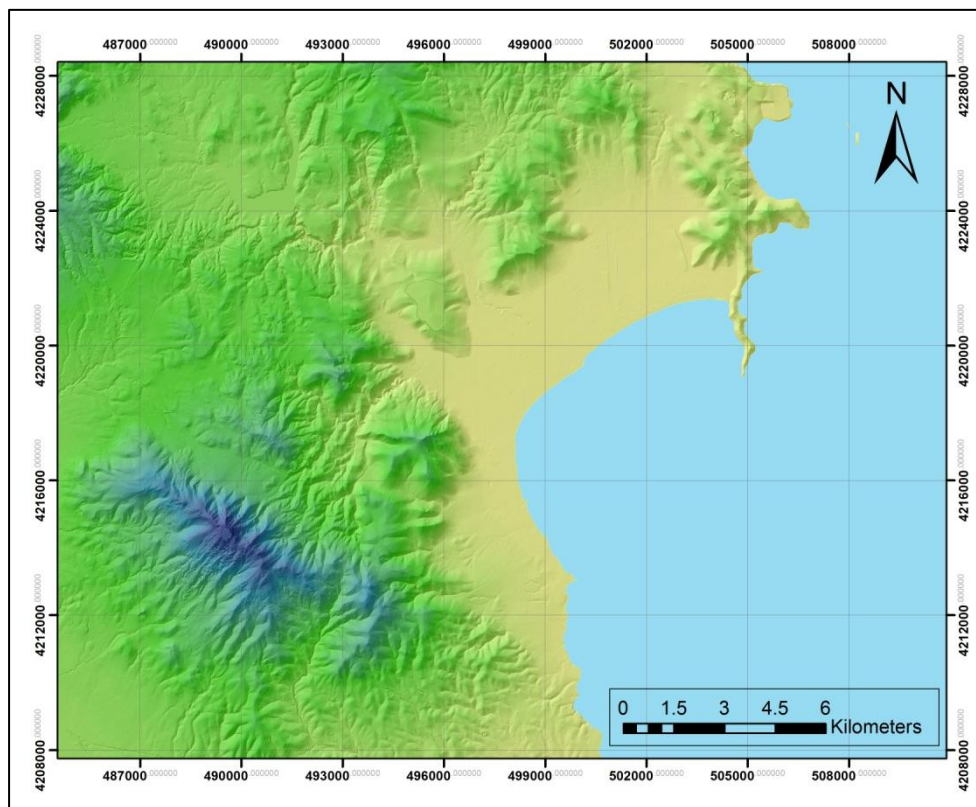




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Δ.Π.Μ.Σ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ
ΠΟΡΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

«ΕΝΝΟΙΟΛΟΓΙΚΟ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ
ΚΟΚΚΩΔΟΥΣ ΠΑΡΑΚΤΙΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ»
Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΜΑΡΑΘΩΝΑ ΑΤΤΙΚΗΣ



Μάρθα Περδικάκη

Επιβλέπων Καθηγητής:

Α. Καλλιώρας, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, 2016

Περιεχόμενα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	7
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	9
ABSTRACT.....	10
1.ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΡΕΥΝΑΣ/ΕΚΠΟΝΗΣΗΣ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ.....	11
2. ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΚΟΚΚΩΔΗ ΥΔΡΟΦΟΡΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	13
2.1 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ.....	13
2.2 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑΣ.....	14
2.2.1 ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΓΛΥΚΟΥ – ΘΑΛΑΣΣΙΝΟΥ ΝΕΡΟΥ	16
2.2.2 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ – ΑΛΑΤΟΤΗΤΑ.....	19
2.2.3 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΥΔΡΟΜΑΣΤΕΥΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΣΤΗ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ	19
2.2.4 ΑΝΥΨΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	20
2.2.5 ΥΔΡΟΧΗΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΚΟΚΚΩΔΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ.....	21
2.2.6 ΕΝΔΕΙΞΗ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ	22
2.3 ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	23
2.3.1 ΤΥΝΗΣΙΑ.....	23
2.3.2 ΑΛΓΕΡΙΑ	24
2.3.3 ΙΣΡΑΗΛ.....	25
2.3.4 ΙΣΠΑΝΙΑ	25
2.3.5 ΑΙΓΥΠΤΟΣ	26
3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	27
3.1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ.....	27
3.2 ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΕΙΣ ΠΑΡΕΜΒΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΧΡΗΣΕΙΣ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΚΑΙ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΥ ΝΕΡΟΥ.....	29
3.2.1 ΦΡΑΓΜΑ ΜΑΡΑΘΩΝΑ	29
3.2.2 ΦΡΑΓΜΑ ΡΑΠΕΝΤΩΣΑΣ	30
3.2.3 ΤΑΦΡΟΙ ΑΠΟΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ.....	31
3.2.4 ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΑ ΥΔΡΟΜΑΣΤΕΥΤΙΚΑ ΕΡΓΑ	31
3.3 ΑΝΤΛΙΟΣΤΑΣΙΟ ΜΑΚΑΡΙΑΣ ΠΗΓΗΣ	31
3.4 ΟΛΥΜΠΙΑΚΟ ΚΩΠΗΛΑΤΟΔΡΟΜΙΟ ΣΧΙΝΙΑ.....	32
3.4.1 ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	32
3.4.2 ΥΔΡΑΥΛΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ.....	33
4. ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΕΣ – ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	36

4.1 ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	36
4.2 ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ.....	39
4.2.1 ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	39
4.2.2 ΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	41
4.2.3 ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΔΙΑΔΑΣ ΜΑΡΑΘΩΝΑ.....	42
4.2.4 ΤΕΚΤΟΝΙΣΜΟΣ	43
5. ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ.....	46
5.1 ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΚΑΘΕΣΤΩΣ ΜΑΡΑΘΩΝΑ.....	46
5.1.1 ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΥΔΡΟΦΟΡΟ ΣΥΣΤΗΜΑ.....	46
5.1.1.3 Καρστικό σύστημα μαρμάρων Αγίας Μαρίνας.....	47
5.1.2 ΚΟΚΚΩΔΕΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟ ΣΥΣΤΗΜΑ.....	48
6. ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ ΠΕΔΙΑΔΑΣ ΜΑΡΑΘΩΝΑ	54
6.1 ΕΡΕΥΝΑ ΠΕΔΙΟΥ- ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ.....	54
6.1.1 ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ (SPECIFIC ELECTRICAL CONDUCTIVITY, SEC)	56
6.1.2 pH.....	59
6.1.3 Θερμοκρασία (⁰ C).....	60
6.2 ΧΗΜΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ	61
6.2.1 Συγκέντρωση ιόντων χλωρίου (Cl ⁻).....	62
6.2.2 Συγκέντρωση όξινων ανθρακικών ιόντων (HCO ₃ ⁻).....	63
6.3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΧΗΜΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ.....	65
6.3.1 Υδροχημικός τύπος νερών	65
6.3.2 Ταξινόμηση κατά Durov	66
6.3.3 Ταξινόμηση κατά Piper	68
6.3.4 Ταξινόμηση κατά Wilcox.....	70
7. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΡΟΗΣ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ. 72	
7.1 ΕΝΝΟΙΟΛΟΓΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ	72
7.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ.....	73
7.3 Ο ΚΩΔΙΚΑΣ MODFLOW	74
7.3.1 Η ΕΞΙΣΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ.....	74
7.3.2 ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ	75
7.3.3 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	75
7.3.4 ΑΡΧΙΚΕΣ ΚΑΙ ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	75
7.3.5 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ.....	76

7.4 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ ΚΟΚΚΩΔΟΥΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΑΡΑΘΩΝΑ	79
7.4.1 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΝΝΟΙΟΛΟΓΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ	79
7.4.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ModelMuse 3.6.3 ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ	80
7.4.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	85
8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	88
9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	92
9.1 ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	92
9.2 ΔΙΕΘΝΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	93
9.3 ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΟΙ ΤΟΠΟΙ.....	94

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή εκπονήθηκε στα πλαίσια του Διατμηματικού- Διεπιστημονικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων» του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Το συγκεκριμένο θέμα ανατέθηκε από το εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας τη Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, υπό την επίβλεψη του Ανδρέα Καλλιώρα, Επίκουρου καθηγητή του τομέα Γεωλογικών επιστημών της σχολής. Το θέμα που πραγματεύεται η διατριβή, τη μελέτη του εννοιολογικού υδρογεωλογικού μοντέλου παράκτιων κοκκωδών υδροφόρων σχηματισμών, εστιάζοντας στην έρευνα του αλλουβιακού παράκτιο υδροφορέα του Μαραθώνα.

Για τη διεξαγωγή της μεταπτυχιακής διατριβής, πραγματοποιήθηκαν οι παρακάτω εργασίες:

- Βιβλιογραφική επισκόπηση, από την ελληνική και τη παγκόσμια βιβλιογραφία, σε θέματα που αφορούν τα γεωλογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά των παράκτιων κοκκωδών υδροφορέων, το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης, τα εννοιολογικά υδρογεωλογικά μοντέλα και τη μαθηματική προσομοίωση των υδροφορέων.
- Συλλογή και επεξεργασία υπαρχόντων γεωμορφολογικών, γεωλογικών και υδρογεωλογικών στοιχείων της ευρύτερης περιοχής έρευνας.
- Την έρευνα πεδίου στην παράκτια πεδιάδα του Μαραθώνα με δημιουργία ενός δικτύου παρακολούθησης του αλλουβιακού και καρστικού υδροφορέα και 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 εξαγωγή συμπερασμάτων .
- Τη μαθηματική προσομοίωση του παράκτιου κοκκώδους υδροφόρου του Μαραθώνα, με χρήση του κώδικα MODFLOW 2005.

Η παρούσα διατριβή δεν θα είχε πραγματοποιηθεί χωρίς την αμέριστη υποστήριξη:

- Του κ. Ανδρέα Καλλιώρα, με τη συνεχή και ουσιαστική καθοδήγηση και υποστήριξη του καθ 'όλη τη διάρκεια της διεξαγωγής της μεταπτυχιακής εργασίας και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε ως προς την ανάληψη της
- Του κ. Χρήστου Πουλιάρη, υποψήφιου διδάκτορα του T.U. Darmstadt, για την υπομονή και επιμονή του να διαλευκάνει οποιαδήποτε απορία μου σε καθημερινή βάση
- Του κ. Αναστάσιου Μητρόπαπα, υποψήφιου διδάκτορα της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών Ε.Μ.Π., για τη καθημερινή του βοήθεια και υποστήριξη σε θέματα χρήσης λογισμικών και έρευνας πεδίου, καθώς χωρίς τη συνοδεία του δεν θα είχαν πραγματοποιηθεί οι μετρήσεις υπαίθρου
- Τη κα. Ελένη Βασιλείου μέλος του Εργαστηριακού Διδακτικού Προσωπικού της σχολής Μηχανικών Μεταλλειολόγων Μεταλλουργών

Ε.Μ.Π για τη βοήθεια που μου παρείχε σε θέματα βιβλιογραφίας και υδροχημείας.

- Του κ. Ιωάννη Κουμαντάκη, Ομότιμου Καθηγητή της Σχολής Μηχ. Μετ. Μετ. Ε.Μ.Π. για τη διάθεση του να προσφέρει τις γνώσεις του πάνω στην υδρογεωλογία της περιοχής μελέτης
- Του κ. Επαμεινώνδα Φλώρου, προπτυχιακού φοιτητή της σχολής Μηχ. Μετ. Μετ. του Ε.Μ.Π. για τη συνοδεία και τη βοήθεια του στην έρευνα πεδίου, τη δειγματοληψία και τις χημικές αναλύσεις
- Του κ. Κωνσταντίνου Μαρκαντώνη, μέλους του Εργαστηριακού Διδακτικού Προσωπικού της σχολής Μηχ. Μετ. Μετ. Ε.Μ.Π. για την προσφορά των υδρογεωλογικών γνώσεων για τη πεδιάδα του Μαραθώνα, που οδήγησαν στην ικανοποιητική ανάπτυξη του μαθηματικού μοντέλου,

Τους οποίους ευχαριστώ εκ βαθέων.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη μάζα των παράκτιων κοκκωδών σχηματισμών αναπτύσσονται υπόγεια υδροφόρα στρώματα. Η υδραυλική επαφή αυτών των συστημάτων με τη θάλασσα σε συνδυασμό με την υπεράντληση τους, τα καθιστά ευάλωτα ως προς το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης, υποβαθμίζοντας έτσι τα ποσοτικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά τους. Η γνώση των υδρογεωλογικών συνθηκών ενός τέτοιου σχηματισμού είναι απαραίτητη για τη διαφύλαξη του και τη μελλοντική του εξυγίανση. Η παρούσα διατριβή πραγματεύεται το εννοιολογικό υδρογεωλογικό μοντέλο του κοκκώδους παράκτιου υδροφορέα του Μαραθώνα.

Ο αλλουβιακός υδροφορέας του Μαραθώνα βρίσκεται στο βορειοανατολικό άκρο της Αττικής και αποτελεί ένα τυπικό Μεσογειακό υδροσύστημα. Οι εργασίες που πραγματοποιήθηκαν για την έρευνα του υδρογεωλογικού συστήματος, περιλαμβάνουν βιβλιογραφική αναζήτηση σε ζητήματα σχετικά με τη θαλάσσια διείσδυση, συγκέντρωση υπαρχόντων γεωλογικών, κλιματικών, γεωμορφολογικών και υδρογεωλογικών δεδομένων που έχουν πραγματοποιηθεί στην ευρύτερη περιοχή έρευνας και έρευνα πεδίου με λήψη και επεξεργασία πρωτογενών δεδομένων από τα πηγάδια και τις γεωτρήσεις της περιοχής. Επιπρόσθετα, πραγματοποιήθηκαν χημικές αναλύσεις των δειγμάτων, ως προς τα βασικά ιόντα. Τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων και των μετρήσεων παρουσιάστηκαν σε κατάλληλους χάρτες και σχετικά διαγράμματα. Τέλος, το κοκκώδες υδροφόρο σύστημα προσομοιώθηκε με τη χρήση του κώδικα MODFLOW2005 και του λογισμικού πακέτου ModelMuse 3.6.3 της USGS, ενώ τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συγκρίθηκαν με πραγματικές μετρήσεις.

