηκαν οι παρακάτω εργασίες:

- Βιβλιογραφική επισκόπηση, από την ελληνική και τη παγκόσμια βιβλιογραφία, σε θέματα που αφορούν το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης, τη διαδικασία παρακολούθησης ενός υπόγειου υδραυλικού συστήματος και τη τρωτότητα των υπόγειων υδροφορέων.
- Συλλογή και επεξεργασία υπαρχόντων γεωλογικών, υδρογεωλογικών, υδρολογικών και κλιματικών στοιχείων της ευρύτερης περιοχής έρευνας.
- Την έρευνα πεδίου στην υδρολογική λεκάνη του Θορικού με δημιουργία ενός δικτύου παρακολούθησης του υδροφορέα και με λήψη δειγμάτων νερού που υποβλήθηκαν σε μετρήσεις και χημικές αναλύσεις.
- Την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των μετρήσεων και τη παρουσίαση τους σε πίνακες και χάρτες, για τη διεξαγωγή συμπερασμάτων .
- Την εκτίμηση της τρωτότητας του αλλουβιακού υδροφορέα του Θορικού ως προς τη θαλάσσια διείσδυση, με τη χρήση του δείκτη GALDIT.

Η παρούσα διπλωματική δεν θα είχε πραγματοποιηθεί χωρίς την αμέριστη υποστήριξη των:

- Το κ. Ανδρέα Καλλιώρα για την ουσιαστική καθοδήγηση και υποστήριξη του καθ' όλη τη διάρκεια της διεξαγωγής της διπλωματικής εργασίας και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε ως προς την ανάληψη της.
- Το κ. Νίκο Σταθόπουλο, υποψήφιο διδάκτορα του εργαστηρίου Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας της Σχολής Μηχ. Μετ. Μετ. Ε.Μ.Π., για την υπομονή και την επιμονή του να με διδάξει πάνω σε θέματα έρευνας πεδίου και η χρήσης λογισμικών.
- Το κ. Χρήστο Πουλιάρη, υποψήφιο διδάκτορα του T.U. Darmstadt, για τη συνεχή βοήθεια και υποστήριξη κατά τη διεξαγωγή της διπλωματικής.
- Τη κα. Ελένη Βασιλείου, διδάκτορα του εργαστηρίου Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας της Σχολής Μηχ. Μετ. Μετ. Ε.Μ.Π., για τη διάθεση της να διαλευκάνει την οποιαδήποτε απορία μου.
- Τον κ. Γεώργιο Αποστολόπουλο, Επίκουρο Καθηγητή του τομέα Μεταλλευτικής της Σχολής Μηχ. Μετ. Μετ. Ε.Μ.Π καθώς και τις φοιτήτριες Αγγελική Βλασσοπούλου και Κατερίνα Σταθοπούλου, για τη διάθεση

Γεωφυσικών δεδομένων από την έρευνα τους, στοιχεία απαραίτητα στη διεξαγωγή της διπλωματικής εργασίας.
Τους οποίους και ευχαριστώ εκ βαθέων.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη προσπάθεια παρακολούθησης των παράκτιων υδροφορέων και τη διερεύνηση της τρωτότητας ενός υδροφορέα ως προς τη θαλάσσια διείσδυση. Η εξέταση του φαινομένου επικεντρώθηκε στην υδρολογική λεκάνη του Θορικού που βρίσκεται στο νοτιανατολικό τμήμα της Αττικής και βόρεια του Λαυρίου. Οι εργασίες που πραγματοποιήθηκαν για τη συγγραφή της διπλωματικής περιλαμβάνουν βιβλιογραφική αναφορά σε ζητήματα σχετικά με τη θαλάσσια διείσδυση, συγκέντρωση υπαρχόντων γεωλογικών, υδρολογικών, υδρογεωλογικών και κλιματικών στοιχείων από έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί στην ευρύτερη περιοχή έρευνας και έρευνα πεδίου με λήψη και επεξεργασία πρωτογενών δεδομένων από τα πηγάδια της περιοχής. Οι χημικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π.. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων επεξεργάστηκαν και παρουσιάστηκαν πίνακες και σχήματα ενώ στη συνέχεια σχεδιάστηκαν χάρτες, με τη χρήση λογισμικών πακέτων ArcMap10.1 και MapInfo Professional 9.0, σχετικά με τη πιεζομετρία και τη κατανομή των συγκεντρώσεων των ιόντων στη περιοχή. Τέλος υπολογίστηκε ο βαθμός τρωτότητας του υδροφορέα στη θαλάσσια διείσδυση σύμφωνα με το πολυκριτηριακό δείκτη GALDIT.

Πιο αναλυτικά, στο 1^ο και 2^ο κεφάλαιο παρατίθενται βιβλιογραφικά στοιχεία ως προς το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης στα παράκτια υδροφόρα συστήματα. Το 3^ο κεφάλαιο αναφέρεται σε γεωγραφικά, ιστορικά στοιχεία της ευρύτερης περιοχής έρευνας(Λαυρεωτική) και τις χρήσεις γης. Το 4^ο κεφάλαιο επεξεργάζεται βροχομετρικά στοιχεία διαθέσιμα από το μετεωρολογικό σταθμό του Λαυρίου. Το 5^ο κεφάλαιο αναφέρεται στα γεωλογικά και λιθολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής και το 6^ο στην υδρογεωλογία. Στο 7^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων με τους αντίστοιχους χάρτες. Το 8^ο κεφάλαιο αναλύει τη τρωτότητα του υδροφόρου του Θορικού ως προς τη θαλάσσια διείσδυση με τη χρήση του δείκτη GALDIT. Στο τέλος της διπλωματικής εργασίας παρατίθενται συμπεράσματα για την έρευνα που διεξήχθη.

ABSTRACT

This thesis discusses the issue of monitoring a coastal aquifer and the research of the aquifer's vulnerability from the aspect of seawater intrusion. The examination of the problem takes place in the alluvial aquifer of Thorikos basin, in the southeast of Attica, next to the city of Lavrio. The work carried out for this thesis, included bibliographical references in the issue of seawater intrusion, collection of geological, hydrogeological and hydrological data from past surveys that took place in the study area and field research including collecting and processing raw data of wells and drills in the Thorikos basin. The chemical analysis was carried out in the laboratory of School of Mining and Metallurgical Engineering, NTUA. The result of chemical analysis and measurements (piezometric level, ion distribution etc.), were proceeded and presented in charts and maps. The maps designed with ArcMap10.1 and MapInfo Professional 9.0 software. In addition, the GALDIT vulnerability index to seawater intrusion was calculated.

In detail, chapter 1 and 2 deals with bibliographical references in the phenomenon of seawater intrusion in coastal aquifer systems. Chapter 3 presents land uses, geographical and historical data of municipality of Lavreotiki. In the 4th chapter, rain data available from the meteorological station of Lavrio, are proceeded. The 5th chapter deals with the geological and lithological structure of the region and the 6th with the hydrogeological one. In the 7th chapter, the chemical analysis data are introduced and maps of the ion concentrations are designed. The 8th chapter includes bibliographical analysis and calculation of the GALDIT index for the region of Thorikos. In the final chapter, the final conclusions of the research are presented.

1.ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ –ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Η συνεχώς αυξανόμενη ανάπτυξη των ανθρώπινων δραστηριοτήτων έχει επιφέρει περιβαλλοντικά προβλήματα στο φυσικό περιβάλλον, με βασικό πρόβλημα την υποβάθμιση τόσο των επιφανειακών όσο και των υπόγειων υδάτων. Οι χρησιμοποιούμενες ποσότητες υδάτων σε γεωργικές, βιομηχανικές και οικιστικές δραστηριότητες εξασφαλίζονται από επίγειες και υπόγειες υδάτινες μάζες, επιστρέφοντας τες στο περιβάλλον υποβαθμισμένες ποιοτικά και ακατάλληλες για χρήση. Η ανεξέλεγκτη εκμετάλλευση των υπόγειων υδροφορέων, δημιουργεί προβλήματα, ιδιαίτερα στις παράκτιες ζώνες. Η γειτνίαση του υδροφορέα με το θαλάσσιο νερό, αυξάνει τις πιθανότητες υποβάθμισης της ποιότητας του, λόγω εισδοχής χλωριόντων. Η αύξηση των χλωριόντων καθιστά το νερό ακατάλληλο για χρήση και δημιουργεί δύσκολα αναστρέψιμες βλάβες στο υδρογεωλογικό σύστημα.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η παρακολούθηση του αλλουβιακού υδροφορέα στη λεκάνη του Θορικού καθώς και ο έλεγχος στη τρωτότητα του ως προς τη θαλάσσια διείσδυση. Η παρούσα εργασία έγινε στα πλαίσια του προγράμματος «**MARSOL** – Demonstrating Managed Aquifer Recharge as a Solution to Water Scarcity and Drought», που αποτελεί ένα περιβαλλοντικό πρόγραμμα συνεργασίας που χρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (FP7).

Η διπλωματική εργασία περιλαμβάνει έρευνα πεδίου στη λεκάνη του Θορικού με εντοπισμό και καταγραφή ενός δικτύου παρακολούθησης πηγαδιών και γεωτρήσεων από τον αλλουβιακό και καρστικό υδροφόρο του υπόγειου υδραυλικού συστήματος της περιοχής. Στα δείγματα νερού πραγματοποιήθηκε χημική ανάλυση. Στα παρακάτω κεφάλαια παρουσιάζονται μόνο τα δεδομένα των πηγαδιών καθώς αυτά τροφοδοτούνται από τον αλλουβιακό υδροφορέα. Οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν σε νερά γεωτρήσεων δεν συμπεριλαμβάνονται παρακάτω καθώς οι γεωτρήσεις τροφοδοτούνται από το καρστικό υδροφορέα της περιοχής, η έρευνα του οποίου δεν πραγματοποιείται στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας. Τα δεδομένα που παράχθηκαν είναι πρωτογενή αφού δεν έχει πραγματοποιηθεί στη περιοχή αντίστοιχη έρευνα.

Η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε είναι αρχικά η βιβλιογραφική ανασκόπηση του προβλήματος της θαλάσσιας διείσδυσης σε συνδυασμό με μεθόδους παρακολούθησης των παράκτιων υδροφορέων και την επισήμανση διαφόρων μελετών περίπτωσης στη λεκάνη της Μεσογείου. Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται αναλυτική περιγραφή της περιοχής έρευνας, με ιστορική ανασκόπηση και περιγραφή της παρούσας κατάστασης και των χρήσεων γης της ευρύτερης περιοχής. Στο τέταρτο κεφάλαιο παρατίθενται τα υδρολογικά στοιχεία της περιοχής έρευνας με ιδιαίτερη έμφαση στα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα που αποτελούν το βασικό όγκο νερού που εισέρχεται στο υπόγειο υδραυλικό σύστημα της περιοχής. Στη συνέχεια περιγράφεται η ιδιαίτερη γεωλογική δομή της Λεκάνης του Θορικού και της ευρύτερης περιοχής έρευνας, της Λαυρεωτικής. Οι υδρογεωλογικές συνθήκες που επικρατούν στον αλλουβιακό υδροφόρο του Θορικού περιγράφονται στο 6^ο κεφάλαιο, προκειμένου να δοθεί μία εικόνα για τη κίνηση του υπόγειου νερού στη κορεσμένη ζώνη. Στο κεφάλαιο 7 γίνεται μία θεωρητική περιγραφή για τη τρωτότητα των αλλουβιακών υδροφορέων στη ρύπανση ενώ στη συνέχεια περιγράφεται αναλυτικά η έρευνα πεδίου που πραγματοποιήθηκε για τη παρακολούθηση του υδροφορέα. Η έρευνα επικεντρώθηκε κυρίως στις υψηλές συγκεντρώσεις ιόντων χλωρίου και στην

υψηλή αγωγιμότητα που παρουσιάζουν τα νερά του υδροφόρου εξαιτίας του φαινομένου της θαλάσσιας διείσδυσης. Τέλος περιγράφεται η διαδικασία ελέγχου της τρωτότητας ενός αλλουβιακού υδροφορέα με το δείκτη GALDIT και προσδιορίζεται η τρωτότητα του υδροφορέα της περιοχής έρευνας.

2. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΩΝ

2.1 ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ

(κύριες βιβλιογραφικές πηγές: Todd & Mays, 2005, Καλλέργης, 2000, Appelo & Postma, 2005, Βουδούρης, 2009)

Τα τελευταία χρόνια, όλο και περισσότερος πληθυσμός συσσωρεύεται στις παράκτιες ζώνες. Ο Essink (2001), αναφέρει χαρακτηριστικά ότι περίπου 50% του συνολικού πληθυσμού της γης απαντάται σε παράκτια ζώνη εύρους 60 km από την ακτογραμμή. Ως αποτέλεσμα αυτής της συσσώρευσης, σε συνδυασμό με τις αυξανόμενες δραστηριότητες του ανθρώπου που βασίζονται στην εκμετάλλευση των διαθέσιμων υπόγειων υδατικών πόρων, έχει οδηγήσει στην υφαλμύριση των εκμεταλλεύσιμων υδροφορέων. Το φαινόμενο της υφαλμύρισης, περιγράφεται ως η διαδικασία κατά την οποία η συγκέντρωση των διαλυμένων στερεών (αλάτων) στο νερό και στο έδαφος, αυξάνει λόγω φυσικών αιτίων, είτε λόγω ανθρωπογενών δραστηριοτήτων (Καλλιώρας, 2008).

Η υφαλμύριση του γλυκού νερού είναι ένα συχνό φαινόμενο τόσο σε επιφανειακούς και φρεάτιους υδροφορείς, όσο και σε βαθύτερους. Το φαινόμενο μπορεί να προέρχεται από (Todd & Mays, 2005):

- τη διείσδυση θαλασσινού νερού προς την ενδοχώρα
- την ύπαρξη συγγενετικού νερού στους πόρους των πετρωμάτων
- την απόρριψη υφάλμυρων αποβλήτων στο περιβάλλον
- αλάτι σε θόλους άλατος και άλατα που διαδίδονται μέσω των σχηματισμών
- νερό που συγκεντρώνεται από την εξάτμιση λιμνοθαλασσών ή άλλων κλειστών κόλπων
- επιστροφή ροών μέσω ρευμάτων από εκτάσεις που αρδεύονται

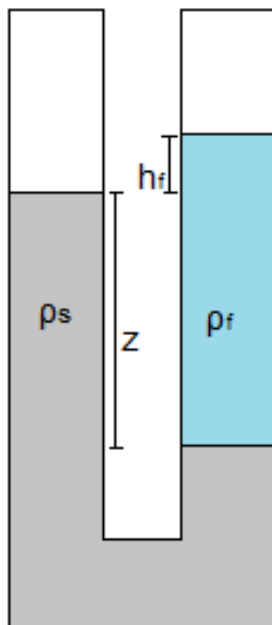
Η θαλάσσια διείσδυση παρατηρείται σε παράκτιους υδροφορείς σε όλο τον κόσμο και θεωρείται η πιο συνήθης αιτία υφαλμύρισης των υπόγειων νερών. Αποτελεί πλέον ένα είδος ρύπανσης, καθώς σύμφωνα με το Βουδούρη (2009), το υπόγειο νερό καθίσταται μη πόσιμο από την ανάμειξη του με θαλασσινό σε ποσοστό μόλις 2%. Ο μηχανισμός της θαλάσσιας διείσδυσης λειτουργεί ως εξής:

Οι παράκτιοι υδροφορείς, επικοινωνούν υπογείως με τη θάλασσα και υπό φυσικές συνθήκες αποστραγγίζονται σε αυτήν. Ανάμεσα σε γλυκό και θαλασσινό νερό υπάρχει υδροστατική ισορροπία, ενώ για να διατηρηθεί αυτή η ισορροπία, πρέπει να διατηρείται σταθερό το ισοζύγιο φόρτισης και αποφόρτισης του υδροφορέα με γλυκό νερό. Οι έντονες αντλήσεις νερού από τον υδροφορέα μέσω κατακόρυφων υδρομαστευτικών έργων (πηγάδια, γεωτρήσεις), διαταράσσουν την ισορροπία του συστήματος ελαττώνοντας ή ακόμα και αναστρέφοντας τη φυσική υδραυλική βαθμίδα προς τη θάλασσα (Καλλέργης, 2000) με αποτέλεσμα τη διείσδυση του θαλασσινού νερού προς την ενδοχώρα. Κατ' αυτόν τον τρόπο, το θαλασσινό νερό αντικαθιστά το γλυκό νερό που αντλήθηκε, ενώ το εναπομείναν νερό του υδροφόρου επιπλέει πάνω από το θαλασσινό ως ελαφρύτερο ($\rho_s=1,025\text{gr/cm}^3 > \rho_f=1\text{gr/cm}^3$) σχηματίζοντας μία διεπιφάνεια.

Η θαλάσσια διείσδυση διακρίνεται σε παθητική και ενεργητική. Σύμφωνα με το Fetter (1994), η περίπτωση της διείσδυσης χαρακτηρίζεται ως παθητική όταν μια ποσότητα νερού αντληθεί από τον υδροφόρο χωρίς να αντιστραφεί η υδραυλική κλίση του υδροφόρου προς τη θάλασσα. Σε αυτή τη περίπτωση αποκαθίσταται νέα ισορροπία της διεπιφάνειας γλυκού-αλμυρού νερού κατά την περίοδο ηρεμίας (μη-άντλησης). Κατά την ενεργητική θαλάσσια διείσδυση υπάρχει αναστροφή της υδραυλικής κλίσης προς τη θάλασσα, λόγω της υπεράντλησης, ενώ παράλληλα δημιουργείται κώνος πτώσης στάθμης με γρηγορότερη πλήρωση του υδροφόρου με θαλασσινό νερό απ' ότι στην παθητική.

2.1.1 Η ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΓΛΥΚΟΥ-ΘΑΛΑΣΣΙΝΟΥ ΝΕΡΟΥ

Η θέση της διεπιφάνειας γλυκού-αλμυρού νερού, δίνεται προσεγγιστικά από τους Ghyben και Herzberg. Η υδροστατική ισορροπία μεταξύ αλμυρού και γλυκού νερού μπορεί να περιγραφεί με τη βοήθεια ενός διπλού συγκοινωνούντος δοχείου (U-tube, σχήμα 2.1)



Σχήμα 2.1. Υδραυλική σχέση γλυκού και αλμυρού νερού σε πειραματικό σωλήνα (U-tube).

Η πίεση σε κάθε πλευρά του σωλήνα πρέπει να είναι ίση εφόσον τα δύο υγρά παραμένουν σε υδροστατική ισορροπία.

$$P_1 = P_2 \rightarrow \rho_s \times g \times z = \rho_f \times g \times (z + h_f)$$

Η εξίσωση προσομοιώνεται σε παράκτιο υδροφορέα που απορρέει στη θάλασσα (σχήμα 2.2) :

$$z = \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_f} \times h_f \quad (2.1)$$

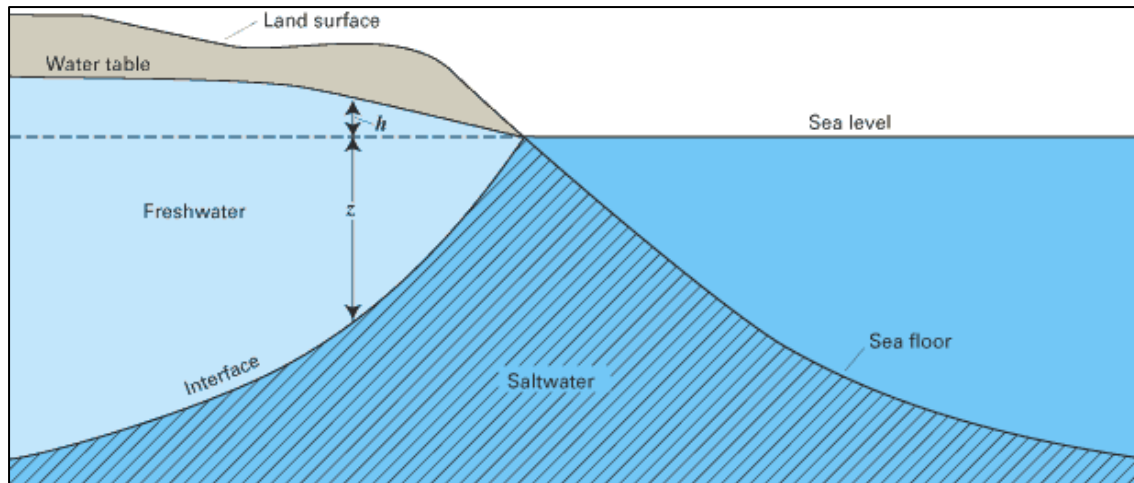
Όπου:

ρ_s = η πυκνότητα του θαλασσινού νερού

ρ_f = η πυκνότητα του γλυκού νερού

z = το βάθος της διεπιφάνειας αλμυρού-γλυκού από τη στάθμη της θάλασσας

h_f = η ανύψωση του γλυκού νερού από τη στάθμη της θάλασσας



Σχήμα 2.2. Κατανομή γλυκού-αλμυρού νερού σε παράκτιο υδροφόρα (Barlow, 2003).

Αν λάβουμε υπ' όψιν ότι $\rho_s=1,025 \text{ gr/cm}^3$ και $\rho_f=1 \text{ gr/cm}^3$ τότε η σχέση 2.1 γίνεται:

$$Z = 40 \times h_f \quad (2.2)$$

Σε περίπτωση που ο υδροφόρος είναι υπό πίεση, οι παραπάνω εξισώσεις ισχύουν αντικαθιστώντας την ανύψωση του γλυκού νερού από τη μέση στάθμη της θάλασσας (h_f) με την πιεζομετρική επιφάνεια του υδροφόρου σε αυτό το σημείο.

Η σχέση Ghyben–Herzberg, αν και αναλύει ικανοποιητικά το μηχανισμό της θαλάσσιας διείσδυσης και κατά συνέπεια τον προσδιορισμό του βάθους της διεπιφάνειας, δεν απεικονίζει πλήρως τις πραγματικές υδραυλικές συνθήκες της κορεσμένης ζώνης καθώς θεωρεί ότι η διεπιφάνεια γλυκού-θαλασσινού νερού είναι στάσιμη και αποτελείται από μία απότομη (διακριτή) λωρίδα στο όριο της οποίας η μετάβαση από το γλυκό στο αλμυρό νερό γίνεται απευθείας. Στις πραγματικές υδρολογικές συνθήκες πεδίου η διεπιφάνεια είναι μία ζώνη μετάβασης από θαλασσινό σε γλυκό νερό με αντίστοιχη διακύμανση στην ποιότητα του νερού.

Μια πιο ακριβής σχέση για τη θέση και το σχήμα της διεπιφάνειας, με την οποία συνδέονται οι συντεταγμένες της z και x , έχει δοθεί από το Glover (Σχήμα2.3):

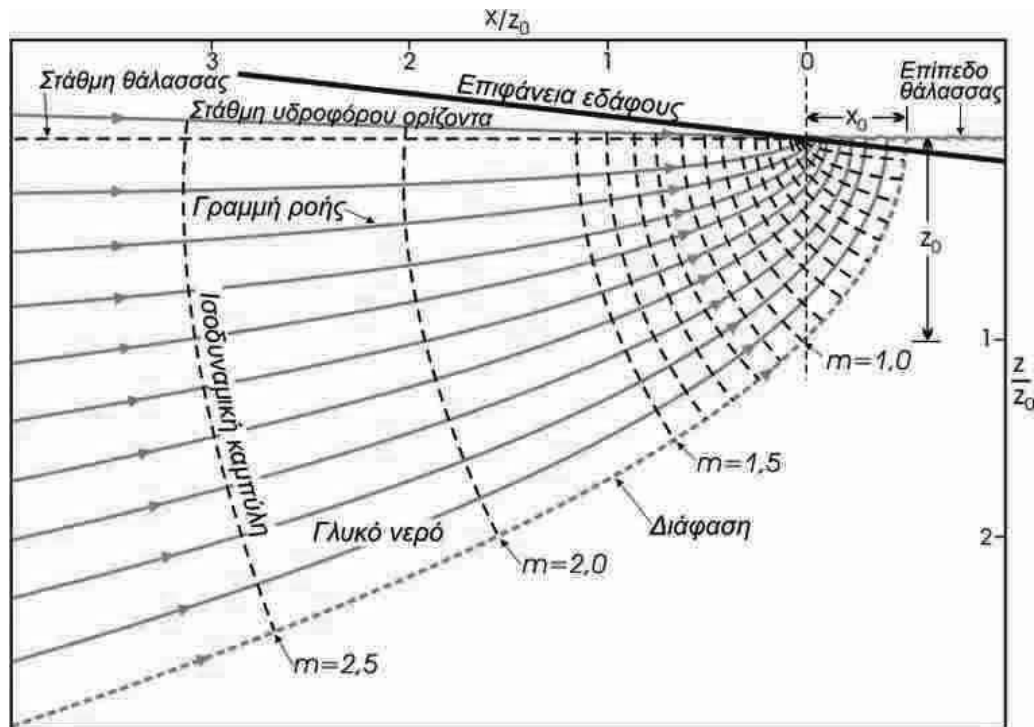
$$Z = \frac{\Lambda \times Q'}{k} + \sqrt{\frac{2 \times \Lambda \times Q' \times X}{k}} \quad (2.3)$$

Όπου:

$$\Lambda = \rho_f / (\rho_s - \rho_f)$$

Q' = η παροχή γλυκού νερού προς τη θάλασσα ανά μονάδα μήκους ακτογραμμής

k = η υδραυλική αγωγιμότητα του υδροφόρα



Σχήμα 2.3: Διάγραμμα ροής κατά Glover¹

Το ύψος της στάθμης h_f του υδροφόρου από το μέσο ύψος της επιφάνειας της θάλασσας υπολογίζεται από τη σχέση 2.4 :

$$h_f = \sqrt{\frac{2 \times Q' \times X}{\Lambda \times k}} \quad (2.4)$$

Το πλάτος X_0 της υποθαλάσσιας ζώνης του υδροφόρου που εκρέει στη θάλασσα είναι (ο τύπος του Glover για $z=0$) :

$$X_0 = - \frac{\Lambda \times Q'}{2 \times k} \quad (2.5)$$

Το βάθος Z_0 της διεπιφάνειας κάτω από την ακτογραμμή είναι (σχέση Glover για $x=0$) :

$$Z_0 = \frac{\Lambda \times Q'}{k} \quad (2.6)$$

Οι παράμετροι x , z , X_0 , Z_0 φαίνονται σχηματικά στο σχήμα 2.3.

Με το τύπο του Glover υπολογίζεται το βάθος z της διεπιφάνειας, για κάθε σημείο x από την ακτή, δίνοντας έτσι μεγαλύτερη ακρίβεια απ' ό,τι ο τύπος Ghyben–Herzberg.

Με βάση τη σχέση Ghyben-Herzberg, προσδιορίζεται το μήκος L της προεκβολής της επιφάνειας από την ακτογραμμή (ή και πόδι της διεπιφάνειας) :

¹ Πηγή: <http://www.geo.auth.gr/763/ch5.htm>

$$L = \frac{(\rho_s - \rho_f) \times k \times D^2}{\rho_f \times Q'} \quad (2.7)$$

2.1.2 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ- ΑΛΑΤΟΤΗΤΑ

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η διεπιφάνεια στη πραγματικότητα είναι μία ζώνη μετάβασης (ή ζώνη διάχυσης) του υπόγειου νερού από αλμυρό σε υφάλμυρο (με αυξανόμενη αλατότητα κατά βάθος) και τελικά σε γλυκό νερό. Δημιουργείται από τη διασπορά της ροής του γλυκού νερού στην επαφή με το θαλασσινό λόγω διατάραξης της υδραυλικής ισορροπίας από εξωτερικούς παράγοντες (π.χ. ανύψωση ή ταπείνωση της στάθμης θάλασσας, άντληση από πηγάδια-γεωτρήσεις). Το εύρος της ζώνης μετάβασης κυμαίνεται από μερικά εκατοστά ενώ μπορεί να ξεπεράσει τα 100m και εξαρτάται από την ένταση της αποφόρτισης γλυκού νερού και το μέγεθος του υδροφόρου. Οι ζώνες με μεγαλύτερο πάχος παρατηρούνται σε υδροφόρους με εκτεταμένη άντληση από υδρομαστευτικά έργα.

Σε έναν υπό άντληση παράκτιο υδροφόρο, η ροή του γλυκού νερού και της ζώνης μετάβασης είναι προς τη θάλασσα, ενώ του θαλασσινού προς την ενδοχώρα. Το πάχος της ζώνης αυξάνεται όσο πλησιάζει στην ακτή, λόγω των παλιρροιακών κυμάτων. Η αλατότητα κυμαίνεται σε διάφορα επίπεδα και αυξάνει προοδευτικά προς το βάθος. Για τη ζώνη μετάβασης υπολογίζεται η σχετική αλατότητα S_R (%) από τον τύπο:

$$S_R = 100 \times \frac{C - C_f}{C_s - C_f} \quad (2.8)$$

Όπου :

C = η αλατότητα σε ένα ορισμένο βάθος της ζώνης μετάβασης

C_f = η αλατότητα του γλυκού νερού

C_s = η αλατότητα του θαλασσινού νερού

2.1.3 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΥΔΡΟΜΑΣΤΕΥΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΣΤΗ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ

Για την αξιολόγηση της επίδρασης πηγαδιών και γεωτρήσεων στο πρόβλημα της θαλάσσιας διείσδυσης, ο Strack ανέπτυξε εμπειρική σχέση, θεωρώντας ισοτροπικό και ομογενή υδροφορέα με στεγανό και οριζόντιο υπόβαθρο με αντλούμενο πηγάδι σε απόσταση x_w από την ακτογραμμή. Σύμφωνα με τον ίδιο η θέση του ποδιού της διεπιφάνειας, υπό σταθερές συνθήκες ροής καθορίζεται από τη σχέση:

$$\frac{1}{2} (1 + \delta) \times \frac{B^2}{\delta^2} = \frac{Q'_{0x}}{K} \times x + \frac{Q_w}{4 \times \pi \times K} \times \ln \left[\frac{(x - x_w)^2 + y^2}{(x + x_w)^2 + y^2} \right] \quad (2.9)$$

Όπου:

$$\delta = \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_f}$$

B = το βάθος του στεγανού υπόβαθρου από τη μέση στάθμη της θάλασσας

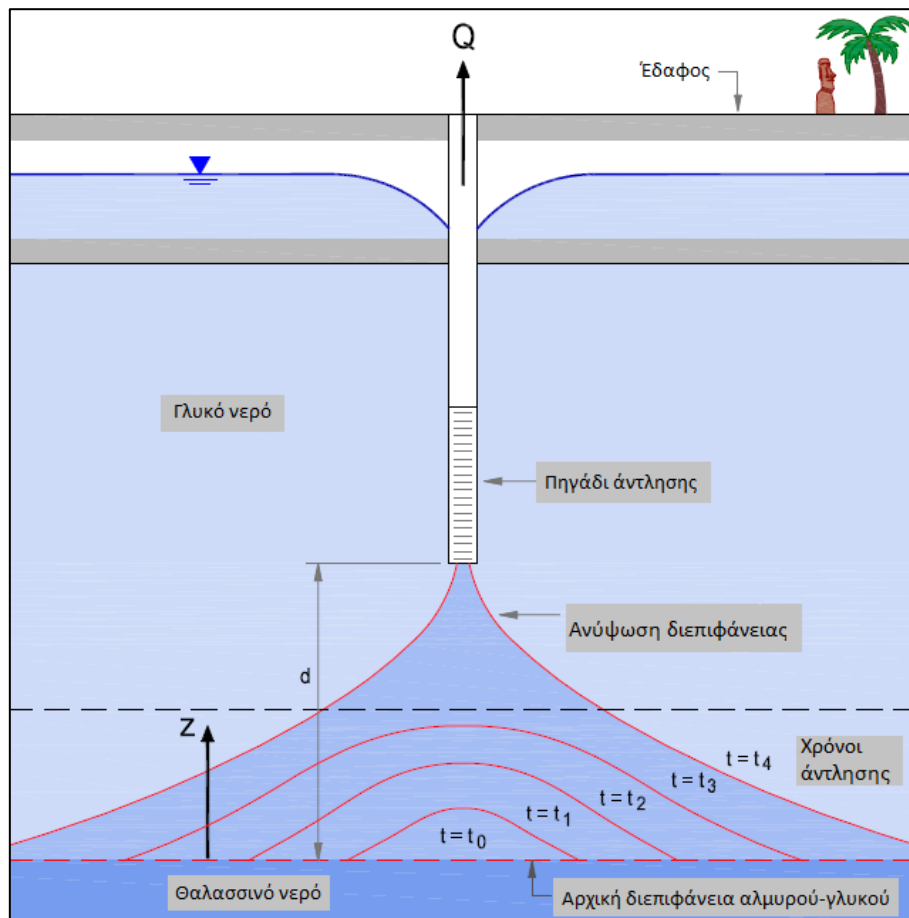
Q'_{0x} = η παροχή προς τη θάλασσα ανά μονάδα μήκους ακτογραμμής

Q_w = η άντληση (παροχή) από το πηγάδι

K = η υδραυλική αγωγιμότητα του υδροφόρου
 x_w = η απόσταση του πηγαδιού από την ακτογραμμή
 x, y = οι συντεταγμένες του ποδιού της διεπιφάνειας

2.1.4 ΑΝΥΨΩΣΗ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ- ΚΩΝΟΣ ΚΑΤΑΠΤΩΣΗΣ

Κατά την άντληση ενός παράκτιου υδροφόρου, ο οποίος βρίσκεται σε υδραυλική επικοινωνία με τη θάλασσα και σχηματίζεται διεπιφάνεια γλυκού-θαλασσινού νερού, δημιουργείται το φαινόμενο του ανεστραμμένου κώνου (upconing). Αυτό που συμβαίνει σε μία τέτοια περίπτωση είναι η τοπική ανύψωση της διεπιφάνειας κάτω από το πηγάδι ή τη γεώτρηση από όπου αντλείται ο υδροφορέας. Σταδιακά η ανύψωση λαμβάνει χώρα ανοδικά με κίνδυνο η γεώτρηση να αντλήσει υφάλμυρο ή ακόμα και θαλασσινό νερό (Σχήμα 2.4).



Σχήμα 2.4 Ανύψωση διεπιφάνειας (upconing)²(Montgomery & Associates 2011)

Θεωρητικά ισχύει η προϋπόθεση ότι η μετάβαση από αλμυρό σε θαλασσινό νερό έχει θεωρηθεί ως διεπιφάνεια και όχι ως ζώνη διάχυσης/μετάβασης. Έτσι, έχει αναπτυχθεί η παρακάτω σχέση για την ανύψωση της διεπιφάνειας λαμβάνοντας υπόψη τη σχέση Ghyben –Herzberg και την υπόθεση Dupuit:

$$Z = \frac{Q}{2 \times \pi \times k \times \left(\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \right)} \quad (2.9)$$

² Πηγή: <http://documentos.dga.cl/>

Όπου:

Z= η ανύψωση της διεπιφάνειας κάτω από το πηγάδι

Q= η παροχή από το πηγάδι

k= η υδραυλική αγωγιμότητα του υδροφόρου

Η κρίσιμη ανύψωση της διεπιφάνειας ($Z_{κρ}$) έτσι ώστε να μην προκληθεί αλμύριση του αντλούμενου νερού στο πηγάδι είναι μεταξύ 0,3 και 0,5 της κατακόρυφης απόστασης της αρχικής θέσης της επιφάνειας από τον πυθμένα του πηγαδιού. Λαμβάνοντας το ανώτερο όριο έχουμε:

$$Z_{κρ}/d = 0.5 \leftrightarrow Z_{κρ} = 0.5 \times d \quad (2.10)$$

Ο μέγιστος επιτρεπτός ρυθμός άντλησης για να μην προκληθεί αλμύριση του αντλούμενου υπόγειου νερού είναι:

$$Q_{max} \leq \pi \times d^2 \times k \times \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \quad (2.11)$$

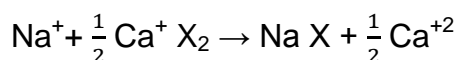
2.1.5 ΥΔΡΟΧΗΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ Υ.Ν. ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ

Κατά τη θαλάσσια διείσδυση, η χημική σύσταση του υπόγειου νερού μεταβάλλεται, διαταράσσοντας έτσι τη μηχανική και τη χημική ισορροπία του παράκτιου υδροφόρου.