ABSTRACT

Coastal aquifer layers are formed as pore water in coastal granular formations. The hydraulic connection of such formations with the sea, combined with overexploitation, makes them vulnerable, in terms of quality and water budget. Knowing the hydrogeologic condition of a formation is vital in order to manage groundwater aquifers properly. The thesis discusses the conceptual hydrogeological model of coastal granular aquifer of Marathon basin.

The alluvial aquifer of Marathon is located in the northeast of Attica, Greece. It is formed as a typical Mediterranean hydrogeological system. The work carried out for this thesis, included bibliographical references in the issue of seawater intrusion in coastal aquifers, collection of geological, geomorphological and hydrogeological data from past surveys in the study area and field research including collecting and processing raw data of wells and drills of Marathon plain. In addition, chemical analysis was carried out in the laboratory. The results of chemical analysis and measurements (piezometric level, ion distribution etc) were proceeded and presented in charts and maps. Finally, the granular aquifer of Marathon plain was simulated in MODFLOW 2005 code, using ModelMuse 3.6.3 of USGS as a graphical interface. The results of the simulation were correlated with real data.

1.ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΡΕΥΝΑΣ/ΕΚΠΟΝΗΣΗΣ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Τα ιζήματα και οι ιζηματογενείς σχηματισμοί είναι δυνατόν να διαμορφώνουν στη μάζα τους υδροφόρα στρώματα, φρεάτια ή/και υπό πίεση. Οι υδρογεωλογικές συνθήκες τέτοιων υδροφόρων καθορίζονται από το περιβάλλον στο οποίο αναπτύσσονται. Στην Ελλάδα και γενικότερα στη Μεσόγειο, στα παράκτια πεδία, αναπτύσσονται παράκτιοι κοκκώδεις υδροφόροι σχηματισμοί οι οποίοι παρουσιάζουν ιδιαίτερη υδρογεωλογική συμπεριφορά εξαιτίας της υδραυλικής του επικοινωνίας με τη θάλασσα.

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή, πραγματεύεται τη διερεύνηση τέτοιων υδροφόρων συστημάτων, ως προς τη λειτουργία τους και την αλληλεπίδραση τους με άλλα υδροφόρα στρώματα. Η διερεύνηση αυτή υλοποιείται μέσα από τη μελέτη του εννοιολογικού υδρογεωλογικού μοντέλου του παράκτιου κοκκώδους υδροφόρου σχηματισμού του Μαραθώνα. Η διπλωματική εργασία περιλαμβάνει έρευνα πεδίου στη πεδιάδα του Μαραθώνα, με εντοπισμό και καταγραφή ενός δικτύου παρακολούθησης πηγαδιών και γεωτρήσεων στον αλλουβιακό και καρστικό υδροφόρο του υπόγειου υδραυλικού συστήματος της περιοχής.

Η μεθοδολογία που ακολουθείται, περιλαμβάνει αρχικά βιβλιογραφική ανασκόπηση για τα γεωλογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά των παράκτιων κοκκωδών υδροφορέων. Ιδιαίτερη έμφαση δίδεται στη ποιοτική και ποσοτική τους υποβάθμιση εξαιτίας των εντατικών αντλήσεων και του φαινομένου της θαλάσσιας διείσδυσης. Το συγκεκριμένο φαινόμενο εξετάζεται με πλήρη περιγραφή των συνθηκών ροής στον υδροφορέα αλλά και των ποιοτικών χαρακτηριστικών του υπογείου νερού κατά τη δράση της θαλάσσιας διείσδυσης. Ακόμη, γίνεται αναφορά σε μελέτες περίπτωσης τέτοιων παράκτιων συστημάτων στη λεκάνη της Μεσογείου. Η εκτενής περιγραφή της περιοχής μελέτης αποτέλεσε αναπόσπαστο κομμάτι της έρευνας προκειμένου να εξεταστούν όλα εκείνα τα στοιχεία που επιδρούν στη διαμόρφωση των συνθηκών τροφοδοσίας και εκφόρτισης του υδροφορέα. Σε επόμενο κεφάλαιο περιγράφεται η γεωλογική δομή και οι γεωμορφολογικές συνθήκες της πεδιάδας του Μαραθώνα και της ευρύτερης περιοχής έρευνας καθώς και οι υδρογεωλογικές συνθήκες που επικρατούν, βάσει παλαιότερων μελετών και διατριβών.

Κατά την έρευνα πεδίου που πραγματοποιήθηκε στην πεδιάδα τον Ιούλιο του 2015, καταγράφηκαν πάνω από 100 σημεία από τα οποία αντλούνται το κοκκώδες και το καρστικό υδροφόρο στρώμα. Τον Οκτώβριο του 2015, μετά το πέρας της ξηρής περιόδου και τη παύση των αντλήσεων, έλαβε χώρα στη περιοχή δειγματοληψία υπογείων νερών και ταυτόχρονες σταθμημετρήσεις, καθώς και επί τόπου μετρήσεις ενδεικτικών ποιοτικών παραμέτρων του νερού (θερμοκρασία, pH, ηλεκτρική αγωγιμότητα). Στη συνέχεια τα δείγματα που λήφθηκαν, μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών Ε.Μ.Π., και τελικά αναλύθηκαν ως προς τα βασικά ιόντα.

Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων των χημικών αναλύσεων πραγματοποιήθηκε μέσω χαρτών κατανομών των ιόντων στον αλλουβιακό υδροφορέα του Μαραθώνα αλλά και διαγράμματα που χαρακτηρίζουν το υπόγειο νερό βάσει της χημικής του σύστασης. Το ενδιαφέρον επικεντρώθηκε στις τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και στις συγκεντρώσεις χλωριόντων, στοιχεία που

αποτελούν ένδειξη ή μη θαλάσσιας διείσδυσης. Από τις μετρήσεις στάθμης σχεδιάστηκε ο πιεζομετρικός χάρτης του αλλουβιακού υδροφορέα έτσι ώστε να περιγραφούν η διεύθυνση ροής του υπογείου νερού, οι ζώνες τροφοδοσίας και οι άξονες αποστράγγισης καθώς και τα είδη υδραυλικής επικοινωνίας με παρακείμενα υδάτινα σώματα (καρστικός υδροφορέας, υγρότοπος Σχινιά και θάλασσα).

Τέλος, για τη βαθύτερη κατανόηση του υδρογεωλογικού συστήματος, επιχειρήθηκε η προσομοίωση του υδροφορέα μέσω μαθηματικού μοντέλου. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε με χρήση του κώδικα MODFLOW 2015.

2. ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΚΟΚΚΩΔΗ ΥΔΡΟΦΟΡΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Οι παράκτιοι οικισμοί αναπτύσσονται από την αρχαιότητα κατά μήκος της ακτογραμμής σε όλο τον κόσμο. Ο Essink (2001), αναφέρει χαρακτηριστικά ότι περίπου 50% του συνολικού πληθυσμού της γης απαντάται σε παράκτια ζώνη εύρους 60 km από την ακτογραμμή. Η ανάγκη των κατοίκων για γλυκό νερό είχε ως αποτέλεσμα την αναζήτηση νερού στο υπέδαφος και επομένως την εκμετάλλευση των υπόγειων υδροφόρων συστημάτων που αναπτύσσονται στο υπέδαφος των παράκτιων πεδίων.

Σύμφωνα με το Fetter (2000), παράκτια πεδιάδα είναι μία πεδινή περιοχή που οριοθετείται προς την ενδοχώρα από ψηλότερες ορεινές περιοχές και προς τη θάλασσα από την ακτογραμμή. Τα παράκτια υδροφόρα συστήματα που διαμορφώνονται σε αυτές τις πεδιάδες, διαφέρουν ως προς τα χαρακτηριστικά τους, ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά (γεωλογικά, κλιματικά, μορφολογικά κτλ.) της εκάστοτε λεκάνης.

2.1 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

Ένας από τους καθοριστικούς παράγοντες που διαμορφώνουν την ακτή και τη παράκτια ζώνη, είναι η γεωλογία της ευρύτερης περιοχής. Παράκτια υδροφόρα στρώματα μπορούν να σχηματιστούν σε συμπαγές πέτρωμα (π.χ. ασβεστόλιθος, μάρμαρο), είτε σε συγκολλημένο κοκκώδες υλικό (π.χ. ψαμίτες, κροκαλοπαγή), είτε σε κοκκώδη χαλαρά στρώματα.

Οι παράκτιες πεδιάδες μπορεί να αποτελούν κομμάτι θαλάσσιου πυθμένα που ήταν καλυμμένο από τη θάλασσα κατά το παρελθόν. Γεωλογικά, η παραθαλάσσια ζώνη μπορεί να είναι όμοια με τη παρακείμενη ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα. Οι αποθέσεις είναι ηπειρωτικές ή και θαλάσσιες. Οι πρώτες συνήθως εντοπίζονται προς την ενδοχώρα ενώ οι δεύτερες προς την ακτή αν και λόγω της μεταβαλλόμενης στάθμης της θάλασσας, τα ηπειρωτικά και θαλάσσια στρώματα εναλλάσσονται.

Οι παράκτιες αποθέσεις, τις περισσότερες φορές, περιλαμβάνουν τεταρτογενή ιζήματα ενώ συχνά εντοπίζονται τριτογενείς και μεσοζωϊκές αποθέσεις. Οι παλαιότερες εμφανίζονται κυρίως προς την ενδοχώρα ενώ οι νεότερες τεταρτογενείς και πρόσφατες εντοπίζονται επιφανειακά κοντά στην ακτή. Τα κοκκώδη στρώματα αποτίθενται σε στρώσεις ή δημιουργούν φακούς ποικίλου πάχους.

Η κοκκομετρική διαβάθμιση των συστημάτων αυτών ποικίλει. Ένας τυπικός κοκκώδης υδροφορέας αποτελείται από διάφορες ενστρωματώσεις ηπειρωτικών άμμων και χαλικιών ή θαλάσσιων άμμων ενώ τα αδιαπέρατα στρώματα δημιουργούνται από την απόθεση ηπειρωτικής ή/και θαλάσσιας αργίλου και ιλύος.

Σε ένα παράκτιο πεδίο, οι ηπειρωτικές αποθέσεις δημιουργούνται από τη δράση των ποταμών και των χειμάρρων οι οποίοι μεταφέρουν κόκκους που προέρχονται από τη διάβρωση των πετρωμάτων της ευρύτερης περιοχής και αποτίθενται, πάνω σε ένα σταθερό υπόβαθρο, κυρίως σε περιοχές με χαμηλό ανάγλυφο.

Στις παράκτιες πεδιάδες, στο πέρας των γεωλογικών χρόνων πραγματοποιούνται τα φαινόμενα της επίκλυσης και απόσυρσης της θάλασσας. Ως

επίκλυση ορίζεται η διεργασία μετανάστευσης της ακτογραμμής προς την ξηρά ενώ απόσυρση ορίζεται το αντίθετο φαινόμενο. Κατά τη δράση αυτών των φαινομένων, μέρος της παράκτιας πεδιάδας μπορεί στο παρελθόν να είχε κατακλυστεί από θάλασσα. Τα φαινόμενα αυτά οδηγούν στη βύθιση και τελικά στην απόθεση θαλάσσιων ιζημάτων. Ένα από τα παραδείγματα αυτού του φαινομένου στον ελληνικό χώρο είναι η θαλάσσια επίκλυση της πεδιάδας του Μαραθώνα κατά το Ολόκαινο (Μαργώνη, 2006).

2.2 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

Στη μάζα των κοκκωδών παράκτιων συστημάτων αναπτύσσονται οι παράκτιοι υδροφορείς. Λόγω της συνήθους υδραυλικής επικοινωνίας τους με τη θάλασσα, κατά την άντληση τους, η φυσική ισορροπία του συστήματος διαταράσσεται με αποτέλεσμα τη διείσδυση της θάλασσας στον υδροφορέα. Για την αποφυγή και την καταστολή αυτού του φαινομένου είναι απαραίτητη η συνεχής παρακολούθησή τους και η γνώση της λειτουργίας του συστήματος (σχέσεις τροφοδοσίας με γειτονικά υδατικά συστήματα, διεύθυνση ροής, εκφορτίσεις κτλ.).

Η φυσική ροή των παράκτιων υδροφορέων ακολουθεί συνήθως την κλίση του εδάφους, δηλαδή από την ενδοχώρα με τα υψηλότερα υψόμετρα προς την ακτογραμμή. Οι κύριες πηγές φυσικής τροφοδοσίας τέτοιων συστημάτων είναι συνήθως άλλα υδροφόρα συστήματα (όχι απαραίτητα κοκκώδη) που βρίσκονται σε υδραυλική επικοινωνία, τα κατακρημνίσματα, επιφανειακές υδάτινες μάζες (π.χ. ποτάμια) κ.α.. Η τροφοδοσία πραγματοποιείται στην ενδοχώρα και μεγάλο μέρος του νερού εκφορτίζεται από τον υδροφορέα προς στη θάλασσα. Οι ποσότητες αυτές είναι συνάρτηση των εισροών που έχει ο υδροφορέας και της ποσότητας νερού που μπορεί να «ελευθερώνεται» από αυτόν μέσω διαφόρων φυσικών μηχανισμών. Κατά το Fetter (2000), οι φυσικοί μηχανισμοί εκφόρτισης του νερού από έναν κοκκώδη παράκτιο γεωλογικό σχηματισμό είναι οι:

- Εξατμισοδιαπνοή
- Απευθείας διάχυση του νερού σε υδατορρέυματα
- Ανάμιξη γλυκού νερού με αλμυρό στη ζώνη διάχυσης
- Ροή διαμέσου ημιπερατού στρώματος υπό την επίδραση του υδραυλικού φορτίου
- Ροή διαμέσου ημιπερατού στρώματος εξαιτίας της οσμωτικής πίεσης που προκαλείται από τη βαθμίδα αλατότητας (salinity gradient)

Στην περίπτωση ελεύθερων υδροφορέων λειτουργούν οι δύο πρώτοι μηχανισμοί. Η εκφόρτιση από βαθείς υπό-πίεση υδροφορείς γίνεται μέσω των τελευταίων τριών μηχανισμών, οι οποίοι δεν έχουν μεγάλη απόδοση. Γενικά, υποθέτοντας ότι όλοι οι υδροφόροι έχουν την τα ίδια υδραυλικά χαρακτηριστικά, όσο βαθύτερο είναι το υδροφόρο στρώμα, τόσο λιγότερο νερό είναι δυνατόν να εκφορτίσει.

Η διατάραξη της ισορροπίας στη ροή και τα αποθέματα ενός παράκτιου κοκκώδους υδροφορέα προέρχεται κυρίως από ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Ενώ στους παράκτιους σχηματισμούς, η ύπαρξη υφάλμυρων νερών μπορεί να

προέρχεται από φυσικά αίτια (συγγενετικό νερό, δράση παλίρροιας, συμπύκνωση διαλυμένων αλάτων σε περιοχές υψηλής εξαμισοδιαπνοής κ.α.), η κύρια αιτία υπαλμύρισης είναι η θαλάσσια διείσδυση. Η ανεξέλεγκτη άντληση των υπόγειων νερών έχει ως αποτέλεσμα τη συνεχόμενη πτώση της στάθμης και τη μείωση του υδραυλικού φορτίου. Μέρος του νερού αυτού που χάνεται, αναπληρώνεται με την εισροή του θαλασσινού νερού προκειμένου να επανέλθει η υδροστατική ισορροπία, με αποτέλεσμα να υποβαθμίζεται και ποιοτικά ο υδροφορέας.

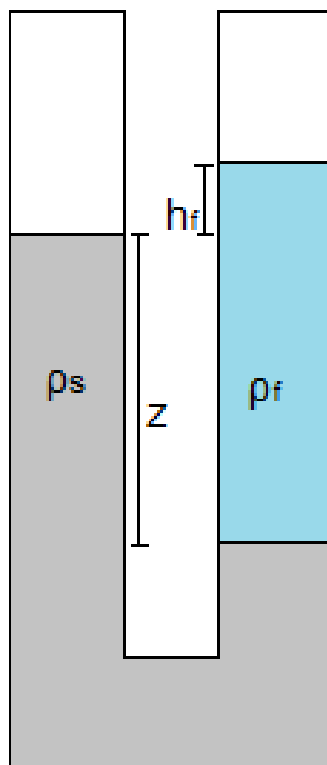
Η θαλάσσια διείσδυση παρατηρείται σε παράκτιους υδροφορείς σε όλο τον κόσμο και θεωρείται η πιο συνήθης αιτία υπαλμύρισης των υπόγειων νερών. Αποτελεί πλέον ένα είδος ρύπανσης, καθώς σύμφωνα με το Βουδούρη (2009), το υπόγειο νερό καθίσταται μη πόσιμο από την ανάμιξη του με θαλασσινό σε ποσοστό μόλις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

Οι παράκτιοι υδροφορείς, όταν επικοινωνούν υπογείως με τη θάλασσα, υπό φυσικές συνθήκες αποστραγγίζονται σε αυτήν. Ανάμεσα σε γλυκό και θαλασσινό νερό υπάρχει υδροστατική ισορροπία. Για να διατηρηθεί αυτή η ισορροπία, πρέπει να διατηρείται σταθερό το ισοζύγιο φόρτισης και εκφόρτισης του υδροφορέα με γλυκό νερό. Οι έντονες αντλήσεις νερού από τον υδροφόρο μέσω κατακόρυφων υδρομαστευτικών έργων (πηγάδια, γεωτρήσεις), διαταράσσουν την ισορροπία του συστήματος ελαττώνοντας ή/και αναστρέφοντας τη φυσική υδραυλική βαθμίδα προς τη θάλασσα (Καλλέργης, 2000), επιτρέποντας έτσι τη διείσδυση του θαλασσινού νερού προς την ενδοχώρα. Κατά αυτό τον τρόπο, το θαλασσινό νερό διαχέεται στον υδροφορέα, αντικαθιστώντας 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 μεταξύ των δυο.

Η θαλάσσια διείσδυση διακρίνεται σε παθητική και ενεργητική. Σύμφωνα με το Fetter(1994), παθητική θαλάσσια διείσδυση γίνεται όταν μια ποσότητα νερού αντληθεί από τον υδροφόρο χωρίς να αναστραφεί η υδραυλική κλίση. Σε αυτή την περίπτωση αποκαθίσταται νέα ισορροπία της διεπιφάνειας γλυκού-αλμυρού νερού. 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 από ότι στην παθητική.

2.2.1 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) :

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

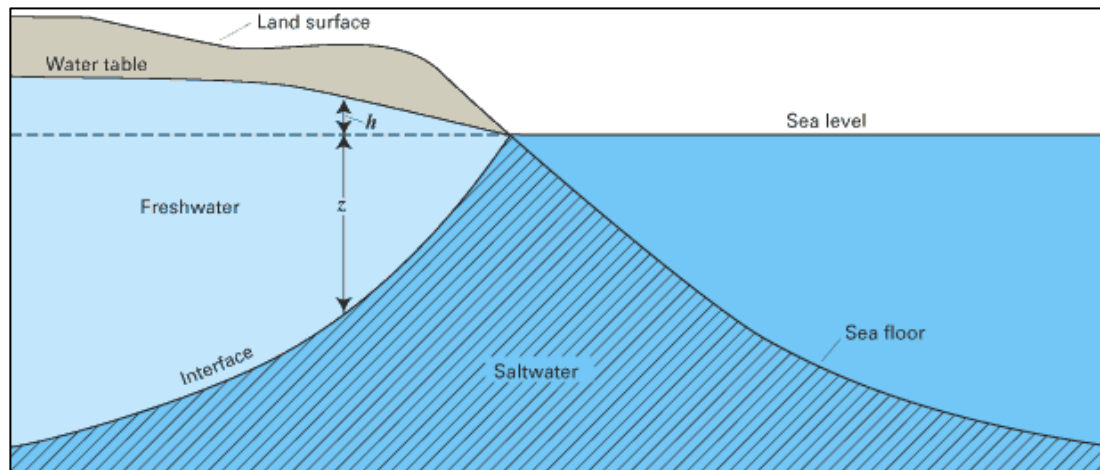
Όπου:

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

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

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):

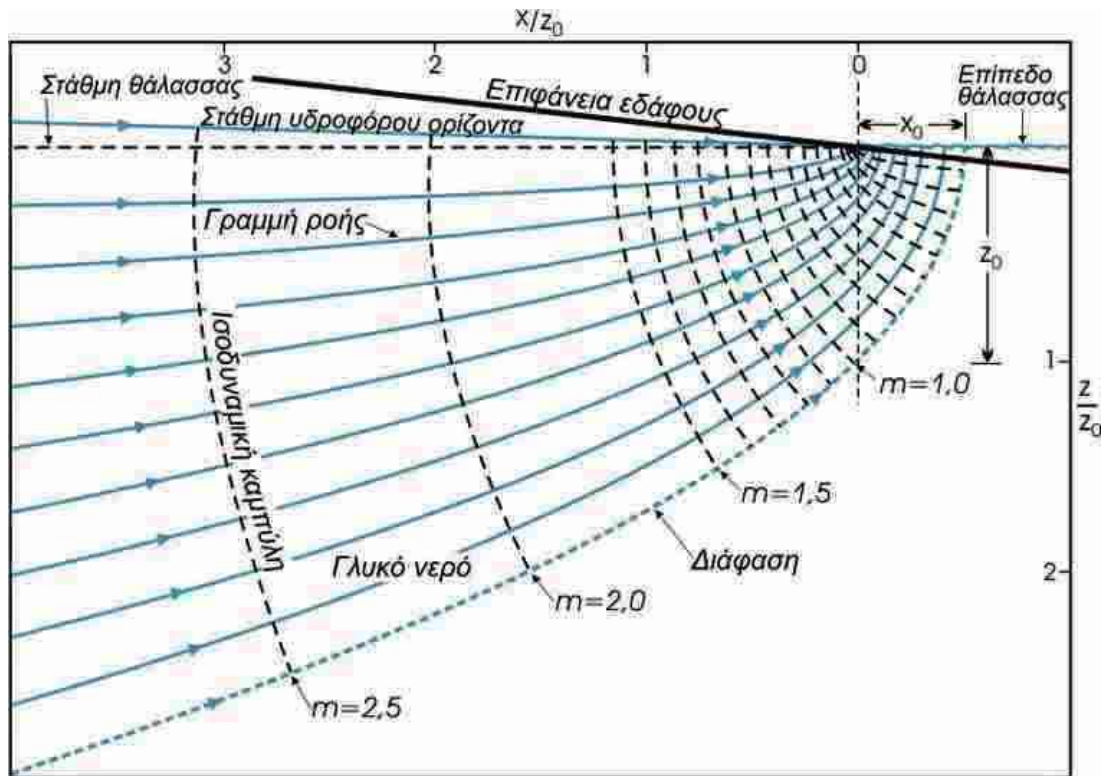
$$z = \frac{\Lambda Q'}{k} + \sqrt{\frac{2\Lambda Q'x}{k}} \quad (2.3)$$

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 Glover (<http://www.geo.auth.gr/763/ch5.htm>)

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

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

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

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

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

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

Οι παράμετροι x , z , X_0 , Z_0 φαίνονται στο σχήμα 2.3. Με τον τύπο του Glover υπολογίζεται το βάθος z της διεπιφάνειας, για κάθε σημείο x από την ακτή, δίνοντας έτσι μεγαλύτερη ακρίβεια απ' ότι 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) :

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

2.2.2 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:

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

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

2.2.3 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:

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

Όπου:

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

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

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

Q_w = η άντληση (παροχή) από το πηγάδι

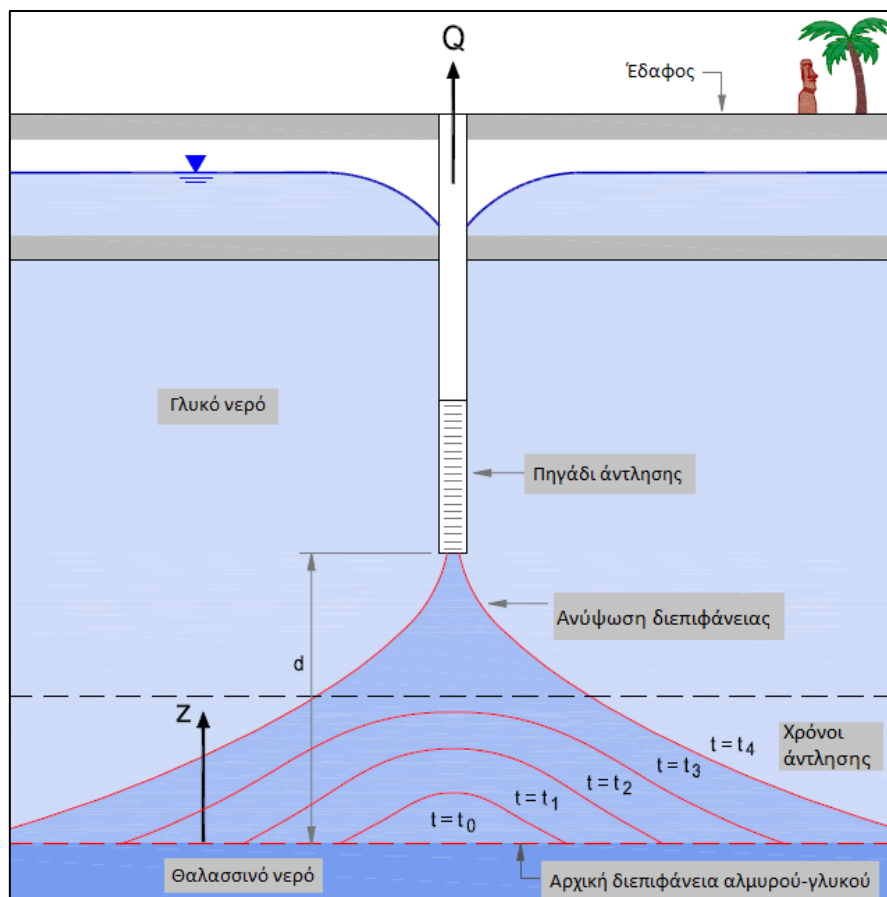
K = η υδραυλική αγωγιμότητα του υδροφόρου

x_w = η απόσταση του πηγαδιού από την ακτογραμμή

x, y = οι συντεταγμένες του ποδίου της διεπιφάνειας

2.2.4 ΑΝΥΨΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

Κατά την άντληση ενός παράκτιου υδροφορέα, 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 θαλασσίνο νερό (Σχήμα 2.4).



Σχήμα 2.4 Ανύψωση διεπιφάνειας (upconing) (Montgomery & Associates, 2011 με τροποποιήσεις)

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:

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

Όπου:

Z= η ανύψωση της διεπιφάνειας κάτω από το πηγάδι

Q= η αντλούμενη 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:

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

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

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

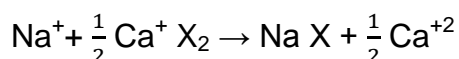
2.2.5 ΥΔΡΟΧΗΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΚΟΚΚΩΔΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ

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 υφαλμύριση συνίσταται σε 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.