Από γεωχημική άποψη η υπαλμύριση συνίσταται από ένα διάλυμα υψηλής αλατότητας (θαλασσινό νερό) αναμειγμένο με ένα αραιωμένο διάλυμα (γλυκό νερό) σε ένα πορώδες μέσο, που περιέχει πολλά δραστικά στερεά (ορυκτά) (Βουδούρης, 2009). Το νέο αυτό υψηλής αλατότητας διάλυμα, αποτελεί τη ζώνη μετάβασης και δημιουργείται μέσω της ανταλλαγής κατιόντων μεταξύ αλμυρού-γλυκού νερού έτσι μέχρις ότου επανέλθει η χημική ισορροπία του συστήματος σύμφωνα με τις νέες συγκεντρώσεις.

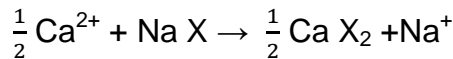
Το γλυκό νερό σε παράκτιες περιοχές περιέχει συνήθως ιόντα ασβεστίου (Ca^{+}) και όξινα ανθρακικά (HCO_3^{-}) που προέρχονται από την αποσύνθεση του ασβεστίτη. Έτσι ο κατιοντικός ανταλλάκτης (του εδάφους) περιέχει Ca^{+} , προσροφημένο στο γεωλογικό υλικό ενώ το θαλασσινό νερό περιέχει κυρίως ιόντα νατρίου (Na^{+}) και χλωρίου (Cl^{-}).

Κατά τη θαλάσσια διείσδυση, συμβαίνει η παρακάτω κατιονική ανταλλαγή:



Όπου X ο ανταλλάκτης του εδάφους.

Σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση, ο ανταλλάκτης του εδάφους απελευθερώνει τα ασβέστιο και στη θέση του προσροφά νάτριο με αποτέλεσμα ο τύπος του νερού να μετατρέπεται από $NaCl$ σε $CaCl_2$. Η αντίστροφη διαδικασία συμβαίνει όταν εμπλουτίζεται ένας υπαλμυρισμένος υδροφόρος με γλυκό νερό, δηλαδή απελευθερώνεται Na^{+} από το έδαφος και προσροφάται Ca^{2+} . Ο τύπος του νερού μετατρέπεται σε $NaHCO_3$:



Εξετάζοντας ένα δείγμα νερού από παράκτιο υδροφόρο, σύμφωνα με τα παραπάνω, προκύπτει ότι αν υπάρχει πλεόνασμα Ca^+ τότε ο υδροφόρος έχει προσβληθεί από θαλάσσια διείσδυση. Αντίθετα, αν βρεθεί πλεόνασμα Na^+ , ο υδροφόρος εμπλουτίζεται.

Για την ακριβέστερη προσέγγιση των αντιδράσεων που συμβαίνουν κατά τη μετατόπιση της διεπιφάνειας γλυκού-αλμυρού νερού, υπολογίζουμε τη συγκέντρωση κάθε ιόντος από το τύπο:

$$m_{i,\text{mix}} = f_{\text{sea}} * m_{i,\text{sea}} + (1-f_{\text{sea}}) * m_{i,\text{fresh}} \quad (2.12)$$

Όπου,

$m_{i,\text{mix}}$ = η συγκέντρωση του ιόντος "i" στο υφάλμυρο μίγμα

f_{sea} = το ποσοστό του θαλασσινού νερού στο υφάλμυρο μίγμα

$m_{i,\text{sea}}$ = η συγκέντρωση του ιόντος "i" στο θαλασσινό νερό

$m_{i,\text{fresh}}$ = η συγκέντρωση του ιόντος "i" στο γλυκό νερό

Το ποσοστό (κλάσμα) f_{sea} υπολογίζεται από τη συγκέντρωση των χλωριόντων στο δείγμα του υφάλμυρου νερού:

$$f_{\text{sea}} = \frac{m_{\text{Cl},\text{sample}} - m_{\text{Cl},\text{fresh}}}{m_{\text{Cl},\text{sea}} - m_{\text{Cl},\text{fresh}}} \quad (2.13)$$

Όπου, $m_{\text{Cl},\text{sample}}$ = η συγκέντρωση χλωριόντων στο δείγμα

2.1.6 ΕΝΔΕΙΞΗ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ

(κύριες βιβλιογραφικές πηγές: Bear, 1999 και Βουδούρης, 2009)

Η αναγνώριση της υφαλμύρισης σε έναν παράκτιο υδροφορέα γίνεται με χημική και ισοτοπική ανάλυση δειγμάτων, λαμβάνοντας υπ' όψιν ένα ή περισσότερα από τα παρακάτω κριτήρια.

- **Ηλεκτρική αγωγιμότητα EC:** αποτελεί μία πρώτη ένδειξη ύπαρξης υφάλμυρου νερού και γίνεται με επί τόπου μετρήσεις, κατά τη δειγματοληψία, με ειδικό φορητό εξοπλισμό (αγωγιμόμετρο). Οι τιμές EC του γλυκού νερού φτάνουν τα 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ και πάνω από αυτό το όριο, το νερό θεωρείται υφάλμυρο.
- **Ιόντα χλωρίου:** λόγω της διαφοροποίησης των ανιόντων του θαλασσινού νερού και του τυπικού ηπειρωτικού νερού, μία σαφέστερη ένδειξη για θαλάσσια διείσδυση αποτελεί η αύξηση των χλωριόντων.
- **Ο λόγος Cl/Br:** ο λόγος Cl/Br είναι ένας αξιόπιστος δείκτης θαλάσσιας διείσδυσης. Στο θαλασσινό νερό ο λόγος ισούται με 297.
- **Ο λόγος Na/Cl:** ο λόγος Na/Cl της θαλάσσιας διείσδυσης είναι μικρότερος από αυτόν του θαλασσινού νερού. Έτσι, συνδυάζοντας τον με άλλες γεωχημικές παραμέτρους, αποτελεί δείκτη για θαλάσσια διείσδυση, ακόμα και αν το φαινόμενο έχει εξελιχθεί σε μικρό βαθμό.
- **Οι λόγοι Ca/Mg, Ca/(HCO₃+SO₄):** ο εμπλουτισμός ενός παράκτιου υδροφόρου με Ca σε συνδυασμό με τους λόγους Ca/Mg και Ca/(HCO₃+SO₄) μεγαλύτεροι του 1, αποτελούν ακόμα μία ένδειξη που επιβεβαιώνει την υφαλμύριση.

- **Ο λόγος του Revelle** : ο Revelle πρότεινε ως κριτήριο θαλάσσιας διείδυσης το λόγο $R = Cl^- / (CO_3^{2-} + HCO_3^-)$. Οι συγκεντρώσεις εκφράζονται σε meq/lit. Για τιμές του λόγου R μεγαλύτερες του 1, έχουμε ένδειξη θαλάσσιας διείδυσης. (Βουδούρης, 2009).
- **Ισότοπα Ο και Η** : κατά τη μίξη του θαλασσινού νερού με απεμπλουτισμένο από ^{18}O υπόγειο νερό σε συσχετισμό του δD έναντι $\delta^{18}O$ ή Cl έναντι $\delta^{18}O$, αναμένεται γραμμικός συσχετισμός. Για διαφορετικές πηγές αλατότητας τα αποτελέσματα θα είχαν διαφορετικό συσχετισμό. Η ισοτοπική ανάλυση δηλαδή, αποτελεί ένα τρόπο να καθοριστεί η πηγή της αλατότητας ενός υδροφόρου.
- **Ισότοπο του Βορίου (B)** : η ισοτοπική σύνθεση του βορίου του υπόγειου νερού είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για τη διάκριση της αλατότητας (π.χ. αν πρόκειται για θαλάσσια διείδυση ή για ανθρωπογενή απόβλητα). Οι τιμές που παίρνει το $\delta^{11}B$ κατά τη θαλάσσια διείδυση, κυμαίνονται πάνω από 30‰ (δηλαδή της τιμής που παίρνει στο θαλασσινό νερό).

2.2. ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ

(κύριες βιβλιογραφικές πηγές: FAO, 1997)

Οι παράκτιοι υδροφορείς αποτελούν σημαντική πηγή νερού για ύδρευση και κυρίως για άρδευση των κατοίκων κάθε περιοχής. Ωστόσο η υπεράντληση έχει οδηγήσει στην υφαλμύριση τους, καθιστώντας το νερό ακατάλληλο για οποιαδήποτε χρήση.

Για την αντιμετώπιση του φαινομένου αυτού, θα πρέπει πρωτίστως να γίνει εγκατάσταση ενός συστήματος παρακολούθησης, μέσα από το οποίο θα ληφθούν απαντήσεις για το μέγεθος και τη δυναμική της θαλάσσιας διείδυσης και για την υδραυλική κλίση και τη ταχύτητα ροής μέσα στον υδροφόρο ώστε τελικά θα είναι δυνατό να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα για την εξυγίανση του υδροφόρου.

2.2.1. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ

2.2.1.1 ΑΜΕΣΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ- ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΗΓΑΔΙΑ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ

Η βασική τεχνική παρακολούθησης των παράκτιων υδροφόρων εμπεριέχει την εγκατάσταση ενός δικτύου γεωτρήσεων ή την χρησιμοποίηση των ήδη υπαρχόντων με σκοπό τη λήψη δειγμάτων νερού. Ο αριθμός και η διασπορά των γεωτρήσεων που θα χρησιμοποιηθούν, εξαρτάται από την έκταση του εκάστοτε υδροφόρου. Κρίσιμος παράγοντας για την εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων είναι ο τρόπος και η συχνότητα διαλογής των δειγμάτων. Μέσω των γεωτρήσεων παρακολούθησης, λαμβάνουμε τα παρακάτω δεδομένα:

- Υδραυλικό φορτίο

Το υδραυλικό ή πιεζομετρικό φορτίο ισούται με το απόλυτο υψόμετρο της στάθμης του νερού μιας γεώτρησης από το μέσο ύψος της στάθμης της θάλασσας. Η στάθμη του νερού σε κάθε γεώτρηση μετράται με ειδικά όργανα, τα σταθμήμετρα. Η μέτρηση της, είναι χρήσιμος δείκτης για τη διακύμανση της μάζας του γλυκού νερού σε εποχιακή βάση καθώς η γνώση της αποφόρτισης και επαναφόρτισης του υδροφόρου είναι σημαντικός παράγοντας για τη κατανόηση της κίνησης της ζώνης διάχυσης αλμυρού-γλυκού νερού. Η στάθμη του υδροφόρου χρησιμοποιείται ακόμη για το σχεδιασμό του πιεζομετρικού χάρτη του παράκτιου υδροφόρου απ' όπου είναι δυνατό να συλλεχθούν σημαντικές πληροφορίες. Στόχος αυτής της διαδικασίας είναι να εξαχθούν συμπεράσματα σε σχέση με τη διεύθυνση ροής του γλυκού νερού, την

ύπαρξη ή μη πλευρικής τροφοδοσίας του συστήματος του υδροφόρου από υπόγειες ή επιφανειακές πηγές (π.χ. από ποταμό). Επίσης, είναι δυνατό να ανιχνευθεί πιθανή θαλάσσια διείσδυση μελετώντας τη θέση του μέγιστου φορτίου. Αν το μέγιστο φορτίο βρίσκεται στο εσωτερικό του πιεζομετρικού χάρτη, η θαλάσσια διείσδυση βρίσκεται σε αρχικό στάδιο ή εκλείπει. Αντιθέτως, αν το μέγιστο φορτίο βρίσκεται στις παρυφές του πιεζομετρικού χάρτη, η θαλάσσια έχει διεισδύσει σε μεγάλο βαθμό στον υδροφόρο.

Η μέτρηση της στάθμης γίνεται είτε χειροκίνητα είτε με αυτόματα συστήματα καταγραφής από τα οποία λαμβάνονται πιο λεπτομερείς πληροφορίες και συγκρίνονται τα αποτελέσματα και με άλλες παραμέτρους (π.χ. η μεταβαλλόμενη στάθμη της θάλασσας).

– Κατακόρυφες ροές

Η ύπαρξη κατακόρυφων ροών κατά μήκος μιας γεώτρησης υποδηλώνει αυξομειώσεις της στάθμης του υδροφόρου. Στους παράκτιους υδροφόρους κάτι τέτοιο οφείλεται κυρίως στην υπεράντληση του γλυκού νερού και στη συνέχεια τη πλήρωση του υδροφόρου με θαλασσινό νερό μέχρι να επέλθει νέα ισορροπία στο σύστημα.

Οι τυχόν διακυμάνσεις στο κατακόρυφο φορτίο εντοπίζονται ως εξής:

- Εισαγωγή μιας συσκευής μεταξύ δύο packers. Τα packers αφήνονται κάποια ώρα έτσι ώστε να ισορροπήσουν και μετράται με αισθητήρα η πίεση της στήλης νερού ανάμεσα σε αυτά. Για τον υπολογισμό των διακυμάνσεων είναι απαραίτητη η γνώση του βάρους του νερού που έχει εγκλωβιστεί. Επαναλαμβάνεται η διαδικασία πολλές φορές, χαμηλώνοντας βαθύτερα στη γεώτρηση το κατώτερο packer. Η διαδικασία είναι χρονοβόρα και ακριβή και γι' αυτό δεν προτιμάτε.
- Μέτρηση της κατακόρυφης ροής με ρευματομέτρο. Πρόκειται για μια έλικα που εισέρχεται στη γεώτρηση και περιστρέφεται όταν υπάρχουν κατακόρυφες ροές ενώ παράλληλα καταγράφεται η ταχύτητα περιστροφής.
- Χρήση ειδικών «δεικτών». Στους παράκτιους υδροφορείς χρησιμοποιούνται κυρίως τα ισότοπα Br-82 του βρωμίου και I-131 του ιωδίου. Ο πυθμένας της γεώτρησης πληρείται με τον δείκτη και μετράται ο χρόνος που θα ανέβει στην επιφάνεια με διαδοχικούς μετρητές ραδιενέργειας. Αν δεν υπάρχουν κατακόρυφες ροές, ο όγκος του νερού που εμπεριέχει το δείκτη ανέρχεται στην επιφάνεια με μειωμένη ραδιενέργεια.

– Αλατότητα

Η αλατότητα στους παράκτιους υδροφόρους είναι ένας από τους πιο σημαντικούς δείκτες καθώς τις περισσότερες φορές υποδηλώνει θαλάσσια διείσδυση. Νερό με αυξημένη αλατότητα έχει γλυφή γεύση και θεωρείται ακατάλληλο προς πόση ενώ καθώς ανεβαίνει η αλατότητα μπορεί να θεωρηθεί ακατάλληλο για οποιαδήποτε άλλη χρήση.

Μια γρήγορη εκτίμηση της αλατότητας γίνεται μέσα από την ηλεκτρική αγωγιμότητα (electric conductivity- EC). Το πόσιμο νερό παίρνει τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας από 100 έως 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Παράγοντες που επηρεάζουν τη τιμή της αγωγιμότητας είναι η θερμοκρασία και η κατανομή των διαφόρων ιόντων στον υδροφόρο.

Στο πεδίο η ηλεκτρική αγωγιμότητα μετράται με ειδικά όργανα, τα αγωγιμόμετρα, αφού πρώτα συλλεχθεί δείγμα από τη γεώτρηση-πηγάδι. Η συσκευή είναι φορητή και αποτελείται από έναν αισθητήρα που συνδέεται μέσω καλωδίου με μία συσκευή μέτρησης αγωγιμότητας. Ο αισθητήρας τοποθετείται στο διάλυμα για λίγη ώρα και μετράει την αγωγιμότητα και τη θερμοκρασία του. Τα αποτελέσματα εμφανίζονται στην οθόνη. Είναι πολύ σημαντικό να

καταγράφεται και η θερμοκρασία του διαλύματος τη στιγμή που συλλέχθηκε το δείγμα καθώς επηρεάζει άμεσα την ηλεκτρική αγωγιμότητα.

Πολλές φορές η αλατότητα του νερού μπορεί να οφείλεται και στη διαλυτότητα των πετρωμάτων που φιλοξενούν τον υδροφόρο (π.χ. στα ανθρακικά πετρώματα έχουμε διάλυση ανθρακικών αλάτων). Γι' αυτό το λόγο πρέπει να γίνεται και περαιτέρω έρευνα σε περίπτωση υψηλής αγωγιμότητας ενός δείγματος. Το τελικό συμπέρασμα για την αλατότητα του διαλύματος βγαίνει από χημικές αναλύσεις.

– Δειγματοληψία

Προκειμένου να υπάρχει πλήρης γνώση της ποιοτικής κατάστασης ενός παράκτιου υδροφόρου, λαμβάνονται δείγματα νερού από τις γεωτρήσεις και τα πηγάδια και στη συνέχεια υπόκεινται σε χημική και ισοτοπική ανάλυση. Ως προς την ύπαρξη θαλάσσιας διείσδυσης μετράται η συγκέντρωση χλωριόντων στο δείγμα. Η συγκέντρωση χλωριόντων είναι καθοριστικός παράγοντας για τη θαλάσσια διείσδυση αφού το χλώριο είναι ένα στοιχείο που βρίσκεται σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις στο υπόγειο νερό, ενώ αποτελεί το επικρατέστερο ιόν του θαλασσινού.

Η δειγματοληψία σε γεωτρήσεις και πηγάδια γίνεται με διάφορους τρόπους. Μια από τους συνηθέστερους είναι η διαλογή με bailer, δηλαδή έναν σωλήνα ο οποίος ρίχνεται στη γεώτρηση και συλλέγει νερό από την επιφάνεια του υδροφόρου. Άλλος τρόπος είναι η διαλογή μέσω αντλητικού συστήματος (σε γεωτρήσεις που είναι ήδη τοποθετημένο). Οι δύο αυτές μέθοδοι είναι απλές και οικονομικές. Για μεγαλύτερη ακρίβεια μετρήσεων χρησιμοποιούνται μέθοδοι όπου λαμβάνονται διαφορετικά δείγματα κατά βάθη (μέσω packers). Αν και δίνουν καλύτερα αποτελέσματα, καθώς τα δείγματα κατηγοριοποιούνται κατά βάθη και προσφέρουν καλή γνώση κάθετου προφίλ για τον υδροφόρο, δεν χρησιμοποιούνται συχνά λόγω υψηλού κόστους και δυσκολίας στη χρήση.

Τα δείγματα αποθηκεύονται σε ειδικά μπουκάλια (από πολυαιθυλένιο) των 500ml. Το μπουκάλι ξεπλένεται μερικές φορές με το νερό της γεώτρησης για να αποφευχθούν τυχόν προσμίξεις με υγρό που έχει απομείνει στο μπουκάλι.

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι οι χημικές και ισοτοπικές αναλύσεις διαφέρουν ανάλογα με το βάθος και το τρόπο διαλογής του δείγματος. Σε μεγαλύτερα βάθη είναι λογικό να έχουμε υψηλότερες συγκεντρώσεις χλωριόντων απ' ότι στην επιφάνεια καθώς η θάλασσα έχει διεισδύσει σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό.

– Γεωφυσικές διαγραφίες γεωτρήσεων και πηγαδιών (well-logging)

Για πιο συστηματική και λεπτομερή παρακολούθηση της θαλάσσιας διείσδυσης, χρησιμοποιείται ηλεκτρική μέθοδος παρακολούθησης.

Για την ηλεκτρική καταγραφή τοποθετούνται, εντός της γεώτρησης, ηλεκτρόδια. Η διάταξη αποτελείται είτε από ένα μοναδικό ηλεκτρόδιο είτε από πολλαπλά, τοποθετημένα σε μεγάλο βάθος στη γεώτρηση. Αν και η τοποθέτηση ενός ηλεκτροδίου είναι οικονομική και η χρήση του πολύ απλή, συνήθως προτιμάται η τοποθέτηση πολλαπλών ηλεκτροδίων καθώς προσφέρουν πολύπλευρη καταγραφή του προφίλ του υδροφόρου. Μέσα στα ηλεκτρόδια υπάρχουν ενσωματωμένα καλώδια τα οποία περνούν μέσα από τη γεώτρηση και καταλήγουν σε έναν πίνακα ελέγχου στην επιφάνεια, απ' όπου γίνεται η παρακολούθηση και η καταγραφή των αποτελεσμάτων. Η παράμετρος που καταγράφεται είναι η ηλεκτρική αντίσταση, καθώς αλλάζει αντιστρόφως ανάλογα με την ηλεκτρική αγωγιμότητα- για ψηλές τιμές αντίστασης έχουμε γλυκό νερό ενώ όσο μικραίνει, γίνεται όλο και πιο υφάλμυρο.

Η μέτρηση γίνεται με εναλλασσόμενο ρεύμα χαμηλής συχνότητας. Καθώς τα ηλεκτρόδια διέρχονται από τη γεώτρηση, η αντίστασή τους αλλάζει ανάλογα με την αντίσταση των πετρωμάτων που φιλοξενούν το νερό. Οι αλλαγές στην

αντίσταση προκαλούν και αλλαγές τάσης στο κύκλωμα οι οποίες καταγράφονται ως καμπύλη αντίστασης συναρτήσεως του βάθους. Παράδειγμα μιας τέτοιας καμπύλης φαίνεται στο σχήμα 2.5.

Η μέθοδος δίνει ικανοποιητικά και μεγάλης ακρίβειας αποτελέσματα, καθώς τα ηλεκτρόδια βρίσκονται σε άμεση επαφή με τους σχηματισμούς.

2.2.1.2 ΕΜΜΕΣΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

(κύρια βιβλιογραφική πηγή : Bear, 1999)

Εκτός των γεωτρήσεων παρακολούθησης, χρησιμοποιούνται και έμμεσες μέθοδοι παρακολούθησης των παράκτιων υδροφόρων :

– Γεωφυσικές μέθοδοι

Κατά τη παρακολούθηση ενός παράκτιου περιβάλλοντος, οι γεωφυσικές μέθοδοι εκμεταλλεύονται της φυσικές ιδιότητες του εδάφους και του νερού (ηλεκτρική αγωγιμότητα, ηλεκτρομαγνητική διαπερατότητα, θερμική αγωγιμότητα κ.α.). Σημαντικό πλεονέκτημα των μεθόδων είναι το ότι οι μετρήσεις γίνονται από την επιφάνεια του εδάφους ή ακόμη και εναέρια μέσω αεροσκαφών. Έτσι κατά την έρευνα πεδίου καλύπτετε μεγάλη έκταση της υπό εξέταση περιοχής και σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Σημειώνεται ότι μερικές τεχνικές εκμεταλλεύονται και την ύπαρξη γεωτρήσεων παρακολούθησης. Κύριο μειονέκτημα των μεθόδων αποτελεί η ανακρίβεια τους που οδηγεί στην ανάγκη χρησιμοποίησης στοιχείων έρευνας πεδίου για τη ρύθμιση των οργάνων.

Ακολουθούν οι πιο συχνές γεωφυσικές μέθοδοι εντοπισμού και παρακολούθησης της θαλάσσιας διείσδυσης.

DC- Direct Current Resistivity

Αποτελεί τη παλαιότερη και πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδο εντοπισμού της υφαλμύρισης. Ο εξοπλισμός είναι απλός και οικονομικός. Βασίζεται στη διαφορά ηλεκτρικής αγωγιμότητας μεταξύ γλυκού και υφάλμυρου νερού.

Πρόκειται για ηλεκτρική μέθοδο. Κατά την εφαρμογή της, εισάγεται ηλεκτρικό ρεύμα στο έδαφος μέσω ηλεκτροδίων. Η ηλεκτρική τάση που προκύπτει μετράται από δύο ηλεκτρόδια τάσης. Στη συνέχεια υπολογίζεται η αντίσταση με το πολλαπλασιασμό της αναλογίας του ρεύματος από ένα γεωμετρικό συντελεστή, ο οποίος εξαρτάται από τη διάταξη του ηλεκτροδίου και την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων. Η αντίσταση που υπολογίζεται είναι η πραγματική για ένα ομογενές έδαφος και η φαινόμενη για ένα ετερογενές. Η ηλεκτρική αντίσταση μεταφράζεται σε αγωγιμότητα (αντιστρόφως ανάλογα ποσά) και έτσι είναι δυνατό να εντοπιστεί τυχόν υφαλμύριση σε έναν παράκτιο υδροφόρα.

FDEM-Frequency Domain Electromagnetic Method

Η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος FDEM, μετρά την ένταση ενός δευτερεύοντος μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται από ρεύμα που εισάγεται στο έδαφος, προκαλούμενο από ένα αρχικό μαγνητικό πεδίο. Πιο αναλυτικά, το δευτερεύον δημιουργείται από την εισαγωγή ρευμάτων eddy στο υπέδαφος, και η δύναμη του εξαρτάται από τη δύναμη αυτών των ρευμάτων. Κατά συνέπεια η δύναμη του πεδίου προσδιορίζει την ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους. Η συχνότητα του αρχικού πεδίου συνδέεται με το βάθος στο οποίο θα φτάσει η μέτρηση. Με χαμηλότερη συχνότητα έχουμε μεγαλύτερο βάθος διείσδυσης.

Εναέριες ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι

Οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι εφαρμόζονται για την εξερεύνηση του υπεδάφους χωρίς την ύπαρξη επαφής με την επιφάνεια του εδάφους. Έτσι οι ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις μπορούν να γίνουν εναέρια μέσω αεροσκάφους ή ελικόπτερου. Ένα τυπικό εναέριο σύστημα χρησιμοποιεί διαφορετικά ζευγάρια

πομπού-δέκτη σε διάφορες συχνότητες. Αυτά τα πηνία τοποθετούνται σε ένα σύστημα ("bird") το οποίο σύρεται 25-50m πάνω από το έδαφος. Το βάθος που θα φτάσει η μέτρηση (δηλ. το μαγνητικό πεδίο) καθορίζεται από τη συχνότητα και δεν ξεπερνά τα 10m. Τα δεδομένα που εξάγονται είναι ένας χάρτης αντίστασης για κάθε διαφορετική συχνότητα.

Η τεχνική είναι κατάλληλη για εφαρμογή σε μεγάλη έκταση (λόγω οικονομικότητας) και σε περιοχές μη αναπτυγμένες (από την άποψη κεραιών, καλωδίων ρεύματος, σωλήνων κτλ) καθώς μπορεί να παραχθούν ψευδή δεδομένα για το υπέδαφος.

TDEM- Time Domain Electromagnetic Method

Η μέθοδος TDEM λειτουργεί χρησιμοποιώντας ένα πομπό που οδηγεί εναλλασσόμενο ρεύμα στο έδαφος, μέσω ενός τετράγωνου βρόγχου καλωδίων. Το ρεύμα κλίνει και ανοίγει για περιόδους ίσης χρονικής διάρκειας, με συχνότητες εύρους 3 έως 75 Hz, παράγοντας έτσι ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Όπως και στη μέθοδο FDEM, το ηλεκτρικό ρεύμα παράγει ένα αρχικό, χρονικά μεταβαλλόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, το οποίο με τη σειρά του δημιουργεί ένα δευτερεύον που η δύναμη του σχετίζεται με την αγωγιμότητα.

Συμπαιρένεται ότι οι παραπάνω μέθοδοι εξάγουν αποτελέσματα ηλεκτρικής αντίστασης ή ηλεκτρικής αγωγιμότητας, μέσω των οποίων είναι δυνατό να εντοπιστεί η ζώνη μετάβασης γλυκού-αλμυρού νερού, αλλά και να χαρτογραφηθεί η αλατότητα σε έναν παράκτιο υδροφόρο.

- Τηλεπισκοπική παρακολούθηση (κύρια βιβλιογραφική πηγή: Αστάρας και Οικονομίδης, 2006)

Πρόκειται για μία από τις νεότερες τεχνικές παρακολούθησης, κατά την οποία λαμβάνονται πληροφορίες για το προς μελέτη αντικείμενο, χωρίς να υπάρχει επαφή με αυτό. Η τηλεσκοπική παρακολούθηση συλλέγει πληροφορίες, εκμεταλλευόμενη την εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας του κάθε αντικείμενου, καταγράφοντας την μέσω αισθητήρων που βρίσκονται σε εναέριες ή διαστημικές πλατφόρμες.

Για τη τηλεσκοπική παρακολούθηση των γήινων πόρων χρησιμοποιείται το πρόγραμμα LANDSAT. Η παρατήρηση γίνεται μέσω δορυφορικών συστημάτων (EO- Earth Observation satellite systems). Σε σύγκριση με την έρευνα πεδίου, τα δεδομένα που λαμβάνονται μέσω της συγκεκριμένης τεχνικής είναι πιο συνοπτικά και μπορούν να συλλεχθούν σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή, με μεγάλη ευκολία (δορυφορικές φωτογραφίες), καθιστώντας την οικονομικότερη και ταχύτερη.

Με τις δορυφορικές λήψεις είναι δυνατό να αναλυθεί μια περιοχή φασματικά, χρονικά και χωρικά. Η ακρίβεια ανάλυσης κάθε εικόνας διαφέρει ανάλογα με τη χρήση για την οποία προσδιορίζεται- η κάθε φωτογραφία μπορεί να αντιστοιχεί σε επιφάνεια εδάφους 1km, ενώ μπορεί να φτάσει και τα 0,6m (δεδομένα υψηλής ανάλυσης).

Τα τηλεσκοπικά συστήματα παρακολούθησης έχουν εφαρμογή και στο πρόβλημα της θαλάσσιας διείδυσης. Για την αναγνώριση και τη παρακολούθηση του φαινομένου γίνεται χρήση πολλαπλών διαφορετικών εικόνων από διαφορετικές χρονικές περιόδους, αναλύοντας τη φυτοκάλυψη στις ενότητες κάθε περιοχής. Η ύπαρξη φυτών ανεκτικών στα άλατα αποτελεί δείκτη υπαλμύρισης. Ακόμη, μέσω δορυφορικών λήψεων, είναι δυνατή η σκιαγράφηση των ζωνών εκφόρτισης του παράκτιου υδροφόρου μέσω δορυφορικών θερμικών υπέρυθρων εικόνων.

- Μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης

Μία εναλλακτική τεχνική παρακολούθησης παράκτιων υδροφορέων αποτελούν τα μαθηματικά μοντέλα. Πρόκειται για μια αλληλουχία εξισώσεων (από μία απλή γραμμική εξίσωση έως μια πολύπλοκη μαθηματική έκφραση) οι οποίες εισάγονται ως αλγόριθμος σε υπολογιστικά προγράμματα. Σημαντική παράμετρος της τεχνικής, είναι η ύπαρξη και η χρήση δεδομένων πεδίου για τη σωστή ρύθμιση του μοντέλου στον εκάστοτε υδροφόρο.

Μέσα από διάφορες τεχνικές προσομοίωσης είναι δυνατό:

- να εντοπιστεί η ροή του ρυπασμένου/υφάλμυρου νερού μέσα τους σχηματισμούς
- να υπολογιστούν ποιοτικά και ποσοτικά στοιχεία του υπόγειου νερού
- να υπάρξει καλύτερη κατανόηση του υδρογεωλογικού συστήματος της περιοχής

Συνδυάζοντας τα παραπάνω στοιχεία, το μοντέλο συνεισφέρει στον έλεγχο της μόλυνσης που θα προκύψει μελλοντικά στον υδροφόρο αλλά και στην εξυγίανση του. Ακόμη παραθέτει την οικολογική και οικονομική επίπτωση κάθε λύσης, επιλέγοντας τελικά τη καλύτερη δυνατή λύση από άποψη διαχείρισης και πρόβλεψης της μελλοντικής κατάστασης του υδροφόρου.

Αν και τα μοντέλα χρησιμοποιούν κάποιες υποθέσεις εξαιτίας της ανομοιογένειας του υδροφόρου, η χρήση στοιχείων πεδίου προσφέρει μεγαλύτερη ακρίβεια αποτελεσμάτων.

2.3 ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ ΣΤΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΜΕΣΟΓΕΙΟΥ

Σε αυτή την ενότητα, παρατίθενται μελέτες περίπτωσης με τεχνικές παρακολούθησης παράκτιων περιοχών στην Ελλάδα και στην ευρύτερη Μεσογειακή λεκάνη.

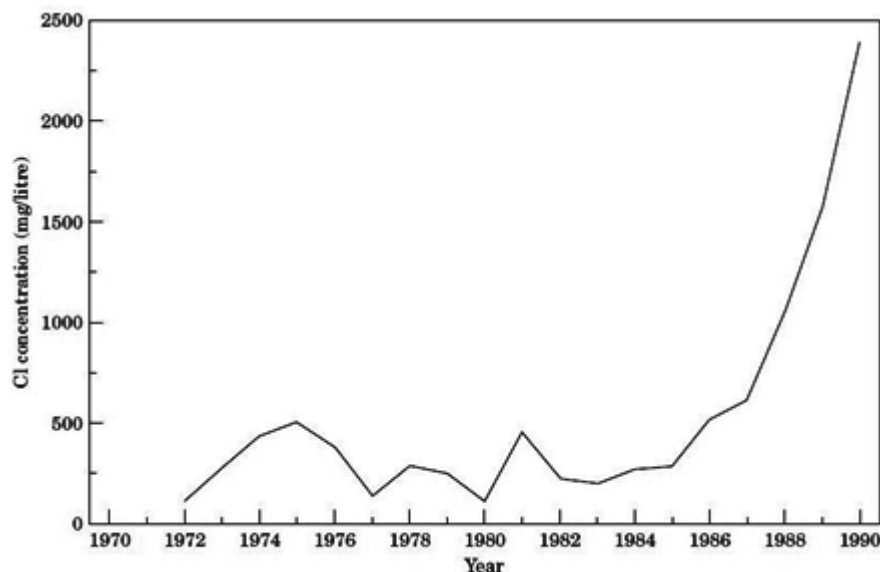
2.3.1 ΙΣΡΑΗΛ

Ο υπό εξέταση παράκτιος υδροφόρος βρίσκεται δυτικά του Ισραήλ και εκφορτίζεται στη Μεσόγειο. Αποτελεί για τη χώρα απόθεμα και κύρια πηγή πόσιμου νερού ενώ εκτείνεται έως και 110 km από την ακτή. Ο υδροφόρος χωρίζεται σε υπο-υδροφόρους (sub-aquifers) καθώς στρώματα αργίλου διακόπτουν την επικοινωνία του συστήματος. Για τη μέτρηση της υφαλμύρισης έχουν ληφθεί υπ' όψιν οι δύο ανώτεροι υπο-υδροφόροι. Έχει παρατηρηθεί υψηλό επίπεδο χλωριόντων στην ενδοχώρα σε απόσταση 2km από την ακτή (Melloul et al., 1997)

Από το 1970, ο υδροφόρος παρακολουθείται μέσα από ένα πυκνό δίκτυο 400 πηγαδιών με συχνή δειγματοληψία. Σταδιακά ο αριθμός των ενεργών πηγαδιών μειώθηκε στα 200 δημιουργώντας ένα μεγάλο κενό δεδομένων και την ανάγκη κάποιας νέας μεθόδου για διεύρυνση των μετρήσεων. Το 1990 εισάγεται η γεωφυσική μέθοδος TDEM ως συμπληρωματική, και κατά την εφαρμογή της, παρατηρήθηκε συσχετισμός μεταξύ των αποτελεσμάτων της και των χημικών αναλύσεων των δειγμάτων. Έχοντας τα δεδομένα των πηγαδιών και συνδυάζοντας τα με τα αποτελέσματα της γεωφυσικής μεθόδου προέκυψε αλματώδης αύξηση των χλωριόντων μεταξύ 1970-1990 (σχήμα 2.5). Το υφάλμυρο νερό είχε εισχωρήσει στην ενδοχώρα από 0-1km (1960) στα 1-2 km (1990). Μεταξύ 1990-1995 παρατηρήθηκε μία αύξηση της στάθμης (λόγω πιθανής μείωσης των αντλήσεων και φυσικής ή τεχνητής επαναφόρτισης του υδροφόρου) που αποδεικνύει ότι η θαλάσσια διείσδυση μπορεί να είναι αναστρέψιμη.

Οι Melloul και Goldenberg (1997) σημειώνουν ότι, το συμπέρασμα που εξάγεται από τα παραπάνω είναι η ανάγκη ενίσχυσης ενός αραιού δικτύου πηγαδιών από συμπληρωματικές μετρήσεις (TDEM) για τη χαρτογράφηση της υφαλμύρισης αλλά και το σχεδιασμό ενός πλάνου (μέσω μαθηματικών μοντέλων) για την

εξυγίανση του υδροφόρου. Σημειώνεται ότι η εξ' ολοκλήρου χρήση της TDEM μπορεί να οδηγήσει σε ασαφή και λανθασμένα αποτελέσματα.