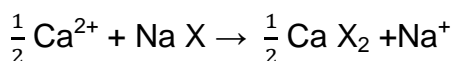
Το γλυκό νερό σε παράκτιες περιοχές περιέχει συνήθως ιόντα ασβεστίου (Ca^{+}) και όξινα ανθρακικά ιόντα (HCO_3^{-}) που προέρχονται από την αποσύνθεση του ασβεστίτη. Έτσι ο κατιοντικός ανταλλάκτης (του εδάφους) περιέχει Ca^{+} , προσροφημένο στο γεωλογικό υλικό ενώ το θαλασσινό νερό περιέχει κυρίως ιόντα 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 CaCl₂. Η αντίστροφη διαδικασία συμβαίνει όταν εμπλουτίζεται ένας υφαλμυρισμένος υδροφόρος με γλυκό νερό, δηλαδή απελευθερώνεται Na⁺ από το έδαφος και προσροφάται Ca²⁺. Ο τύπος του νερού μετατρέπεται σε NaHCO₃ :



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:

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

Όπου,

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

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

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

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

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

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

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

2.2.6 ΕΝΔΕΙΞΗ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ

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 θαλασσιού 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 διείσδυσης το λόγο $R = \text{Cl}^- / (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-)$. Οι συγκεντρώσεις εκφράζονται σε meq/lit. Για τιμές του λόγου R μεγαλύτερες του 1, έχουμε ένδειξη θαλάσσιας διείσδυσης. (Βουδούρης, 2009).
- **Ισότοπα O και H :** κατά τη μίξη του θαλασσινού νερού με απεμπλουτισμένο από ¹⁸O υπόγειο νερό σε συσχετισμό του δD έναντι δ¹⁸O ή Cl έναντι δ¹⁸O, 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 διείσδυση ή για ανθρωπογενή απόβλητα). Οι τιμές που παίρνει το δ¹¹B κατά τη θαλάσσια διείσδυση, κυμαίνονται πάνω από 30‰ (δηλαδή της τιμής που παίρνει στο θαλασσινό νερό).

2.3 ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

2.3.1 ΤΥΝΗΣΙΑ

Ο παράκτιος υδροφόρος της μελέτης περίπτωσης βρίσκεται στο βορειοανατολικό τομέα 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 σχηματισμός που εξετάζεται αποτελείται από αργιλώδη άμμο.

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 (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' ότι 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 τη γεωμετρία, τη γεωλογία και τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά του υδροφόρου.

2.3.2 ΑΛΓΕΡΙΑ

Η πεδιάδα Nador βρίσκεται στη Turaza της Αλγερίας. Ο Bouderbala A. (2014) στην έκθεσή του, μελετάει τη θαλάσσια διείσδυση και την έκταση της στον κοκκώδη υδροφορέα της περιοχής που εκτείνεται σε 19km² και τροφοδοτείται 75 km δυτικά από το Αλγέρι.

Η περιοχή κατατάσσεται κλιματικά στα ημίξηρα κλίματα με ετήσια βροχόπτωση 427 mm και διήθηση 37mm. Ο υδροφορέας διαμορφώνεται σε πλειστοκαινικές και τεταρτογενείς αποθέσεις με υψηλή αγωγιμότητα ($6,8 \cdot 10^{-4}$ m/s), ενώ το αδιαπέρατο υπόβαθρο του αποτελείται από αργιλώδεις μάργες. Οι βασικές πηγές τροφοδοσίας είναι το νερό της βροχής και το νερό της άρδευσης, μέρος του οποίου διηθείται στον υδροφόρο.

Στη συγκεκριμένη μελέτη πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στάθμης και δειγματοληψία από 24 πηγάδια, τα δείγματα των οποίων αναλύθηκαν χημικά. Οι μετρήσεις και οι χημικές αναλύσεις έδειξαν ιδιαίτερα υψηλές αγωγιμότητες (1500-5500 $\mu\text{S}/\text{cm}$) και υψηλή συγκέντρωση χλωριόντων (175-2500 mg/l) και νατρίου (32-350 mg/l). Τα αποτελέσματα αυτά υποδεικνύουν την εισχώρηση του θαλασσινού νερού στον υδροφορέα.

Σύμφωνα με το χάρτη ισοπιεζομετρικών γραμμών που παρατίθεται στη μελέτη, η διεύθυνση ροής είναι BA-ND προς τη μεσόγειο ενώ κοντά στην ακτή εντοπίζεται μηδενικό υδραυλικό φορτίο.

Τα δείγματα με τις υψηλότερες συγκεντρώσεις Cl⁻ και Na⁺ καθώς και με τη μεγαλύτερη αγωγιμότητα, βρίσκονται κοντά στην ακτογραμμή, εκεί όπου παρατηρείται και η ισοπιεζομετρική γραμμή του 0.

2.3.3 ΙΣΡΑΗΛ

Ο παράκτιος υδροφορέας του Ισραήλ οριοθετείται από τη πόλη Haifa στα Βόρεια, από τη Γάζα στα νότια και από τη Σαμάρεια στα Ανατολικά ενώ στα δυτικά συνορεύει με τη Μεσόγειο θάλασσα. Ο σχηματισμός που φιλοξενεί τον υδροφορέα είναι κοκκώδης, πλειστοκαινικής ηλικίας και η κύρια σύσταση του είναι άμμοι, ψαμμίτες, μάργες στρώσεις αργίλου χωρίζουν τη δυτική περιοχή σε υπο-υδροφόρους. Ο υδροφόρος βρίσκεται υπό καθεστώς έντονης άντλησης έχοντας ως αποτέλεσμα τη θαλάσσια διείσδυση.

Οι Melloul et al. χωρίζουν τη περιοχή σε δύο υπό ενότητες, ανάλογα με τη κατάσταση υφαλμύρωσης:

Το τμήμα έως 2 km από την ακτογραμμή όπου η υδροστατική στάθμη του υδροφορέα βρίσκεται στο ίδιο επίπεδο με τη θάλασσα με έντονο το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης, με συγκεντρώσεις χλωριόντων που φτάνουν τα 1000mg/lit.

Το τμήμα από τα 2km έως τα 10km από την ακτή. Η υφαλμύρωση σε αυτή τη περιοχή δεν είναι έντονη. Τα χλωριόντα κυμαίνονται μεταξύ 50και 200 mg/lit.

Οι ερευνητές της συγκεκριμένης μελέτης επιχειρούν να σχεδιάσουν τη διαχείριση των υδατικών πόρων της περιοχής έτσι ώστε οι ανάγκες των κατοίκων σε νερό να συνάδουν με την βιώσιμη χρήση του υδροφορέα. Ο σχεδιασμός αυτού του πλάνου γίνεται με τη χρήση μιας πυραμίδας ιεραρχίας για την αποτελεσματική διαχείριση των υδάτων. Τελικά, οι βασικοί στόχοι είναι η σύνδεση της διαχείρισης των υδατικών πόρων με τη την κοινωνία και την οικονομία, η ελεγχόμενη παροχή νερού από τον υδροφορέα , η ανάσχεση της θαλάσσιας διείσδυσης, η διατήρηση του νερού στον υδροφορέα σε συνδυασμό με την επεξεργασία οικιακών, γεωργικών και βιομηχανικών λυμάτων και η συμμετοχή και συνεχής ενημέρωση των κατοίκων. Με αυτό τον τρόπο, είναι εφικτή η σταδιακή εξυγίανση των παράκτιων υδροφορέων αναχαιτίζοντας τη δράση της θαλάσσιας διείσδυσης.

2.3.4 ΙΣΠΑΝΙΑ

Η παράκτια περιοχή Campo de Cartagena βρίσκεται στη νότια Ισπανία και συνορεύει με τη λιμνοθάλασσα Mar Menor η οποία επικοινωνεί υδραυλικά με τη Μεσόγειο. Οι Rey J. et al. (2003) πραγματοποίησαν γεωφυσικές διασκοπήσεις προκειμένου να εντοπίσουν την εξέλιξη του μετώπου υφαλμύρισης στον κοκκώδη υδροφορέα της περιοχής.

Γεωλογικά, ο υπό εξέταση υδροφόρος σχηματίζεται από από τεταρτογενείς αποθέσεις (άμμους και χάλικες) ενώ κατά την εικοσαετία 1960-1980 βρισκόταν υπό καθεστώς έντονης άντλησης.

Για τη διεξαγωγή της έρευνας πραγματοποιήθηκαν 12 ηλεκτρικές τομογραφίες σε βάθη από 58 έως 148 m. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι στα πρώτα 10m, η ηλεκτρική αντίσταση έχει υψηλές τιμές (50-80Ω) κάτι που υποδεικνύει την ύπαρξη ακόρεστης ζώνης. Σε μεγαλύτερα βάθη παρατηρείται μία απότομη πτώση της ηλεκτρικής αντίστασης (1-3 Ω) , που πιθανότητα αντιστοιχεί στο υφάλμυρο τμήμα του τεταρτογενούς υδροφορέα. Σε διάφορα σημεία της πεδιάδας, η χαμηλή ηλεκτρική αντίσταση εντοπίζεται σε βάθη μικρότερα των 10 μέτρων, στοιχείο που υποδεικνύει την ύπαρξη του φαινομένου της ανύψωσης (upconing) της ζώνης υφαλμύρισης. Οι

υψηλές τιμές ηλεκτρικής αντίστασης κοντά στην επιφάνεια του εδάφους υποδηλώνουν την ανάσχεση του θαλάσσιου μετώπου, γεγονός που αποδίδεται στην επαναφόρτιση του υδροφορέα με αρδευτικό νερό και τη παύση των αντλήσεων λόγω της μεταφοράς γλυκού νερού από τη λεκάνη Tagus (1979). Ως αποτέλεσμα αυτού, η επιφάνεια αλμυρού- γλυκού νερού έχει μετατοπιστεί, κατά το κατακόρυφο άξονα, σε μεγαλύτερα βάθη.

2.3.5 ΑΙΓΥΠΤΟΣ

Το Ras El Hekma, βρίσκεται στο βορειοδυτικό τομέα της Αιγύπτου και αποτελεί ένα από τα κύρια ακρωτήρια της νότιας ακτογραμμής της Μεσογείου. Οι Yousif M. και Bubenzer O. (2012) στη μελέτη τους, εξετάζουν τις υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής με σκοπό τη γνώση της κατάστασης του υδροφορέα και την ορθολογική χρήση των υδατικών πόρων της περιοχής. Στο παράκτιο πεδίο, αναπτύσσονται τρεις υδροφόροι:

- Ο κοκκώδης υδροφόρος που διαμορφώθηκε από ανθρακική άμμο του Ολόκαινου.
- Ο υδροφόρος που αναπτύσσεται σε ωλιθικούς ασβεστόλιθους, ηλικίας Πλειστόκαινου
- Ο υδροφόρος στη μάζα ρωγματομένου ασβεστόλιθου, ηλικίας Μέσου Μειόκαινου

Όσον αφορά το κοκκώδες υδροφόρο σύστημα, πρόκειται για σχηματισμό υψηλού πορώδους με αποτέλεσμα την άμεση ανατροφοδότηση του υδροφορέα με απευθείας διήθηση της βροχής και μέρους του νερού της επιφανειακής απορροής. Ο υδροφορέας συνορεύει στα βόρεια με τη θάλασσα και το υπόβαθρο του αποτελείται από συμπαγή ασβεστόλιθο. Ο σχηματισμός αντλείται μέσω 6 πηγαδιών προκειμένου να παρέχεται νερό για τη κάλυψη των αναγκών τις περιοχής.

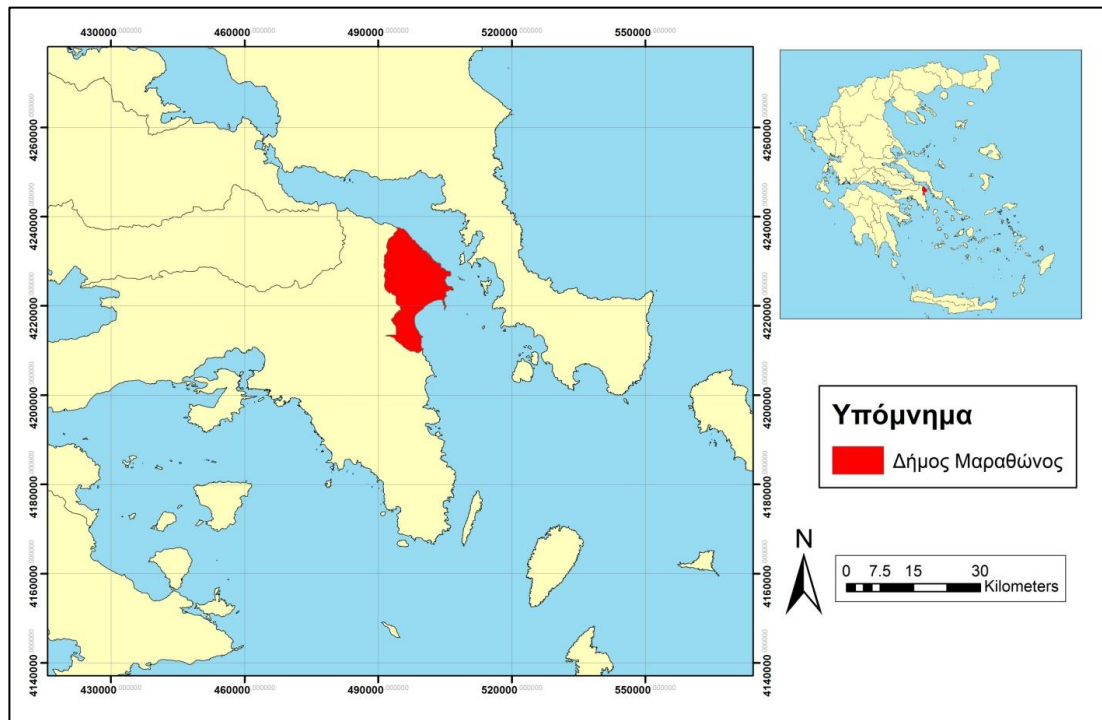
Το βάθος του κάθε πηγαδιού διαφέρει, από 4 έως 10 μέτρα, ενώ η στάθμη τους κυμαίνεται μεταξύ -3.5 και 1 μέτρο με μηδενικό επίπεδο αναφοράς το απόλυτο υψόμετρο της στάθμης της θάλασσας. Το σύνολο των διαλυμένων στερεών σωματιδίων (TDS) στα δείγματα που συλλέχθηκαν έχει εύρος μεταξύ 4761mg/lit έως 6413mg/lit , κάτι που αντικατοπτρίζει τη διείσδυση του θαλασσινού νερού σε συνδυασμό με το στοιχείο ότι η στάθμη των περισσότερων πηγαδιών βρίσκεται κάτω από το επίπεδο της θάλασσας.

Η κατακόρυφη αύξηση του TDS σχετίζεται άμεσα με την αύξηση των διαλυμένων αλάτων (NaCl, Na₂SO₄). Η παρουσία διττανθρακικών αλάτων (HCO₃) σχετίζεται με την επίδραση της ανάμειξης των υπόγειων υδάτων με το νερό της βροχής.

3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

3.1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

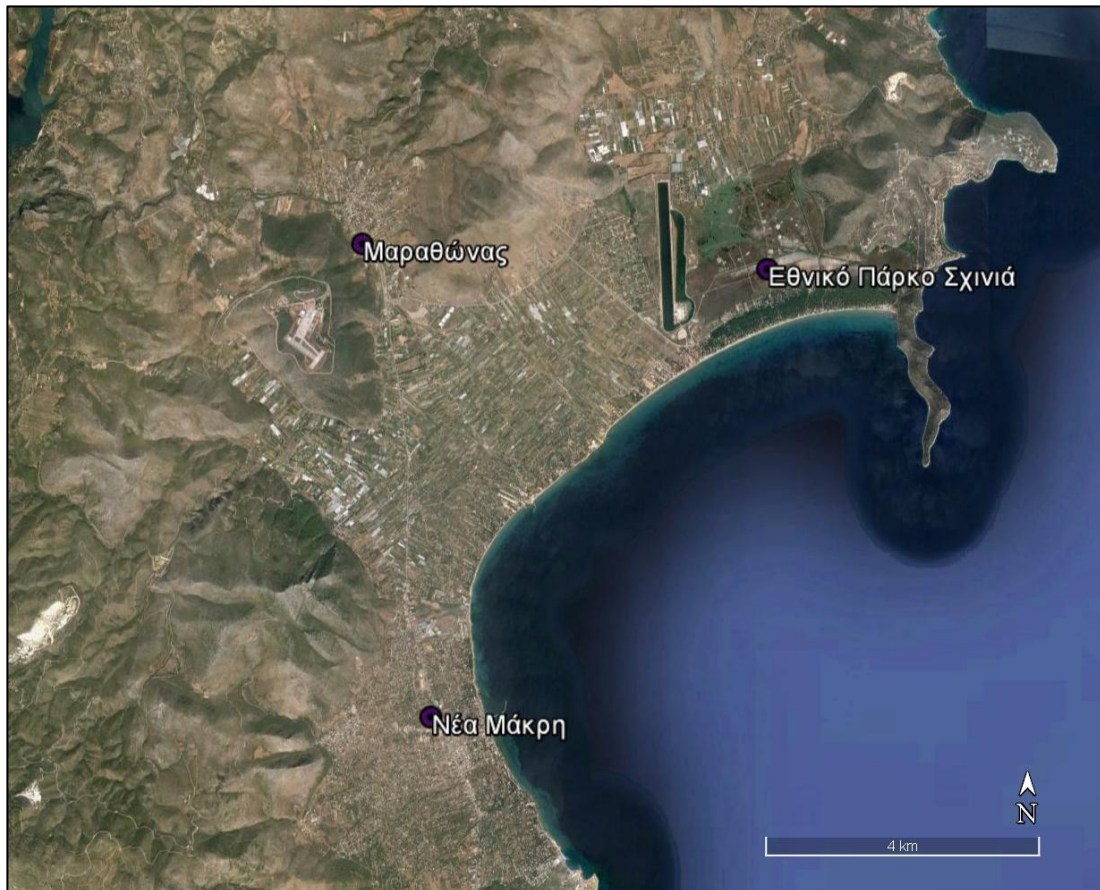
Η ευρύτερη περιοχή έρευνας της παρούσας διατριβής είναι ο Μαραθώνας. Γεωγραφικά, βρίσκεται βορειοανατολικά του νομού Αττικής και διοικητικά ανήκει στην Περιφέρεια Ανατολικής Αττικής. Παλαιότερα αποτελούσε αυτοτελή δήμο, αλλά μετά το 2010 συγχωνεύτηκε με άλλους, σύμφωνα με το πρόγραμμα “Καλλικράτης” του νόμου Ν3852/2010. Ο σημερινός δήμος διατηρεί το όνομα “Δήμος Μαραθώνος”. Έδρα του νέου Δήμου είναι ο Μαραθώνας, και περιλαμβάνει ακόμη τον πρώην δήμο Νέας Μάκρης και τις κοινότητες Βαρνάβα και Γραμματικού (σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1 Διοικητική έκταση Δήμου Μαραθώνα.

Η έκταση του δήμου είναι 227 km² και ο μόνιμος πληθυσμός ανέρχεται στα 26.899 άτομα, σύμφωνα με τα στοιχεία που προέκυψαν από την απογραφή του 2011.

Η στενότερη περιοχή μελέτης είναι η πεδιάδα του Μαραθώνα με έκταση περίπου 40km² (σχήμα 3.2). Η ακτογραμμή, η οποία διαχωρίζει την ηπειρωτική χώρα από τη θάλασσα, έχει μήκος 10km και αρχίζει από τη λοφώδη ζώνη της Κυνοσούρας στα βορειοανατολικά έως τη Νέα Μάκρη στα νοτιοανατολικά. Στην ενδοχώρα, οριοθετείται στα Δ/Β/ΒΑ από λοφώδεις περιοχές με απότομα πρανή: στα βόρεια οριοθετείται από τους ορεινούς όγκους Κοτρώνι, Στρατή και Τεροκορυφή, στα δυτικά από τον ορεινό όγκο της Πεντέλης, στα ανατολικά από τον ορεινό όγκο της Δρακονέρας και του Μύτικα, και στα νοτιοανατολικά από την χερσόνησο της Κυνοσούρας.



Σχήμα 3.2 Η πεδιάδα του Μαραθώνα (Πηγή: Google Earth)

Η περιοχή της πεδιάδας είναι μία έκταση με ιδιαίτερη ιστορική και αρχαιολογική σημασία. Ο λόγος έγκειται στο κορυφαίο γεγονός της ελληνικής και παγκόσμιας ιστορίας που είναι η νίκη των Αθηναίων επί των Περσών το 490 π.Χ. και η αναχαίτιση του περσικού επεκτατισμού στην υπόλοιπη Ευρώπη.

Η ιδιαιτερότητα της συγκεκριμένης περιοχής έγκειται και σε άλλους παράγοντες. Ο Σχινιάς στα όρια του όρμου του Μαραθώνα, εκτός από το ότι αποτελεί τη μεγαλύτερη αμμώδη παραλία της Αττικής, είναι και ένα από τα σπουδαιότερα οικολογικά πάρκα της χώρας. Καταλαμβάνει μια μεγάλη έκταση 13.840 στρέμματα συμπεριλαμβανομένου Μεγάλου Έλους του Μαραθώνα. Αποτελεί ένα εξαιρετικό φυσικό τοπίο και περιλαμβάνει την περιοχή του υγροτόπου Μέγα Έλος, τη λοφώδη χερσόνησο της Κυνοσούρας, το λόφο της Δρακονέρας, την περιοχή του δάσους με τις κουκουναριές και τη χαλέπιο πεύκη, την περιοχή της Μακαρίας Πηγής, τον όρμο του Μαραθώνα, το Ολυμπιακό Κωπηλατοδρόμιο και την περιοχή αναψυχής, τουρισμού και κατοικίας¹. Το πάρκο του Σχινιά εισηχθεί ως κατηγορία προστατευόμενων περιοχών με το Ν. 1650/1986 (άρθρα 18 και 19) ενώ με το Διάταγμα ΦΕΚ 395/Δ/03.07.2000 έχουν καθοριστεί και περιφερειακές ζώνες προστασίας.

¹ www.npschiniasmarathon.gr

3.2 ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΕΙΣ ΠΑΡΕΜΒΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΧΡΗΣΕΙΣ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΚΑΙ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΥ ΝΕΡΟΥ

Η ευρύτερη περιοχή του Μαραθώνα, εξαιτίας της έντονης μορφολογίας που παρουσιάζει λόγω του ορεινού όγκου της Πεντέλης, είναι μία περιοχή με έντονη τη παρουσία του νερού, επιφανειακού αλλά και υπόγειου. Το επιφανειακό νερό εκδηλώνεται μέσα από χείμαρρους οι οποίοι εκβάλλουν στον όρμο του Μαραθώνα και το υπόγειο προκύπτει από τη κατείσδυση βρόχινου νερού σε καρστικούς υδροφορείς της Πεντέλης και σε προσχλωσιγενείς και του πεδινού τμήματος της περιοχής έρευνας.

Από την αρχαιότητα ακόμη, οι άνθρωποι προσπάθησαν να εκμεταλλευτούν τους μεγάλους όγκους νερού που απέρρεαν ανεκμετάλλετοι στη θάλασσα αλλά και να προστατευτούν από πλημμύρες που δημιουργούνταν από τη δράση των χειμάρρων. Κατά αυτό τον τρόπο στην πεδιάδα του Μαραθώνα αλλά και στους ορεινούς όγκους της περιοχής καταγράφονται πολυάριθμα έργα για αποθήκευση, άντληση νερού και προστασία από τις πλημμύρες. Τα έργα και οι χρήσεις τους περιγράφονται στις ακόλουθες επιμέρους ενότητες (§3.2.1 - §3.4.2).

3.2.1 ΦΡΑΓΜΑ ΜΑΡΑΘΩΝΑ

Η συνεχόμενη αύξηση του πληθυσμού της Αθήνας, ιδιαίτερα μετά τη μικρασιατική καταστροφή, δημιούργησε νέες υδρευτικές ανάγκες. Το 1926, ξεκίνησε η κατασκευή του φράγματος του Μαραθώνα προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες της πρωτεύουσας σε νερό. Το έργο αναλήφθηκε από την αμερικάνικη εταιρεία Ulen and Company και ολοκληρώθηκε το 1929 δημιουργώντας τον ταμιευτήρα του Μαραθώνα.

Η λίμνη του Μαραθώνα βρίσκεται στην περιοχή της βορειοανατολικής Αττικής σε απόσταση 30 km από την Αθήνα, στα σύνορα μεταξύ των Καλλικρατικών δήμων Μαραθώνα και Ωρωπού. Το φράγμα έχει κατασκευαστεί στη συμβολή πολλών ρεμάτων που συγκεντρώνουν της απορροές της περιβάλλουσας λεκάνης, με κυριότερα το ρέμα Βαρνάβα και τον ποταμό Χάραδρο, που πηγάζει από την Πάρνηθα. Ο πλησιέστερος στη λίμνη οικισμός είναι ο Βόθωνας Αττικής στα ανατολικά, ενώ 6 km νοτιότερα βρίσκεται η κωμόπολη του Μαραθώνα.

Σύμφωνα με στοιχεία της «Ελληνικής Επιτροπής Μεγάλων Φραγμάτων» (2013), ο τύπος του φράγματος είναι “Βαρύτητας Λιθοδέματος”, δηλαδή είναι κατασκευασμένο από σκυρόδεμα, ενώ επενδύθηκε με πεντελικό μάρμαρο, κάτι που το καθιστά μοναδικό σε παγκόσμιο επίπεδο. Το μέγιστο ύψος του φράγματος είναι 54m από τη θεμελίωση του, το μέγιστο πλάτος στη βάση είναι 48m ενώ το πλάτος της στέψης (στο επίπεδο του δρόμου κυκλοφορίας) είναι 4,5m. Το μήκος της στέψης είναι 285m. Η επιφάνεια του τεχνητού ταμιευτήρα του Μαραθώνα είναι 2,45km στη στάθμη υπερχειλίσης. Η μέγιστη χωρητικότητα του είναι $41 \times 10^6 \text{ m}^3$, ενώ ο μέγιστος ωφέλιμος όγκος είναι $34 \times 10^6 \text{ m}^3$. Για τη διανομή του νερού στη πρωτεύουσα, κατασκευάστηκε και υδραγωγείο από τη λίμνη του Μαραθώνα έως την Αθήνα συνολικού μήκους 21,5 km που περιλαμβάνει και τη σήραγγα Μπογατίου. Το 1959, λόγω της ραγδαίας αύξησης του πληθυσμού στην Αθήνα, το σύστημα της λίμνης του

Μαραθώνα συνδέθηκε με το υδραγωγείο της φυσικής λίμνης Υλίκης προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες σε νερό. Μετά την κατασκευή του φράγματος του Μόρνου (1979), ο ταμιευτήρας του Μαραθώνα λειτουργεί κυρίως ως μια δεξαμενή αποθήκευσης των υδάτων που έρχονται από τους ταμιευτήρες της Υλίκης και του Μόρνου-Εύηνου, για λόγους ασφαλείας λόγω της εγγύτητάς του με την Πρωτεύουσα.

Κατάντη του φράγματος, τοποθετείται ο Καλλικρατικός δήμος του Μαραθώνα. Είναι προφανές, ότι η κατασκευή ενός τέτοιου έργου επηρεάζει τα επιφανειακά και τα υπόγεια νερά σε πολύ μεγαλύτερη έκταση από τη λεκάνη κατάκλισης του φράγματος. Ανεξάρτητα από τον τύπο του φράγματος, το μέγεθος του και άλλα χαρακτηριστικά του, το κύριο αποτέλεσμα είναι η μόνιμη ή η προσωρινή διακοπή της απορροής. Ως επακόλουθο αυτού, επηρεάζονται τα ίδια τα πετρώματα, οι χρήσεις γης, οι φυσικοί πόροι και γενικότερα η ανθρώπινη δραστηριότητα της κατάντη περιοχής.



Σχήμα 3.3 Το φράγμα και ο τεχνητός ταμιευτήρας του Μαραθώνα (Φωτογραφικό αρχείο ΕΥΔΑΠ).