Σχήμα 2.5 Κατανομή χλωριόντων (Melloul & Goldenberg, 1997)

2.3.2 ΙΤΑΛΙΑ

Η παράκτια περιοχή Apulia, βρίσκεται νοτιοανατολικά της Ιταλίας. Στην Apulia αναπτύσσεται ένα μεγάλο καρστικό σύστημα από δολομίτες το οποίο τροφοδοτεί ολόκληρη τη περιοχή με πόσιμο νερό. Οι Polemio et al. (2009), σημειώνουν ότι ως καρστικός υδροφορέας, είναι ιδιαίτερα ευάλωτος σε μολύνσεις (υψηλή υδραυλική αγωγιμότητα, υψηλή μεταβιβαστικότητα) με αποτέλεσμα εδώ και πολλές δεκαετίες να καταγράφεται συνεχής αύξηση της θαλάσσιας διείσδυσης. Η ανησυχητική αυτή αύξηση οδήγησε στην ανάγκη δημιουργίας ενός πολύπλευρου συστήματος παρακολούθησης του υδροφόρου, καθώς και ενός εδίου αντιμετώπισης του φαινομένου.

Οι τεχνικές παρακολούθησης που χρησιμοποιήθηκαν είναι:

- Υδρογεωλογικό δίκτυο πηγαδιών (Hydrogeological monitoring network). Το δίκτυο υπήρχε από το 1970 και αποτελούταν από 60 γεωτρήσεις. Αργότερα όμως αναβαθμίστηκε με περισσότερα πηγάδια και σύγχρονο εξοπλισμό με αισθητήρες παρακολούθησης της πιεζομετρικής επιφάνειας και της αλατότητας για τον προσδιορισμό της ζώνης διάχυσης. Το δίκτυο λειτούργησε μόνο κατά τη περίοδο 1997-1998 και στη συνέχεια εγκαταλείφθηκε λόγω υψηλού κόστους συντήρησης. Κατά τη περίοδο 1997-2003 παρατηρήθηκαν απότομες πτώσεις στη πιεζομετρία της περιοχής, τόσο στην ενδοχώρα όσο και στη παράκτια ζώνη.
- Χωρική και χρονική ανάλυση της αλατότητας (Spatial and Temporal Variability of salinity). Η ανάλυση έγινε σε 500 δείγματα (1995-2003), ως προς τα ποσοστά των ιόντων Ca^{2+} και Mg^{2+} . Για το διαχωρισμό υφάλμυρου και γλυκού νερού προσδιορίστηκε ο λόγος rMg^{2+}/rCa^{2+} (για λόγο μεγαλύτερο του 2 το νερό θεωρείται υφάλμυρο). Η ηλεκτρική αγωγιμότητα των δειγμάτων δεν παρουσίασε μεγάλες μεταβολές σε εποχιακή βάση. Σύμφωνα με τις αναλύσεις, έγινε χωρική κατανομή της αλατότητας μέσω καμπύλων (TCL=threshold contour line) με τη μέθοδο kriging προγράμματος γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών (GIS). Η περιοχή χωρίστηκε σε τρεις ζώνες ως προς τη τρωτότητα στη θαλάσσια διείσδυση, με βάση τη καμπύλη TCL:
 - Αλατότητα κάτω από το όριο (ενδοχώρα): ζώνη χαμηλής τρωτότητας

- Αλατότητα πάνω από το όριο(στην ακτή): ζώνη υψηλής τρωτότητας
 - Μεταβατική ζώνη: ζώνη μεταβλητής τρωτότητας
- Πολυπαραμετρική μέτρηση για ποιοτική ταξινόμηση (Multi-parameter logging for quality classification). Οι μετρήσεις έγιναν μέσω αισθητήρων, εγκαταστημένων στις γεωτρήσεις. Οι παράμετροι που μετρήθηκαν είναι η πίεση, η θερμοκρασία, η ηλεκτρική αγωγιμότητα, το pH, το διαλυμένο οξυγόνο και διακρίθηκαν 3 τύποι περιοχών με διαφορετικές ενδείξεις:
- Η εσωτερική περιοχή πανατροφοδοσίας (ενδοχώρα)
 - Η ρυπασμένη από τη θαλάσσια διείσδυση (παράκτια)
 - Η ζώνη μετάβασης μεταξύ των δύο παραπάνω περιοχών
- Οι παραπάνω τεχνικές, ως σύνολο, αποτελούν μία απλή, γρήγορη και χαμηλού κόστους μέθοδο παρακολούθησης. Ως καρστικό σύστημα, ο συγκεκριμένος υδροφόρος απαιτεί δίκτυο γεωτρήσεων για τη διεξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων. Οι πολύ-παραμετρικές μετρήσεις δίνουν μια γενική εικόνα για τη κατάσταση του συστήματος και αποτελούν δείκτη για τη σύγκριση μελλοντικών αποτελεσμάτων (Polemio et al., 2009).

2.3.3 ΑΙΓΥΠΤΟΣ

Το δέλτα του Νείλου βρίσκεται στο βόρειο τμήμα της Αιγύπτου και συνορεύει με τη μεσόγειο. Κάτω από αυτό, βρίσκεται φρεάτιος υδροφόρος και αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα αποθέματα νερού της Αιγύπτου ($500 \times 10^9 \text{ m}^3$). Η κύρια τροφοδότηση του συστήματος είναι η απορροή του Νείλου και τα κανάλια που έχουν κατασκευαστεί για άρδευση. Η περιοχή έρευνας της μελέτης περίπτωσης, είναι το ανατολικό κομμάτι του Δέλτα όπου αναπτύσσεται φρεάτιος υδροφόρος από τεταρτογενείς αποθέσεις που εκφορτίζεται στη λίμνη Monzala και στη μεσόγειο θάλασσα. Στο υπόγειο νερό της περιοχής έχουν παρατηρηθεί σημεία υψηλής αλατότητας, φαινόμενο που μπορεί να προκαλείται από θαλάσσια διείσδυση. Η παρακολούθηση του υδροφόρου για την εξακρίβωση της αιτίας υπαλμύρισης έγινε με τη λήψη 61 δειγμάτων από 8 κανάλια, 12 αποχετεύσεις και 41 πηγάδια. Στα δείγματα έγιναν επί τόπου μετρήσεις θερμοκρασίας, ηλεκτρικής αγωγιμότητας, pH και διαλυμένων οξυγόνων με ειδικό φορητό εξοπλισμό, ενώ αργότερα έγινε στο εργαστήριο υδροχημική και ισοτοπική ανάλυση για την αναγνώριση των χημικών στοιχείων και το βαθμό αλατότητας στο νερό.

Οι Ahmed et al. (2013) κατηγοριοποίησαν τα δείγματα σε 3 κατηγορίες- περιοχές A, B και C, σύμφωνα με τη χημική ανάλυση ως προς τα χλωριόντα και τα συνολικά διαλυμένα στερεά (TDS) κάθε δείγματος (αυξανόμενη αλατότητα από την κατηγορία A προς τη C). Πιο συγκεκριμένα:

- Κατηγορία A και B₁: χαμηλή αλατότητα, πρόκειται για νερό άρδευσης (υψηλές συγκεντρώσεις νιτρικών ιόντων), εντοπίζεται στο κεντρικό και νότιο κομμάτι της περιοχής έρευνας
- Κατηγορία B₂ και C: υψηλή αλατότητα, εντοπίζεται στο Βόρειο τμήμα της περιοχής έρευνας (προς τη Μεσόγειο).

Για την εκτίμηση της προέλευσης της υψηλής αλατότητας του βόρειου τμήματος της περιοχής, έγινε ισοτοπική ανάλυση για τη διακύμανση των σταθερών ισότοπων ($\delta^{18}\text{O}$ και $\delta^2\text{H}$) των δειγμάτων. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το νερό του υδροφόρου προέρχεται από νερό άρδευσης, καναλιών και μετεωρικό νερό πιθανότατα από τις τεταρτογενείς αποθέσεις. Η σύνθετη ισοτοπική ανάλυση του Cl με $\delta^{18}\text{O}$ και ^{14}C υποδεικνύει ότι το υπαλάμυρο νερό δεν προέρχεται από θαλάσσια διείσδυση αλλά συνδέεται με την εξάτμιση και με θαλάσσιας προέλευσης στρώματα αλάτων που εναποτέθηκαν στη περιοχή κατά το παρελθόν.

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι η υψηλή περιεκτικότητα TDS και χλωριόντων μπορεί να μην οφείλεται στη θαλάσσια διείσδυση αλλά μπορεί να συνδέεται με τη διάλυση πετρωμάτων με αντίστοιχες αλατότητες. Τέλος,

αποδεικνύεται ότι η παρακολούθηση ενός υδροφόρου μέσω υδροχημικής και ισοτοπικής ανάλυσης αποτελεί χρήσιμο εργαλείο για την έρευνα της αλατότητας και της ποιότητας των υπόγειων νερών στους παράκτιους υδροφορείς.

2.3.4 ΙΣΠΑΝΙΑ

Η υπό έρευνα περιοχή Ses Sitjoles, βρίσκεται νοτιοανατολικά της Μαγιόρκα σε απόσταση 6km από την ακτή. Οι Garing et al. (2013) αναφέρουν ότι οι γεωλογικοί σχηματισμοί που αναπτύσσονται στη περιοχή είναι κοραλλιογενείς και ανθρακικοί (δολομίτες). Λόγω των τουριστικών και γεωργικών δραστηριοτήτων του Ses Sitjoles, υπάρχει μεγάλη ζήτηση γλυκού νερού το οποίο αντλείται από τον παράκτιο καρστικό υδροφόρο που βρίσκεται στη περιοχή, γεγονός που έχει δημιουργήσει το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης. Για την παρακολούθηση του υδροφόρου το 2003 αναπτύχθηκε δίκτυο 18 γεωτρήσεων βάθους 100m.

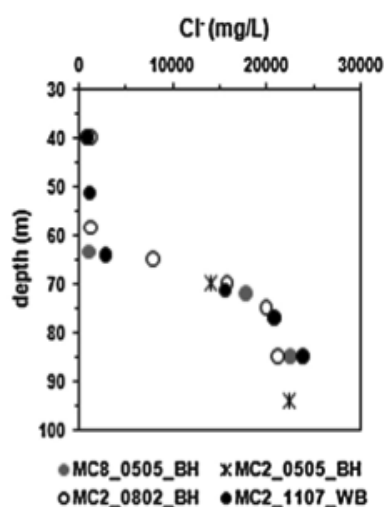
Οι τεχνικές παρακολούθησης που χρησιμοποιήθηκαν είναι γεωφυσικές και δειγματοληπτικές που ακολουθούνται από χημική ανάλυση.

Η γεωφυσική έρευνα εστιάστηκε σε 2 γεωτρήσεις και μετρήθηκαν η ηλεκτρική αγωγιμότητα του πορώδους μέσου (σ_r), η ηλεκτρική αγωγιμότητα του νερού του υδροφόρου (σ_f) και το pH. Οι μετρήσεις έγιναν μέσω αισθητήρων που εισήχθησαν στη γεώτρηση από το βάθος των 40m έως τα 95m. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αγωγιμότητας και pH παρουσιάζονται στο σχήμα 2.8.

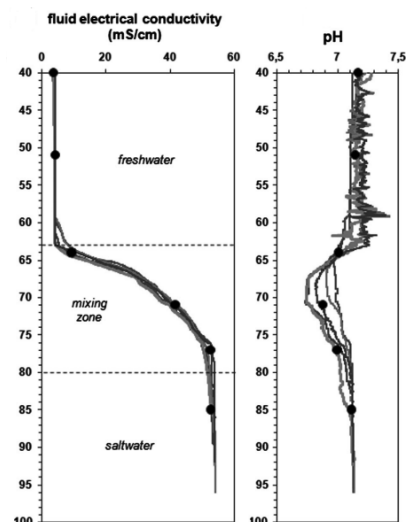
Τα δείγματα συλλέχθηκαν από διάφορα βάθη σε τρεις διαφορετικές περιόδους (Μάιος 2005, Φεβρουάριος 2008, Ιούλιος 2011). Τα βασικά στοιχεία που βρέθηκαν κατά τις χημικές αναλύσεις είναι Ca, Mg, Na, Cl, και K. Για να προσδιοριστεί η έκταση της θαλάσσιας διείσδυσης σχεδιάστηκε διάγραμμα κατανομής χλωριόντων (σχήμα 2.7).

Από τις εικόνες φαίνεται καθαρά το βάθος της ζώνης μετάβασης αλμυρού-γλυκού νερού, περίπου στα 65m.

Κατά τη περίοδο παρακολούθησης του υδροφόρου (2003-2011) δεν έχει σημειωθεί κάποια σημαντική αλλαγή στη ζώνη μετάβασης, επομένως το προφίλ της θαλάσσιας διείσδυσης παραμένει σταθερό. Συνδυάζοντας τα αποτελέσματα των πολυπαραμετρικών μετρήσεων, συμπεραίνεται ότι υπάρχει διάλυση δολομίτη στη ζώνη μετάβασης. Το γεγονός οφείλεται στην ύπαρξη βιομάζας η οποία μειώνει το pH του υφάλμυρου νερού με αποτέλεσμα τη διάλυση του ασβεστίου. Αυτή η διαδικασία έχει δράσει σημαντικά στην ανάπτυξη του πορώδους και της διαπερατότητας του υδροφόρου στη ζώνη μετάβασης.



Σχήμα 2.6 Κατανομή χλωριόντων (Garing et al., 2013)



Σχήμα 2.7 Διαγράμματα ηλεκτρικής αγωγιμότητας-pH (Garing et al., 2013)

2.3.5 ΤΥΝΗΣΙΑ

Ο παράκτιος υδροφόρος της μελέτης περίπτωσης βρίσκεται βορειοανατολικά της Τυνησίας, μεταξύ των περιοχών Nabeul και Hammamet. Η γεωλογία της περιοχής ποικίλει και έτσι ο υδροφόρος φιλοξενείται μέσα σε πολλούς διαφορετικούς σχηματισμούς. Η συγκεκριμένη μελέτη ασχολείται με τα αποθέματα νερού που βρίσκονται στον αβαθή τεταρτογενή σχηματισμό δημιουργώντας έναν ελεύθερο πολυστρωματικό υδροφόρο.

Ο υδροφόρος απορρέει φυσικά προς τη Μεσόγειο. Παρ' όλα αυτά, οι Tabelsi et al. (2012) τονίζουν ότι υπάρχουν σημεία κατάπτωσης της πιεζομετρικής επιφάνειας (έως -5m από τη μέση στάθμη θάλασσας), στοιχείο που υποδηλώνει θαλάσσια διείσδυση. Για τον εντοπισμό της ζώνης μετάβασης γλυκού- αλμυρού νερού και τη καταγραφή του προφίλ της θαλάσσιας διείσδυσης χρησιμοποιήθηκε η γεωφυσική μέθοδος TDEM. Για την ενίσχυση της μεθόδου χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα γεωτρήσεων (ηλεκτρονική καταγραφή, δειγματοληψία-χημική ανάλυση).

Οι σχηματισμοί της περιοχής μελέτης εμπεριέχουν άμμο και ασβεστόλιθο με ποσότητες αργίλου στη μάζα τους. Λόγω της αργίλου η ζώνη του γλυκού νερού έχει χαμηλότερη αντίσταση απ' ό,τι θα είχε σε υδροφόρο καθαρής άμμου ή ασβεστόλιθου, με τιμές που φτάνουν αυτές του υφάλμυρου νερού. Έτσι η ερμηνεία των αποτελεσμάτων της TDEM μπορεί να είναι λανθασμένη. Το πρόβλημα λύνεται με τα δεδομένα των γεωτρήσεων και τη κατανομή χλωριόντων από τις χημικές αναλύσεις. Για τη σχέση αλατότητας και λιθολογίας έγιναν διαφορετικές υποθέσεις. Η ζώνη εντοπίστηκε σε εύρος μερικών μέτρων έως και δεκάδες μέτρων από την επιφάνεια, ενώ πιο έντονη αλατότητα υπήρχε στις περιοχές Nabeul και Hammamet σε απόσταση 4 km από την ακτή.

Οι Tabelsi et al. (2012) τονίζουν ότι σε πολυστρωματικούς υδροφόρους, η αλατότητα δεν ακολουθεί το τυπικό μοντέλο αλλά εξαρτάται κυρίως από τον τεκτονισμό τη περιοχή, τη γεωμετρία, τη γεωλογία και τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά του υδροφόρου.

2.3.6 ΕΛΛΑΔΑ

Η Πιερία βρίσκεται βορειοανατολικά της Ελλάδας. Πρόκειται για παράκτια περιοχή χωρίς έντονο ανάγλυφο και το έδαφος της αποτελείται κυρίως από άργιλο και άμμο. Οι χρήσεις γης είναι κυρίως γεωργικές και έτσι οι ανάγκες για άρδευση έχουν οδηγήσει στη θαλάσσια διείσδυση του υδροφόρου της περιοχής.

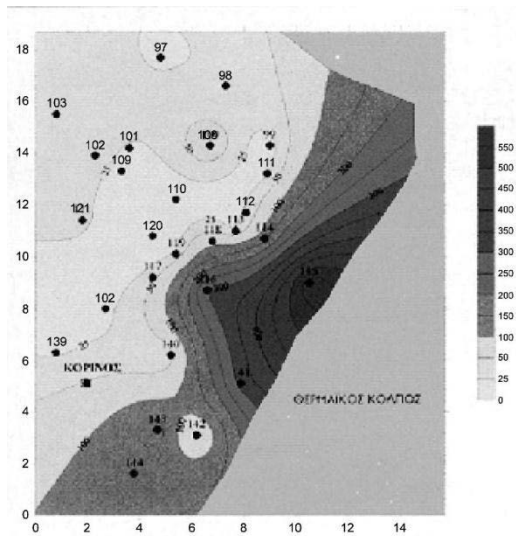
Η παρακολούθηση του φαινομένου έγινε με τηλεσκοπικά μέσα (remote sensing). Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν είναι:

- Τοπογραφικός χάρτης 1:50000, από τη Γεωγραφική υπηρεσία στρατού
- Γεωλογικός χάρτης 1:50000 με τις ζώνες αλατότητας της παράκτιας περιοχής Κορινός, από το ΙΓΜΕ(Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών)
- Θεματικός Χάρτης TM(Thematic Mapper), καταγραφόμενος από το δορυφόρο LANDSAT 5, ανάλυσης 30m

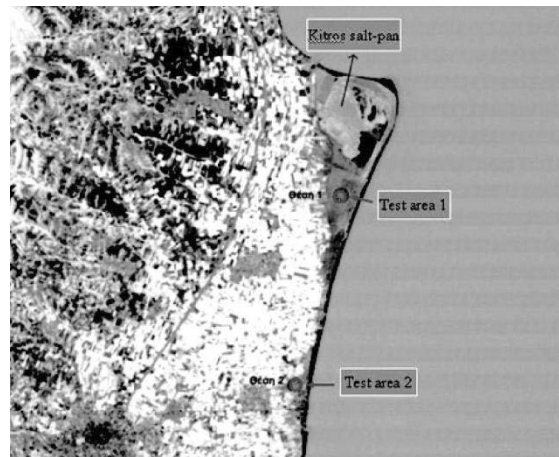
Οι Αστάρας και Οικονομίδης (2006), εντόπισαν στη μελέτη τους τις περιοχές έντονης αλατότητας μέσω ανάλυσης της φασματικής ανάκλασης των φυτών. Η χαμηλή, ανεκτική στο αλάτι βλάστηση έχει διαφορετική φασματική ανάκλαση από την υγιή. Αυτό συμβαίνει διότι η πρώτη είναι αδύναμη και πολλές φορές ανύπαρκτη λόγω της αλατότητας του εδάφους.

Για την εύρεση των περιοχών υψηλής αλατότητας χρησιμοποιήθηκαν εικόνες TM και αναλύθηκαν με τη μέθοδο PCA (Principal Component Methodology) για να υπάρχει καλύτερη φασματική ανάλυση. Οι εικόνες ενισχύθηκαν με το πρόγραμμα EASI/PECE για μεγαλύτερη αντίθεση.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του χάρτη του ΙΓΜΕ (σχήμα 2.8) και των δορυφορικών εικόνων PCA (σχήμα 2.9), η αλατότητα φαίνεται να εξελίσσεται κατά τον ίδιο τρόπο.



Σχήμα 2.8 Ζώνες θαλάσσιας διείσδυσης (Τζιμούρτας,2000)



Εικόνα 2.9 Επεξεργασμένη δορυφορική εικόνα (Αστάρας -Οικονομίδης,2006)

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι η χρήση δεδομένων TM του δορυφόρου LANDSAT-5 αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για τον εντοπισμό υδρογεωλογικών φαινομένων, όπως η θαλάσσιας διείσδυση.

Οι Ψυχογιού κ.α. (2006), ερεύνησαν το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης στη περιοχή του Μαραθώνα μέσω συγκεκριμένων χημικών αναλύσεων. Πρόκειται για περιοχή με έντονη γεωργική δραστηριότητα που αρδεύεται από παράκτιο υδροφόρο ο οποίος έχει προσβληθεί από θαλάσσια διείσδυση, λόγω υπεράντλησης. Στην ευρύτερη περιοχή έρευνας (Μαραθώνας- Νέα Μάκρη) αναπτύσσονται δύο υδροφορείς: ο καρστικός (από μάρμαρα) και ένας ελεύθερος υδροφόρος από τεταρτογενείς αλλουβιακές αποθέσεις.

Για τη παρακολούθηση της θαλάσσιας διείσδυσης και της γενικότερης μόλυνσης που έχει υποστεί ο υδροφόρος, χρησιμοποιήθηκε ένα δίκτυο 58 γεωτρήσεων και πηγαδιών. Κατά τη διάρκεια της έρευνας έγιναν δύο δειγματοληψίες, στο τέλος (Οκτώβριος 2003) και στην αρχή (Μάιος 2004) της περιόδου έντονης άρδευσης αλλά και μέτρηση του υδραυλικού φορτίου κάθε γεώτρησης.

Οι μετρήσεις ηλεκτρικής αγωγιμότητας, θερμοκρασίας pH και Eh έγιναν επί τόπου ενώ οι συγκεντρώσεις των κύριων ιόντων (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-) αναλύθηκαν με τη τεχνική της ιοντικής χρωματογραφίας.

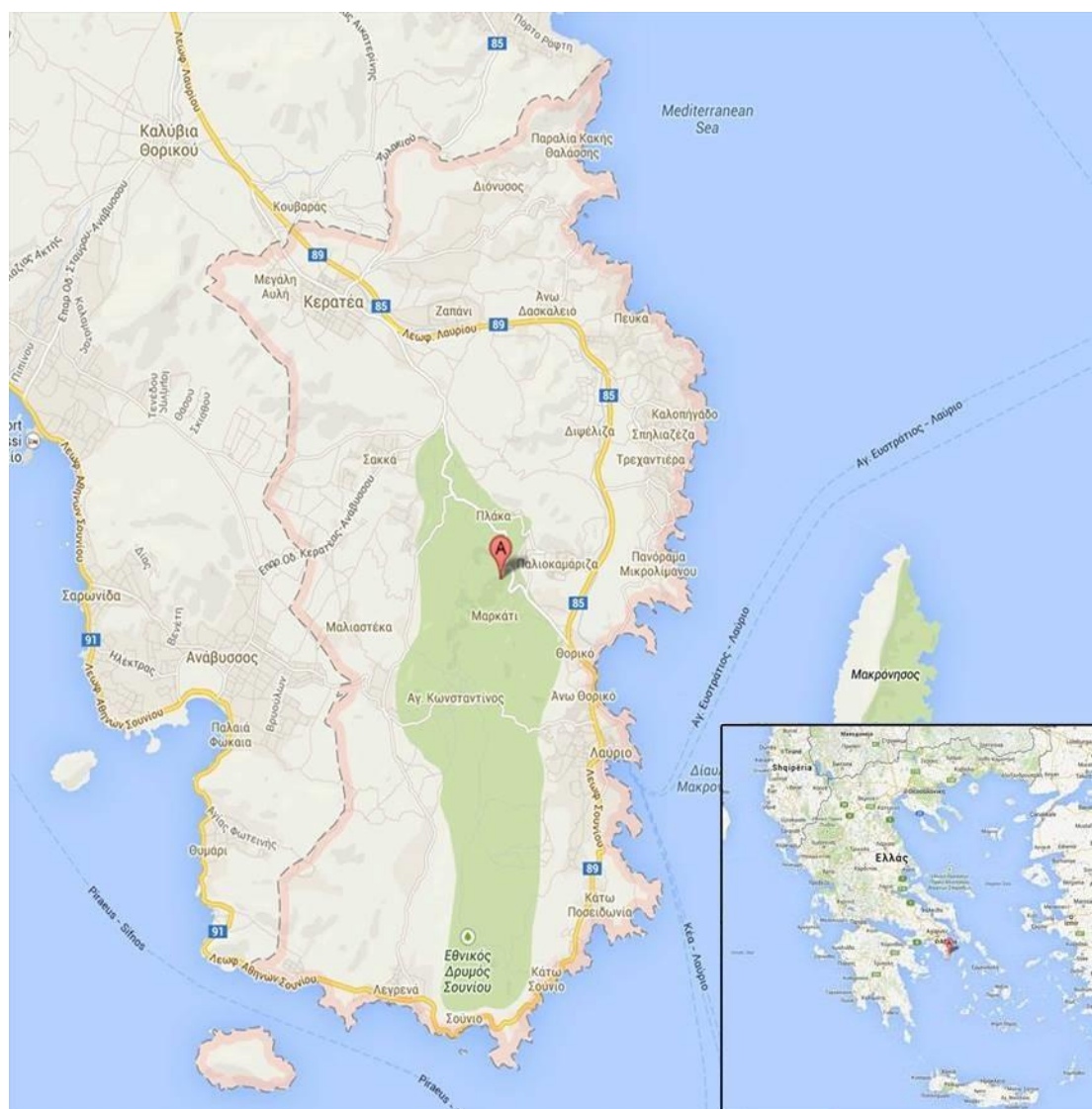
Σύμφωνα με τις μετρήσεις της στάθμης (υδραυλικού φορτίου) του αλλουβιακού υδροφορέα, καταγράφονται αρνητικά πιεζομετρικά φορτία στο τέλος της αρδευτικής περιόδου, ενώ το Μάιο υπάρχει βελτίωση, που μπορεί να συνδέεται με πλευρική τροφοδότηση από το καρστ. Οι κατανομές χλωριόντων και η ηλεκτρική αγωγιμότητα εμφανίζουν πολύ υψηλές τιμές, κάτι που επιβεβαιώνει το ενδεχόμενο θαλάσσιας διείσδυσης ($\text{EC}=900\text{-}6270 \mu\text{S}/\text{cm}$, εύρος $\text{Cl}^- = 1.40 - 46.95 \text{meq}/\text{l}$)

Μέσω του προγράμματος ArcGIS κατασκευάστηκαν καμπύλες κατανομής χλωριόντων και ηλεκτρικής αγωγιμότητας απ' όπου συμπεραίνεται ότι οι ζώνες με τη μεγαλύτερη αλατότητα βρίσκονται σε περιοχές με έντονη γεωργική δραστηριότητα. Στη Νέα Μάκρη όπου η γεωργία έχει μειωθεί σημαντικά λόγω της αστικοποίησης, η ποιότητα του νερού είναι πολύ καλύτερη.

3. ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

3.1 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΑ-ΔΗΜΟΓΡΑΦΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η ευρύτερη περιοχή έρευνας της συγκεκριμένης διπλωματικής είναι η περιοχή της Λαυρεωτικής. Βρίσκεται νοτιοανατολικά του νομού Αττικής και διοικητικά ανήκει στην Περιφέρεια Ανατολικής Αττικής. Παλαιότερα αποτελούσε αυτοτελή δήμο, αλλά μετά το 2010 συγχωνεύτηκε με άλλους, σύμφωνα με το πρόγραμμα “Καλλικράτης” του νόμου Ν3852/2010. Ο καινούριος δήμος διατηρεί το όνομα Δήμος Λαυρεωτικής με έδρα το Λαύριο, ενώ αποτελείται από τους παλαιότερους δήμους Λαυρεωτικής, Κερατέας και τη κοινότητα Αγίου Κωνσταντίνου (Σχήμα 3.1).

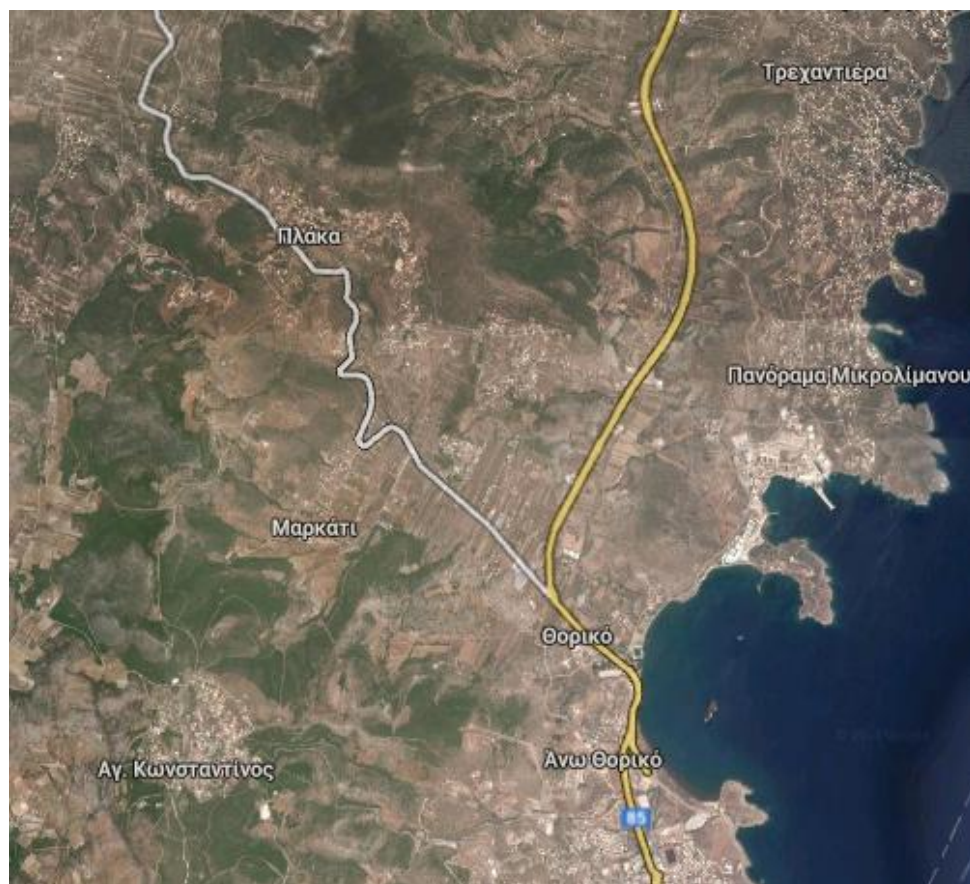


Σχήμα 3.1 Ο δήμος της Λαυρεωτικής³

³ Πηγή: maps.google.com

Η έκταση του δήμου είναι 165.000 τ.μ. και ο μόνιμος πληθυσμός ανέρχεται στα 25.102 άτομα, σύμφωνα με την απογραφή του 2011.

Η περιοχή που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις για τον έλεγχο της υφαλμύρισης του αλλουβιακού υδροφόρου, είναι η υδρολογική λεκάνη που σχηματίζεται δυτικά του κόλπου του Θορικού (Σχήμα 3.2). Η επιλογή της συγκεκριμένης περιοχής οφείλεται στη μικρή της έκταση και στα ιδιαίτερα γεωλογικά της χαρακτηριστικά. Έτσι, δημιουργείται ένα ελεγχόμενο περιβάλλον στο οποίο μπορεί να γίνει η βέλτιστη διαχείριση των ληφθέντων δεδομένων.



Σχήμα 3.2 Η περιοχή έρευνας –λεκάνη Θορικού ⁴

3.1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ⁵

Το Λαύριο είναι μία από της αρχαιότερες πόλεις της Ελλάδας. Η αρχική του εποίκηση έγινε λόγω των πλούσιων κοιτασμάτων αργύρου και μολύβδου που αναπτύσσονταν σε πολλά σημεία της Λαυρεωτικής. Η εκμετάλλευση των κοιτασμάτων και η μεταλλουργική τους επεξεργασία ξεκίνησε το 3.000 π.Χ., όμως η μεγάλη ανάπτυξη επήλθε το 5^ο αιώνα π.Χ. με την άνοδο της Αθηναϊκής δημοκρατίας και την κατασκευή των μεγάλων μνημείων του Χρυσού αιώνα του Περικλή. Οι εργασίες διακόπηκαν κατά τη Κλασική περίοδο με τη πτώση της Αθηναϊκής κυριαρχίας και την έναρξη των Περσικών πολέμων.

⁴ Πηγή: www.maps.google.com

⁵ Πηγή: <http://www.ltp.ntua.gr/>

Στα νεότερα χρόνια, το 1864 ιδρύεται η ιταλογαλλική εταιρία «Hilarion Roux et Cie» και εκμεταλλεύεται τις αρχαίες σκωριές εξάγοντας αργυρούχου μόλυβδου μέσω μεταλλουργικών διεργασιών. Το 1873 και μετά από διαμάχη της εταιρίας με το ελληνικό κράτος δημιουργούνται δύο εταιρίες :η «Εταιρεία των Μεταλλουργείων του Λαυρίου» και τη γαλλοελληνική εταιρεία «Μεταλλεία Καμάριζας». Δύο χρόνια αργότερα, το 1876, ιδρύθηκε από τον Serpieri η «Compagnie Francaise des Mines du Laurium », που διαδέχθηκε τα «Μεταλλεία Καμάριζας». Το εργοστάσιο κατασκευάστηκε στη θέση Κυπριανός. Η βιομηχανία που αναπτύχθηκε οδήγησε στη μεγάλη ανάπτυξη του τότε εργατικού συνδικαλισμού σε ένα αστικό κέντρο 10.000 ατόμων, μεγάλο για τα δεδομένα της εποχής. Κατά το Πρώτο Παγκόσμιο Πόλεμο σταματάνε οι μεταλλουργικές διεργασίες και ο πληθυσμός του Λαυρίου μειώνεται στο μισό. Στα μέσα της δεκαετίας του 1950 ξεκινάει μία νέα περίοδο ακμής με την ανάπτυξη της βιομηχανίας η οποία σταματάει μετά από μερικές δεκαετίες στα πλαίσια της αποβιομηχανοποίησης σε ολόκληρη την Ελλάδα και πάνω από το 20% του πληθυσμού εγκαταλείπει τη πόλη.

3.2 ΧΡΗΣΕΙΣ ΓΗΣ⁶

Οι κυριότερες χρήσεις γης στη χερσόνησο της Λαυρεωτικής είναι γεωργικές, αστικές και σε ένα μικρό μέρος της βιομηχανικές. Πρόκειται για μία περιοχή με ιδιαίτερο και ποικιλόμορφο φυσικό περιβάλλον, με εκτεταμένες παράκτιες ζώνες και με την ύπαρξη σημαντικών αρχαίων ευρημάτων. Για τη διαφύλαξη αυτών των χαρακτηριστικών και την περεταίρω τουριστική, και αστική ανάπτυξη της, η περιοχή έχει ενταχθεί στο πρόγραμμα “Σχεδιασμού του Εξωαστικού Χώρου και Προστασία Περιβάλλοντος” του Υπουργείου Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής. Το πρόγραμμα περιλαμβάνει το διαχωρισμό της χερσονήσου σε Ζώνες Οικιστικού Ελέγχου (ΖΟΕ), που καθορίζουν τη χρήση, τη δόμηση και τις υποδομές κάθε έκτασης. Τα χαρακτηριστικά κάθε ζώνης καθορίζονται από το προεδρικό διάταγμα με τίτλο «Καθορισμός χρήσεων γης και όρων και περιορισμών δόμησης στην εκτός σχεδίου και εκτός ορίων οικισμών προ του έτους 1923 περιοχής της χερσονήσου Λαυρεωτικής(Ν. Αττικής)», του ΦΕΚ125Δ/1998.

Οι Ζώνες Οικιστικού Ελέγχου (ΖΟΕ) φαίνονται στο χάρτη που έχει διαμορφωθεί σύμφωνα με το ΦΕΚ (σχήμα 3.3). Ανάλογα με το προσανατολισμό τους, χωρίζονται σε :

1. Ζώνες υψηλής προστασίας (αρχαιολογικοί χώροι, βιότοποι, περιαστικό πράσινο, ζώνες παραλίας).
2. Ζώνες μέσης προστασίας και ήπιας αναψυχής (γεωργική γη, ζώνες αναψυχής).
3. Ζώνες αναπτυξιακές (Β' κατοικίας, τουριστικές, βιομηχανικές) στις οποίες ακολουθεί πολεοδομική μελέτη.