3.2.2 ΦΡΑΓΜΑ ΡΑΠΕΝΤΩΣΑΣ

Ένα άλλο νεότερο φράγμα που έχει κατασκευαστεί στην ευρύτερη περιοχή έρευνας είναι αυτό της Ραπεντώσας. Το συγκεκριμένο φράγμα κατασκευάστηκε για την αντιπλημμυρική προστασία της λεκάνης Ραπεντώσας από το χείμαρο Καμπιτούγιο. Η Λεκάνη Ραπεντώσας ξεκινά από την περιοχή Διονύσου και καταλήγει στα βόρεια της Νέας Μάκρης. Το έργο, στην περιοχή του Βρανά, ολοκληρώθηκε το 2004 από την Ε.ΥΔ.Α.Π.. Το ύψος του φράγματος είναι 39m, το μήκος στέψης του 145 m, ο όγκος του $155,5 \times 10^3 \text{ m}^3$ και η χωρητικότητά του είναι $1,285 \times 10^6 \text{ m}^3$. Το εμβαδόν της λεκάνης απορροής στην οποία βρίσκεται έχει έκταση $24,94 \text{ km}^2$, ενώ η παροχή σχεδιασμού του υπερχειλιστή είναι $165 \text{ m}^3/\text{sec}$. Το φράγμα είναι

κατασκευασμένο από λιθορριπή με πλάκες στεγανοποίησης ενωμένες με αρμούς (που λειτουργούν ως μεμβράνη στεγανοποίησης) στην ανάντη παρειά και μετωπικό υπερχειλιστή πλάτους 20m και ύψους 3m.

Το φράγμα λειτούργησε αποτελεσματικά για πρώτη φορά μετά τη κατασκευή του σε ένα πλημμυρικό επεισόδιο το Νοέμβριο του 2005. Κατά την πλημμύρα, στο πεδινό τμήμα προέκυψε παροχή αιχμής $14\text{m}^3/\text{s}$. Εάν δεν υπήρχε το φράγμα η πλημμυρική αιχμή θα έφτανε τα $40\text{m}^3/\text{s}$.

3.2.3 ΤΑΦΡΟΙ ΑΠΟΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ

Η ύπαρξη των ελωδών εκτάσεων στη πεδιάδα του Μαραθώνα (έλος Σχινιά, έλος Μπρεξίζας) κατέστησε αναγκαία την κατασκευή αποστραγγιστικών τάφρων στην περιοχή από την εποχή της αρχαιότητας. Ο Σωτηριάδης (1932), αναφέρει ότι κατά τις ανασκαφές του Μαραθώνα εντοπίστηκαν τα αποστραγγιστικά έργα του έλους της Μπρεξίζας. Η στρατηγικής σημασίας περιοχή της Μπρεξίζας, εξαιτίας της ένωσης της πεδιάδας του Μαραθώνα με την υπόλοιπη Αττική, οδήγησε στην κατασκευή αποστραγγιστικής τάφρου με έξοδο προς τη θάλασσα από τον Ηρώδη τον Αττικό. Κατά τα νεότερα χρόνια, η αποστράγγιση του έλους, φαίνεται να επιτεύχθηκε με τη κατασκευή μεγάλης τάφρου, με διεύθυνση Α-Δ, η οποία οδηγούσε τα νερά της πηγής Μάτι και τα νερά του έλους προς τη θάλασσα.

Σήμερα, στις ελώδεις εκτάσεις, έχουν κατασκευαστεί τάφροι αποστράγγισης. Το έλος του Σχινιά, αποστραγγίζεται από τάφρο μήκους 17 km και το έλος της Μπρεξίζας από τάφρο 2.8km. Τα νερά των τάφρων οδηγούνται στη θάλασσα.

3.2.4 ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΑ ΥΔΡΟΜΑΣΤΕΥΤΙΚΑ ΕΡΓΑ

Στο πεδίο του Μαραθώνα, αναπτύσσονται δύο υδροφόρα συστήματα. Το ένα σύστημα αναπτύσσεται στις προσχωσιγενείς αποθέσεις της πεδιάδας του Μαραθώνα, ενώ στο υπόβαθρο του βρίσκεται ο υπόγειος καρστικός υδροφορέας ο οποίος αποτελεί συνέχεια του καρστικού συστήματος της Πεντέλης. Η πλούσια υδροφορία των δύο υδροφόρων σχηματισμών εκμεταλλεύεται με πολυάριθμα κατακόρυφα πηγάδια και γεωτρήσεις από τους κατοίκους της περιοχής. Η συνεχόμενη και ανεξέλεγκτη άντληση, κυρίως για γεωργικούς σκοπούς, έχει οδηγήσει σε σοβαρή μείωση των αποθεμάτων αλλά και ρύπανση και των δύο υδροφορέων, κυρίως από το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης και της νιτρορύπανσης. Τα σημεία που καταγράφηκαν κατά την εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής, φαίνονται στο χάρτη του σχήματος 3.4. Σ' αυτά, έγιναν δειγματοληψίες νερού και σταθμημετρήσεις.

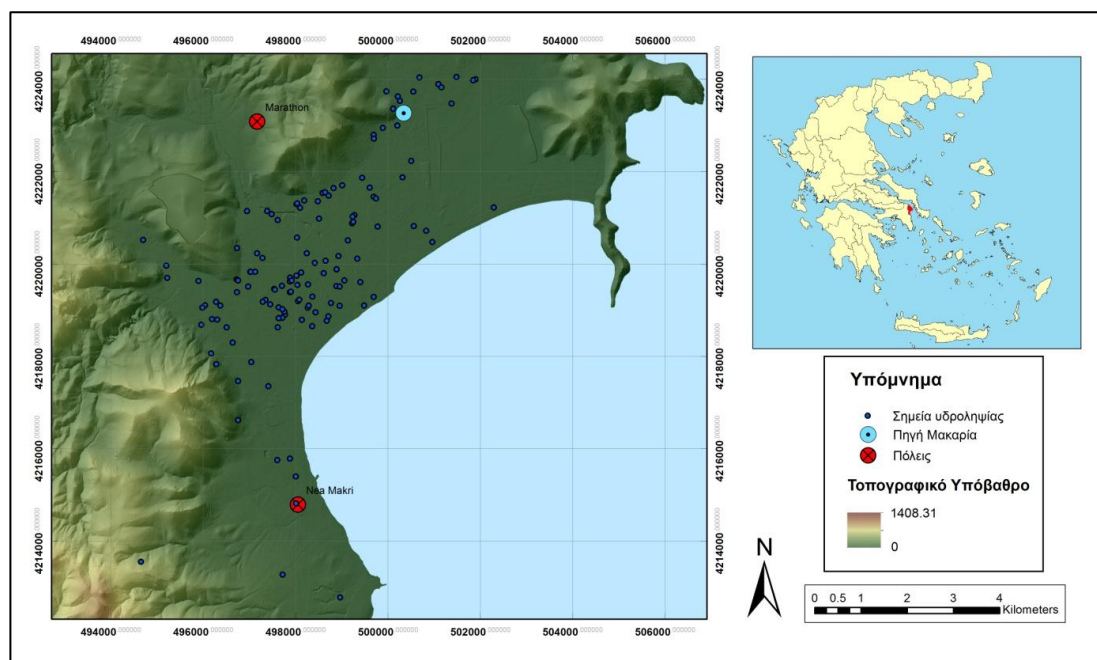
3.3 ΑΝΤΛΙΟΣΤΑΣΙΟ ΜΑΚΑΡΙΑΣ ΠΗΓΗΣ

Σημαντικό και αναπόσπαστο κομμάτι για το οικοσύστημα του Πάρκου του Σχινιά αλλά και για την ευρύτερη περιοχή του Μαραθώνα, αποτελεί η πηγή της Μακαρίας. Πρόκειται για καρστική πηγή, η οποία εκδηλώνεται στην επαφή των μαρμάρων του Μαραθώνα με τις σύγχρονες αργιλοαμμώδεις αποθέσεις τις ελώδους

περιοχής του Σχινιά. Η Μακαρία, αναβλύζει σε ύψος 2,5m στη περιοχή του Κάτω Σουλίου και εκδηλώνεται σε δύο λίμνες γλυκού έως υφάλμυρου νερού (σχήμα 3.4).

Στο παρελθόν, το νερό της Μακαρίας τροφοδοτούσε κυρίως το έλος του Πάρκου Σχινιά. Εκτιμάται ότι προ του 1923 ο βιότοπος δεχόταν ετησίως ποσότητα νερού της τάξης των 6 έως 7×10^6 m³ (Χατζημπίρος, 2005). Σήμερα, μέρος των εκφορτίσεων κατεισδύει στον προσχωσιγενή υδροφορέα της περιοχής. Το μεγαλύτερο ποσοστό όμως του νερού της πηγής, μετά την κατασκευή του κωπηλατοδρομίου (2004), παροχετεύεται μέσω καναλιού στις Ολυμπιακές εγκαταστάσεις του Σχινιά, εξασφαλίζοντας το νερό των δύο στίβων του κωπηλατοδρομίου, μέσω των πυθμένων των οποίων, διηθείται και τροφοδοτεί τον προσχωματικό υδροφορέα.

Κατά την περίοδο 1974-1982, στο χώρο της Μακαρίας είχε κατασκευαστεί αντλιοστάσιο από την ΕΥΔΑΠ. Το νερό της πηγής χρησιμοποιούταν για την ενίσχυση της ύδρευσης της Αθήνας. Οι ποσότητες νερού που αντλούνταν κατά αυτή τη περίοδο έφταναν τα 7×10^6 m³ ετησίως. Η μέση ωριαία παροχή έφτανε τα 830 m³ (500 m³/h το καλοκαίρι και 1660 m³/h το χειμώνα). Το αντλιοστάσιο υπάρχει στο χώρο της Μακαρίας μέχρι και σήμερα, αν και έχει εγκαταληφθεί.



Σχήμα 3.4 Σημεία υδροληψίας και η Μακαρία πηγή στην πεδιάδα του Μαραθώνα.

3.4 ΟΛΥΜΠΙΑΚΟ ΚΩΠΗΛΑΤΟΔΡΟΜΙΟ ΣΧΙΝΙΑ

Το κωπηλατοδρόμιο του Σχινιά, κατασκευάστηκε προκειμένου να φιλοξενήσει τα αθλήματα κωπηλασίας για τους Ολυμπιακούς αγώνες του 2004 που πραγματοποιήθηκαν στην Αθήνα.

3.4.1 ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κωπηλατοδρομίου σύμφωνα με το Φωτόπουλο(2004), είναι τα εξής:

1. Κύριος αγωνιστικός στίβος κωπηλασίας: κανό –καγιάκ
 - Συνολικό μήκος 2.222m:
2.000m αγωνιστικής διαδρομής
200m ζώνη διαφυγής πίσω από τη γραμμή τερματισμού
22m μεταξύ της γραμμής αφετηρίας και της όχθης
 - Συνολικό πλάτος 162m:
8 λωρίδες αγωνιστικού στίβου πλάτους 13,5m
ζώνη ασφαλείας εκατέρωθεν των λωρίδων: 27m
 - Βάθος 3,5 m (Στις ζώνες ασφαλείας εκατέρωθεν των 8 λωρίδων, το βάθος είναι δυνατόν να αρχίσει να μειώνεται σταδιακά με ήπια κλίση, μέχρι τις όχθες)

2. Δευτερεύων στίβος προθέρμανσης και προπόνησης
 - Συνολικό μήκος 1250 m:
1000μ στίβου προπόνησης
150μ ζώνη διαφυγής στη πλευρά των λεμβαρχείων
100μ στο βόρειο άκρο του στίβου
 - Ελάχιστο πλάτος στίβου προθέρμανσης και προπόνησης 118,5m:
5 λωρίδες προπόνησης για κωπηλασία πλάτους 13,5m και ζώνη ασφαλείας εκατέρωθεν των, ελάχιστου πλάτους 5m.
4 λωρίδες προπόνησης για κανό πλάτους 9m με 5m ελάχιστη ζώνη ασφάλειας μεταξύ λωρίδων και όχθης.
 - Βάθος: 2m

3.4.2 ΥΔΡΑΥΛΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Η δημιουργία του κωπηλατοδρομίου αποτελεί μία υδραυλική παρέμβαση μεγάλης κλίμακας στο φυσικό περιβάλλον του Εθνικού Πάρκου Σχινιά. Για τη συντήρηση αλλά και την αποκατάσταση του υγροτόπου, ήταν αναγκαία η πλήρης εναρμόνιση του τεχνικού έργου με το περιβάλλον. Για την επίτευξη του προαναφερθέντος στόχου πραγματοποιήθηκαν τα παρακάτω έργα:

3.4.2.1 ΔΙΩΡΥΓΑ ΠΡΟΣΑΓΩΓΗΣ

Οι δύο στίβοι του κωπηλατοδρομίου τροφοδοτούνται με νερό από τη Μακαρία Πηγή μέσω διώρυγας προσαγωγής. Πρόκειται για μία ανοικτή ανεπένδυτη τάφρο τραπεζοειδούς διατομής, η οποία συνδέεται με την κύρια αποστραγγιστική τάφρο της Μακαρίας προς τα ανατολικά. Στο σημείο εκκίνησης της διώρυγας προσαγωγής, έχει κατασκευαστεί επίπεδο θυρόφραγμα διαστάσεων 1m×1m. Η κατασκευή του συγκεκριμένου έργου υδροληψίας πραγματοποιήθηκε κυρίως για περιβαλλοντικούς λόγους. Έτσι επιτυγχάνεται:

- Διατήρηση σταθερής στάθμης ανάντη της θέσης κατασκευής του θυροφράγματος, έτσι ώστε να μην υποβαθμιστούν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά χλωρίδας και πανίδας της συγκεκριμένης ζώνης.

- Αποφυγή έντονων διακυμάνσεων της στάθμης της κύριας αποστραγγιστικής τάφρου ανάντη της θέσης του θυροφράγματος.
- Δυνατότητα προσαγωγής του νερού με ταχύτητες τέτοιες ώστε να μην απαιτείται η κατασκευή επενδεδυμένης τάφρου.