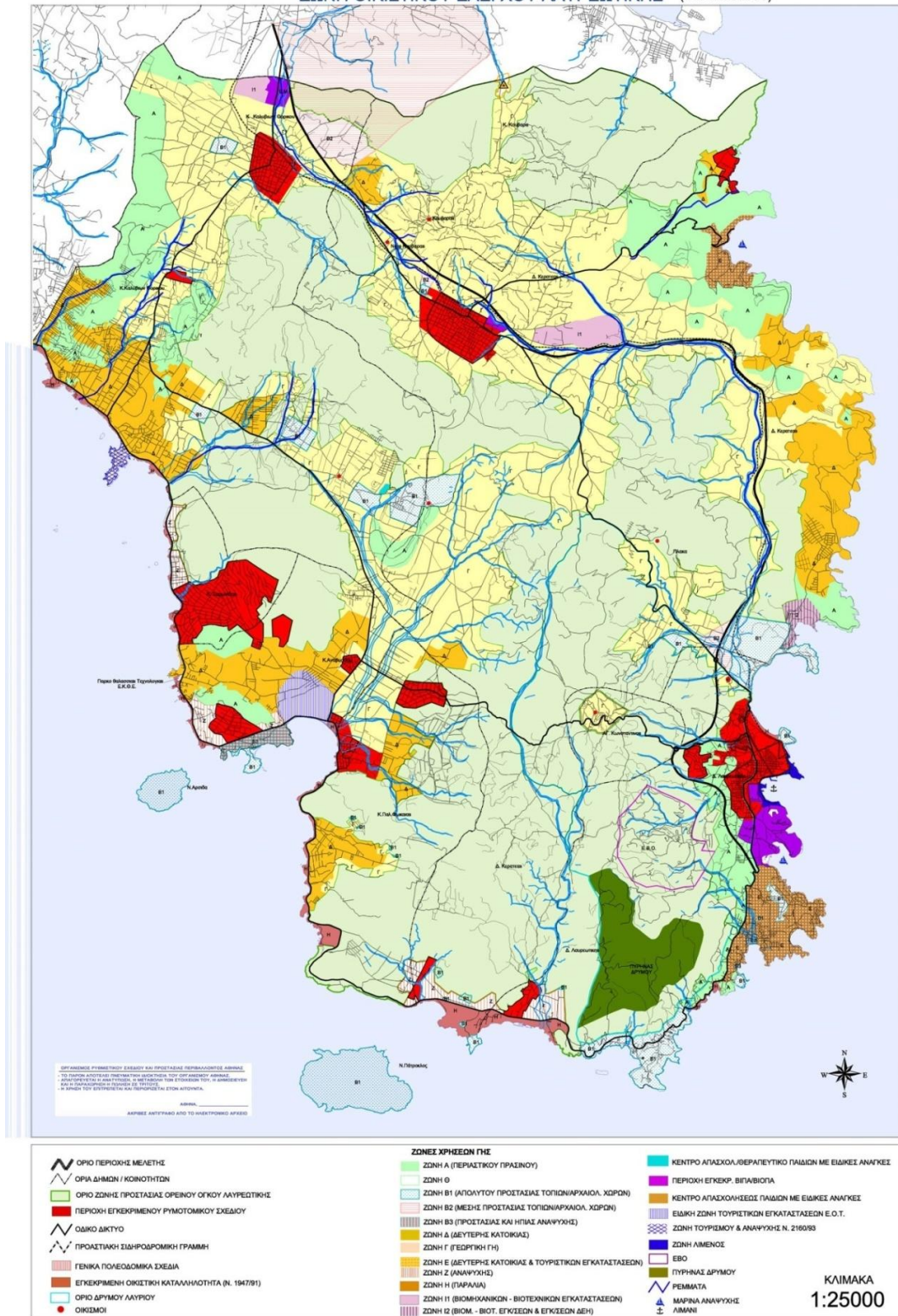
Η κάθε ζώνη με τις επιτρεπόμενες παρεμβάσεις (σύμφωνα με το ΦΕΚ125Δ/1998) περιγράφεται στο πίνακα 3.1.

Εκτός των οριοθετημένων ζωνών, στη περιοχή δραστηριοποιούταν από το 1981 η «Ελληνική Βιομηχανία Όπλων Α.Ε.» (ΕΒΟ). Το 2004 συγχωνεύτηκε με τη ΠΥΡΚΑΛ και πλέον ονομάζεται «Ελληνικά Αμυντικά Συστήματα Α.Β.Ε.Ε.» (ΕΑΣ)⁷. Ακόμη, στη πόλη του Λαυρίου, μία έκταση 2.417 στρεμμάτων έχει ενταχθεί στο πρόγραμμα Οργάνωσης Βιομηχανικών - Βιοτεχνικών Ζωνών (ΒΙΟΠΑ - ΒΙΠΑ) . Σε αυτό το πρόγραμμα του Υπουργείου Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής εντάσσονται ζώνες για τις οποίες προβλέπεται ανάπτυξη βιομηχανικών και βιοτεχνικών δραστηριοτήτων.

⁶ Πηγή: <http://www.minenv.gr/3/31/313/31303/g3130308.html>

⁷ Πηγή: <http://www.eas.gr/>

ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ ΡΥΘΜΙΣΤΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΖΩΝΗ ΟΙΚΙΣΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΛΑΥΡΕΩΤΙΚΗΣ (ΦΕΚ 125Δ/98)



Σχήμα 3.3 Χάρτης χρήσεων γης Λαυρεωτικής⁸

⁸ Πηγή: <http://www.organismosathinas.gr/>

Πίνακας 3.1 Ζώνες Οικιστικού Ελέγχου

ΖΩΝΗ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ	ΕΠΙΤΡΕΠΟΜΕΝΕΣ ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ
Α-Περαστικό πράσινο	Υψηλής προστασίας	<ul style="list-style-type: none"> – αναψυκτήρια και καθιστικά, εγκαταστάσεις πολιτιστικών εκδηλώσεων, – υπαίθριες αθλητικές εγκαταστάσεις μικρής έκτασης με τα απαραίτητα για τη λειτουργία τους βοηθητικά κτίσματα(γραφεία, αποδυτήρια, ντους, W.C.) – κατασκηνώσεις, οργανωμένες τουριστικές κατασκηνώσεις χωρίς οικισμούς και παιδικές κατασκηνώσεις χωρίς οικισμούς – εγκαταστάσεις παραγωγής αιολικής ενέργειας – εγκαταστάσεις μετεωρολογικών και γεωδυναμικών σταθμών
B1-Απολύτου Προστασίας Τοπίων/Αρχαιολογικών χώρων	Υψηλής προστασίας	<ul style="list-style-type: none"> • απαγορεύεται κάθε δόμηση
B2-Μέση προστασία τοπίων και αρχαιολογικών χώρων	Μέσης προστασίας και ήπιας αναψυχής	<ul style="list-style-type: none"> • κατοικία • αγροτικές αποθήκες • δημόσια και δημοτικά καθιστικά και αναψυκτήρια
B3-Προστασία και ήπια αναψυχή	Μέσης προστασίας και ήπιας αναψυχής	<ul style="list-style-type: none"> • επιτρέπεται οι διαμορφώσεις εδάφους και οι κατασκευές εξοπλισμού υπαίθριας αναψυχής και χώροι υγιεινής
Γ-Γεωργική γη	Μέσης προστασίας και ήπιας αναψυχής	<ul style="list-style-type: none"> • αγροτικές αποθήκες που εξυπηρετούν τη πρωτογενή παραγωγή • κτηνοτροφικές και σταυλικές εγκαταστάσεις • θερμοκήπια • κατοικίες • κατασκηνώσεις, οργανωμένες τουριστικές κατασκηνώσεις χωρίς οικισμούς και παιδικές κατασκηνώσεις χωρίς οικισμούς • εγκαταστάσεις

		<ul style="list-style-type: none"> υδατοκαλλιεργειών – εγκαταστάσεις παραγωγής αιολικής ενέργειας – εγκαταστάσεις μετεωρολογικών και γεωδυναμικών σταθμών
Δ-Β' Κατοικίας	Αναπτυξιακές ζώνες	<ul style="list-style-type: none"> • κατοικία • εστιατόρια- αναψυκτήρια – υπαίθριες αθλητικές εγκαταστάσεις με τα απαραίτητα για τη λειτουργία τους βοηθητικά κτίσματα(γραφεία, αποδυτήρια, ντους, W.C.) – εγκαταστάσεις λουόμενων
Ε-Δεύτερης κατοικίας και τουριστικών εγκαταστάσεων	Αναπτυξιακές ζώνες	<ul style="list-style-type: none"> • κατοικία • εστιατόρια-αναψυκτήρια – υπαίθριες αθλητικές εγκαταστάσεις με τα απαραίτητα για τη λειτουργία τους βοηθητικά κτίσματα(γραφεία, αποδυτήρια, ντους, W.C.) • ξενοδοχεία, οργανωμένες τουριστικές κατασκηνώσεις και λοιπές τουριστικές εγκαταστάσεις • χερσαίες και τουριστικές εγκαταστάσεις για την εξυπηρέτηση του ναυταθλητισμού
Z-Αναψυχή	Μέσης προστασίας και ήπιας αναψυχής	<ul style="list-style-type: none"> • εστιατόρια, αναψυκτήρια, καφενεία, ζαχαροπλαστεία, ταβέρνες, κέντρα διασκέδασης • πολιτιστικές εγκαταστάσεις • αθλητικές εγκαταστάσεις • εγκαταστάσεις υπαίθριας αναψυχής, θαλάσσιου αθλητισμού και χώροι εξυπηρέτησης τους
Η-Παραλία	Υψηλής προστασίας	<ul style="list-style-type: none"> • εγκαταστάσεις λουόμενων(αποδυτήρια, αναψυκτήρια, ντους, W.C., υπαίθρια καθιστικά, εγκαταστάσεις για θαλάσσια παιχνίδια • χερσαίες και θαλάσσιες εγκαταστάσεις για την εξυπηρέτηση του ναυταθλητισμού
I1-Βιοτεχνικών-βιομηχανικών	Αναπτυξιακές ζώνες	<ul style="list-style-type: none"> • περιοχή βιομηχανικών-βιοτεχνικών εγκαταστάσεων όπου επιτρέπονται μη ιδιαίτερα

εγκαταστάσεων

οχλούσες επαγγελματικές
εγκαταστάσεις

I2- Βιοτεχνικών-
βιομηχανικών
εγκαταστάσεων και
εγκαταστάσεων ΔΕΗ

Αναπτυξιακές
ζώνες

- περιοχή βιομηχανικών-βιοτεχνικών εγκαταστάσεων όπου επιτρέπονται μη ιδιαίτερα οχλούσες επαγγελματικές εγκαταστάσεις
 - επιτρέπονται εγκαταστάσεις της ΔΕΗ
-

4.ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ

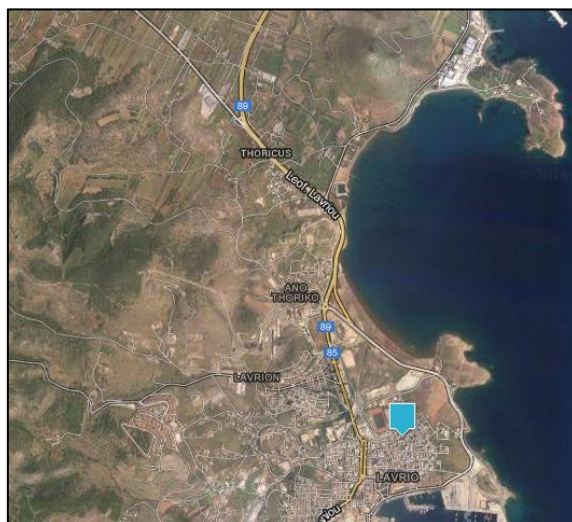
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κατά τη μελέτη ενός υδρολογικού συστήματος μιας περιοχής, η σημαντικότερη παράμετρος για τη κατανόηση του είναι η γνώση της ποιοτικής και ποσοτικής κατάστασης των επιφανειακών και υπόγειων νερών. Κάτι τέτοιο είναι δυνατό μέσα από τη μελέτη των κλιματικών συνθηκών και της κατάστασης και κίνησης του υπόγειου νερού για τον υπολογισμό του υδρολογικού ισοζυγίου.

Η αρχική συνθήκη για την εύρεση του υδατικού ισοζυγίου είναι ο υπολογισμός της ποσότητας των όμβριων υδάτων που εισέρχονται σε μία υδρολογική λεκάνη. Κάτι τέτοιο προκύπτει από την παρακολούθηση των βροχοπτώσεων της στενής αλλά και της ευρύτερης περιοχής μελέτης. Τα δεδομένα συλλέγονται κυρίως από τους βροχομετρικούς σταθμούς κάθε περιοχής ή και των γειτονικών αυτής.

Τα προβλήματα που δημιουργούνται κατά τη συλλογή και επεξεργασία βροχομετρικών δεδομένων, είναι η έλλειψη στοιχείων για μεγάλες χρονικές περιόδους λόγω βλαβών και δυσλειτουργιών των μετεωρολογικών σταθμών. Κάτι τέτοιο αντιμετωπίζεται με την ανάπτυξη διαφόρων μεθόδων οι οποίες αποσκοπούν στη συμπλήρωση των τιμών βροχόπτωσης σε σημεία όπου δεν υπάρχουν μετεωρολογικοί ή βροχομετρικοί σταθμοί (Creutin and Obled, 1982, Bastin et al. 1984, Tabios and Salas, 1985). Παρά τη μεγάλη εξέλιξη της στατιστικής επιστήμης, αρκετά σημεία στον υπολογισμό της μέσης βροχόπτωσης σε μια περιοχή με μη επαρκές δίκτυο σταθμών, εξακολουθούν να παραμένουν ασαφή, με αποτέλεσμα η έρευνα της αξιοπιστίας της εκτίμησης της μέσης βροχόπτωσης με τις διάφορες μεθόδους να συνεχίζεται εντατικά (Lebel et al., 1987).

Στο παρόν κεφάλαιο, υπολογίζεται το συνολικό ύψος βροχής που εισέρχεται στη λεκάνη του Θορικού από τα διαθέσιμα δεδομένα βροχοπτώσεως του μετεωρολογικού σταθμού του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών στην περιοχή του Λαυρίου. Ο συγκεκριμένος σταθμός χρησιμοποιήθηκε λόγω της εγγύτητας στη περιοχή έρευνας (Σχήμα 4.1).



Σχήμα 4.1 Μετεωρολογικός Σταθμός Λαυρίου⁹

⁹Πηγή: www.meteo.gr

4.2 ΒΡΟΧΟΜΕΤΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Παρατηρώντας τις τιμές των βροχοπτώσεων σε ετήσια και υπερετήσια βάση, φαίνεται ότι η περιοχή έρευνας αποτελεί μία τυπική πεδινή μεσογειακή περιοχή λόγω των γενικά ξηρών και θερμών καλοκαιρινών περιόδων και των υγρών και ψυχρών χειμερινών.

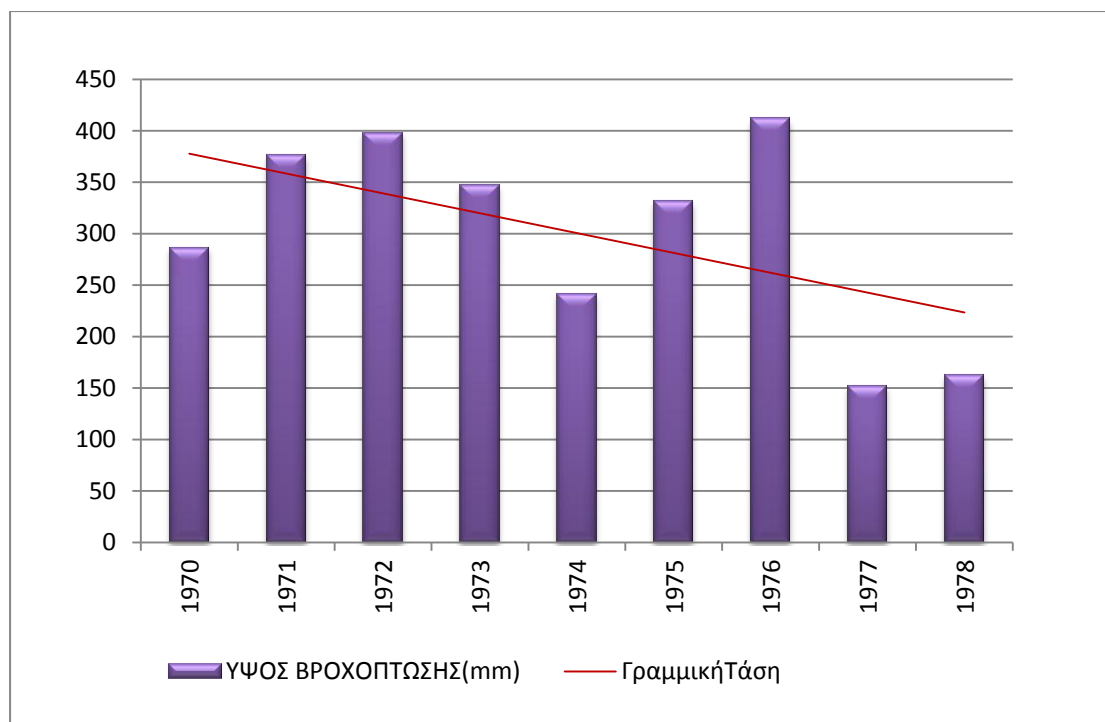
Στον πίνακα 4.2 παρουσιάζονται τα διαθέσιμα δεδομένα από το σταθμό του Λαυρίου για τη περίοδο 1970-1978. Σύμφωνα με αυτά, το μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης ανέρχεται στα 300,61 mm. Επίσης, είναι εμφανές από τις τιμές του πίνακα, ότι το ύψος της βροχόπτωσης μειώνεται σημαντικά κατά τη διάρκεια της αρδευτικής περιόδου (Μάιο έως Σεπτέμβρη), γεγονός που δημιουργεί προβλήματα ως προς τη ποσότητα του διαθέσιμου νερού και ως προς τη ποιότητα του, κάτι που θα αναλυθεί στα παρακάτω κεφάλαια.

Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζεται η διακύμανση της ετήσιας βροχόπτωσης του βροχομετρικού σταθμού Λαυρίου για την περίοδο 1970-1978. Λαμβάνοντας υπόψη τη γραμμή τάσης, παρατηρείται μια πτωτική τάση του συνολικού ετήσιου ύψους ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων της τάξης των 150mm. Αυτή η πτώση στο μέσο ύψος βροχής θεωρείται μεγάλη για το διάστημα των εννέα χρόνων που έγιναν οι μετρήσεις. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα, το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως στη μεγάλη μείωση της βροχόπτωσης κατά τα έτη 1977, 1978.

Πίνακας 4.2 Ύψη ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων (mm) καταγεγραμμένα στο βροχομετρικό σταθμό Λαυρίου για την περίοδο 1970-1978.

ΜΗΝΑΣ	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	Μ.Ο. ¹
ΙΑΝ	39.80	67.50	95.80	95.90	30.30	27.80	51.70,	28.50	0.00	48.20
ΦΕΒ	35.80	107.20	64.20	75.40	89.00	28.60	40.90	9.40	0.00	50.06
ΜΑΡ	17.20	39.60	16.00	56.60	45.90	25.60	29.30	15.30	0.00	27.28
ΑΠΡ	1.20	4.40	34.80	19.20	5.00	9.70	83.40	25.80	0.00	20.39
ΜΑΙ	22.40	0.00	5.20	0.00	7.00	15.10	11.30	0.00	11.20	8.02
ΙΟΥΝ	2.00	3.00	0.00	0.00	3.50	15.00	11.00	0.00	0.00	3.83
ΙΟΥΛ	6.00	3.00	10.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.11
ΑΥΓ	0.00	0.00	14.20	0.00	0.00	7.00	6.60	0.00	0.00	3.09
ΣΕΠ	3.20	0.00	0.80	0.00	2.00	0.00	12.30	12.70	43.60	8.29
ΟΚΤ	54.20	15.20	104.20	44.20	5.00	18.80	100.00	7.30	81.50	47.82
ΝΟΕ	8.00	49.90	33.20	36.20	34.10	46.20	65.80	52.80	26.00	39.13
ΔΕΚ	96.45	86.20	19.80	20.00	19.00	137.40	50.80	0.00	0.00	47.74
ΣΥΝΟΛΟ²	286.25	376.00	398.20	347.50	240.80	331.20	411.40	151.80	162.30	

¹Μέσος όρος μηνιαίας βροχόπτωσης, ²Συνολική βροχόπτωση ανά έτος



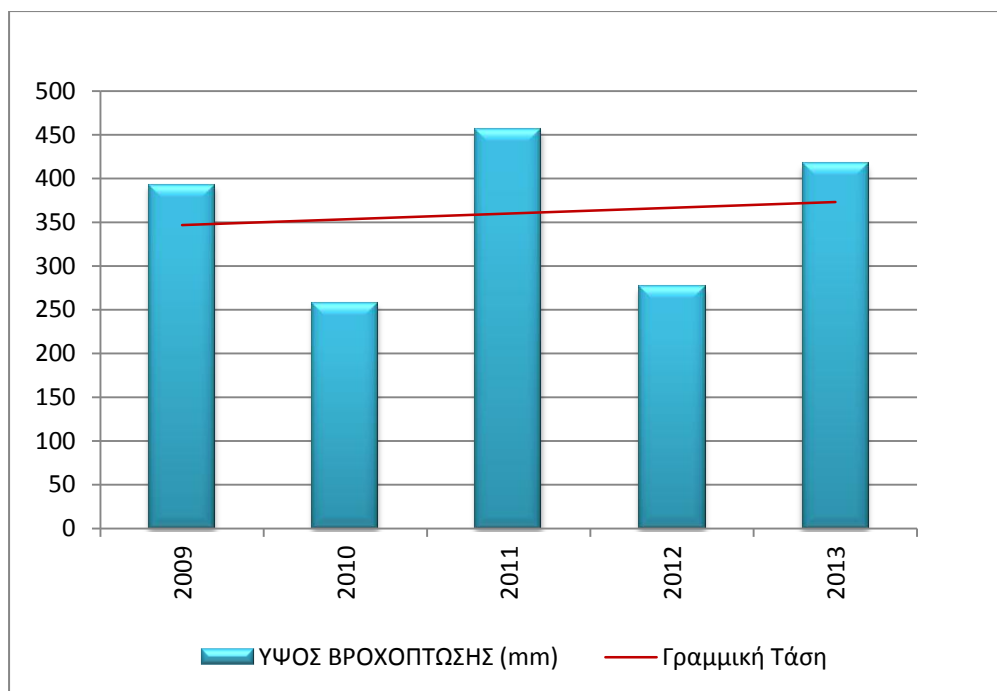
Σχήμα 4.2 Διακύμανση της ετήσιας βροχόπτωσης στο βροχομετρικό σταθμό Λαυρίου για την περίοδο 1970-1978.

Στον πίνακα 4.3 παρουσιάζονται τα δεδομένα βροχοπτώσεων του ίδιου μετεωρολογικού σταθμού του Λαυρίου, για τα έτη 2009-2013. Γι' αυτή τη χρονική περίοδο, το μέσο ύψος βροχόπτωσης φτάνει περίπου τα 360mm ανά έτος. Και σε αυτήν την περίοδο, οι μήνες με τις μικρότερες βροχοπτώσεις είναι οι αρδευτικοί (Μάιος έως Σεπτέμβριος).

Πίνακας 4.3 Ύψη ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων (mm) καταγεγραμμένα στο βροχομετρικό σταθμό Λαυρίου για την περίοδο 2009-2013.

ΜΗΝΑΣ	2009	2010	2011	2012	2013	Μ.Ο. ¹
ΙΑΝ	67.30	77.80	75.40	25.60	66.60	62.54
ΦΕΒ	42.80	37.80	182.80	54.80	70.20	77.68
ΜΑΡ	66.00	8.00	39.60	12.20	60.10	37.18
ΑΠΡ	45.20	2.40	63.20	23.20	3.00	27.40
ΜΑΙ	2.00	4.80	8.80	7.40	2.00	5.00
ΙΟΥΝ	0.00	9.40	1.60	0.00	4.80	3.16
ΙΟΥΛ	0.20	0.20	0.00	0.00	0.00	0.08
ΑΥΓ	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ΣΕΠ	16.00	3.20	18.60	0.00	0.00	7.56
ΟΚΤ	47.20	78.80	29.20	19.40	24.40	39.80
ΝΟΕ	38.20	9.60	0.80	42.20	106.20	39.40
ΔΕΚ	68.20	25.20	36.60	91.40	79.20	60.12
ΣΥΝΟΛΟ²	393.10	257.20	456.60	276.20	416.50	

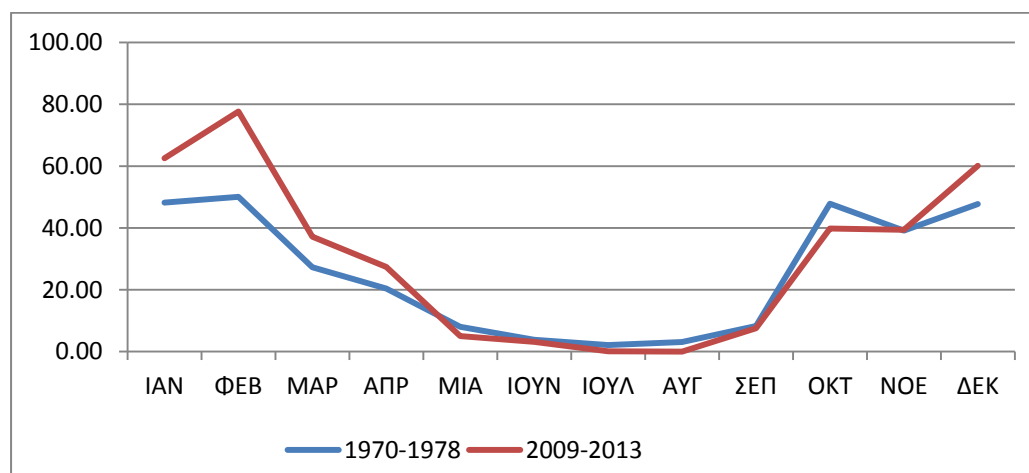
¹Μέσος όρος μηνιαίας βροχόπτωσης, ²Συνολική βροχόπτωση ανά έτος



Σχήμα 4.3 Διακύμανση της ετήσιας βροχόπτωσης στο βροχομετρικό σταθμό Λαυρίου για την περίοδο 2009-2013.

Στο παραπάνω σχήμα (4.3) φαίνεται η κατανομή της ετήσιας βροχόπτωσης για τα έτη 2009-2013. Σε αντίθεση με τη προηγούμενη περίοδο (1970-1978), τα αποτελέσματα είναι πιο ενθαρρυντικά, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα. Από τη γραμμική τάση διακρίνεται η αυξητική τάση του ύψους βροχόπτωσης, της τάξης των 60 mm στη διάρκεια των 5 ετών αυτής της χρονικής περιόδου.

Στο σχήμα 4.4 συσχετίζεται το μέσο μηνιαίο ύψος βροχόπτωσης για τις δύο περιόδους. Από την απεικόνιση των δύο περιόδων μπορεί να διαπιστωθεί ότι η βροχόπτωση κατά τους χειμερινούς μήνες (Νοέμβρη έως Απρίλη) είναι υψηλότερη τη περίοδο 2009-2013. Αντίθετα τη περίοδο άρδευσης παρατηρείται μεγαλύτερη βροχόπτωση τη περίοδο 1970-1978, αλλά σε πολύ μικρό ποσοστό σε σχέση με τη γενικότερη αύξηση των βροχοπτώσεων τα τελευταία έτη.



Σχήμα 4.4 Συσχέτιση της μηνιαίας βροχόπτωσης(mm) για τις δύο περιόδους διαθέσιμων δεδομένων(1970-1978 και 2009-2013).

5. ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Το Λαύριο ανήκει γεωτεκτονικά στην Αττικο-Κυκλαδική ζώνη. Στη συγκεκριμένη ζώνη διακρίνονται τέσσερις κύριες τεκτονικές- στρωματογραφικές ενότητες (Skarpelis et al. 2008). Αποτελείται από την ενότητα της βάσης, μία κατώτερη (που βρίσκεται κυρίως στο κεντρικό Αιγαίο) και μια ανώτερη τεκτονική ενότητα και τέλος μία ενότητα από θαλάσσιες και ηπειρωτικές αποθέσεις που υπέρκεινται της ανώτερης.

Η τεκτονική-στρωματογραφική διαμόρφωση της Αττικο-Κυκλαδικής ζώνης στο Λαύριο εκπροσωπείται από μία Κατώτερη τεκτονική ενότητα και μία Ανώτερη. (Marinos & Petrascheck, 1956). Η Κατώτερη ενότητα ονομάζεται και αυτόχθονη και η Ανώτερη αναφέρεται και ως αλλόχθονη ή «Φυλλιτικό κάλυμμα». Πιο συγκεκριμένα:

- Η αυτόχθονη ενότητα χωρίζεται σε τρεις υποενότητες:
 - i. Το Κατώτερο Μάρμαρο (πάχους μεγαλύτερου των 600m)
 - ii. Το Σχιστόλιθο Καμάριζας- Καισαριανής (πάχους περίπου 600m)
 - iii. Το Ανώτερο Μάρμαρο (πάχους περίπου 100m)

Ουσιαστικά, το αυτόχθονο σύστημα αποτελείται από μετακλαστικά πετρώματα με ενστρώσεις μαρμάρων, μεταμορφωμένα υπερβασικά πετρώματα και μεταβασίτες (Σχιστόλιθος Καισαριανής), τα οποία περιβάλλονται από μάρμαρο.

- Το Φυλλιτικό Κάλυμμα *συντίθεται κυρίως από φυλλίτες με ενστρώσεις μαρμάρου, χαλαζίτες και μεταβασίτες (Μπαζιώτης, Μπόσκος, 2011).*

Η κατώτερη γεωτεκτονική ενότητα (αυτόχθονη) είναι ένα σύστημα μεταμορφωμένο και έντονα παραμορφωμένο, με αρχικές δομές διεύθυνσης ΒΑ-ΝΔ και νεότερες ΒΔ-ΝΑ (Μαριολάκος, 1971). Η μεταμόρφωση έγινε κάτω από συνθήκες υψηλής πίεσης/χαμηλής θερμοκρασίας (high-pressure/low-temperature – HP/LT) και αργότερα επικαλύφθηκε από τη πρασινοσχιστολιθική φάση μεταμόρφωσης του φυλλιτικού καλύμματος (Μπαζιώτης, 2008). Σύμφωνα με τους Marinos and Petrascheck (1956), τα απολιθώματα εντός της αυτόχθονης ενότητας υποδεικνύουν ανωτριάδική έως κατωιουρασική ηλικία.

Μετά τις φάσεις μεταμόρφωσης, εμφανίζεται διείσδυση γρανοδιορίτη στην Πλάκα Λαυρίου, στην ενότητα της βάσης (αυτόχθονη). Θεωρείται ότι πρόκειται για διακλάδωση του γρανιτικού βαθολίθου που βρίσκεται σε μεγάλο βάθος ανατολικά της Αττικής (Μαρίνος και Μακρής, 1975). Η διείσδυση συνοδεύτηκε με την μεταμόρφωση επαφής του περιβάλλοντος «Σχιστολίθου Καισαριανής» (Μπαλτατζής, 1981).

Εκτός του γρανοδιορίτη, εντοπίζονται και πορφυρικές φλέβες σε όλη την έκταση της αυτόχθονης ενότητας. Οι φλέβες έχουν δύο κύριες διευθύνσεις, ΔΒΔ-ΑΝΑ και ΔΝΔ-ΑΒΑ, ενώ η σύνθεση τους ποικίλει από συνδυασμό χαλαζία-συνήνιτη σε χαλαζία-μονζονίτη και γρανοδιορίτη. Γνωστές φλέβες βρίσκονται και στις περιοχές της Καμάριζας και της Πλάκας (Σκαρπέλης et al. 2008).

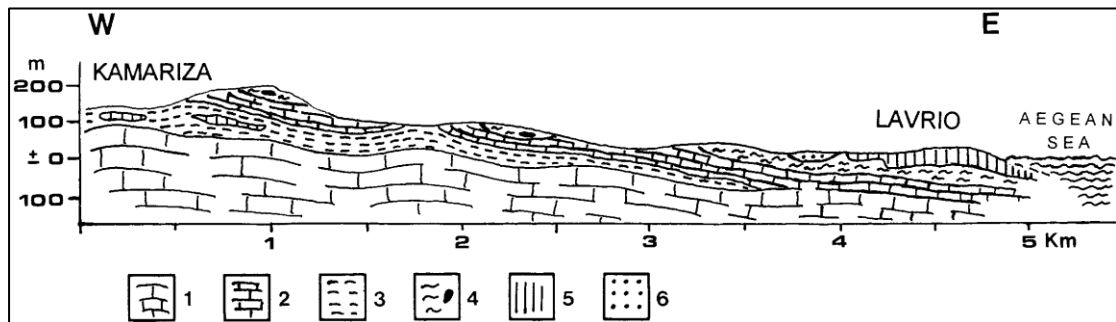
Στις λεκάνες της περιοχής εμφανίζονται επίσης τεταρτογενείς αποθέσεις από αργίλους, ψαμμίτες και εναλλαγές από χονδρόκοκκες άμμους που αποτελούν προϊόντα αποσάθρωσης συμπαγών πετρωμάτων της περιοχής. Στα βορειοανατολικά της λεκάνης του Θορικού ο σχιστόλιθος και νοτιοανατολικά το ανώτερο μάρμαρο, καλύπτονται με ιζήματα πάχους μέχρι 10m. Στο βόρειο τμήμα της

περιοχής οι σχιστόλιθοι και οι φυλλίτες του καλύμματος, καλύπτονται με χαλαρές αποθέσεις πάχους έως 5m (Σταμάτης et al., 2000).

Οι δύο ενότητες διαχωρίζονται από ένα ρήγμα αποκόλλησης με διεύθυνση Β-Ν. Η αρχική επιφάνεια επαφής της αυτόχθονης ενότητας και του καλύμματος ήταν ένα ρήγμα επώθησης (Marinos and Petrascheck, 1956). Η αποκάλυψη της μεταμορφωμένης ενότητας (αυτόχθονη) στη Λαυρεωτική προέκυψε σαν αποτέλεσμα της περιφερειακής επέκτασης και της ρηγμάτωσης αποκόλλησης, σε συνέχεια με την επέκταση στις Κυκλάδες (Jolivet and Brun, 2010; Ring and Layer, 2003).

Η εκτεταμένη αποκόλληση σε σχετικά μικρά βάθη οδήγησε στη τεκτονική τοποθέτηση του ανώτερου συστήματος στο κατώτερο (Λιάτη et al., 2013).

Στο παρακάτω σχεδιάγραμμα των Stamatis et al. (2001) φαίνεται μία ολοκληρωμένη εικόνα της στρωματογραφίας.



1.Ανώτερο Μάρμαρο,2.Κατώτερο Μάρμαρο,3.Σχιστόλιθος Καμάριζας 4.Φυλλιτικό Κάλυμα,5.Μάρμαρα του καλύμματος,6.Τεταρτογενείς αποθέσεις

Σχήμα 5.1 Ενδεικτική Γεωλογική τομή Καμάριζας-Λαυρίου (Stamatis et al., 2001)

Στις παρακάτω εικόνες (5.1 και 5.2) φαίνεται καθαρά η επαφή σχιστόλιθου και ασβεστόλιθου.