Η διώρυγα προσαγωγής έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

Μήκος: 565 m

Πλάτος: 1 m

Μέσο βάθος: 1 m

Σχήμα: τραπεζοειδές με κλίση πρανών 4 (οριζόντιο): 1 (κατακόρυφο)

Κλίση πυθμένα: 0,3‰

Επένδυση: ανεπένδυτη

Μέγιστη παροχευτικότητα: 1700 m³/h

Στάθμη προσαγωγής στο στίβο: + 0,7

3.4.2.2 ΕΚΤΡΟΠΗ ΤΗΣ ΚΥΡΙΑΣ ΑΠΟΣΤΡΑΓΓΙΣΤΙΚΗΣ ΤΑΦΡΟΥ ΜΑΚΑΡΙΑΣ ΠΗΓΗΣ

Πριν τη κατασκευή του ολυμπιακού έργου, η κύρια αποστραγγιστική τάφρος της Μακαρίας Πηγής, έτεμνε στο κατάντη μέρος της, τις εγκαταστάσεις της δυτικής όχθης του κωπηλατοδρομίου. Για τη πλήρωση των στίβων με νερό, πραγματοποιήθηκε στο συγκεκριμένο σημείο εκτροπή της αποστραγγιστικής τάφρου συνολικού μήκους 600m. Η νέα τάφρος που διαμορφώθηκε, σχεδιάστηκε με τα ίδια χαρακτηριστικά της αποστραγγιστικής τάφρου της Μακαρίας, δηλαδή είναι χωμάτινη, ανεπένδυτη, τραπεζοειδούς διατομής με πλάτος πυθμένα 8,5m και κλίση πρανών παρόμοια με εκείνη της υφιστάμενης τάφρου. Το συγκεκριμένο έργο επιδιώκει τη διατήρηση του υπάρχοντος καθεστώτος ροής.

3.4.2.3 ΣΥΣΤΗΜΑ ΥΠΕΡΧΕΙΛΙΣΗΣ

Σύμφωνα με τον αρχικό σχεδιασμό, για την αποκατάσταση και τη διατήρηση του υδροβιότοπου του Σχινιά, την ανατολική πλευρά του βοηθητικού στίβου κατασκευάστηκαν τρεις υπερχειλιστές (βόρειος, μέσος και νότιος). Κύριος σκοπός του έργου είναι η επαναφορά του υγροτόπου στη κατάσταση που ήταν πριν το 1923.

Οι υπερχειλιστές έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να παροχετεύεται στο έλος ποσότητα νερού $5,8 \times 10^6 \text{m}^3$ σε ετήσια βάση. Το πλάτος του βόρειου υπερχειλιστή είναι 3 m, ενώ του μέσου και του νότιου 1,5m. Το ύψος υπερχείλισης και των τριών υπερχειλιστών, ανέρχεται στα 0,06 m. Σύμφωνα με τις μελέτες, το νερό απάγεται προς την ανατολική πλευρά του βιοτόπου μέσω τάφρων υπερχείλισης, οι οποίες

έχουν διαστάσεις η μεν βόρεια 1,5 m, η δε μέση και η νότια 1 m. Η κλίση πρανών των τάφρων αυτών θα είναι επίσης 4:1 (οριζόντιο:κατακόρυφο).

4. ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΕΣ – ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

4.1 ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Από γεωμορφολογική άποψη, το παράκτιο πεδίο του Μαραθώνα παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω των έντονων γεωμορφολογικών αλλαγών που συνεχώς πραγματοποιούνται, εξαιτίας φυσικών διεργασιών και ανθρωπογενών παρεμβάσεων.

Γενικά, η περιοχή χαρακτηρίζεται ως πεδινή, με κλίση η οποία δεν υπερβαίνει το 4%, ενώ η έκταση του έλους έχει κλίση από 0 έως 2% (Σκούντζος, 1992).

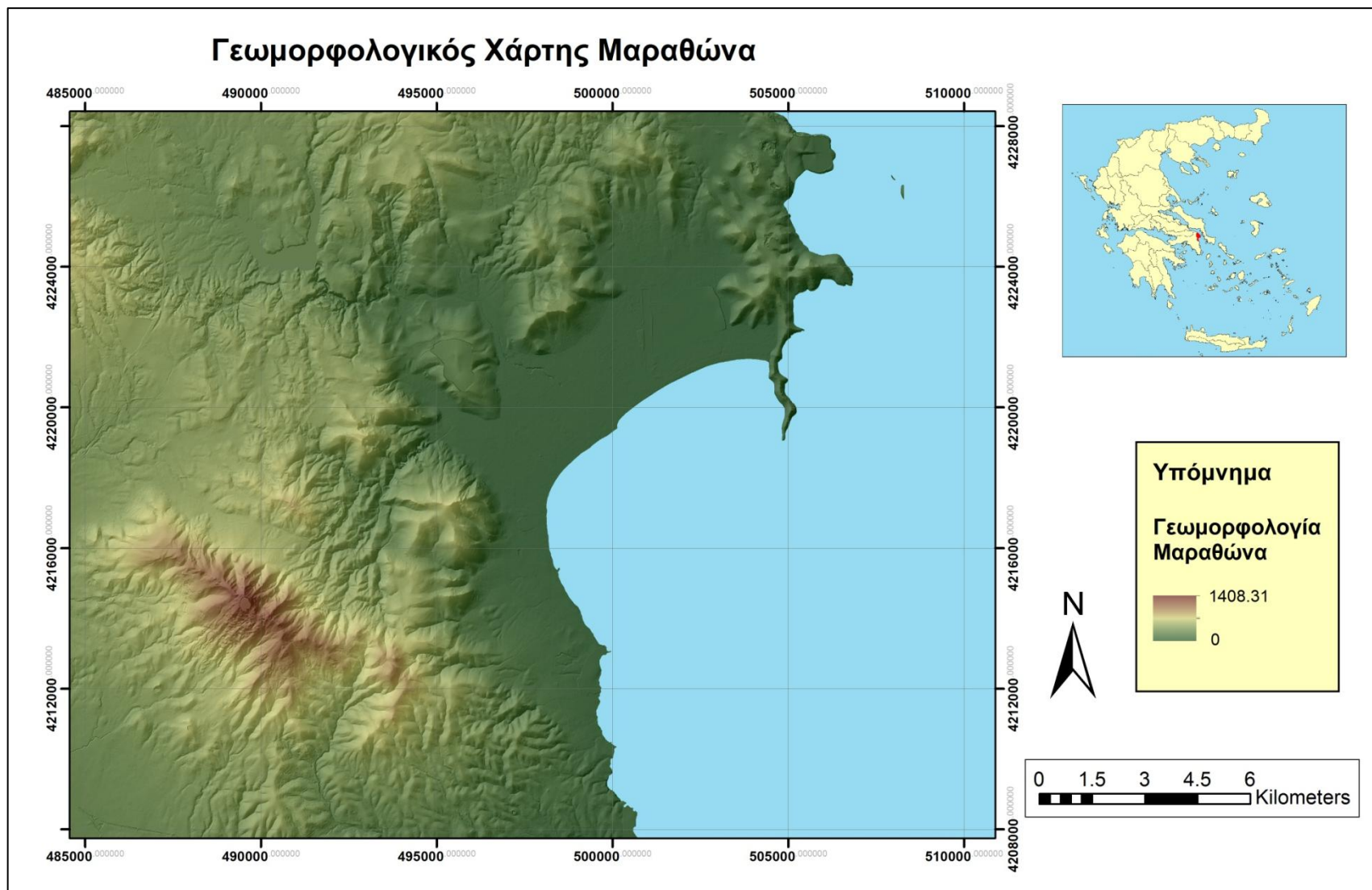
Σύμφωνα με τη Μαργώνη (2006), η πεδιάδα του Μαραθώνα αποτελεί ουσιαστικά ένα καρστικό-τεκτονικό βύθισμα της λοφώδους ζώνης της ΒΑ Αττικής και οριοθετείται από τη λοφώδη ζώνη της Πεντέλης από την πλευρά της ξηράς και από την ακτογραμμή του Όρμου του Μαραθώνα από την πλευρά της θάλασσας. Το βύθισμα δημιουργήθηκε πιθανώς κατά το Πλειστόκαινο και πληρώθηκε με υλικά, τα οποία προήλθαν από εξωγενείς διεργασίες διάβρωσης και αποσάθρωσης. Σημαντική επίδραση στη διαμόρφωση της μορφολογίας της περιοχής είχε η δράση των χειμάρρων Οινόης/Χάραδρου και Κιμπιτούγιου. Ο πρώτος αποστραγγίζει τις Β/ΒΑ υπώρειες της Πάρνηθας. Η παλαιότερη λεκάνη απορροής του έχει διακοπεί μετά τη κατασκευή του φράγματος του Μαραθώνα. Σήμερα ο Χάραδρος εκφορτίζεται προς την ακτογραμμή του όρμου του Μαραθώνα με λεκάνη απορροής 58km² κατάντη της λίμνης του Μαραθώνα. Ο δεύτερος αποστραγγίζει τις ΒΑ υπώρειες της Πεντέλης στη περιοχή της Ραπεντώσας, με έκταση λεκάνης απορροής 30,16km² και εξέρχεται από τη λοφώδη ζώνη στη περιοχή του Μαραθώνα, δυτικά του Αρχαιολογικού Μουσείου Μαραθώνα.

Η πεδινή έκταση του Μαραθώνα, χωρίζεται γεωμορφολογικά στις εξής ενότητες:

- Πεδινό τμήμα πόλης Μαραθώνα: Εκτείνεται κατά μήκος της κοίτης του χειμάρρου Οινόης και διακρίνεται σε δύο τμήματα. Στο πρώτο, αναπτύσσεται η πόλη του Μαραθώνα και έχει διεύθυνση ΝΝΑ-ΒΒΔ, μήκος 2 km και πλάτος 0,6 km περίπου. Στο δεύτερο, αναπτύσσονται καλλιέργειες ανθοκομικών και κηπευτικών με διεύθυνση Α-Δ, μήκος 1,2 km και πλάτος 0,5 km περίπου.
- Πεδινό τμήμα Μαραθώνα: Αναπτύσσεται στην περιοχή από το όριο μεταξύ Νέας Μάκρης και Μαραθώνα, δυτικά – βορειοδυτικά από τις απολήξεις της λοφώδους περιοχής, βορειοανατολικά από την αποστραγγιστική τάφρο της Μακαρίας Πηγής και ανατολικά από την ακτογραμμή του όρμου του Μαραθώνα. Ο κύριος άξονας της πεδιάδας έχει διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ με μέσο μήκος 6 km και μέσο πλάτος 3 km περίπου. Στο κεντρικό της τμήμα η πεδιάδα διασχίζεται από την κοίτη του χειμάρρου της Οινόης ενώ στο νοτιοδυτικό τμήμα καταλήγει η κοίτη του Κιμπιτούγιου. Το υψόμετρο της πεδιάδας κυμαίνεται από 0,5 - 1 m έως 15 - 18 m. Συγκεκριμένη έκταση καλύπτεται κυρίως από κατοικίες και γεωργικές εκτάσεις.

- Πεδινό τμήμα Κάτω Σούλι – Πάτημα: Αποτελεί το Β-ΒΑ άκρο της πεδιάδας του Μαραθώνα. Αναπτύσσεται με διεύθυνση Α-Δ και έχει μήκος 3,5 km περίπου και μέσο πλάτος 0,5 km. Οριοθετείται νότια από το δρόμο Μαραθώνα – Κάτω Σουλίου ενώ στις υπόλοιπες διευθύνσεις περιβάλλεται από λοφώδεις ορεινούς όγκους. Τα υψόμετρα στη συγκεκριμένη έκταση κυμαίνονται από 8m έως 50m προς τη περιοχή των λόφων. Στη περιοχή αναπτύσσονται αγροτικές εκμεταλλεύσεις αποτελούμενες κυρίως από θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις καλλιέργειας κηπευτικών και ανθοκομικών ειδών.
- Οι περιοχές των ελωδών εκτάσεων. Αποτελείται από το έλος του Σχινιά και της Μπρεξίζας. Στο έλος του Σχινιά αναπτύσσεται ο υγρότοπος, μέρος του Εθνικού Πάρκου του Σχινιά. Το απόλυτο υψόμετρο της περιοχής στο κεντρικό τμήμα, δε ξεπερνά το 1m, ενώ βορειότερα κυμαίνεται μεταξύ 1,5 και 2,5m. Ιδιαίτερα μορφολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής του έλους του Σχινιά η ύπαρξη της μικρής χερσονήσου της Κυνοσούρας με τρεις μικρές κορυφές μεγίστου ύψους 92m, στο ανατολικό όριο της πεδινής έκτασης, αλλά και η ανάπτυξη παράλληλα προς την ακτή, παράκτιων χαμηλών αμμολόφων μήκους 3 km και πλάτους 450 m, όπου και αναπτύσσεται το προστατευόμενο δάσος κουκουναριάς και πεύκης. Το έλος της Μπρεξίζας αναπτύσσεται στο νοτιοδυτικό άκρο της πεδιάδας με έκταση περίπου 1km² και οριοθετείται μεταξύ του οικισμού της Νέας Μάκρης στα νότια, του κάμπου του Μαραθώνα στα βόρεια, της παράκτιας ζώνης στα ανατολικά και των παρυφών του καρστικού λόφου Αγριλίκι στα δυτικά. Στο έλος εκφορτίζεται η πηγή Μάτι η οποία παροχετεύεται στη θάλασσα. Το έλος αποστραγγίστηκε το 1931 και σήμερα το μεγαλύτερο μέρος του έχει καταλειφθεί από οικοδομήματα.

Στο σχήμα 4.1, παρουσιάζεται η γεωμορφολογία της περιοχής, όπως κατασκευάστηκε από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους που χορηγήθηκε από το Εθνικό Κτηματολόγιο, με κλίμακα 1:5000. Για τη κατασκευή του χάρτη χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ArcMap 10.1. Εξαιτίας της ύπαρξης πληθώρας στρατηγικών σημείων στην ευρύτερη περιοχή του Μαραθώνα (πρώην αμερικάνικη βάση στο έλος του Σχινιά, βάση ελικοπτέρων ναυτικού στο Κοτρώνι, ναυτική βάση Νοτίου Ευβοϊκού στην Αγ. Μαρίνα κ.α.) το ψηφιακό μοντέλο εδάφους περιείχε τμήματα τα οποία δεν εμπεριείχαν πληροφορία. Στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής, τα κενά αυτά καλύφθηκαν λαμβάνοντας πληροφορία υψομέτρου από τις γύρω περιοχές των κενών κελιών, προκειμένου να διεκπεραιωθούν οι εργασίες που ήταν προγραμματισμένες για τη διεξαγωγή της διπλωματικής.