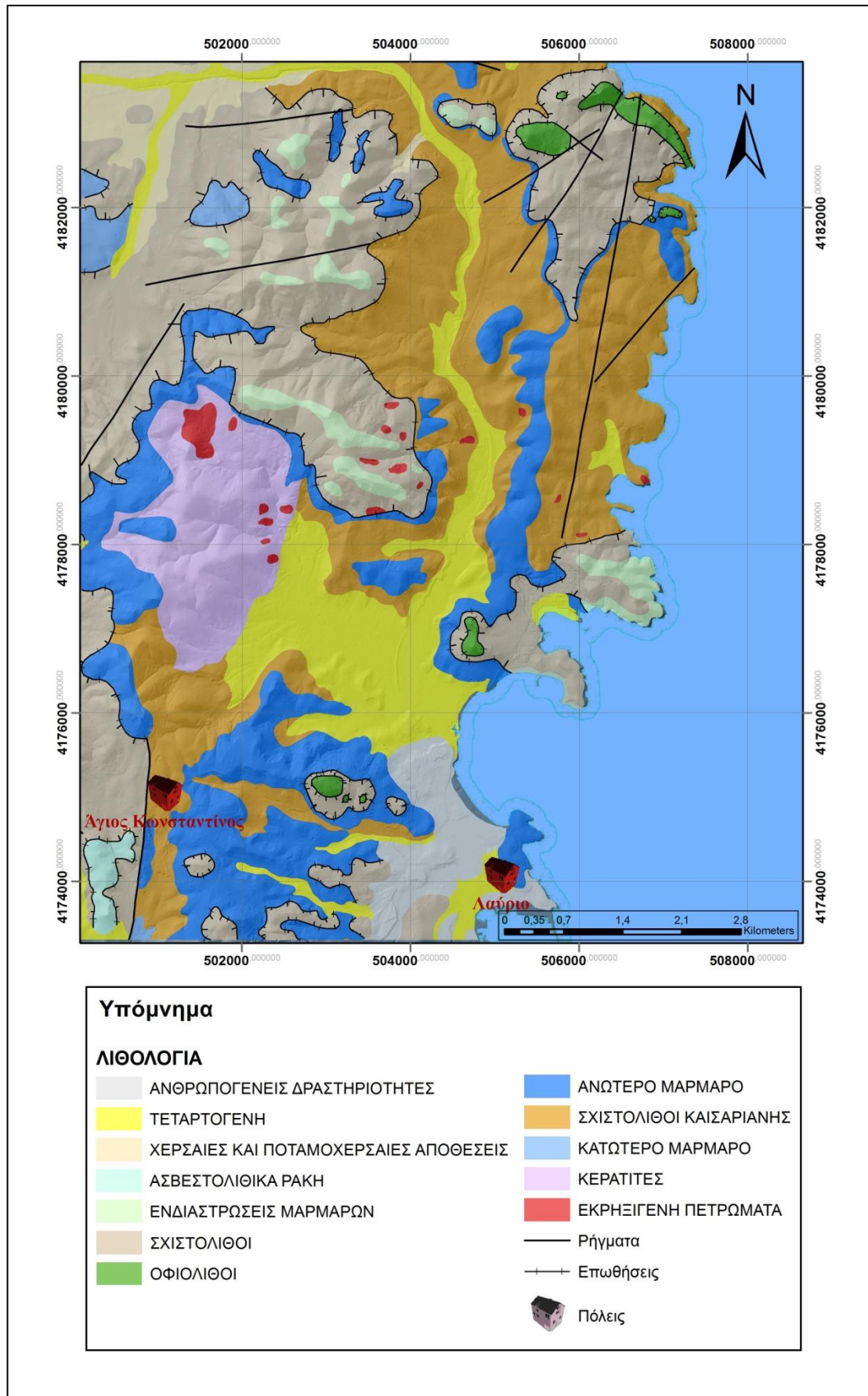


Εικόνα 5.1 Η επαφή ανώτερου μάρμαρου και σχιστόλιθου (Λεωφόρος Λαυρίου)



Εικόνα 5.2 Η επαφή ανώτερου μάρμαρου και σχιστόλιθου (Λεκάνη Θορικού)

Η γεωλογία της περιοχής έρευνας φαίνεται στο συνημμένο χάρτη που σχεδιάστηκε σύμφωνα με τα δεδομένα του ΙΓΜΕ (Φωτιάδης,2000). Όπως φαίνεται (σχήμα 5.2), η λεκάνη που σχηματίζεται πληρώνεται με τεταρτογενείς αποθέσεις. Δυτικά της, εμφανίζονται κερατίτες της μεταμορφικής άλω της γρανοδιοριτικής διεισδύσεως. Στα βόρεια και στα νότια απαντούνται οι Σχιστόλιθοι Καισαριανής και κάποιες εμφανίσεις του Ανώτερου Μαρμάρου. Ανατολικά κυριαρχεί το ανώτερο μάρμαρο και σε κάποια σημεία συναντάται ο Σχιστόλιθος Καισαριανής.



Σχήμα 5.2 Γεωλογικός χάρτης Θεοικού(Πηγή: ΙΓΜΕ,2000 με τροποποιήσεις)

6.ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ

6.1 ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

(κύρια βιβλιογραφική πηγή: Stamatis et al., 2001)

Οι υδρογεωλογικές συνθήκες της Λαυρεωτικής διαμορφώνονται ανάλογα με τους σχηματισμούς και το τεκτονισμό κάθε περιοχής.

Ο κύριος υδροφόρος αναπτύσσεται στην αυτόχθονη ενότητα, στο ανώτερο και κατώτερο μάρμαρο. Πρόκειται για ένα σύστημα έντονα κατακερματισμένο και καρστικοποιημένο, με μεγάλη υδροπερατότητα.

Το κατώτερο μάρμαρο εμφανίζεται σε ευρεία κλίμακα δυτικά του Λαυρίου, συμπεριλαμβάνοντας και τη παράκτια ζώνη. Η έλλειψη αδιαπέρατου στρώματος και η επικοινωνία του καρστικού υδροφορέα με την ακτή, έχει σαν αποτέλεσμα την εκφόρτισή του στη θάλασσα. Το κατώτερο μάρμαρο εμφανίζεται σε περιορισμένη κλίμακα στο νοτιοδυτικό Λαύριο και νότια της Καμάριζας. Το ανώτερο μάρμαρο εμφανίζεται εκτεταμένα στη περιοχή του Λαυρίου με μέγιστο πάχος τα 100 m. Το νερό που κατεισδύει στο σχηματιζόμενο καρστικό υδροφορέα, ακολουθεί τη γενική ανατολική κλίση των στρωμάτων, απορρέοντας πλευρικά προς τις τεταρτογενείς αποθέσεις ή βρίσκει υπόγεια διέξοδο προς τη θάλασσα, δημιουργώντας υποθαλάσσιες ή παράκτιες πηγές. Το νερό του καρστικού υδροφόρου αντλείται μέσω γεωτρήσεων για την άρδευση γεωργικών εκτάσεων.

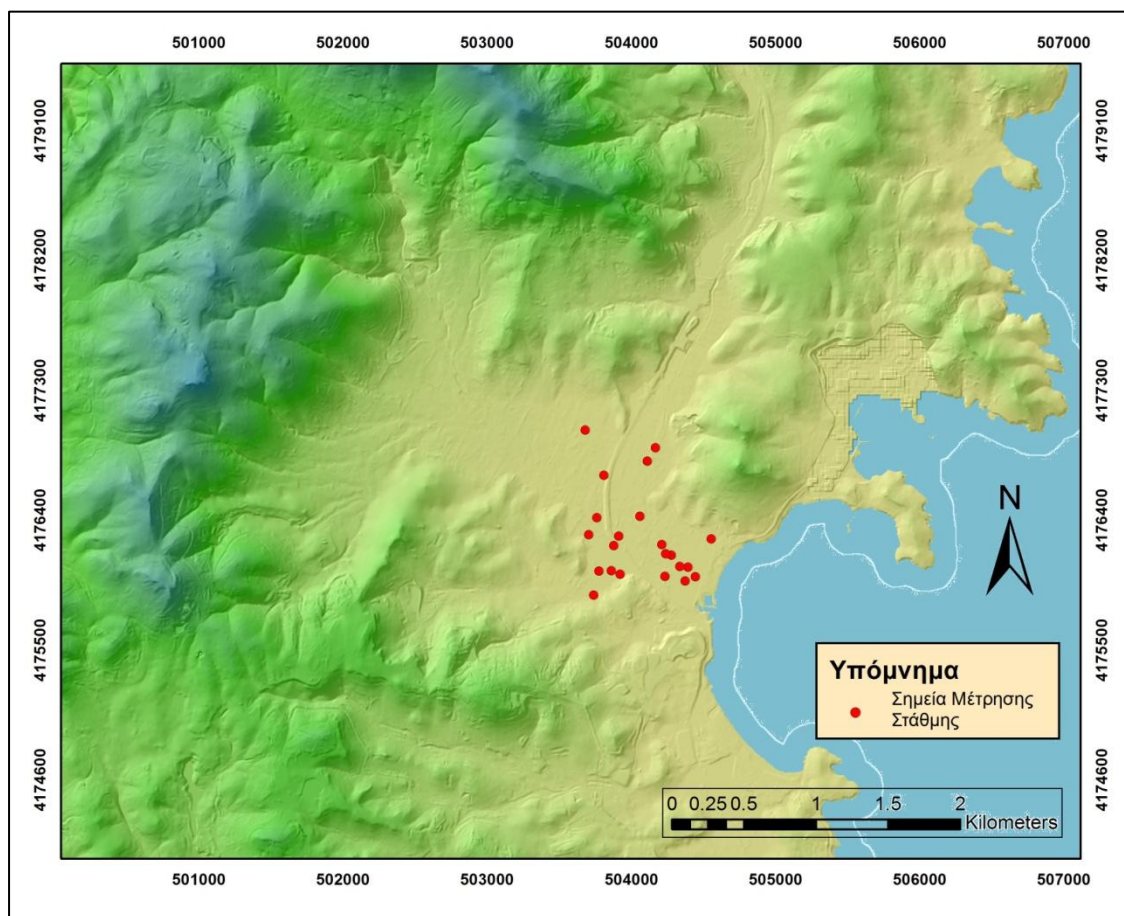
Οι σχιστόλιθοι και το φυλλιτικό κάλυμμα παρουσιάζουν ίδια υδρογεωλογική συμπεριφορά αφού πρόκειται για αδιαπέρατα πετρώματα. Ωστόσο, στην αποσαθρωμένη μάζα τους δημιουργούνται υπόγειοι, υπό πίεση υδροφόροι, κυρίως στο νότιο Λαύριο και τη Καμάριζα. Οι υδροφορείς εκμεταλλεύονται μέσω ρηχών πηγαδιών από τους κατοίκους της περιοχής. Η περιορισμένη υδροπερατότητα των στρωμάτων (που σημαίνει μειωμένη κατεισδυση και επομένως ελλιπή πλήρωση του υδροφορέα), σε συνδυασμό με την εκτεταμένη άντληση των πηγαδιών, έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση των αποθεμάτων ή και ακόμα τη στέρευση των πηγαδιών. Το υδρογραφικό δίκτυο που αναπτύσσεται στους φυλλίτες και τους σχιστόλιθους έχει δενδροειδή μορφή.

Στη λεκάνη του Θορικού και σε κάποιες εκτάσεις της λεκάνης του Λαυρίου, αναπτύσσονται αλλουβιακοί, ελεύθεροι υδροφορείς στις τεταρτογενείς (αλλουβιακές) αποθέσεις. Οι υδροφόροι αυτοί χαρακτηρίζονται από μικρή υδραυλική αγωγιμότητα και περιορισμένα υδραυλικά χαρακτηριστικά, αφού απαρτίζονται από αποθέσεις μικρής κοκκομετρίας. Στο Θορικό, το αδιαπέρατο δάπεδο του αλλουβιακού υδροφόρου είναι σχιστόλιθος Καισαριανής (της αυτόχθονης ενότητας), ενώ στο Λαύριο περιέχει φυλλίτες και σχιστόλιθους του Φυλλιτικού καλύμματος. Οι δύο κύριες πηγές τροφοδοσίας είναι το νερό της βροχής που κατεισδύει και η πλευρική τροφοδοσία από τους καρστικούς υδροφόρους των μαρμάρων και από το νερό των σχιστόλιθων. Στους αλλουβιακούς υδροφόρους έχουν επίσης κατασκευαστεί ρηχά πηγάδια, που χρησιμοποιούνται για άρδευση μικρών γεωργικών μονάδων.

Στη Λαυρεωτική, παρατηρείται η εισχώρησης της θάλασσας στο παράκτιο υδροφορέα και μάλιστα με αυξανόμενο ρυθμό. Το φαινόμενο αποδίδεται στην υδραυλική επικοινωνία της θάλασσας με τους υδροφόρους σε συνδυασμό με την συνεχόμενη άντληση των γεωτρήσεων και των πηγαδιών.

6.2 ΥΠΟΓΕΙΕΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Ο ελεύθερος αλλουβιακός υδροφορέας, μέρος αυτού του παράκτιου συστήματος, φορτίζεται από τη διήθηση των εποχιακών χειμάρρων που σχηματίζονται στον υδροκρίτη του Θορικού, καθώς επίσης και από τη πλευρική τροφοδοσία υπόγειου νερού που προέρχεται από το καρστικό υδροφόρο των μαρμάρων της περιοχής έρευνας. Κατά τη παρακολούθηση του παράκτιου αλλουβιακού υδροφορέα του Θορικού έγινε μέτρηση της στάθμης και δειγματοληψία στο νερό κάθε πηγαδιού. Για τη διεξαγωγή αντιπροσωπευτικών αποτελεσμάτων, οι μετρήσεις σε κάθε σημείο πραγματοποιήθηκαν το Μάρτιο του 2014, πριν την έναρξη της αρδευτικής περιόδου. Τα σημεία στα οποία πραγματοποιήθηκε μέτρηση στάθμης φαίνονται στο παρακάτω χάρτη (Σχήμα 6.1).



Σχήμα 6.1 Σημεία μέτρησης στάθμης στον αλλουβιακό υδροφορέα του Θορικού

Οι μετρήσεις της στάθμης χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του υδραυλικού (πιεζομετρικού) φορτίου κάθε σημείου παρουσιάζονται στο πίνακα 6.1.

Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις στάθμης, φαίνεται στις εικόνες:



Εικόνα 6.1 Σταθμήμετρο (Μάρτιος 2014)



Εικόνα 6.2 Μέτρηση στάθμης με σταθμήμετρο σε γεώτρηση του Θορικού (Μάρτιος 2014)

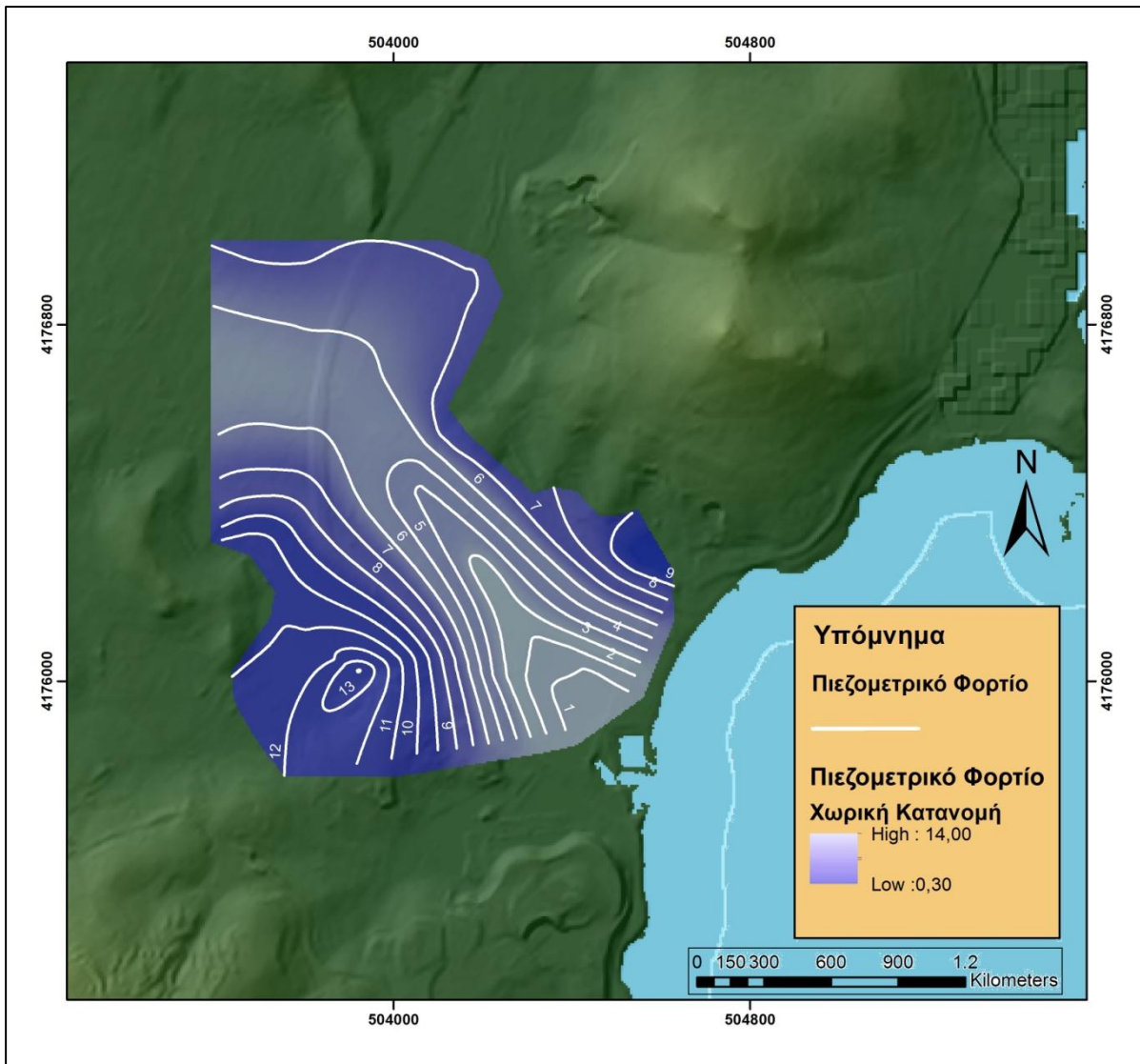
Πίνακας 6.1 Στάθμες- Πιεζομετρικά φορτία σημείων παρακολούθησης

ΔΕΙΓΜΑ	ΒΑΘΟΣ ΣΤΑΘΜΗΣ(m)	ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ (m)
W1	2,85	11,86112
W3	3,2	7,185717
W4	2,85	11,2192
W6	2,6	14,10184
W8	6,4	11,74139
W10	4,25	10,68478
W11	5,33	7,193726
W18	1,1	0,555504
W19	1	0,783625
W20	1,25	1,877737
W24	1,54	9,904711
W26	7,75	6,941818
W30	4,23	3,774265
W31	1,5	1,712581
W32	1,4	3,550693
W35	1,8	2,622109
W36	2	2,551738
W37	3,1	2,220149
W39	3,2	5,704229
W42	6,2	5,33046
U10	6,33	6,241413

Οι υδρολογικές συνθήκες της λεκάνης του Θορικού, φαίνονται από το πιεζομετρικό χάρτη της περιοχής (Σχήμα 6.2). Ο χάρτης σχεδιάστηκε με τα λογισμικά πακέτα ArcMap 10.1 και MapInfo Professional 9.0, με τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από επιλεγμένα σημεία- πηγάδια του δικτύου παρακολούθησης.

Το πιεζομετρικό φορτίο στη περιοχή κυμαίνεται μεταξύ 0,5 και 14 μέτρα. Οι ισοπιεζομετρικές καμπύλες επιβεβαιώνεται ότι ο υδροφόρος τροφοδοτείται κυρίως από το Ανώτερο Μάρμαρο. Οι γραμμές ροής δείχνουν ότι η πλευρική τροφοδοσία από το Ανώτερο Μάρμαρο έχει διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ και ΝΔ-ΒΑ. Η ύπαρξη συγκλίνουσας ροής υποδεικνύει τον κύριο άξονα αποστράγγισης του υδροφόρου προς τη θάλασσα, με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ.

Από τη κατανομή των ισοπιεζομετρικών γραμμών στο χάρτη γίνεται αντιληπτό ότι στην περιοχή η υδραυλική κλίση δεν είναι ανεστραμμένη και επομένως η θαλάσσια διείδυση είναι παθητική. Σε αυτή τη περίπτωση η διεπιφάνεια αλμυρού-γλυκού νερού κινείται αργά προς την ενδοχώρα μέχρις ότου να αποκατασταθεί νέα ισορροπία (Βουδούρης, 2009). Οι συνέπειες της παθητικής θαλάσσιας διείδυσης είναι μικρότερες από της ενεργής καθώς η εισχώρηση του θαλασσινού νερού γίνεται με μικρότερους ρυθμούς, χωρίς να δημιουργείται κώνος κατάπτωσης.



Σχήμα 6.2 Κατανομή πιεζομετρικού φορτίου στην υδρολογική λεκάνη του Θορικού.

7. ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ

7.1 ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ

(Κύριες Βιβλιογραφικές Πηγές: Βουδούρης, 2009, Καλλέργης, 2000, Καλλιώρας, 2008)

Τρωτότητα ή ρυπαντική επιδεκτικότητα ή ευαλωσιμότητα (vulnerability) υπόγειων νερών ή υδροφορέων είναι η ευαισθησία ή η επιδεκτικότητα απέναντι στους ρύπους. Την έννοια εισήγαγε για πρώτη φορά ο Margat το 1968 προκειμένου να εκφράσει τον βαθμό προστασίας που προσφέρει το φυσικό περιβάλλον εναντίον της ρύπανσης των υπόγειων νερών. 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. Έκτοτε, έχουν δοθεί διάφοροι ορισμοί για τον προσδιορισμό της έννοιας:

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 βασίζεται στην παραδοχή ότι το φυσικό περιβάλλον μπορεί να προστατεύσει σε κάποιο βαθμό το υπόγειο νερό. Συνεπώς κάποιες περιοχές είναι πιο ευάλωτες από κάποιες άλλες. Η τρωτότητα περιγράφει την ευκολία με την οποία ένας ρύπος, που εισάγεται στην επιφάνεια του εδάφους, μπορεί να φθάσει στον υδροφόρο κάτω από συγκεκριμένες πρακτικές διαχείρισης των χρήσεων γης σε μια περιοχή, με καθορισμένα χαρακτηριστικά του ρύπου και της ευαισθησίας του υδροφόρου. Έτσι η τρωτότητα του υπόγειου νερού είναι συνάρτηση των χαρακτηριστικών του υδροφόρου συστήματος, της απόστασης από την πηγή ρύπανσης, των χαρακτηριστικών του ρύπου και άλλων παραγόντων που μπορεί πιθανά να αυξήσουν το ρυπαντικό φορτίο του συγκεκριμένου ρυπαντή.

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 υδροφόρου και του υπερκείμενου εδάφους, χωρίς εξειδίκευση σε κάποιο ρυπαντή.

Οι παράγοντες που καθορίζουν την ισχύ των ρυπαντών για να εισχωρήσουν στον υδροφόρο είναι

- Η κοκκομετρία
- Η εδαφοχημική σύσταση των υλικών της ακόρεστης ζώνης
- Το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα
- Ο ρυθμός εμπλουτισμού του υπογείου νερού
- Περιβαλλοντικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη διαδικασία της βιοδιάσπασης (π.χ. θερμοκρασία, υγρασία)

Η έννοια της τρωτότητας σχετίζεται όχι μόνο με το είδος της ρύπανσης που πλήττει έναν υδροφόρο αλλά και με τη ποσότητα και την έκταση αυτής αλλά και με την επίδραση των καιρικών φαινομένων(π.χ. ξηρασία ενός υδροφόρου).

Η ακόρεστη ζώνη παίζει σημαντικό ρόλο στη τρωτότητα ενός υδροφόρου αφού καθορίζει τη κίνηση του νερού φιλτράροντας το και απομακρύνοντας βακτηρίδια και μικροοργανισμούς, συμβάλλοντας έτσι στο περιορισμό της μόλυνσης του νερού που τελικά θα φτάσει στον υδροφόρο. Ο βαθμός φιλτραρίσματος εξαρτάται από τη λιθολογία, τη κοκκομετρία και το πάχος της ακόρεστης ζώνης καθώς και από τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε ρύπου.

Σύμφωνα με το Στουρνάρα (1997), τα στάδια αντιμετώπισης της τρωτότητας είναι:

- Το στάδιο της δυνητικής εισόδου του ρύπου στο υδατικό σύστημα, που συνδέεται με τις υδρογεωλογικές συνθήκες και τη συμπεριφορά του ρύπου
- Το στάδιο παραμονής του ρύπου στο υδατικό σύστημα, που συνδέεται με τις φυσικοχημικές ιδιότητες του ρύπου και τις υδρογεωλογικές και υδραυλικές συνθήκες του υδροφορέα.
- Το στάδιο άφιξης του ρύπου στο υδροληπτικό έργο, εφόσον γίνεται εκμετάλλευση του υδροφορέα.

Για την αντιμετώπιση του φαινομένου, σε πολλές χώρες έχει γίνει προσπάθεια χαρτογράφησης της τρωτότητας. Αποτελούν μία ειδική κατηγορία υδρογεωλογικών χαρτών και πρέπει να ενημερώνονται σε τακτά χρονικά διαστήματα εξαιτίας της συνεχόμενης μεταβολής του ρυπαντικού φορτίου και της γενικότερης κατάστασης ενός υδροφορέα. Οι πληροφορίες που χρειάζονται για τον υπολογισμό της τρωτότητας ενός υδροφόρου στρώματος συλλέγονται από σταθμούς ελεγχου που έχουν εγκατασταθεί ύστερα από υδρογεωλογική έρευνα. Οι βασικές πληροφορίες για τη χαρτογράφηση της τρωτότητας των υπόγειων νερών, όπως έχουν διατυπωθεί από το Καλλέργη(2009), παρουσιάζονται στο πίνακα 7.1.

Για τη ποσοτικοποίηση της τρωτότητας ενός υδροφορέα, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι που βασίζονται κυρίως στα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα (είδος, πάχος ακόρεστης ζώνης, κοκκομετρία, κ.α.). οι χρησιμοποιούμενες μέθοδοι για την εκτίμηση της τρωτότητας διακρίνονται σε:

- Μέθοδοι Βαθμονόμησης, π.χ. DRASTIC (Aller et al., 1987), GOD(Foster,1987), SEEPAGE (Moore & John,1990) κ.α.
- Στατιστικές Μέθοδοι (απλή περιγραφική στατιστική των συγκεντρώσεων διαφόρων ρυπαντών και ανάλυση συσχέτισης)
- Μέθοδοι Προσομοίωσης (επιλύουν αριθμητικά τις εξισώσεις κίνησης του υπόγειου νερού, π.χ. MODFLOW, MT3D)

Πίνακας 7.1 Πληροφορίες που απαιτούνται για τη χαρτογράφηση της τρωτότητας των υπόγειων νερών (Καλλέργης, 2000)

ΠΕΔΙΑ ΒΑΣΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ	ΤΥΠΟΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ	Υψόμετρα, μεταβολές μορφολογιών κλίσεων, πυκνότητα και κατανομή υδρογραφικού δικτύου.
ΒΛΑΣΤΗΣΗ	Χρήσεις γης, διαδρομές υπεδαφικού νερού, περιοχές τροφοδοσίας και εκφόρτισης, ιχνογράφιση ασυνεχειών και γραμμικών στοιχείων.
ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑ	Βροχομετρικά δεδομένα, μέση θερμοκρασία αέρα, υγρασία, ηλιακή ακτινοβολία, εξατμισοδιαπνοή, εκτίμηση της ενεργής βροχόπτωσης.
ΕΔΑΦΗ	Πάχη, ιστός, δομή, ορυκτολογική σύσταση, χημικές και φυσικές ιδιότητες, πορώδες, διαπερατότητα, υγρασία, ικανότητα κατείσδυσης.
ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ	Παροχές υδρορευμάτων, ανάλυση υδρογραφημάτων, βασική ροή, λόγος ροής, ανταλλαγές νερού με υποκείμενα υδροφόρα συστήματα.
ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ	
1. ΑΚΟΡΕΣΤΗ ΖΩΝΗ	Βάθος υπόγειου νερού, πάχος, λιθοστρωματογραφία, ορυκτολογία, γεωμετρία, δείκτης ρωγμών, δείκτης ανάπτυξης καρστ, ενεργό πορώδες και βαθμός κορεσμού, ταχύτητα ροής, ρυθμός κατείσδυσης, τροφοδοσία
2. ΚΟΡΕΣΜΕΝΗ ΖΩΝΗ	Λιθοστρωματογραφία, γεωλογική δομή, γεωμετρία, ενεργό πορώδες, τύπος διαπερατότητας (πρωτογενές ή δευτερογενές πορώδες), μεταβιβαστικότητα, αποθηκευτικότητα και υδραυλική αγωγιμότητα των υδροφόρων οριζόντων, τύπος υδροφορέα
ΧΡΗΣΕΙΣ ΝΕΡΟΥ	Σημεία υδροληψίας (πηγές, γεωτρήσεις) και θέσεις υδροληπτικών έργων, επιφανειακοί και υπόγειοι υδατικοί πόροι, κατανομή τους και χρήση, παροχή και πτώσεις στάθμης των υδροφόρων πεδίων, θέση και ρυθμοί τροφοδοσίας των διαφόρων συστημάτων.
ΧΗΜΕΙΑ	

1. ΥΔΡΟΧΗΜΕΙΑ	Φυσικές και χημικές ιδιότητες επιφανειακών και υπόγειων νερών, χημικοί δείκτες, ισότοπα, ηλικία υπόγειου νερού και χρόνος παραμονής του στα υδροφόρα, χαρακτηριστικοί λόγοι, κατανομή ποιότητας επιφανειακών και υπόγειων νερών.
2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΡΥΠΩΝ	Αλλαγές στην ποιότητα του υπόγειου νερού, παρουσία ρύπων, φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά ρύπων, συγκέντρωση, ημιζωή, κινητικότητα, ικανότητα ιοντο-ανταλλαγής, προσρόφησης, βιοαποδόμησης κ.ά.
ΑΝΘΡΩΠΙΝΕΣ ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ	Έκταση αστικών περιοχών, θέση και τύπος των βιομηχανιών, παρουσία ρυπογόνων πηγών, δυνητικοί εισοδοί ρύπων.

7.2 ΕΡΕΥΝΑ ΠΕΔΙΟΥ

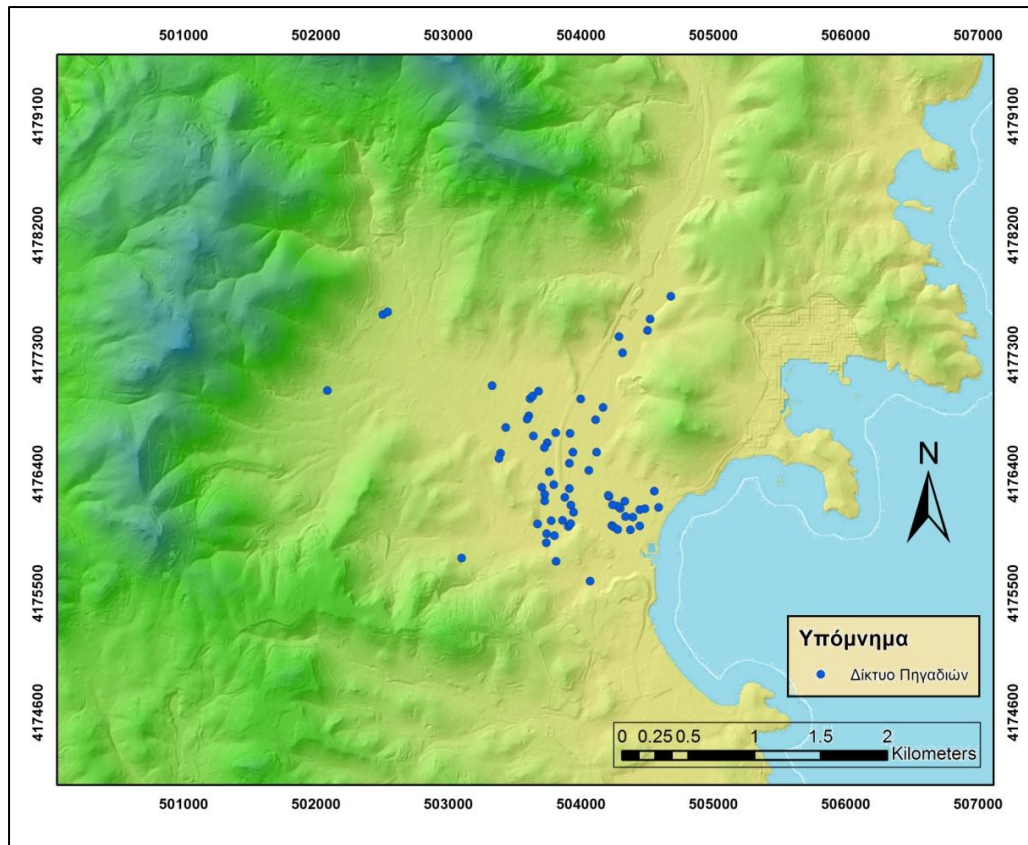
Η έρευνα που πραγματοποιήθηκε για τη παρούσα διπλωματική, διεξήχθη στην υδρολογική λεκάνη του Θορικού. Η συγκεκριμένη λεκάνη επιλέχθηκε λόγω της περιορισμένης έκτασης της και επομένως του ελεγχόμενου υδρολογικού συστήματος της. Τα συμπεράσματα που θα προκύψουν για τη συγκεκριμένη λεκάνη μπορούν να εφαρμοστούν και σε λεκάνες μεγαλύτερης κλίμακας.

Για τον έλεγχο της κατάστασης του παράκτιου υδροφόρου που ερευνήθηκε, χρησιμοποιήθηκε ένα δίκτυο πηγαδιών. Το δίκτυο διαμορφώθηκε, κατόπιν έρευνας, από πηγάδια κατοίκων της περιοχής που χρησιμοποιούνται κυρίως για αρδευτικούς σκοπούς. Τα περισσότερα πηγάδια που καταγράφηκαν, παροχετεύονται νερό από τον αλλουβιακό υδροφόρο του Θορικού ενώ υπάρχουν και καταγεγραμμένες γεωτρήσεις που ο πυθμένας τους επικοινωνεί με το καρστικό υδροφόρο του ανώτερου μαρμάρου της περιοχής. Οι γεωτρήσεις αυτές δε χρησιμοποιήθηκαν για τη λήψη δεδομένων καθώς η παρούσα διπλωματική εργασία, ερευνά τον παράκτιο αλλουβιακό υδροφόρο που σχηματίζεται στις κοκκώδεις τεταρτογενείς αποθέσεις της υδρολογικής λεκάνης του Θορικού. Το δίκτυο πηγαδιών που εντοπίστηκε και καταγράφηκε κατά την έρευνα πεδίου, αποδίδεται στην σχήμα 7.1.

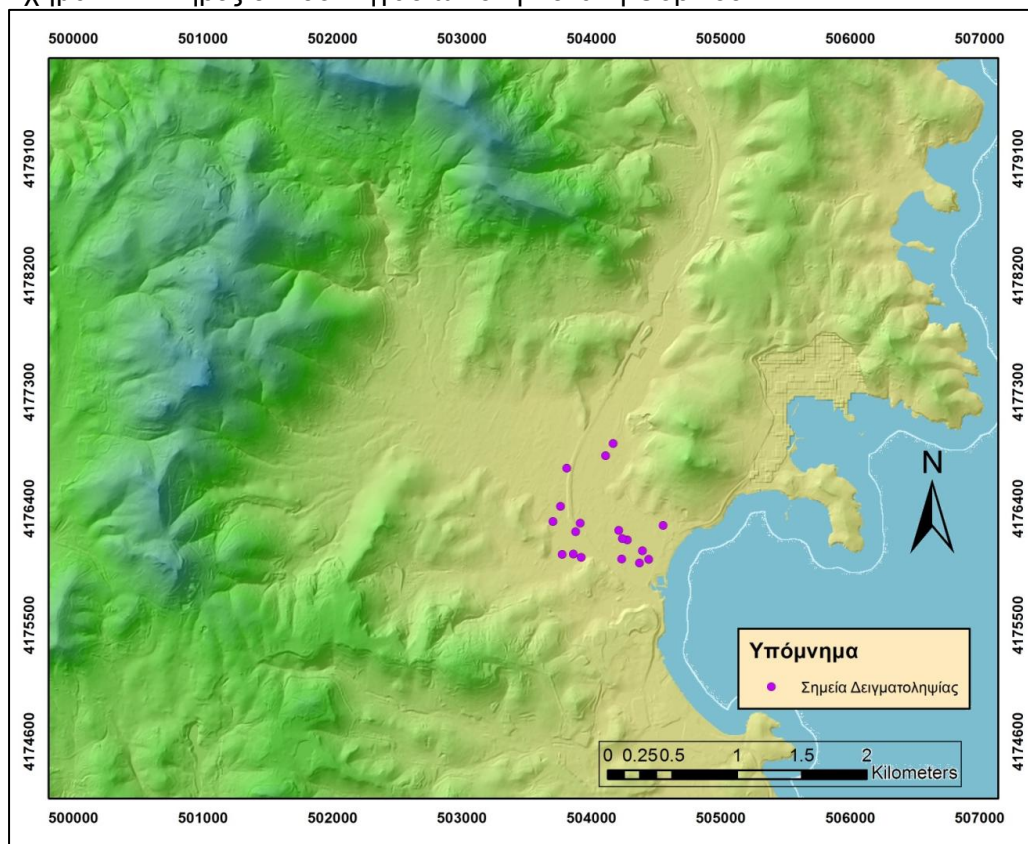
7.2 ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ- ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

7.2.1 ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Για την παρακολούθηση της υφιστάμενης κατάστασης του υδροφόρου, συλλέχθηκαν δείγματα νερού από πηγάδια που επιλέχθηκαν βάσει της τοποθεσίας τους. Στο παρακάτω σχήμα (7.2) φαίνονται τα σημεία δειγματοληψίας.



Σχήμα 7.1 Πλήρες δίκτυο πηγαδιών στη Λεκάνη Θορικού



Σχήμα 7.2 Σημεία Δειγματοληψίας στη Λεκάνη του Θορικού

Η δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε με το δειγματολήπτη της εικόνας 7.1 και τα δείγματα συλλέχθηκαν σε μπουκάλια πολυαιθυλενίου (εικόνα 7.2), ενώ προστέθηκε μικρή ποσότητα πυκνού νιτρικού οξέως για τη συντήρηση των δειγμάτων.



Εικόνα 7.1 Δειγματολήπτης (Θορικό, Μάρτιος 2014)



Εικόνα 7.2 Μπουκάλια πολυαιθυλενίου για τη λήψη δειγμάτων προς ανάλυση ιόντων και βαρέων μετάλλων(Θορικό, Μάρτιος 2014)

Στα δείγματα έγιναν επί τόπου μετρήσεις ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας (SEC), pH και θερμοκρασίας (T) με ειδικά φορητά όργανα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 7.2.

Πίνακας 7.2 Αποτελέσματα επί τόπου μετρήσεων

ΔΕΙΓΜΑ	EC (mS/cm)	pH	T (°C)
W1	7,76	7,6	19,3
W3	4,07	7,4	19,5
W4	10,33	7,6	20,1
W6	3,82	7,5	19,1
W10	3,64	7,4	19,6
W11	3,77	7,3	21,1
W18	15,95	7,2	18,8
W19	24,1	7	18,2
W20	12,03	7,3	18,7
W24	11,71	7,4	18,6
W26	1,73	8	18
W32	6,79	7,6	17,5
W35	9,42	7,3	18,2
W36	10,15	7,6	20,5
W37	5,29	8,1	19,1
W39	6,9	7	19,5
W42	4,31	7,6	20
U10	1,38	8,1	18,4

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με ειδικό φορητό εξοπλισμό (εικόνα 7.3)

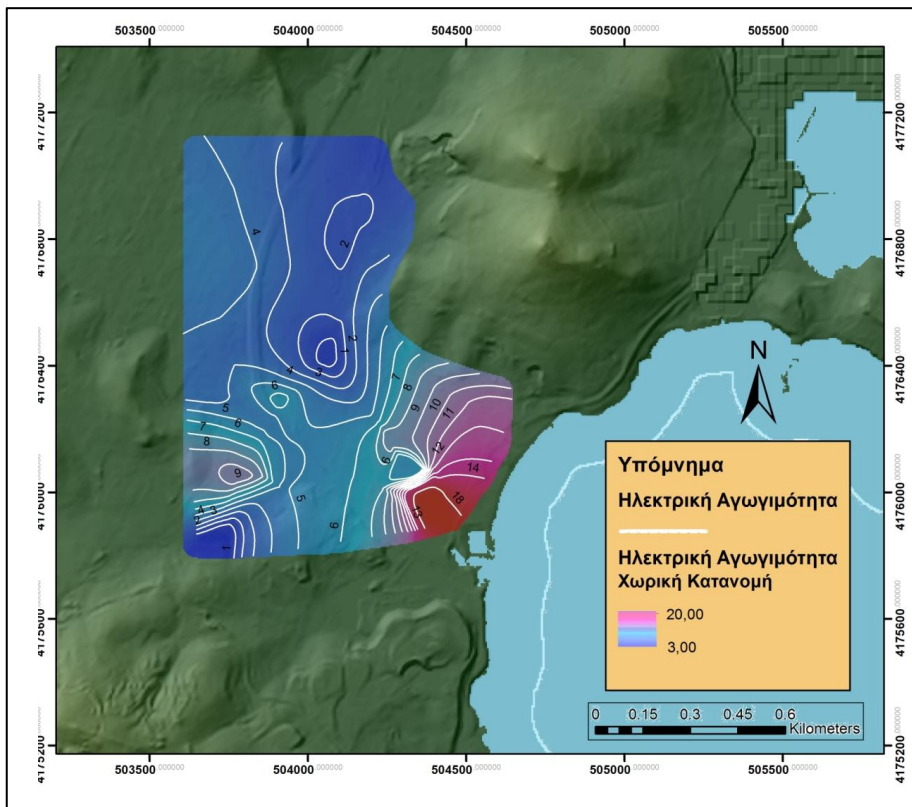


Εικόνα 7.3 Πολυπαραμετρικό όργανο μέτρησης pH, ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας και θερμοκρασίας.

7.2.1.1 ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ (SPECIFIC ELECTRICAL CONDUCTIVITY, SEC)

Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα των υδάτων, αποτελεί μία ασφαλή πρώτη ένδειξη της ποιότητας τους αλλά και μία γρήγορη ένδειξη της χημικής τους κατάστασης. Η μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας πραγματοποιείται επί τόπου στο πεδίο με τη χρήση ειδικού φορητού εξοπλισμού (αγωγιμόμετρο) έτσι ώστε ο ερευνητής να έχει μία πρώτη εικόνα της ποιοτικής κατάστασης ενός δείγματος νερού. Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα ορίζεται ως η αγωγιμότητα 1 cm³ σε θερμοκρασία ίση με 25 °C. Ως φυσικό μέγεθος, αποτελεί την ιδιότητα του νερού ως μέσου για τη μετάδοση του ηλεκτρικού ρεύματος. Η ιδιότητα αυτή, καθώς και το μέγεθός της, καθορίζονται από τη χημική σύσταση του νερού. Δηλαδή, η συγκέντρωση των χημικών ιόντων που ενυπάρχουν στο νερό συνεισφέρουν ουσιαστικά στο εν λόγω μέγεθος (Καλλιώρας, 2008). Η ηλεκτρική αγωγιμότητα των γλυκών υπόγειων νερών δεν ξεπερνά τα 1000 μS/cm (=1mS/cm). Τιμές μεγαλύτερες των 1500 μS/cm (=1,5 mS/cm) υποδεικνύουν ότι ο υπόγειος υδροφόρας έχει υποστεί κάποια μορφή ρύπανσης.

Από τις μετρήσεις που παρουσιάστηκαν στο πίνακα 7.2, παρατηρείται ότι η ηλεκτρική αγωγιμότητα του υπόγειου νερού στα περισσότερα δείγματα είναι ιδιαίτερα αυξημένη. Στο χάρτη του σχήματος 7.3 παρουσιάζεται η κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας (μS/cm), όπως αυτή μετρήθηκε επί τόπου στο πεδίο, με τη χρήση φορητού αγωγιμόμετρου.



Σχήμα 7.3 Κατανομή Ειδικής Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας στον αλλουβιακό υδροφόρα του Θορικού (μετρήσεις 2014)

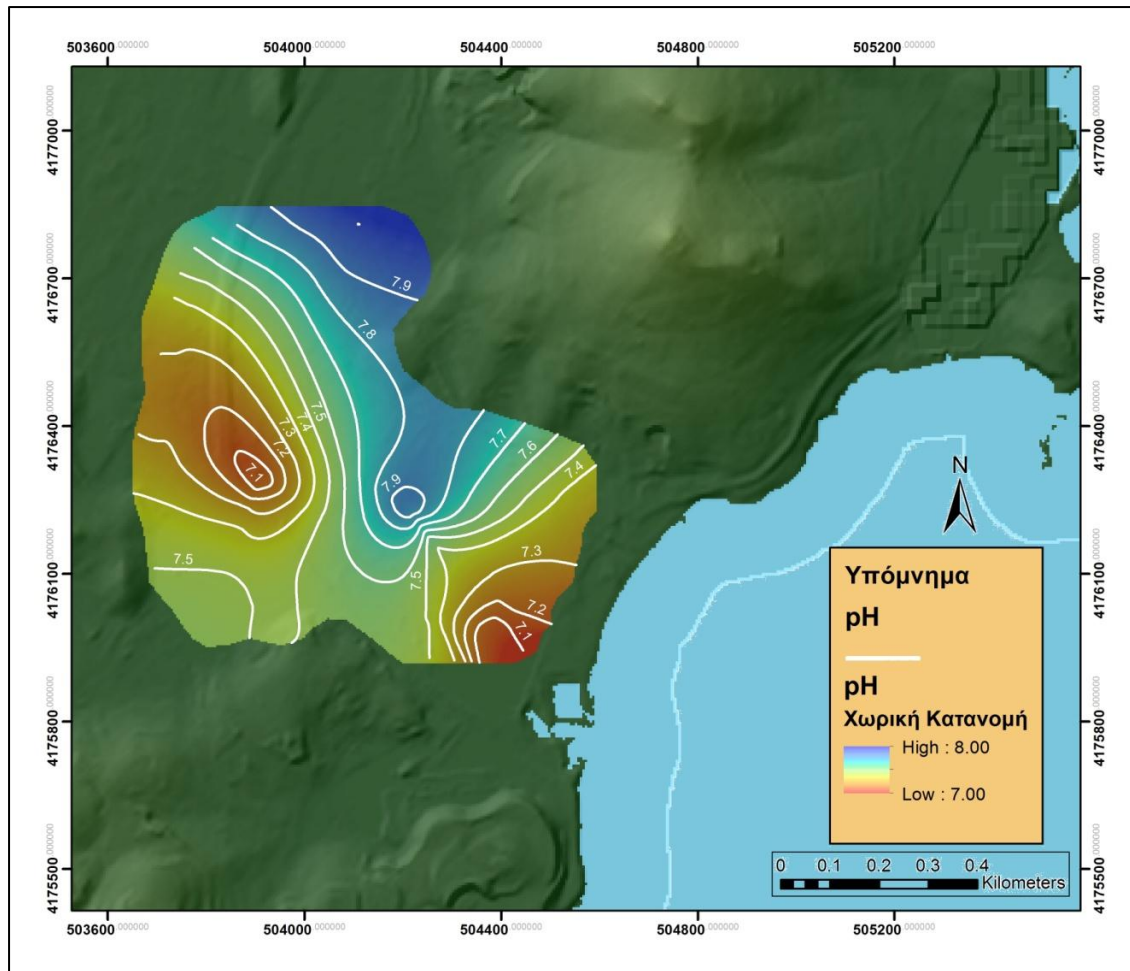
Στο ίδιο σχήμα, τα σημεία με την υψηλότερη αγωγιμότητα βρίσκονται πλησίον στο κόλπο του Θορικού, στην έκταση της λεκάνης που συνορεύει με τη θάλασσα, ενώ προς τα βόρεια της λεκάνης η ηλεκτρική αγωγιμότητα μειώνεται σημαντικά.

Η αυξημένη αγωγιμότητα στον υδροφορέα του Θορικού μπορεί να προέρχεται από την διείσδυση του θαλασσινού νερού, αφού το υπόγειο σύστημα συνδέεται και τελικά απορρέει στη θάλασσα. Η υψηλή αγωγιμότητα αποτελεί ένα πρώτο δείκτη για αυτόν τον ισχυρισμό όμως για την εξακρίβωση της υπαλμύρισης του υδροφορέα πρέπει να χρησιμοποιηθούν και άλλοι δείκτες.

7.2.1.2 pH

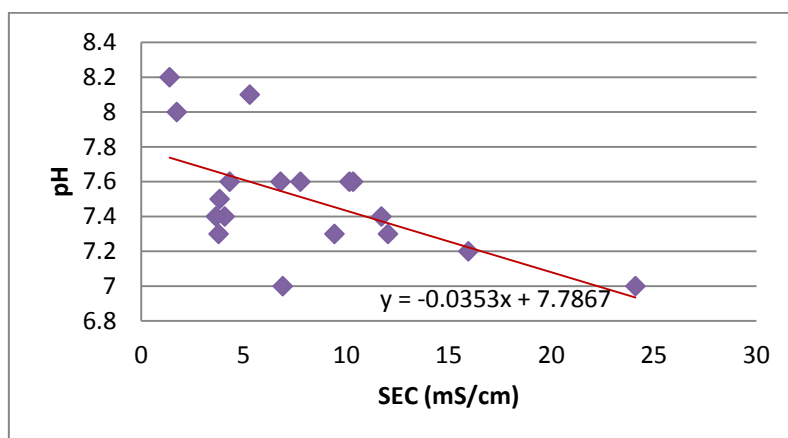
Το pH είναι ένας δείκτης με ιδιαίτερη σημασία όσον αφορά τη ποιότητα νερού ενός δείγματος, αφού συνδέεται άμεσα με τη φυσικοχημική του κατάσταση. Το pH του υπόγειου νερού είναι ένας σημαντικός παράγοντας αποσάθρωσης. Σύμφωνα με το Βουδούρη (2009), όσο πιο όξινο είναι ένα υδατικό περιβάλλον, τόσο περισσότερο ευνοεί την αφαίρεση Fe και Al από τα μητρικά πετρώματα καθώς και τη δημιουργία SiO₂. Κατά το Καλλέργη (2000), η μέτρηση του pH πρέπει να γίνεται στην ύπαιθρο, σε συνθήκες που να αποτρέπουν την ανταλλαγή αερίου του δείγματος νερού με τον ατμοσφαιρικό αέρα καθώς είναι ευαίσθητο στη συγκέντρωση CO₂. Οι μετρήσεις pH που έγιναν στα δείγματα του Θορικού έχουν μικρές διαβαθμίσεις (από 7 έως 8.1) και τα δείγματα νερού υποδεικνύουν ελαφρά αλκαλική φύση στη κλίμακα pH.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που επισημάνθηκαν στο πίνακα 7.1, σχεδιάστηκε ο χάρτης του σχήματος 7.4, με τη διαβάθμιση του pH στη περιοχή έρευνας.



Σχήμα 7.4 Κατανομή pH στον αλλουβιακό υδροφόρα του Θορικού (μετρήσεις 2014)

Αν και οι διαβαθμίσεις του pH δεν είναι μεγάλες (από 7 έως 8.1), στη συσχέτιση που έγινε μεταξύ των δύο μεγεθών (σχήμα 7.5), οι δύο τιμές φαίνεται να αλλάζουν αντιστρόφως ανάλογα.

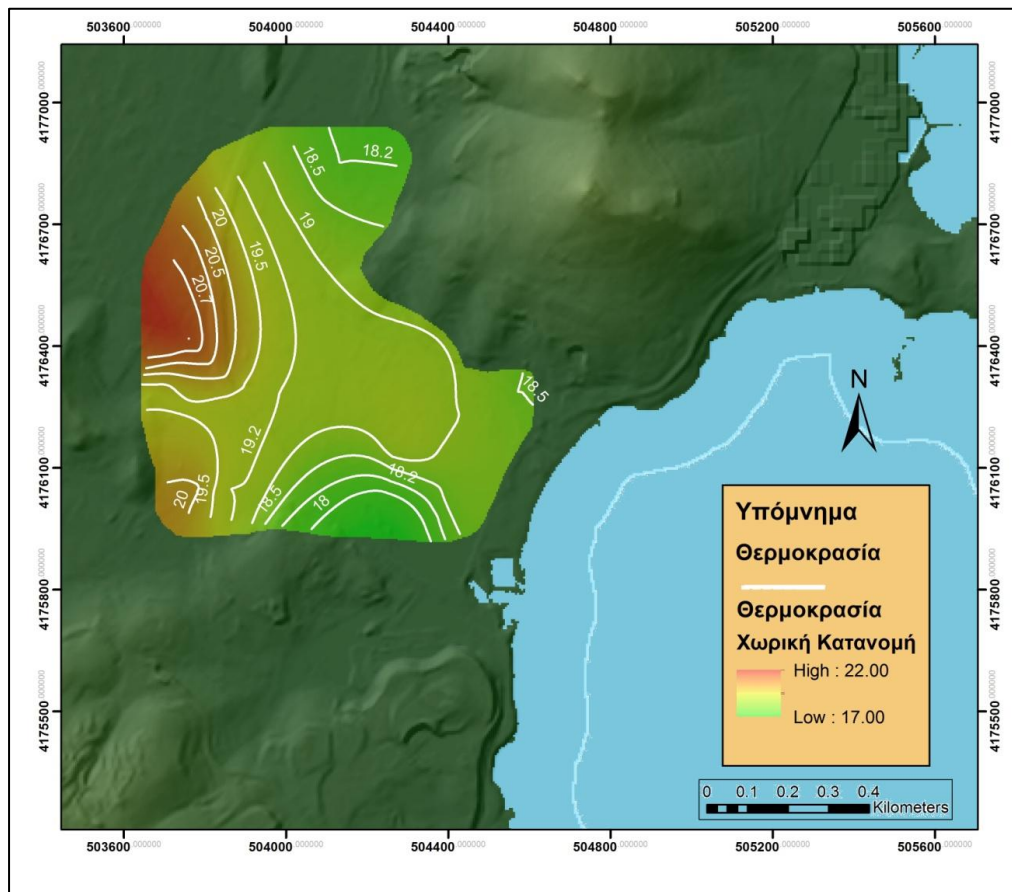


Σχήμα 7.5 Συσχέτιση Ειδικής Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας και pH.

7.2.1.3 Η ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

Σύμφωνα με το Βουδούρη (2009), η θερμοκρασία των υπογείων νερών επηρεάζεται άμεσα από τη θερμοκρασία των πετρωμάτων που τα φιλοξενούν. Σε γενικές γραμμές, η θερμοκρασία στα υπόγεια νερά παραμένει σταθερή. Στα πιο επιφανειακά, η θερμοκρασία κυμαίνεται ανάλογα με τις μεταβολές της ηλιακής ενέργειας στην επιφάνεια της γης. Ακόμη, η θερμοκρασία στους υπόγειους υδροφορείς αλλάζει σύμφωνα με τις διακυμάνσεις του υδραυλικού φορτίου. Σε βαθύτερα σημεία του υδροφόρου παρατηρούνται μεγαλύτερες θερμοκρασίες απ' ό,τι σε λιγότερο βαθιά.

Σύμφωνα με τα δεδομένα των μετρήσεων, η ελάχιστη θερμοκρασία που καταγράφηκε είναι $17,5^{\circ}\text{C}$ ενώ η μέγιστη $21,1^{\circ}\text{C}$. Στον επισυναπτόμενο χάρτη της σχήματος 7.6 διακρίνεται η κατανομή της θερμοκρασίας στη λεκάνη του Θορικού. Οι χαμηλότερες θερμοκρασίες παρατηρούνται στα σημεία όπου ο υδροφόρος τροφοδοτείται από τα μάρμαρα καθώς και κοντά στον άξονα απορροής προς τη θάλασσα. Αυτό μπορεί να οφείλεται στον εμπλουτισμό του υδροφόρου με θαλασσινό νερό και στις έντονες αντλησεις που οδηγούν στην ανάμειξη θαλασσινού και γλυκού νερού.



Σχήμα 7.6 Κατανομή της θερμοκρασίας στον αλλουβιακό υδροφόρο του Θορικού (μετρήσεις 2014)

7.2.2 ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ

Στη συνέχεια της έρευνας, τα δείγματα που συλλέχθηκαν, μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο του Τεχνολογικού Πάρκου Λαυρίου. Στο εργαστήριο έγιναν χημικές αναλύσεις των δειγμάτων ως προς τα ιόντα χλωρίου(Cl⁻), τα θειικά(SO₄⁻²) και τα νιτρικά(NO₃⁻). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο πίνακα 7.3.

Πίνακας 7.3 Αποτελέσματα Χημικών Αναλύσεων δειγμάτων

ΔΕΙΓΜΑ	Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ ⁻² (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)
W1	2224,7		3,3
W4	3020,4		0,8
W3	1121,4		8,3
W6	812,3		14,8
W10	909,3293881	712,9	4,70
W11	745,2		9,6
W18	5938,271141	1236,4	5,00
W19	15437,26434	1662,8	1,00
W20	4920,52187	1060,3	5,10
W24	4649,122064	997,7	3,80
W26	190,1199033	507,1	1,20
W32	1991,536113	847,9	1,60
W35	2897,332964	778,7	0,70
W36	3070,35034	958,2	1,30
W37	1570,866414	734,3	0,40
W39	1818,518737	1183,7	13,40
W42	1245,186648	619,0	0,00
U10	339,3897964	480,7	4,60

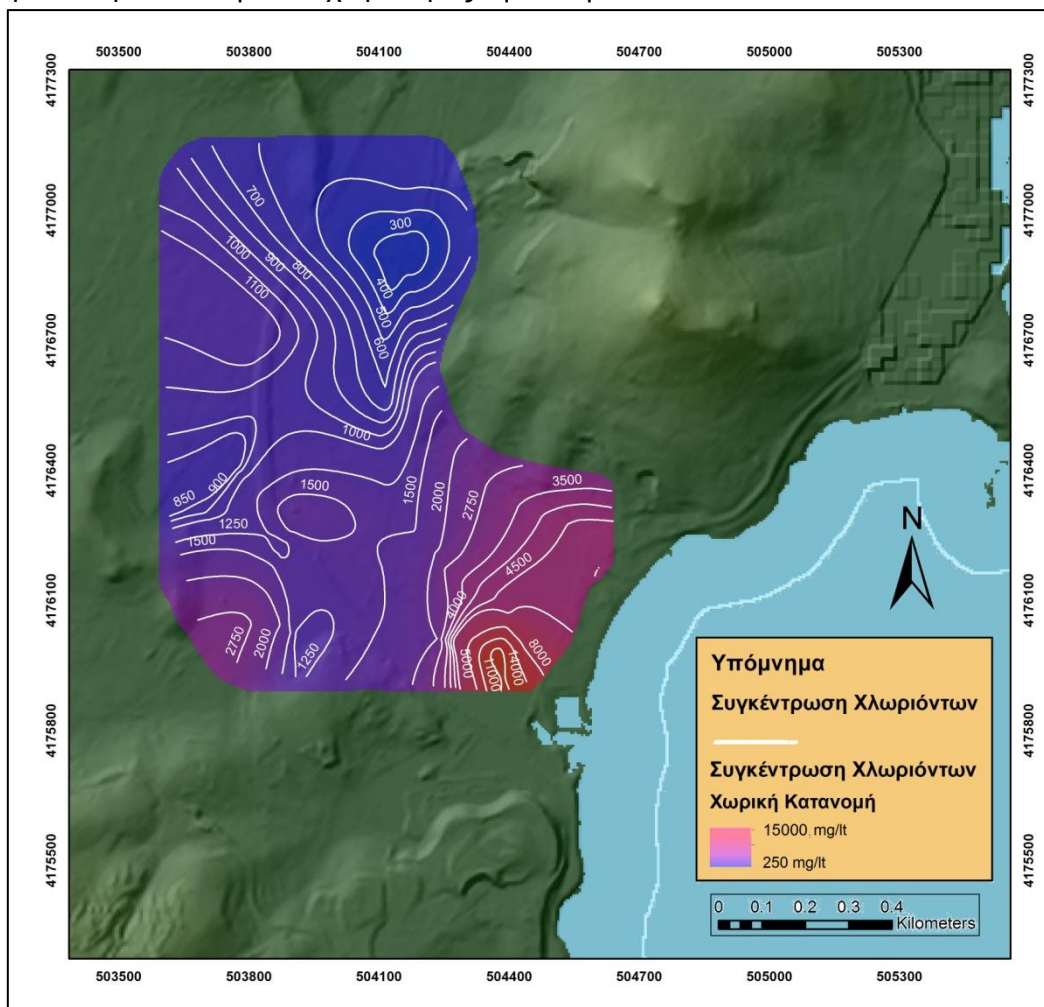
7.2.2.1 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΙΟΝΤΩΝ ΧΛΩΡΙΟΥ (Cl⁻)

Η υψηλή συγκέντρωση χλωριόντων στις υπόγειες υδάτινες μάζες προέρχεται κυρίως από τα ιζηματογενή πετρώματα που περιέχουν αργιλικά ορυκτά θαλάσσιας προέλευσης, οι εβαπορίτες και οι θερμές πηγές, ενώ στους παράκτιους υδροφορείς συνδέεται με τη διείσδυση της θάλασσας (Βουδούρης, 2009). Ο Καλλέργης (2000) αναφέρει ότι στις υγρές περιοχή η συγκέντρωση των χλωριόντων φτάνει τα 10mg/lit ενώ στις ξηρές είναι μεγαλύτερη των 100mg/lit. Οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες, εντείνουν περισσότερο το φαινόμενο της υφαλμύρισης των υπόγειων νερών με ενέργειες όπως είναι τα άλατα των δρόμων για αποπαγοποίηση (deicing salts), τα βιομηχανικά, οικιακά και αγροχημικά απόβλητα, οι αλμύρες πετρελαϊκών πεδίων και η θαλάσσια διείσδυση λόγω άντλησης (Καλλιώρας, 2008).

Στη περίπτωση του Θορικού, οι ιδιαίτερα υψηλές συγκεντρώσεις χλωριόντων που φαίνονται στο πίνακα 7.3, προέρχονται ως επί το πλείστον από την εισχώρηση της θάλασσας στον υδροφόρο, αφού το υπόγειο υδραυλικό σύστημα της περιοχής συνδέεται άμεσα και τελικά απορρέει στη θάλασσα. Το φαινόμενο έχει προκύψει από την υπεράντληση των πολυάριθμων πηγαδιών και γεωτρήσεων που υπάρχουν στη περιοχή, σε συνδυασμό με τις περιορισμένες βροχοπτώσεις και την ελλειπή πλήρωση τόσο του αλλουβιακού όσο και του καρστικού υδροφόρου. Για να

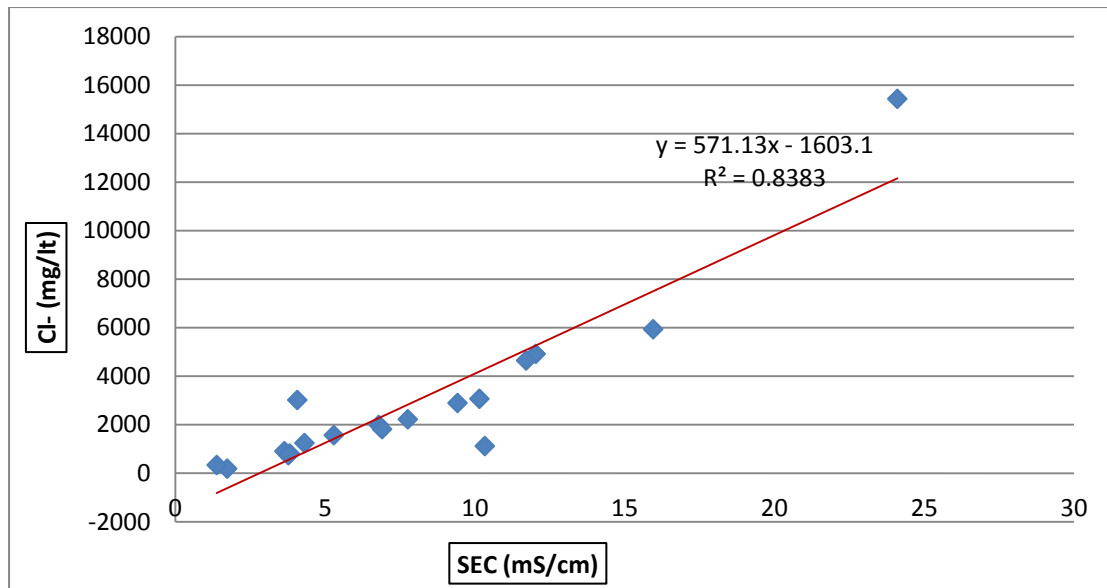
κατανοηθεί η έκταση του φαινομένου, αρκεί να αναφερθεί η σημείωση του Βουδούρη μία συγκέντρωση περίπου 100mg/lt χρησιμοποιείται ως δείκτης θαλάσσιας εισβολής.

Η κατανομή των ιόντων χλωρίου φαίνεται αναλυτικά στο χάρτη του σχήματος 7.7. Στο χάρτη γίνεται εμφανές ότι η συγκέντρωση χλωριόντων αυξάνεται όλο και περισσότερο από την ενδοχώρα προς την ακτή.



Σχήμα 7.7 Κατανομή ιόντων χλωρίου στον αλλουβιακό υδροφόρα του Θορικού

Στο παρακάτω διάγραμμα, φαίνεται η σχέση μεταξύ της συγκέντρωσης χλωριόντων και της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας των αντίστοιχων δειγμάτων.



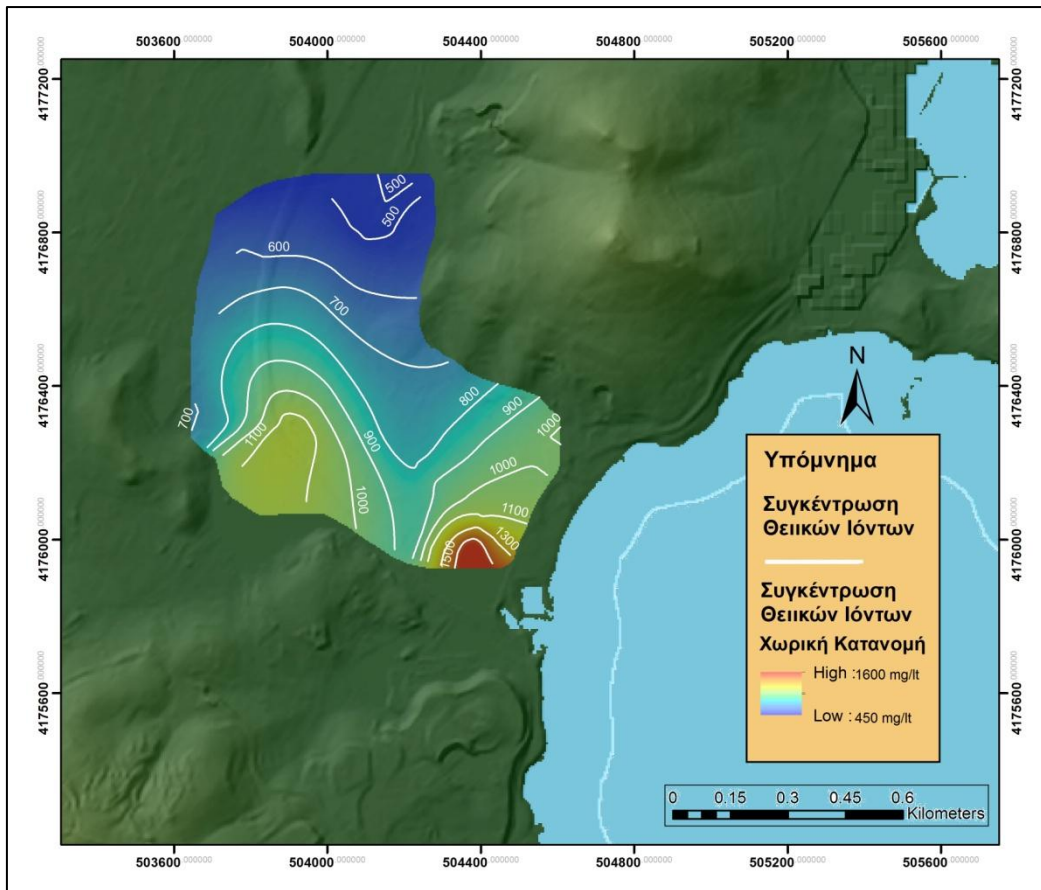
Σχήμα 7.8 Σχέση Ειδικής ηλεκτρικής Αγωγιμότητας (SEC) και συγκέντρωσης Χλωριόντων(μετρήσεις 2014)

Από τη γραμμή τάσης των δύο μετρήσεων, φαίνεται ότι η σχέση μεταξύ ηλεκτρικής αγωγιμότητας και η συγκέντρωση χλωριόντων είναι ανάλογη, επομένως συμπεραίνεται ότι οι υψηλές τιμές της αγωγιμότητας προέρχονται από τη διείσδυση της θάλασσας στον υδροφόρο.

7.2.2.2 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΘΕΙΙΚΩΝ ΙΟΝΤΩΝ (SO_4^{2-})

Σύμφωνα με το Βουδούρη, προέλευση των θειικών ανιόντων είναι η διάλυση του γύψου και του ανυδρίτη, η χρήση θειικών λιπασμάτων τύπου $(NH_4)_2SO_4$ καθώς και η οξειδωση θειούχων ενώσεων που βρίσκονται σε αργιλικά πετρώματα. Ο Καλλέργης (2000) προσθέτει ότι οι τυπικές συγκεντρώσεις αυτών των ιόντων στο υπόγειο νερό είναι γενικά χαμηλότερες των 300 mg/L, με εξαίρεση τις υδρογεωτρήσεις που επηρεάζονται από τα όξινα απόβλητα των μεταλλείων.

Η επιτρεπτή συγκέντρωση χλωριόντων στο πόσιμο νερό δεν ξεπερνά τα 250 mg/l. Στα δεδομένα των μετρήσεων(πίνακας 7.2) , οι συγκεντρώσεις των θειικών ανιόντων στο υπόγειο νερό ξεπερνούν τα επιτρεπόμενα όρια. Οι ψηλές συγκεντρώσεις πιθανά οφείλονται στη χρήση θειικών λιπασμάτων, καθώς η περιοχή είναι έντονα αγροτική αλλά και σε κατάλοιπα όξινων αποβλήτων των μεταλλείων που δραστηριοποιούνταν στην ευρύτερη περιοχή της Λαυρεωτικής μέχρι τα μέσα του 1950. Στο χάρτη που επισυνάπτεται παρακάτω, παρουσιάζεται η κατανομή των θειικών ιόντων στον υδροφορέα του Θορικού (σχήμα 7.9).

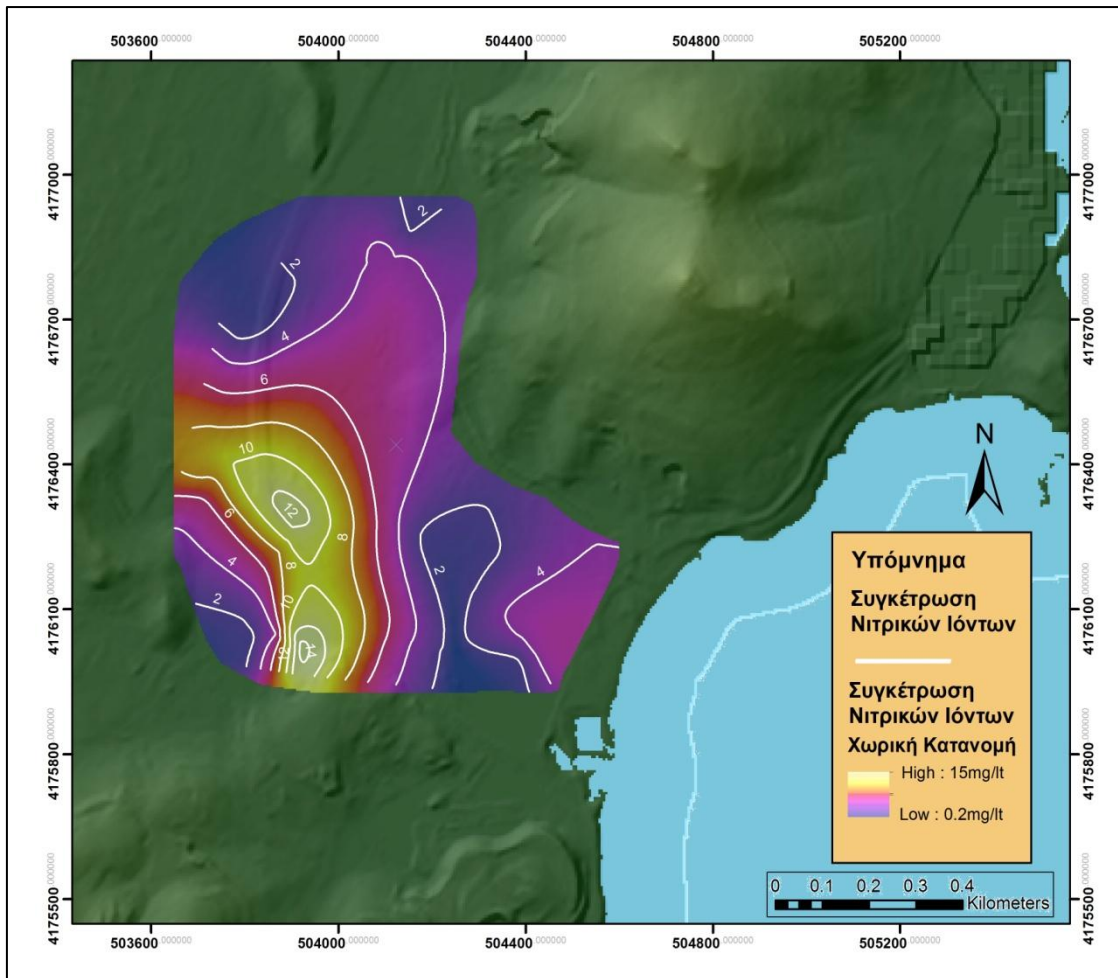


Σχήμα 7.9 Κατανομή θειικών ιόντων στον αλλουβιακό υδροφόρα του Θορικού

7.2.2.3 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΝΙΤΡΙΚΩΝ ΙΟΝΤΩΝ (NO_3^-)

Κυριότερες πηγές νιτρικών ιόντων αποτελούν το εδαφικό άζωτο το οποίο με τη δράση συγκεκριμένων βακτηρίων μετατρέπεται σε νιτρικά ιόντα (μια διαδικασία που επιταχύνεται με την καλλιέργεια του εδάφους), στράγγιση σηπτικών βόθρων, εκροές ζωικών αποβλήτων και τέλος με την αλόγιστη χρήση εδαφοβελτιωτικών ουσιών (Καλλιώρας, 2008). Το όριο συγκέντρωσης νιτρικών ιόντων στο νερό ανέρχεται στα 50mg/l. Η ανάλυση δειγμάτων νερού σε NO_3^- πρέπει να γίνεται το συντομότερο δυνατό μετά την συλλογή του νερού καθώς επιδέχονται γρήγορη αλλοίωση. Για τον ίδιο λόγο, ο Καλλέργης επισημαίνει ότι τα δείγματα πρέπει να φυλάσσονται στους 4°C και η ανάλυση να γίνεται εντός 24ώρου.

Η συγκέντρωση των νιτρικών ιόντων του Θορικού παρατίθεται στο πίνακα 7.3. Παρά την έντονη χρήση εδαφοβελτιωτικών ουσιών για τις γεωργικές καλλιέργειες της περιοχής, ο υδροφόρος δε φαίνεται να έχει επηρεαστεί σε μεγάλο βαθμό. Τα νιτρικά ιόντα κατανέμονται στον αλλουβιακό υδροφόρο της περιοχής έρευνας ως παρακάτω:



Σχήμα 7.10 Κατανομή νιτρικών ιόντων στον αλλουβιακό υδροφόρα του Θορικού

7.2.2.4 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

Εκτός από τις χημικές αναλύσεις για ιόντα χλωρίου, νιτρικά και θειικά που πραγματοποιήθηκαν στα δείγματα, έγιναν και αναλύσεις ως προς τα βαρέα μέταλλα Fe, Pb, Zn, Cu και Cd. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε για τυχόν ανίχνευση βαρέων μετάλλων αφού στη περιοχή από την αρχαιότητα μέχρι και τα μέσα το 20^{ου} αιώνα πραγματοποιούνταν μεταλλευτικές και μεταλλουργικές εργασίες(κεφάλαιο 3.1.1). Μάλιστα, στη περιοχή υπάρχουν ακόμα εμφανείς αποθέσεις σκωριών του εξορυγμένου μεταλλεύματος. Με τη βροχόπτωση, το νερό εισέρχεται στις αποθέσεις και περνώντας από αυτές εμπλουτίζεται με βαρέα μέταλλα που περιέχονται σε μεγάλο ποσοστό στις σκωρίες. Τα στοιχεία αυτά είναι τοξικά για το ανθρώπινο οργανισμό και δημιουργούν προβλήματα υγείας σε μακροχρόνια βάση.

Στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι χημικές αναλύσεις των δειγμάτων, ως προς τα βαρέα μέταλλα:

Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι ο σίδηρος, ο χαλκός και το κάδμιο βρίσκονται σε μη ανιχνεύσιμες ποσότητες στο νερό των δειγμάτων. Οι χαμηλές συγκεντρώσεις μπορεί να οφείλονται στο γεγονός ότι τα μη όξινα νερά κρατούν τις συγκεντρώσεις των Cd, Pb και Fe σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Άλλος λόγος της χαμηλής συγκέντρωσης ιχνομετάλλων στο υπόγειο νερό είναι η προσρόφηση τους από τα

αργιλικά ορυκτά, οργανικά υλικά και τα λοιπά ορυκτά που αποτελούν το πορώδες μέσο(Καλλέργης,2000).

Πίνακας 7.4 Αναλύσεις Βαρέων Μετάλλων

ΔΕΙΓΜΑ	Fe(μg/l)	Pb(μg/l)	Zn(mg/l)	Cu(mg/l)	Cd(mg/l)
W1	16	nd*	30	nd	nd
W3	nd	nd	22	nd	nd
W4	101	nd	26	nd	nd
W6	nd	nd	39	nd	nd
W10	437	nd	117	nd	nd
W11	nd	nd	nd	nd	nd
W18	0	nd	42	nd	nd
W19	364	nd	34	nd	nd
W20	1694	nd	42	nd	nd
W24	nd	nd	261	nd	nd
W26	115	nd	nd	nd	nd
W32	145	nd	192	nd	nd
W35	502	nd	125	nd	nd
W36	nd	nd	nd	nd	nd
W37	211	nd	nd	nd	nd
W39	nd	nd	nd	nd	nd
W42	968	nd	314	nd	nd

*nd=non detectable (μη ανιχνεύσιμο)

8. ΑΞΙΟΛΟΓΙΣΗ ΤΗΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ GALDIT

8.1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Η συνεχής ανθρωπογενής παρέμβαση στο φυσικό περιβάλλον, συμπεριλαμβάνει και τη συνεχή εκμετάλλευση των υπόγειων αποθεμάτων νερού. Το αποτέλεσμα αυτής της κατάστασης έχει οδηγήσει στην εισχώρηση του θαλασσινού νερού στους υδροφορείς των παράκτιων υδρολογικών συστημάτων και επομένως στη μόλυνση του υπόγειου νερού. Η πτώση της στάθμης των υπογείων νερών ως προς το μέσο ύψος της θάλασσας επηρεάζει σημαντικά την εισβολή της θαλάσσιας διείσδυσης προς την ενδοχώρα. Όσο μεγαλύτερη είναι η πτώση στη στάθμη των υπόγειων νερών, τόσο περισσότερο διεισδύει η θάλασσα. Οι συνεχείς κλιματικές αλλαγές των τελευταίων δεκαετιών έχουν οδηγήσει στη τήξη των πολικών πάγων και επομένως την ανύψωση της θαλάσσιας στάθμης, γεγονός που ευνοεί ακόμη περισσότερο την εισχώρηση του θαλασσινού νερού στα παράκτια υδρολογικά συστήματα.

Ο δείκτης GLADIT αναπτύχθηκε από τους Chachadi και Lobo-Ferreira το 2001 και τροποποιήθηκε το 2005. Πρόκειται για μία μέθοδο εκτίμησης της τρωτότητας ενός παράκτιου υδροφόρου, ως προς την υφαλμύριση, και βασίζεται στα εγγενή χαρακτηριστικά του υδροφόρου που μένουν σχεδόν σταθερά και ανεπηρέαστα από την ανθρώπινη επέμβαση. Έτσι η τρωτότητα ενός υδροφόρου ορίζεται ως «η ευαισθησία της ποιότητας του υπόγειου νερού στην επιβολή άντλησης ή ανύψωση της στάθμης της θάλασσας ή και των δύο στη παράκτια ζώνη, που καθορίζεται από τα εγγενή χαρακτηριστικά του υδροφόρου» (Lobo-Ferreira et al., 2005).

Τα χαρακτηριστικά που λαμβάνονται υπόψη για τον υπολογισμό του δείκτη GALDIT είναι:

- Ο τύπος του υδροφόρου στρώματος (**G**roundwater occurrence- Aquifer type)
- Η υδραυλική αγωγιμότητα του υδροφόρου (**A**quifer hydraulic conductivity)
- Το υδραυλικό φορτίο πάνω από το επίπεδο της θάλασσας (Height of groundwater **L**evel above the sea)
- Η απόσταση από την ακτή (**D**istance from the shore)
- Η υφιστάμενη κατάσταση υφαλμύρισης στη περιοχή (**I**mpact of existing status of seawater intrusion in the area)
- Το πάχος του υδροφόρου (**T**hickness of the aquifer)

Η ονομασία GALDIT προέρχεται από τα τονισμένα, υπογραμμισμένα γράμματα των αγγλικών όρων κάθε παραμέτρου-δείκτη.

Οι παράμετροι είναι οι βασικές προϋποθέσεις για την αξιολόγηση του δυναμικού της θαλάσσιας διείσδυσης για κάθε παράκτια ζώνη.

Στατικές παράμετροι που παραμένουν αμετάβλητες κατά τη διάρκεια των χρόνων θεωρούνται ο τύπος του υδροφορέα, η υδραυλική αγωγιμότητα, η απόσταση του σημείου εξέτασης από την ακτή και το πάχος του υδροφόρου. Αντιθέτως, δυναμικές είναι η υφιστάμενη κατάσταση υφαλμύρισης στη περιοχή και το υδραυλικό φορτίο.

Οι παράμετροι περιγράφονται από τρία σημαντικά τμήματα: βαρύτητες, διακυμάνσεις και βαθμονομήσεις. Ανάλογα με τη σημαντικότητα της κάθε παραμέτρου, καθορίζεται και η βαρύτητα της για το προσδιορισμό της τρωτότητας του υδροφορέα. Το εύρος της βαρύτητας κυμαίνεται μεταξύ 1 και 4 (οι κρισιμότερες παράμετροι έχουν βαρύτητα 4).

Εκτός της βαρύτητας, κάθε παράμετρος βαθμονομείται ανάλογα με τη κατάσταση του υδροφόρου σε συγκεκριμένα σημεία (θέσεις γεωτρήσεων). Η κλίμακα βαθμονόμησης κυμαίνεται μεταξύ 1 και 10. Όσο ψηλότερη είναι η βαθμονόμηση, τόσο μεγαλύτερη είναι η τρωτότητα του υδροφόρου στη θαλάσσια διείσδυση. Στο παρακάτω πίνακα αναγράφονται οι βαρύτητες των παραμέτρων έτσι όπως έχουν διατυπωθεί από τους Chachandi και Lobo-Ferreira:

Πίνακας 8.1 Βαρύτητα Παραμέτρων δείκτη GALDIT

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΒΑΡΥΤΗΤΑ
G-ΤΥΠΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ	1
A-ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ	3
L-ΥΨΟΣ ΣΤΑΘΜΗΣ	4
D-ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΚΤΗ	4
I-ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	1
T-ΠΑΧΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ	2

Σύμφωνα με τα παραπάνω, ο δείκτης GALDIT (GALDIT Vulnerability Index) υπολογίζεται από το τύπο:

$$GVI = \frac{\sum_{i=1}^6 w_i r_i}{\sum_{i=1}^6 w_i} \quad (8.1)$$

Όπου:

w_i = η βαρύτητα κάθε παραμέτρου- δείκτη

r_i = η βαθμονόμηση της παραμέτρου σε συγκεκριμένα σημεία

8.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ-ΔΕΙΚΤΩΝ

G- Ο ΤΥΠΟΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ

Μέσα στους γεωλογικού σχηματισμούς δημιουργούνται ελεύθεροι, υπό πίεση και υπό μερική πίεση υδροφορείς ανάλογα με τη διαπερατότητα του κάθε στρώματος και την ύπαρξη ή μη εμποδίων (π.χ. αδιαπέρατη οροφή ή δάπεδο). Η έκταση της θαλάσσιας διείσδυσης συνδέεται άμεσα με το τύπο του υδροφόρου και την ύπαρξη γλυκού νερού σε αυτόν. Είναι ευνόητο ότι ένας ελεύθερος υδροφορέας, υπό φυσικές συνθήκες είναι πιο ευάλωτος στην υφαλμύριση απ' ότι ένας υπό πίεση λόγω της υψηλής πίεσης στην οποία υποβάλλεται (μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής). Παρ' όλα αυτά, κατά την άντληση ενός υπό πίεση (αρτεσιανού) υδροφορέα δημιουργείται μεγαλύτερος κίνος κατάπτωσης καθιστώντας τον πιο ευάλωτο στη διείσδυση της θάλασσας απ' ότι τους υπόλοιπους.

Σε μία περιοχή με περισσότερους του ενός υδροφόρους, λαμβάνεται η βαθμονόμηση του υδροφόρου με τη μεγαλύτερη τρωτότητα.

Τα δεδομένα για το καθορισμό του τύπου του υδροφόρου λαμβάνονται από ανάλυση δοκιμαστικών αντλήσεων ή από λιθολογική παρακολούθηση του υδροφόρου.

Η παράμετρος βαθμονομείται όπως παρακάτω:

Πίνακας 8.2 Βαθμονόμηση παραμέτρου G (Chachadi ,Lobo-Ferreira , 2001)

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΒΑΡΥΤΗΤΑ	ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ
Τύπος υδροφόρου (Groundwater Occurrence - Aquifer Type)	1	Υπό πίεση υδροφόρος	10
		Ελεύθερος υδροφόρος	7,5
		Υπό πίεση με διαρροές υδροφόρος	5
		Περιορισμένος πλευρικά υδροφόρος (εμπλουτισμός ή/και αδιαπέρατο όριο παράλληλο με την ακτογραμμή)	2,5

A- Η ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΩΝ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

Η υδραυλική αγωγιμότητα ορίζεται ως η ικανότητα του υδροφόρου να μεταφέρει το νερό μέσω του ενεργού πορώδους. Το μέγεθος της διείσδυσης του θαλάσσιου μετώπου σε έναν παράκτιο υδροφορέα συνδέεται άμεσα με την υδραυλική του

αγωγιμότητα. Όσο μεγαλύτερη είναι η υδραυλική αγωγιμότητα, τόσο μεγαλύτερη είναι η κίνηση του θαλάσσιου νερού προς την ενδοχώρα. Ακόμη, κατά την άντληση του υδροφορέα, η υψηλή αγωγιμότητα δημιουργεί μεγαλύτερο κώνο κατάπτωσης. Τα υδραυτικά εμπόδια (π.χ. στρώματα αργίλων, αδιαπέρατα αναχώματα παράλληλα στην ακτή) λειτουργούν ως «τοίχοι» εμποδίζοντας τη θαλάσσια διείσδυση.

Η υδραυλική αγωγιμότητα υπολογίζεται από δεδομένα δοκιμαστικών αντλήσεων ή από τη λιθολογική παρακολούθηση του υδροφορέα.

Πίνακας 8.3 Βαθμονόμηση παραμέτρου A (Chachadi ,Lobo-Ferreira , 2001)

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΒΑΡΥΤΗΤΑ	ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ	
Υδραυλική			ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ	
Αγωγιμότητα		ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ	(m/day)	
Υδροφόρου	3	Υψηλή	>40	10
(Aquifer		Μέση	10-40	7,5
Hydraulic		Χαμηλή	5-10	5
Conductivity)		Πολύ χαμηλή	<5	2,5

L- ΤΟ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΑΣ

Το υδραυλικό φορτίο είναι ένας από τους κρισιμότερους παράγοντες που καθορίζουν το εύρος της θαλάσσιας διείσδυσης καθώς καθορίζει την υδραυλική πίεση που θα απωθήσει το μέτωπο της υφαλμύρισης.

Υπό φυσικές συνθήκες, το νερό του υδροφόρου εκρέει στη θάλασσα. Μετά από ανύψωση της στάθμης της θάλασσας, η ποσότητα του νερού που εκρέει μειώνεται, με αποτέλεσμα το μήκος του ποδιού της διεπιφάνειας της θάλασσας να αυξάνεται.

Για τη βαθμονόμηση της παραμέτρου L, πρέπει να εξετάζονται μακροχρόνια τα επίπεδα διακύμανσης της στάθμης των υπογείων νερών κάθε περιοχής. Γενικά μπορούμε να θεωρήσουμε τις μικρότερες τιμές στάθμης του υδροφόρου, ως τα σημεία με τη μεγαλύτερη τρωτότητα.

Οι στάθμες λαμβάνονται από τα σημεία παρακολούθησης (γεωτρήσεις-πηγάδια).

Η βαθμονόμηση φαίνεται στο παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 8.4 Βαθμονόμηση παραμέτρου L (Chachadi ,Lobo-Ferreira , 2001)

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΒΑΡΥΤΗΤΑ	ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ
Φορτίο της στάθμης		ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ	ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ
			(m)
του υπόγειου νερού	4	Υψηλό	<1
(Height of		Μέσο	1-1,5
Groundwater		Χαμηλό	1,5-2
Level)		Πολύ χαμηλό	>2
			5
			2,5

D- Η ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΚΤΗ

Η επίδραση της υφαλμύρισης γενικά μειώνεται καθώς κινούμαστε προς την ενδοχώρα, αποκρινόμενοι από την ακτή. Η μεγαλύτερη επίδραση της θάλασσας σημειώνεται κοντά στην ακτή.

Τα δεδομένα για τη συγκεκριμένη παράμετρο υπολογίζονται από τοπογραφικούς χάρτες, έχοντας ως γραμμή αναφοράς, τη πλήμμη (ή γραμμή υψηλότερης παλίρροιας), ξεκινώντας από την ακτή. Η βαθμονόμηση της παραμέτρου D φαίνεται στο παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 8.5 Βαθμονόμηση παραμέτρου D (Chachadi ,Lobo-Ferreira , 2001)

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΒΑΡΥΤΗΤΑ	ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ
Απόσταση από την		ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ	ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ
			(m)
ακτή / υψηλή στάθμη		Πολύ μικρή	<500
παλίρροιας	4	Μικρή	500-750
(Distance		Μεσαία	750-1000
from shore			5
/High		Μεγάλη	>1000
Tide)			2,5

I- ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ ΣΤΗ ΠΕΡΙΟΧΗ

Για την εκτίμηση της ήδη υπάρχουσας υφαλμύρισης στα διάφορα σημεία (γεωτρήσεις) ενός υδροφόρου, οι Chachandi και Lobo-Ferreira (2001) προτείνουν τη χρήση του συντελεστή Revelle, δηλαδή το κλάσμα $Cl^- / [HCO_3^{-1} + CO_3^{2-}]$. Παρ' όλα αυτά, χρησιμοποιούνται και άλλοι δείκτες ή συγκεντρώσεις ιόντων (π.χ. συγκέντρωση χλωριόντων) . Τα δεδομένα για τις συγκεντρώσεις των ανθρακικών αλάτων και των χλωριόντων συλλέγονται είτε από το πεδίο (με δειγματοληψία από γεωτρήσεις) είτε λαμβάνονται έτοιμα σε περίπτωση που έχει γίνει σχετική έρευνα στη περιοχή. Στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η βαθμονόμηση της παραμέτρου I, ως προς το συντελεστή Revelle:

Πίνακας 8.6 Βαθμονόμηση παραμέτρου I (Chachadi ,Lobo-Ferreira , 2001)

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΒΑΡΥΤΗΤΑ	ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ
Επίδραση της διείσδυσης του θαλασσινού νερού (Impact status of existing seawater intrusion)	1	ΧΑΡΑΚΤΗ ΡΙΣΜΟΣ Υψηλή Μέση Χαμηλή Πολύ χαμηλή	ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ $Cl^- / [HCO_3^{-1} + CO_3^{2-}]$ <500 500-750 750-1000 >1000 10 7,5 5 2,5

Τ- ΤΟ ΠΑΧΟΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ

Το πάχος του εκάστοτε υδροφορέα παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην έκταση και το μέγεθος της θαλάσσιας διείσδυσης. Γενικά ισχύει ότι όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος του υδροφόρου στρώματος, τόσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος της υπαλμύρισης που υφίσταται και αντιστρόφως.

Το πάχος ενός υδροφόρου μπορεί να υπολογιστεί από τη λιθολογική καταγραφή των σχηματισμών, μέσω γεωφυσικών μεθόδων (Vertical Electrical Soundings). Η παράμετρος Τ βαθμονομείται ως εξής:

Πίνακας 8.7 Βαθμονόμηση παραμέτρου Τ (Chachadi ,Lobo-Ferreira , 2001)

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΒΑΡΥΤΗΤΑ	ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ	
Πάχος Υδροφόρου (κορεσμένου) (Aquifer Thickness (saturated))	2	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ	ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ	
			(m)	
		Μεγάλο	>10	10
		Μέσο	7,5-10	7,5
		Μικρό	5-7,5	5
		Πολύ μικρό	<5	2,5

8.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΑΛΛΟΥΒΙΑΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΟΥ ΘΟΡΙΚΟΥ

8.3.1 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ GALDIT ΓΙΑ ΤΗΝ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΛΕΚΑΝΗ ΤΟΥ ΘΟΡΙΚΟΥ

Η βαρύτητα κάθε παραμέτρου παραμένει σταθερή, όπως περιγράφηκε παραπάνω. Η βαθμονόμηση τους, έγινε με βάση τη κλίμακα της λεκάνης του Θορικού.

Ο ΤΥΠΟΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ (G)

Ο τύπος του υδροφορέα είναι παράμετρος σταθερή σε όλη του την έκταση και χρονικά αμετάβλητη. Στη περίπτωση που μελετάται, ο αλλουβιακός υδροφορέας του Θορικού είναι ελεύθερος και επομένως ιδιαίτερα ευάλωτος προς την υφαλμύριση. Έτσι η παράμετρος G βαθμονομείται με 8 (πίνακας 8.8).

Πίνακας 8.8 Βαθμονόμηση παραμέτρου G

ΤΥΠΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ (G)	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ
υπό πίεση	10
ελεύθερος	7,5
με διαρροή	5
με αδιαπέρατο όριο κατά μήκος της ακτής	2,5

Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζεται η συνολική βαρύτητα της παραμέτρου G για τη λεκάνη του Θορικού:

Πίνακας 8.9 Συνολική βαρύτητα του παράγοντα W1×R1 για κάθε πηγάδι

ΔΕΙΓΜΑ	G	ΒΑΡΥΤΗΤΑ(W1)	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ(R1)	W1xR1
W1	ελεύθερος υδροφόρος	1	7,5	7,5
W3	ελεύθερος υδροφόρος	1	7,5	7,5
W4	ελεύθερος υδροφόρος	1	7,5	7,5
W6	ελεύθερος υδροφόρος	1	7,5	7,5
W10	ελεύθερος υδροφόρος	1	7,5	7,5
W11	ελεύθερος υδροφόρος	1	7,5	7,5
W18	ελεύθερος υδροφόρος	1	7,5	7,5
W19	ελεύθερος υδροφόρος	1	7,5	7,5
W20	ελεύθερος υδροφόρος	1	7,5	7,5
W24	ελεύθερος υδροφόρος	1	7,5	7,5
W26	ελεύθερος υδροφόρος	1	7,5	7,5
W32	ελεύθερος υδροφόρος	1	7,5	7,5
W35	ελεύθερος υδροφόρος	1	7,5	7,5
W36	ελεύθερος υδροφόρος	1	7,5	7,5
W37	ελεύθερος υδροφόρος	1	7,5	7,5
W39	ελεύθερος υδροφόρος	1	7,5	7,5
W42	ελεύθερος υδροφόρος	1	7,5	7,5
U10	ελεύθερος υδροφόρος	1	7,5	7,5

Η ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ(A)

Η υδραυλική αγωγιμότητα του αλλουβιακού υδροφορέα της περιοχής υπολογίστηκε βάσει της κοκκομετρίας και του είδους των κόκκων που επικρατούν σε κάθε σημείο-πηγάδι. Τα αποτελέσματα της κοκκομετρίας λήφθηκαν από γεωφυσική έρευνα που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια διπλωματικής εργασίας στη περιοχή (Βλασσοπούλου, Σταθοπούλου, 2014). Βάσει αυτών των αποτελεσμάτων εντοπίστηκαν δύο είδη αποθέσεων στον αλλουβιακό υδροφορέα: αργιλικές αποθέσεις και αμμώδεις αποθέσεις με χαλικιώδεις ενστρώσεις. Είναι ευνόητο ότι οι αμμώδεις- χαλικιώδεις αποθέσεις θα έχουν πολύ μεγαλύτερη υδραυλική

αγωγιμότητα απ' ότι οι αργλικές λόγω της μεγαλύτερης κοκκομετρίας τους. Γι' αυτό το λόγο οι αργλικές αποθέσεις βαθμονομήθηκαν με 2,5 και οι αμμώδεις-χαλικώδεις με 10. Πιο αναλυτικά, η βαθμονόμηση για τα διάφορα είδη αποθέσεων που μπορούμε να συναντήσουμε στη περιοχή, συντάσσεται στο παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 8.10 Βαθμονόμηση παραμέτρου A

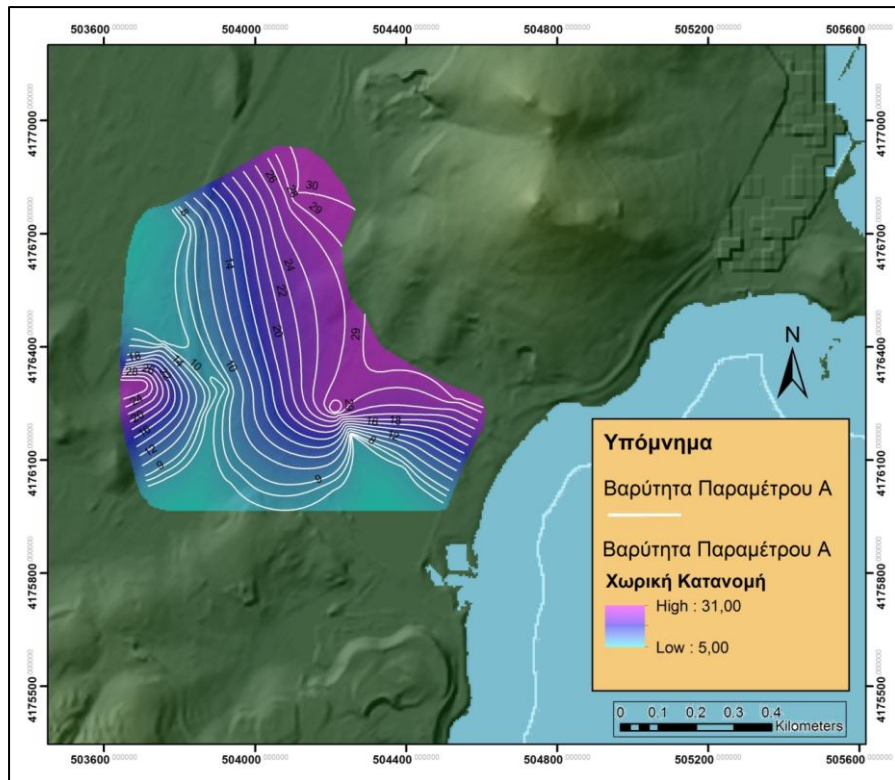
ΥΛΙΚΟ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ(A)	ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ (m/sec)	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ
αμμοχαλικώδες υλικό	$>1 \times 10^{-4}$	10
αμμώδες υλικό	$1 \times 10^{-4} - 3 \times 10^{-5}$	7,5
αμμοαργιλώδες υλικό	$3 \times 10^{-5} - 2 \times 10^{-9}$	5
αργιλώδες υλικό	$<2 \times 10^{-9}$	2,5

Στο πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζεται η συνολική βαρύτητα της παραμέτρου για κάθε πηγάδι:

Πίνακας 8.11 Συνολική βαρύτητα του παράγοντα W2×R2 για κάθε πηγάδι

ΔΕΙΓΜΑ	A(m/sec)	ΒΑΡΥΤΗΤΑ(W2)	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ(R2)	W2xR2
W2	2×10^{-9}	3	2,5	7,5
W3	2×10^{-9}	3	2,5	7,5
W4	2×10^{-9}	3	2,5	7,5
W6	2×10^{-9}	3	2,5	7,5
W10	2×10^{-4}	3	10	30
W11	2×10^{-9}	3	2,5	7,5
W18	2×10^{-9}	3	2,5	7,5
W19	2×10^{-9}	3	2,5	7,5
W20	2×10^{-9}	3	2,5	7,5
W24	2×10^{-4}	3	10	30
W26	2×10^{-4}	3	10	30
W32	2×10^{-9}	3	2,5	7,5
W35	2×10^{-9}	3	2,5	7,5
W36	2×10^{-9}	3	2,5	7,5
W37	2×10^{-4}	3	10	30
W39	2×10^{-9}	3	2,5	7,5
W42	2×10^{-9}	3	2,5	7,5
U10	2×10^{-4}	3	10	30

Η κατανομή της παραμέτρου στη λεκάνη του Θορικού φαίνεται στο σχήμα 8.1.



Σχήμα 8.1 Κατανομή της συνολικής βαρύτητας W2xR2 στον αλλουβιακό υδροφορέα του Θορικού

ΤΟ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΑΣ (L)

Οι πιεζομετρικές συνθήκες της παράκτιας περιοχής αποτελούν μια δυναμική παράμετρο καθώς το υδραυλικό φορτίο του υδροφορέα αλλάζει τόσο εποχιακά όσο και χρονικά. Οι διαβάθμιση της πιεζομετρίας εξαρτώνται από τον όγκο του νερού που τροφοδοτεί τον υδροφορέα και από τα επίπεδα εκμετάλλευσης(άντλησης) του. Στη συγκεκριμένη περιοχή, η πιεζομετρία του αλλουβιακού υδροφορέα επηρεάζεται έντονα από τις συνεχόμενες και μη ελεγχόμενες αντλήσεις, με αποτέλεσμα την αναπόφευκτη πτώση της στάθμης. Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 6, μετρήθηκαν οι στάθμες κάθε σημείου πριν την έναρξη της αρδευτικής περιόδου και στη συνέχεια υπολογίστηκε το υδραυλικό (πιεζομετρικό) φορτίο. Η βαθμονόμηση κάθε σημείου έγινε με βάση το παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 8.12 Βαθμονόμηση παραμέτρου L

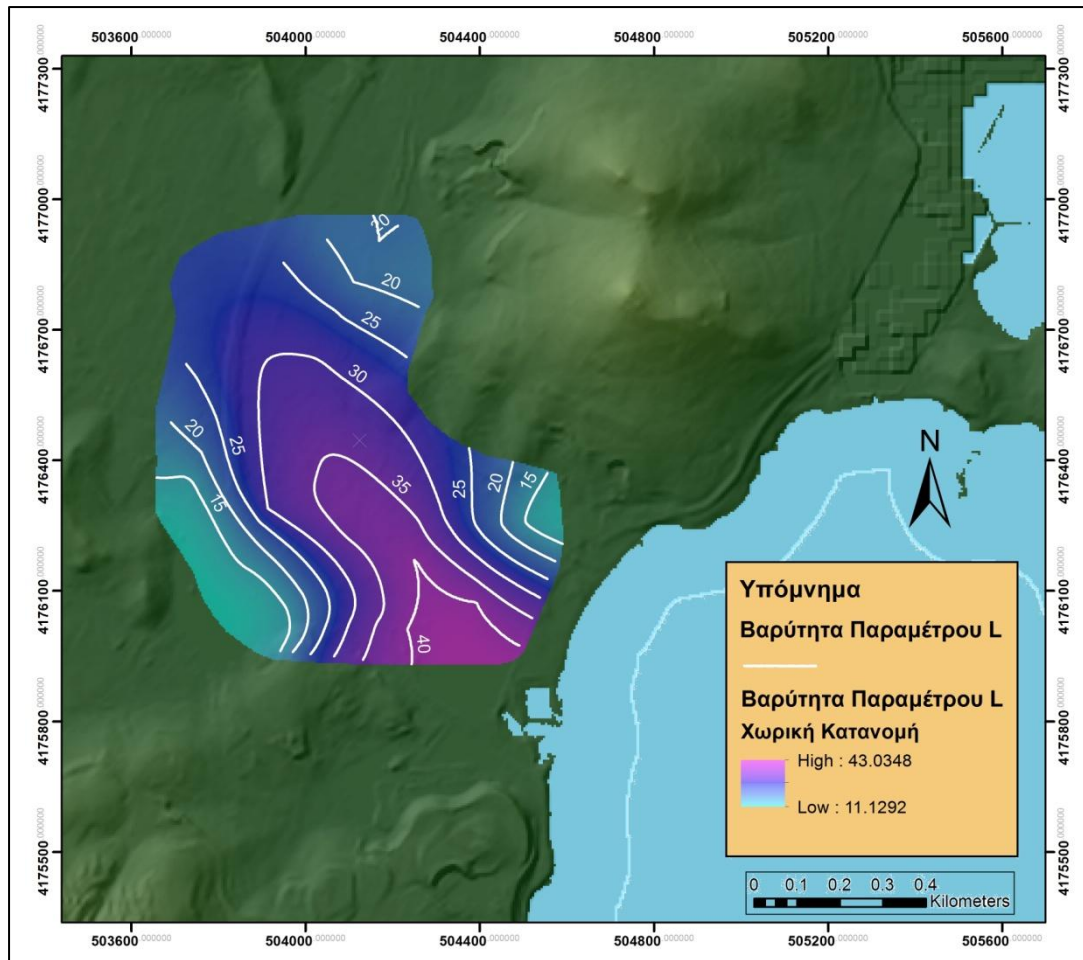
ΥΨΟΜΕΤΡΟ ΣΤΑΘΜΗΣ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ(L)	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ
<4m	10
4m-6m	7,5
6m-8m	5
>8m	2,5

Στη συνέχεια υπολογίζεται το γινόμενο W3xR3:

Πίνακας 8.13 Συνολική βαρύτητα του παράγοντα W3xR3 για κάθε πηγάδι

ΔΕΙΓΜΑ	L(m)	ΒΑΡΥΤΗΤΑ(W3)	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ(R3)	W3xR3
W1	11,86	4	2,5	10
W3	7,18	4	5	20
W4	11,21	4	2,5	10
W6	14,10	4	2,5	10
W10	10,68	4	2,5	10
W11	7,19	4	5	20
W18	0,55	4	10	40
W19	0,78	4	10	40
W20	1,87	4	10	40
W24	9,90	4	2,5	10
W26	6,94	4	5	20
W32	3,55	4	10	40
W35	2,62	4	10	40
W36	2,55	4	10	40
W37	2,22	4	10	40
W39	5,70	4	7,5	30
W42	5,33	4	7,5	30
U10	6,24	4	5	20

Η κατανομή της βαρύτητας της συγκεκριμένης παραμέτρου σύμφωνα με τους υπολογισμούς του πίνακα 8.13, παρουσιάζεται στο παρακάτω χάρτη:



Σχήμα 8.2 Κατανομή της συνολικής βαρύτητας W3xR3 στον αλλουβιακό υδροφόρα του Θορικού

ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΚΤΗ (D)

Όπως ειπώθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, στο Θορικό δημιουργείται μία λεκάνη περιορισμένης έκτασης. Γι' αυτό το λόγο, η βαθμονόμηση που χρησιμοποιήθηκε τροποποιήθηκε σύμφωνα με τα δεδομένα (πίνακας 8.14).

Πίνακας 8.14 Βαθμονόμηση παραμέτρου D

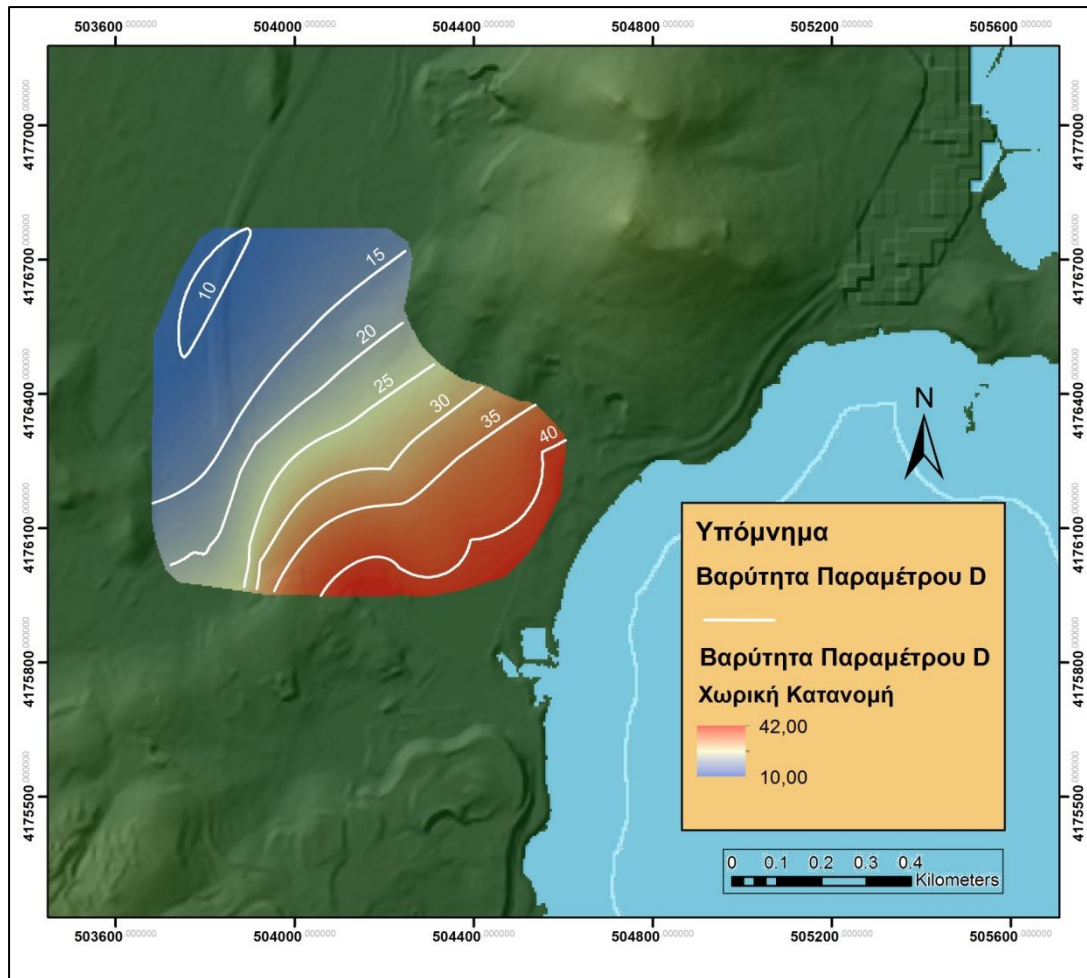
ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΚΤΗ (D)	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ
<400 m	10
400m-600m	7,5
600m-800m	5
>800m	2,5

Στο παρακάτω πίνακα αναγράφονται οι τιμές της συνολικής βαρύτητας της παραμέτρου D για κάθε πηγάδι:

Πίνακας 8.15 Συνολική βαρύτητα του παράγοντα W4×R4 για κάθε πηγάδι

ΔΕΙΓΜΑ	D(m)	ΒΑΡΥΤΗΤΑ(W4)	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ(R4)	W4xR4
W1	633	4	5	20
W3	705	4	5	20
W4	710	4	5	20
W6	568	4	7,5	30
W10	890	4	2,5	10
W11	920	4	2,5	10
W18	165	4	10	40
W19	225	4	10	40
W20	230	4	10	40
W24	196	4	10	40
W26	910	4	2,5	10
W32	293	4	10	40
W35	370	4	10	40
W36	407	4	7,5	30
W37	460	4	7,5	30
W39	755	4	5	20
W42	1056	4	2,5	10
U10	883	4	2,5	10

Η κατανομή της βαρύτητας της παραμέτρου D φαίνεται στο χάρτη του σχήματος 8.3.



Σχήμα 8.3 Κατανομή της συνολικής βαρύτητας W4xR4 στον αλλουβιακό υδροφόρα του Θορικού

ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ (I)

Για τον υπολογισμό της υφαλμύρισης στα σημεία παρακολούθησης, χρησιμοποιήθηκαν τα υπάρχοντα δεδομένα της έρευνας πεδίου που διεξήχθη. Η βαθμονόμηση της παραμέτρου πραγματοποιήθηκε με τις διαθέσιμες συγκεντρώσεις χλωριόντων, δεδομένα που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 7.

Η παράμετρος βαθμονομήθηκε βάσει του παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 8.16 Βαθμονόμηση παραμέτρου I

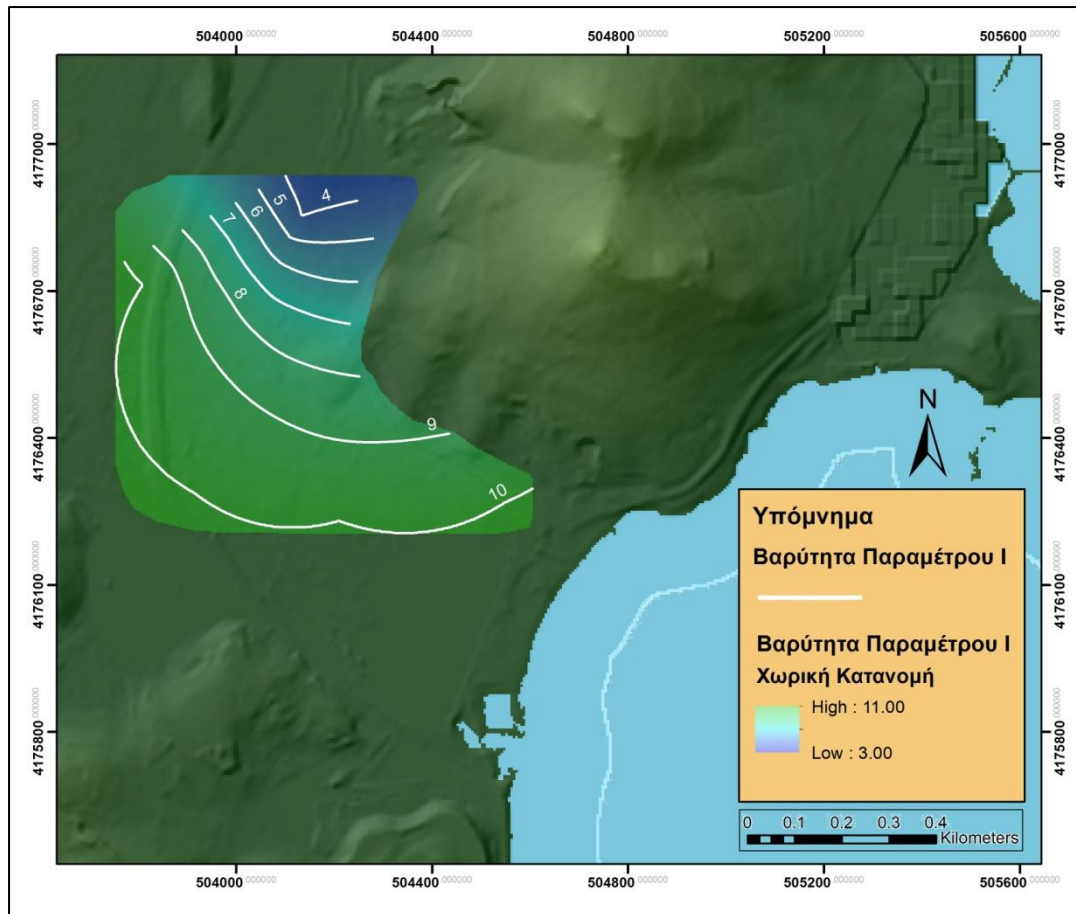
ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗΣ (Cl⁻ mg/l)	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ
>700	10
500-700	7,5
300-500	5
<300	2,5

Η συνολική βαρύτητα της παραμέτρου έχει ως εξής:

Πίνακας 8.17 Συνολική βαρύτητα του παράγοντα W5×R5 για κάθε πηγάδι

ΔΕΙΓΜΑ	I(mg/l)	ΒΑΡΥΤΗΤΑ(W5)	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ(R5)	W5xR5
W1	2224,70	1	10	10
W3	1121,40	1	10	10
W4	3020,40	1	10	10
W6	812,30	1	10	10
W10	909,30	1	10	10
W11	745,20	1	10	10
W18	5938,27	1	10	10
W19	15437,26	1	10	10
W20	4920,50	1	10	10
W24	4649,12	1	10	10
W26	190,11	1	2,5	2,5
W32	1991,53	1	10	10
W35	2897,30	1	10	10
W36	3070,30	1	10	10
W37	1570,86	1	10	10
W39	1818,50	1	10	10
W42	1245,18	1	10	10
U10	339,38	1	5	5

Η παράμετρος κατανέμεται στον υδροφόρο του Θορικού, όπως φαίνεται στο χάρτη:



Σχήμα 8.4 Κατανομή της συνολικής βαρύτητας W5xR5 στον αλλουβιακό υδροφορέα του Θορικού

ΤΟ ΠΑΧΟΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ(T)

Τα στοιχεία για το πάχος του υδροφορέα συλλέχθηκαν από σχετική γεωφυσική έρευνα στη περιοχή (Βλασσοπούλου, Σταθοπούλου, 2014). Το πάχος του αλλουβιακού στρώματος κυμαίνεται μεταξύ 5 και 13 μέτρων, ενώ το πάχος του υδροφόρου στρώματος μεταξύ 0,75 και 11,5 μέτρων. Η βαθμονόμηση της παραμέτρου για κάθε σημείο έγινε κατά το πίνακα 8.18.

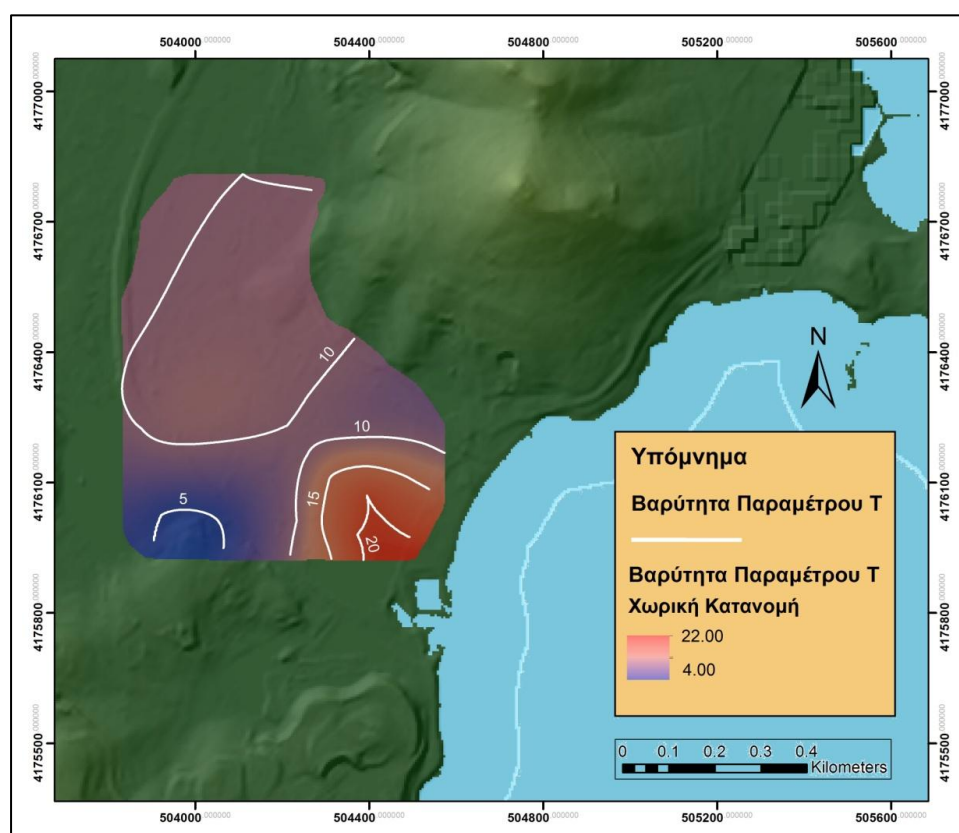
Πίνακας 8.18 Βαθμονόμηση παραμέτρου T

ΠΑΧΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ (T)	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ
>9m	10
7m-9m	7,5
4m-7m	5
<4m	2,5

Στο πίνακα 8.19 υπολογίζεται το γινόμενο WxR κάθε σημείου παρακολούθησης για τη παράμετρο D και στη συνέχεια η κατανομή στον υδροφορέα του Θορικού:

Πίνακας 8.19 Συνολική βαρύτητα του παράγοντα W6×R6 για κάθε πηγάδι

ΔΕΙΓΜΑ	T(m)	ΒΑΡΥΤΗΤΑ(W6)	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ(R6)	W6xR6
W1	2,15	2	2,5	5
W3	4,8	2	5	10
W4	2,15	2	2,5	5
W6	2,4	2	2,5	5
W10	0,75	2	2,5	5
W11	1,17	2	2,5	5
W18	11,4	2	10	20
W19	11,5	2	10	20
W20	9,25	2	10	20
W24	3,46	2	2,5	5
W26	3,75	2	2,5	5
W32	4,1	2	5	10
W35	4,7	2	5	10
W36	4,5	2	5	10
W37	6,9	2	5	10
W39	7,8	2	7,5	15
W42	2,3	2	2,5	5
U10	6,17	2	5	10



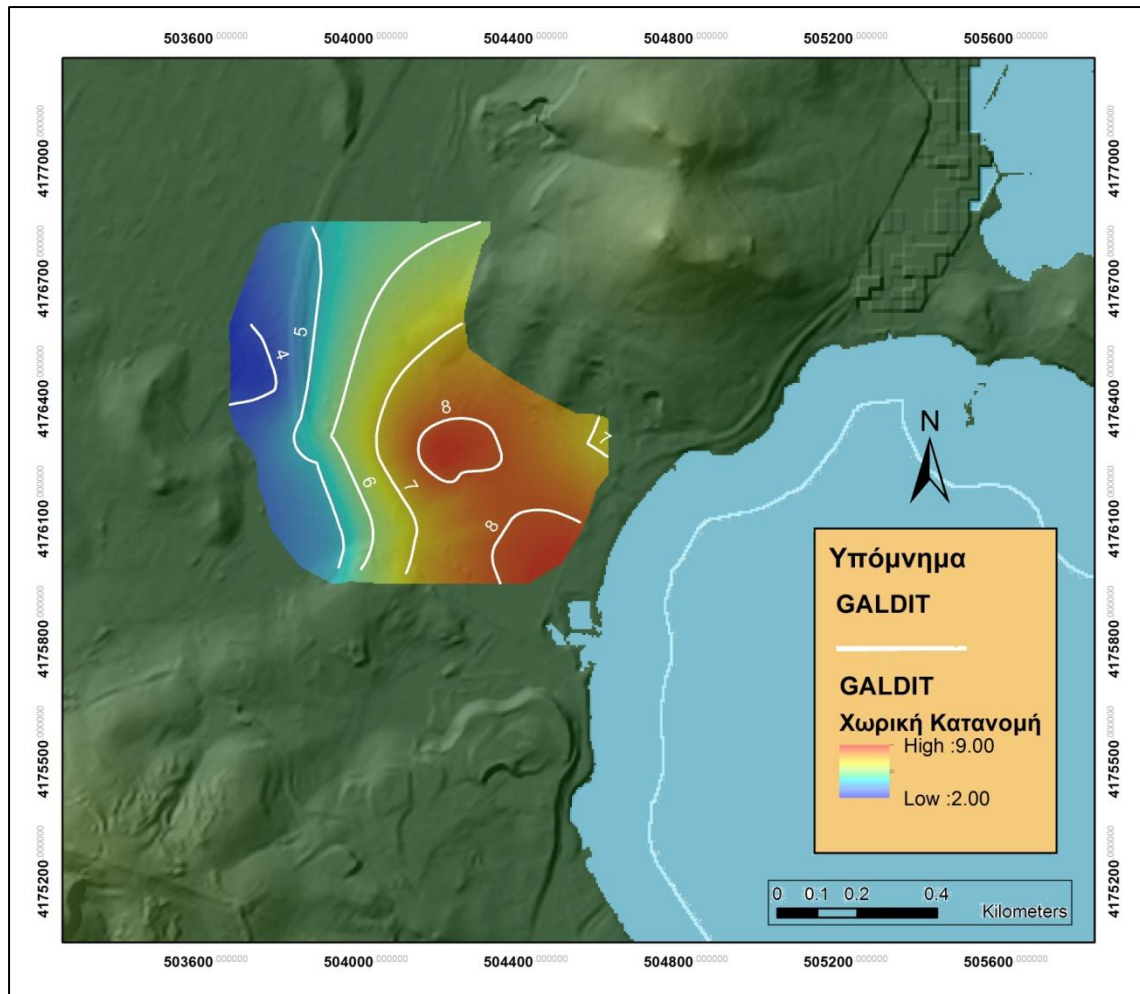
Σχήμα 8.5 Κατανομή της συνολικής βαρύτητας W6xR6 στον αλλουβιακό υδροφόρα του Θορικού

Τελικά υπολογίζεται ο δείκτης τρωτότητας του αλλουβιακού υδροφορέα του Θορικού σύμφωνα με τη σχέση 8.1. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στο παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 8.20 Δείκτης τρωτότητας GVI για κάθε σημείο παρακολούθησης

ΔΕΙΓΜΑ	GVI
W1	4,0
W3	5,0
W4	4,0
W6	4,7
W10	4,6
W11	3,8
W18	8,5
W19	8,5
W20	8,2
W24	7,0
W26	5,2
W32	7,5
W35	7,6
W36	6,9
W37	8,8
W39	6,0
W42	4,6
U10	5,7

Μετά από τη σχετική έρευνα για τις παραμέτρους του δείκτη και τον υπολογισμό της βαρύτητας τους σε κάθε σημείο-πηγάδι, στο τελευταίο χάρτη παρουσιάζεται η κατανομή του Δείκτη Τρωτότητας GALDIT στον αλλουβιακό υδροφορέα που αναπτύσσεται στη λεκάνη του Θορικού.



Σχήμα 8.6 Κατανομή του δείκτη τρωτότητας (GVI) στην περιοχή του Θορικού.

9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής προκύπτουν κάποια βασικά συμπεράσματα που διατυπώνονται στη συνέχεια:

1. Το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης είναι ένα πρόβλημα που εμφανίζεται στη Μεσογειακή λεκάνη αλλά και σε ολόκληρο τον κόσμο. Το πρόβλημα συνεχώς οξύνεται εξαιτίας της εντεινόμενης εκμετάλλευσης των υπόγειων υδατικών πόρων με αποτέλεσμα όλο και μεγαλύτερες ποσότητες θαλασσινού νερού να διεισδύουν στους παράκτιους υδροφορείς. Το φαινόμενο αυτό πρέπει να αντιμετωπιστεί άμεσα, πριν το πρόβλημα κατασταθεί μη αναστρέψιμο.

2. Για την αντιμετώπιση της θαλάσσιας διείσδυσης σε έναν υδροφόρο, είναι μέγιστης σημασίας ο προσδιορισμός του βαθμού του προβλήματος. Κάτι τέτοιο πραγματοποιείται με την ανάπτυξη ενός κατάλληλου συστήματος παρακολούθησης του υπό εξέταση υδροφόρου.

Η πιο κοινή τακτική, είναι η δημιουργία ενός δικτύου παρακολούθησης που απαρτίζεται από ικανό αριθμό πηγαδιών και γεωτρήσεων σε καίρια σημεία του υδροφορέα. Η λήψη δειγμάτων σε τακτά χρονικά διαστήματα είναι απαραίτητη για τη λήψη κατάλληλων δεδομένων πεδίου. Στα δείγματα πρέπει να πραγματοποιούνται μετρήσεις pH, θερμοκρασίας και ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας όπως και χημικές αναλύσεις βασικών ιόντων. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατό να καταγραφεί η κίνηση του μετώπου της υφαλμύρισης έτσι ώστε να προβλεφτεί η μελλοντική του εξέλιξη για να είναι δυνατή η αποτροπή της.

Εκτός της κλασσικής δειγματοληπτικής μεθόδου παρακολούθησης, έχουν αναπτυχθεί και άλλες μέθοδοι που θεωρούνται έμμεσες καθώς δεν υπάρχει άμεση πρόσβαση στον υδροφόρο. Τέτοιες είναι γεωφυσικές μέθοδοι (π.χ. DC, TDEM κ.α.) που βασίζονται στην εισαγωγή ρεύματος από το έδαφος ή την εκπομπή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, καταγράφοντας την πληροφορία του σήματος/κύματος που επιστρέφει. Το σήμα που επιστρέφει μεταφράζεται συνήθως σε ηλεκτρική αγωγιμότητα (SEC). Η υψηλή αγωγιμότητα είναι δείκτης θαλάσσιας διείσδυσης. Μία άλλη έμμεση μέθοδος παρακολούθησης του μετώπου της υφαλμύρισης είναι η τηλεσκοπική, η οποία χρησιμοποιεί δορυφορικές λήψεις και ανάλογα με τη βλάστηση και άλλες αλλαγές στο έδαφος που υποδεικνύουν υφαλμύριση στον υδροφόρο.

3. Η ευρύτερη περιοχή έρευνας αποτελεί κέντρο μεταλλευτικών και μεταλλουργικών διεργασιών και για αυτό το λόγο τα εδάφη της θεωρούνται επιβαρημένα με βαρέα μέταλλα. Οι χρήσεις γης της ευρύτερης περιοχής έρευνας αλλά και του Θορικού είναι κυρίως αστικές, γεωργικές, κτηνοτροφικές και με μία μικρή βιομηχανική δραστηριότητα. Η ανεξέλεγκτη χρήση εδαφοβελτιωτικών ουσιών από τους κατοίκους της περιοχής και η απόρριψη ρυπασμένων υδάτων και στερεών αποβλήτων στο περιβάλλον, συνδέονται με τις χρήσεις γης και είναι πιθανό να έχουν εισχωρήσει στον υπόγειο υδρολογικό σύστημα της περιοχής.

4. Η ανάλυση της βροχοπτώσης έγινε από τα δεδομένα του μετεωρολογικού σταθμού του Λαυρίου, του κοντινότερου σταθμού στη λεκάνη του Θορικού. Οι διαθέσιμες καταγεγραμμένες βροχοπτώσεις είναι των περιόδων 1970-1978 και 2009-2014. Οι βροχοπτώσεις των δύο περιόδων συγκρίθηκαν και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι στο μέσο όρο ετήσιας βροχοπτώσης υπάρχει μία αύξηση της τάξης των 60mm σε σχέση με το παρελθόν.

5. Η περιοχή της Λαυρεωτικής ανήκει τεκτονικά στην Αττικο-Κυκλαδική ζώνη. Κύριοι σχηματισμοί είναι τα μάρμαρα και οι σχιστόλιθοι ενώ σε ορισμένα σημεία εντοπίζεται φυλλίτης, γρανοδιορίτης και κερατίτης. Κύριο χαρακτηριστικό της ευρύτερης περιοχής είναι ένα ρήγμα επώθησης μεγάλης κλίμακας. Το ρήγμα ενώνει τις δύο τεκτονικές ενότητες, την ανώτερη και τη κατώτερη. Η κατώτερη αποτελείται από σχιστόλιθο που είναι έγκλειστος σε μάρμαρο και η ανώτερη αποτελεί το φυλλικό κάλυμμα. Στη περιοχή του Θορικού αναπτύσσεται μια λεκάνη με τεταρτογενείς αποθέσεις.

6. Η διαφορετική λιθολογία που υπάρχει στη λεκάνη του Θορικού έχει οδηγήσει στη δημιουργία διαφορετικών υδρογεωλογικών συστημάτων. Στις τεταρτογενείς αποθέσεις της κοιλάδας, αναπτύσσεται ένας ελεύθερος υδροφόρος που αντλείται μέσω πηγαδιών από τους κατοίκους της περιοχής. Η αδιαπέρατη βάση του υδροφόρου απαρτίζεται από σχιστόλιθους, στα δυτικά της λεκάνης. Στα ανατολικά, ο αλλουβιακός υδροφορέας υπέρκειται του ανώτερου μαρμάρου, στο οποίο αναπτύσσεται καρστική υδροφορία. Στον πιεζομετρικό χάρτη που σχεδιάστηκε, με πρωτογενή δεδομένα στάθμεων, φαίνεται καθαρά η πλευρική τροφοδοσία του αλλουβιακού υδροφορέα από το καρστικό καθώς και η τροφοδοσία του από τη διήθηση εφήμερων χειμάρρων. Στο χάρτη φαίνεται ακόμα ο άξονας απορροής του κοκκώδους σχηματισμού προς τη θάλασσα.

7. Κατά τη διάρκεια εκπόνησης της ανά χείρας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε πλήρης καταγραφή των σημείων υδροληψίας της υδρολογικής λεκάνης του Χειμάρρου του Θορικού. Από την καταγραφή προέκυψε ένα δίκτυο περίπου 100 σημείων υδροληψίας με κύρια την αρδευτική χρήση του υπόγειου νερού. Βάσει των παραπάνω, επιλέχθηκε κατάλληλος αριθμός σημείων (περίπου 20) τα οποία είναι ομοιογενώς κατανεμημένα στη λεκάνη του Θορικού, με σκοπό την ανάπτυξη δικτύου παρακολούθησης της στάθμης και της ποιότητας των υπόγειων νερών του αλλουβιακού υδροφορέα του Θορικού. Τα παραπάνω εισήχθησαν σε βάση δεδομένων σε συνδυασμό με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών.

8. Τρωτότητα είναι επιδεκτικότητα ή η ευαισθησία ενός υδροφορέα στους ρύπους. Η τρωτότητα περιγράφει την ευκολία με την οποία ένας ρύπος, που εισάγεται στην επιφάνεια του εδάφους, μπορεί να φθάσει στον υδροφορέα κάτω από συγκεκριμένες πρακτικές διαχείρισης των χρήσεων γης σε μια περιοχή, με καθορισμένα χαρακτηριστικά του ρύπου και της ευαισθησίας του υδροφορέα. Συμπεραίνεται ότι κάθε υδροφορέας διαφορετική τρωτότητα σε κάθε ρύπο που εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του ρύπου και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε υδροφορέα(π.χ. κοκκομετρία, λιθολογία, ακόρεστη ζώνη κ.α.). Για τη μέτρηση της τρωτότητας έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι βασισμένες στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του κάθε υδροφόρου. Τέτοιες είναι στατιστικές, βαθμονόμησης (π.χ. DRASTIC, GOD) και μέθοδοι προσομοίωσης (MODFLOW).

Για την παρακολούθηση του αλλουβιακού υδροφόρου του Θορικού πραγματοποιήθηκε έρευνα πεδίου με συλλογή δειγμάτων. Οι μετρήσεις και οι χημικές αναλύσεις που προέκυψαν είναι πρωτογενή δεδομένα και χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της παρούσας κατάστασης του υδροφορέα.

Οι μετρήσεις ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας (SEC) παρουσιάζουν ιδιαίτερα υψηλές τιμές σε όλη την έκταση του υδροφορέα, υπονοώντας υψηλές συγκεντρώσεις ιόντων. Η διακύμανση του pH είναι μικρή και κυμαίνεται σε φυσιολογικά επίπεδα

(μέση τιμή pH= 7.5) ενώ όλα τα δείγματα δείχνουν ελαφρώς αλκαλική φύση στην κλιμάκα pH.

Οι χημικές αναλύσεις ιόντων δείχνουν ιδιαίτερα αυξημένα ιόντα χλωρίου σε όλα τα δείγματα που συλλέχθηκαν επιβεβαιώνοντας την εισχώρηση της θάλασσας στον υδροφόρο. Όπως είναι λογικό, οι υψηλότερες συγκεντρώσεις εντοπίζονται κοντά στην γεινιάζουσα περιοχή του υδροφόρου με τη θάλασσα καθώς η θαλάσσια διείσδυση γίνεται εντονότερη από την ενδοχώρα προς την ακτή. Οι χαμηλές συγκεντρώσεις σε νιτρικά ιόντα δείχνουν ότι ο υδροφόρος δεν έχει επηρεαστεί σε μεγάλο βαθμό από τις εδαφοβελτιωτικές ουσίες που χρησιμοποιούνται από τους κατοίκους για τις γεωργικές καλλιέργειες. Επιπρόσθετα οι υψηλές συγκεντρώσεις θειικών ιόντων πιθανά να προέρχονται από τα όξινα κατάλοιπα των παλιών μεταλλείων που δραστηριοποιούνταν στη περιοχή. Οι αναλύσεις βαρέων μετάλλων δεν έδειξαν ιδιαίτερα ανησυχητικά αποτελέσματα, εκτός από κάποια δείγματα με υψηλές ενδείξεις σιδήρου.

9. Η τρωτότητα του υδροφόρου ως προς τη θαλάσσια διείσδυση εξαρτάται από τα εγγενή χαρακτηριστικά του υδατικού συστήματος. Για τη μέτρηση της τρωτότητας του υδροφόρου έχουν δημιουργηθεί κάποιες μέθοδοι.

Ο προσδιορισμός της τρωτότητας στον αλλουβιακό υδροφόρο του Θορικού έγινε με τη χρήση της μεθόδου βαθμονόμησης GALDIT. Ο δείκτης τρωτότητας GALDIT δίνει έμφαση στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του κοκκώδους σχηματισμού. Αυτά περιλαμβάνουν:

- Το είδος του υδροφόρου (υπό πίεση, ελεύθερος, υπό μερική πίεση, περιορισμένος πλευρικά)
- Η υδραυλική αγωγιμότητα
- Το υδραυλικό φορτίο από το μέσο ύψος της στάθμης της θάλασσας
- Η απόσταση του σημείου εξέτασης από την ακτή
- Η υφιστάμενη κατάσταση της υφαλμύρισης του υδροφόρου
- Το πάχος του υδροφόρου

Σύμφωνα με το GVI (GALDIT VULNERABILITY INDEX), κάθε σημείο παρακολούθησης εξετάζεται μεμονωμένα ως προς τις παραπάνω παραμέτρους. Κάθε παράμετρος έχει συγκεκριμένη βαρύτητα και βαθμονομείται ανάλογα με τα στοιχεία που προκύπτουν από το σημείο παρακολούθησης. Τελικά ο δείκτης υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση :

$$GVI = \frac{\sum_{i=1}^6 w_i r_i}{\sum_{i=1}^6 w_i}$$

Όπου:

w_i = η βαρύτητα κάθε παραμέτρου- δείκτη

r_i = η βαθμονόμηση της παραμέτρου σε συγκεκριμένα σημεία.

Στη λεκάνη του Θορικού υπολογίστηκε ο δείκτης GALDIT σε επιλεγμένα σημεία μετρήσεων. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα και τους χάρτες κατανομής που σχεδιάστηκαν, ο μεγαλύτερος βαθμός τρωτότητας εντοπίζεται κοντά στην επαφή του υδροφόρου με τη θάλασσα ενώ εξασθενεί προς την ενδοχώρα.

10. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

10.1.Ελληνική Βιβλιογραφία

- Αγγελοπούλου Σ. (2009), Συγκρότηση Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών για τη παράκτια ζώνη του δήμου Λαυρεωτικής, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών Ε.Μ.Π., σελ.74-78
- Βλασσοπούλου Α., Σταθοπούλου Κ. (2014). Γεωφυσική έρευνα στη κοιλάδα του Θορικού, για τον εντοπισμό στρωματογραφίας και του μετώπου της υφαλμύρισης. Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών Ε.Μ.Π.
- Βουδούρης Κ., 2009. Υδρογεωλογία Περιβάλλοντος, Υπόγεια νερά και Περιβάλλον, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, σελ 80-81,91, 98-103, 255-263, 403-418
- Καλλέργης, Γ. (2000). Εφαρμοσμένη Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία. Τόμος Β'. Εκδόσεις ΤΕΕ, Αθήνα, σελ. . 96-98, 327-336
- Todd D., Mays L. (2005). Groundwater Hydrology. 3rd Edition. Wiley,USA, pp. 589-601
- Καλλιώρας Α., (2008). Διαχείριση υπόγειων υδατικών πόρων σε υδροφόρους που υπόκεινται σε καθεστώς θαλάσσιας διείσδυσης. Η περίπτωση του δυτικού παράκτιου τμήματος του Ν. Ροδόπης. Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Δ.Π.Θ., σελ. 69-75, 142-155, 167-168
- Παυλόπουλος Κ. (1997), Γεωμορφολογική εξέλιξη της Νότιας Αττικής, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας Ε.Κ.Π.Α., σελ. 28

10.2. Διεθνής Βιβλιογραφία

- Ahmed M. A., Abdel Samie S. G., Badawy H. A. (2013). Factors controlling mechanisms of groundwater salinization and hydrogeochemical processes in the Quaternary aquifer of the Eastern Nile Delta, Egypt. Environmental Earth Sciences, Vol 68, No 2, pp. 369-393
- Appelo C.A.J., Postma D.(2005). Geochemistry, groundwater and pollution. 2nd Edition. A.A. Balkema Publishers, Great Britain, pp. 242-247
- Astaras T., Oikonomidis D. (2006). Remote Sensing techniques to monitoring coastal plain areas suffering from saltwater intrusion and detection of fresh water discharge in coastal, karstic areas: case studies from Greece. Groundwater and Ecosystems, Vol 70, pp. 2-8
- Baziotis I., Mposkos E., Origin of metabasites from upper tectonic unit of the Lavrion area (SE Attica, Greece):Geochemical implications for dual origin with distinct provenance of blueschist and greenschist's protoliths. Lithos, Vol 126, No. 3-4, pp.161-173
- Bear J., Cheng A., Sorek S., Ouazar D., Herrera I. (1999). Seawater intrusion in coastal aquifers-Concepts, Methods and Practices, Springer Science+Business Media Dordrecht,Israel, pp.13-40, 69-72
- Essink Gualbert H. P. Oude (2001). Density Dependent Groundwater Flow, Academic Publishing of Utrecht University, f. 12.50.
- Food and Agricultural Organization of the United Nations (1997). Seawater Intrusion in Coastal Aquifers-Guidelines for Study, Monitoring and Control. FAO, Italy, pp.12-24
- Garing C., Luquot L., Pezard P.A., Gouze P. (2013). Geochemical investigations of saltwater intrusion into the coastal carbonate aquifer of Mallorca, Spain. Applied Geochemistry, Vol.39, No 1, pp.1-9

- Krohe A, Mposkos E., Diamantopoulos A, Kaouras G.(2010). Formation of basins and mountain ranges in Attica (Greece): The role of Miocene to Recent low-angle normal detachment faults. *Earth-Science Reviews*, Vol. 98, No 1-2, pp.81-104
- Liati A, Skarpelis N., Fanning C.M.(2012), Late Permian–Early Triassic igneous activity in the Attic Cycladic Belt (Attica): New geochronological data and geodynamic implications. *Tectonophysics*, Vol.595-596, pp.140-147
- Lobo Ferreira J. P., Chachadi A. G., Diamantino C., Henriques M. J., (2005). Assessing aquifer vulnerability to seawater intrusion using GALDIT method: Part 1 – Application to the Portuguese Aquifer of Monte Gordo. *Proceedings of the 4th InterCeltic Colloquium on Hydrology and Management of Water "Water in Celtic Countries: Quantity, Quality and Climate Variability"*, eds. J.P. Lobo Ferreira and José M. P. Vieira, held at Universidade do Minho Guimarães, Portugal, July 11- 13, 2005, <http://www.iahs.info/>, IAHS (International Association of Hydrological Sciences), Publication 310, pp. 1-12
- Lobo Ferreira J. P., Chachadi A. G., Diamantino C., Henriques M. J., (2005). Assessing aquifer vulnerability to seawater intrusion using GALDIT method: GALDIT Indicators Description. . *Proceedings of the 4th InterCeltic Colloquium on Hydrology and Management of Water "Water in Celtic Countries: Quantity, Quality and Climate Variability"*, eds. J.P. Lobo Ferreira and José M. P. Vieira, held at Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, July 11- 13, 2005, <http://www.iahs.info/>, IAHS (International Association of Hydrological Sciences), Publication 310, pp.1-9
- Melloul A. J., Goldenberg L. C.(1997). Monitoring of Seawater Intrusion in Coastal Aquifers: Basics and Local Concerns. *Journal of Environmental Management*, Vol.51, No1, pp.78-85
- Polemio M., Dragone Z V., Limoni Z P. P. (2009). Monitoring and methods to analyse the groundwater quality degradation risk in coastal karstic aquifers(Apulia, Southern Italy). *Environmental Geology*, Vol.58, No 2, pp.299-312
- Psychoyou ., Mimides T., Rizos S., Sgoubopoulou A. (2006). Groundwater hydrochemistry at Balkan coastal plains — the case of Marathon of Attica, Greece. *Desalination*, Vol. 213, No 1-3, pp. 1-8.
- Skarpelis N., Tsikouras V., Pe-Piper G.(2008), The Miocene igneous rocks in the Basal Unit of Lavrion (SE Attica, Greece): petrology and geodynamic implications. *Geological Magazine*, Vol 145, No.1, pp.1-15
- Stamatis G., Voudouris K., Karefilakis F. (2001), Groundwater pollution by heavymetals in historical Mining area of Lavrio, Attica, Greece. *Water, Air, and Soil Pollution*, Vol.128, No. 1-2, pp.63-68
- Trabelsi F., Mammou A.B., Tarhouni J., Piga C., Ranieri G. (2012). Delineation of saltwater intrusion zones using the time domain electromagnetic method: the Nabeul–Hammamet coastal aquifer case study (NE Tunisia). *Hydrological Processes*, Vol. 27, No 14, pp. 2005-2018