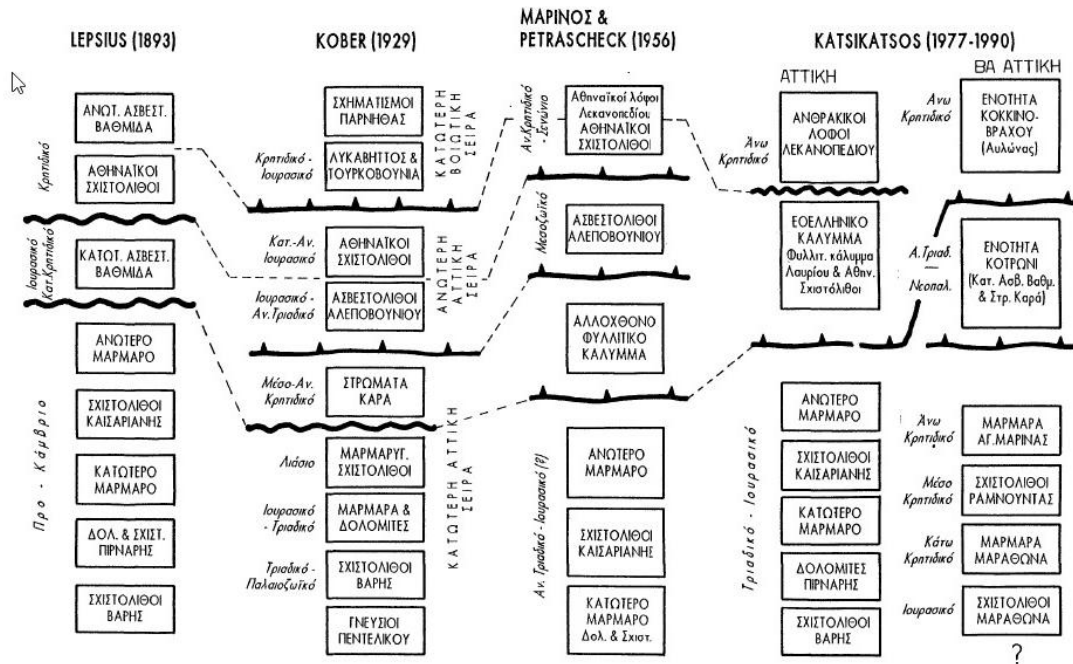
Σχήμα 4.1 Γεωμορφολογικός χάρτης περιοχής Μαραθώνα

4.2 ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

4.2.1 ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Ο όρμος του Μαραθώνα ανήκει γεωγραφικά στην ευρύτερη περιοχή της βορειοανατολικής Αττικής. Η περιοχή αυτή, από γεωτεκτονική άποψη, εντάσσεται στην «Ενδιάμεση Τεκτονομεταμορφική ζώνη των Ελληνίδων» όπως αυτή ορίστηκε από τον Brunh (1956). Πιο συγκεκριμένα, αποτελεί τμήμα της Αττικοκυκλαδικής μάζας (Marinos & Petrascheck, 1956), και μάλιστα στα όρια της με τη Πελαγονική, με τη περιοχή μελέτης (πεδιάδα Μαραθώνα) να βρίσκεται στο βορειοδυτικό τμήμα αυτής.

Πολλοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί κατά τη διάρκεια του τελευταίου αιώνα, με τη δομή της Ανατολικής Αττικής, διατυπώνοντας διάφορες απόψεις για τη λιθοστρωματογραφία. Ο Λόζιος (1993), στη διδακτορική του διατριβή για τη τεκτονική της ΒΑ Αττικής, διατυπώνει σχηματικά τις κύριες απόψεις που επικράτησαν στη διάρκεια των χρόνων, για τη λιθοστρωματογραφική δομή της Αττικής (σχήμα 4.2).



Σχήμα 4.2 Σχηματική απεικόνιση των απόψεων των κυριότερων ερευνητών για τη λιθοστρωματογραφική δομή της Αττικής (Λόζιος, 1993)

Στη συνέχεια, ακολουθεί σύντομη περιγραφή των πιο πρόσφατων αναφορών σχετικά με τη γεωτεκτονική και λιθολογική δομή της ΒΑ Αττικής:

Ο Κατσικάτος (1971,1977) παρουσιάζει τη λιθοστρωματογραφία της Αττικής- Ν. Ευβοίας, θεωρώντας για τη περιοχή δύο ζώνες τύπου «Εσωτερικών Ελληνίδων»:

- Ζώνη Αττικής: αποτελεί τη βάση και τη σχετικά αυτόχθονη ζώνη και αποτελείται από το «Μεταμορφωμένο σύστημα Αττικής», τριαδικο-ιουρασικής

ηλικίας με παραμόρφωση και μεταμόρφωση στο Αν. Ιουρασικό (κανονικά μεταμορφωμένα του Lepsius).

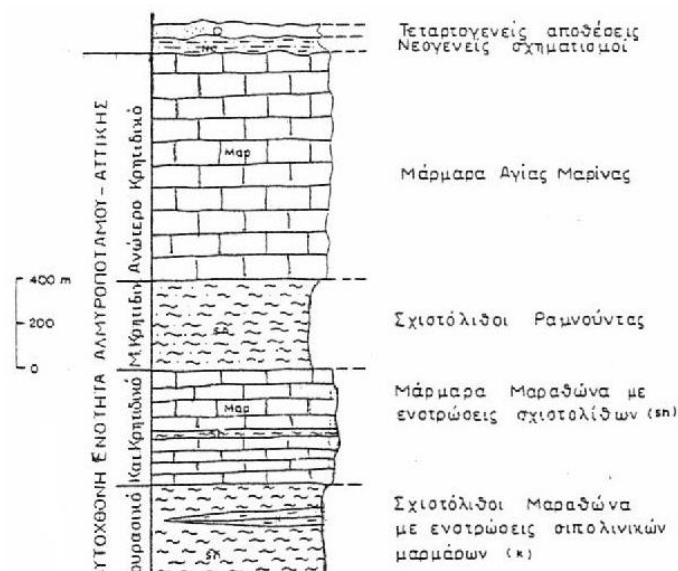
- Ζώνη Αλμυροποτάμου: εμφανίζεται σε Εύβοια και ΒΑ Αττική, είναι επωθημένη στη προηγούμενη ενότητα και αποτελείται από εναλλαγές μαρμάρων και σχιστολίθων με μεταφλύσχη στην οροφή που επικάθεται στα Ανω-Τριαδικά μάρμαρα Αγ. Γεωργίου-Ευβοίας.

Ο Clement (1983), για τη περιοχή της ΒΑ Αττικής διακρίνει τρεις ενότητες:

- Ενότητα Εκάλης: η λιθοστρωματογραφική στήλη αποτελείται από λεπτές εναλλαγές μαρμάρων και σχιστολίθων με κύριες εμφανίσεις σε δυτικό και νότιο Πεντελικό. Η ενότητα αυτή εναποτίθεται στην «Ενότητα Πεντελικού».
- Ενότητα Πεντελικού: αποτελείται από μάρμαρα και υπερκείμενους σχιστόλιθους και εμφανίζεται στο κεντρικό και ανατολικό Πεντελικό στα βόρεια μέχρι το ύψος του Μαραθώνα.
- Ενότητα Μαραθώνα: υπόκειται των δύο παραπάνω ενοτήτων και η λιθοστρωματογραφική στήλη έχει ως βάση σχιστολίθους ενώ σε αυτούς υπέρκεινται τριαδικά μάρμαρα με καρστικά έγκοιλα πληρωμένα με μεταλλεύματα στα οποία εναποτίθενται Άνω-Κρητιδικά μάρμαρα και στη κορυφή σχιστόλιθοι.

Ο Παπανικολάου (1984, 1986) χωρίζει τη περιοχή της Αττικής σε τρεις γεωτεκτονικές ενότητες. Η ανώτερη είναι η ενότητα «Ολύμπου- Αλμυροποτάμου- Κερατέας» με εμφανίσεις σε ΒΑ Αττική, Όλυμπο, Εύβοια και Σάμο και εντάσσεται στις «Εσωτερικές Ελληνίδες». Σε αυτή υπόκειται η «Ενότητα Αττικής», η οποία εντάσσεται στις «Εσωτερικές Ελληνίδες» και την αλλόχθονη «Ενότητα Λαυρίου» που υπέρκειται τεκτονικά της προηγούμενης και αποτελείται από το φυλλικό κάλυμμα Λαυρίου και τους σχηματισμούς του λεκανοπεδίου Αθηνών.

Οι Κατσικάτσος κ.α. (1990), παραθέτουν με σχηματική απεικόνιση στους Γεωλογικούς χάρτες του Ι.Γ.Μ.Ε. τη λιθοστρωματογραφική διάρθρωση της ΒΑ Αττικής – Νοτίου Ευβοίας (Σχήμα 4.3).



Σχήμα 4.3 Στρωματογραφική στήλη ΒΑ Αττικής Περιοχή βορειοδυτικού τμήματος του γεωλογικού φύλλου «Ραφήνα», κλίμακας 1:50 000. Κατά Γ. Κατσικάτσο)

Σύμφωνα με το σχήμα, η στρωματογραφία της ΒΑ Αττικής διαμορφώνεται από εναλλαγές μεγάλου πάχους οριζόντων μαρμάρων και σχιστόλιθων με ηλικία από το Ιουρασικό μέχρι το Άνω Κρητιδικό που πλευρικά στην περιοχή της Ευβοίας, εξελίσσονται στους αντίστοιχους σχηματισμούς του «Αλμυροποτάμου» με ηλικία από το Τριαδικό (μάρμαρα) μέχρι το Ηώκαινο (μετά-φλύσσης). Την ενότητα αυτή ονομάζουν «αυτόχθονη ενότητα Αλμυροποτάμου-Αττικής» και στην οποία υπόκεινται τεκτονικά οι ενότητες των κυανοσχιστολίθων και των αμεταμόρφωτων της Πελαγονικής.

Ο Λόζιος (1993), χωρίζει τη περιοχή στρωματογραφικά σε δύο μεταμορφωμένες γεωτεκτονικές ενότητες:

- Ενότητα «ΒΑ Αττικής» που καταλαμβάνει το μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής και αποτελεί τη σχετικά αυτόχθονη ενότητα. Το υπόβαθρο της ενότητας αυτής είναι άγνωστο.
- Ενότητα «Αγίου Γεωργίου» που υπέρκειται τεκτονικά της προηγούμενης και αποτελεί την αλλόχθονη ενότητα.

Στις δύο παραπάνω ενότητες υπέρκειται και οι αμεταμόρφωτοι σχηματισμοί της Πάρνηθας που αντιπροσωπεύουν τμήματα της Υποπελαγονικής ζώνης η οποία απαρτίζει την Ανατολική Ελλάδα.

4.2.2 ΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Λαμβάνοντας υπόψη τη στρωματογραφική στήλη που παρατίθεται στο σχήμα 4.3, στη στενότερη περιοχή μελέτης απαντώνται τα παρακάτω στρώματα (από κάτω προς τα πάνω):

- Μάρμαρα Πεντέλης: αποτελούν τον κατώτερο ορίζοντα της σειράς σχηματισμών της βορειοανατολικής Αττικής. Πρόκειται για μάρμαρα λευκά ή λευκότεφρα ή κυανού χρώματος, χονδροκρυσταλλικά, μεσοστρωματώδη έως παχυστρωματώδη και κατά θέσεις δολομιτικά.
- Σχιστόλιθοι Διονύσου: εμφανίζονται στη περιοχή της Πεντέλης και το πάχος τους κυμαίνεται από 250 μέτρα (στα Δυτικά της Πεντέλης) μέχρι και 1000 μέτρα (στα Ανατολικά). Πρόκειται για μεταμορφωμένα πετρώματα χαμηλού έως μέσου βαθμού μεταμόρφωσης. Τέτοια πετρώματα είναι οι επιδοτικοί-κεροστιλβικοί γνεύσιοι, επιδοτικοί αμφιβολίτες, επιδοτικοί-αλβιτικοί-χώριτικοί σχιστόλιθοι, μοσχοβιτικοί γνεύσιοι και μοσχοβιτικοί σχιστόλιθοι.]
- Μάρμαρα Γραμματικού: Είναι ανεπτυγμένα στη δυτική πλαγιά της Πεντέλης, με πάχος πάνω από 200 μέτρα, ενώ στα ανατολικά μηδενίζεται. Τα μάρμαρα αυτά εμφανίζονται και βορειότερα στη περιοχή Διονύσου- Γραμματικού με κυμαινόμενο πάχος, ενώ στη περιοχή της λίμνης Μαραθώνα φτάνουν πάχος μερικών δεκάδων μέτρων. Τα μάρμαρα αυτά είναι λεπτοστρωματώδη έως μεσοστρωματώδη, τεφρόλευκα, αδροκρυσταλλικά μέτριας καρσικότητας, ενώ κατά θέσεις μεταπίπτουν σε σιπολιτικά μάρμαρα και ασβεστιτικούς σχιστόλιθους.
- Σχιστόλιθοι Μαραθώνα: στη περιοχή της πόλης του Μαραθώνα έχουν πάχος περίπου 100 μέτρα και αυξάνεται βαθμιαία προς τα βόρεια, μέχρι και τα 1500 μέτρα μεταξύ Γραμματικού και ακτής Νότιου Ευβοϊκού κόλπου. Πρόκειται για

χλωριτικούς και μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους με ενστρώσεις μαρμάρων μικρού πάχους.

- Μάρμαρα Μαραθώνα: αναπτύσσονται κυρίως στη περιοχή μεταξύ Μαραθώνα και Κάτω Σουλίου. Το πάχος τους κυμαίνεται από μερικές δεκάδες έως 500 μέτρα. Είναι μικροκρυσταλλικοί σχηματισμοί με φακούς ή και λεπτές στρώσεις πυριτολίθων και συχνά με παρεμβολές δολομιτικών μαρμάρων και σχιστολιθικές ενστρώσεις.
- Σχιστόλιθοι Ραμνούντας: εμφανίζονται με μορφή μεγάλης ένστρωσης μεταξύ των Μαρμάρων Μαραθώνα και Αγίας Μαρίνας. Είναι μοσχοβιτικοί, χλωριτικοί, χαλαζιακοί και ανθρακικοί με μικρές ενστρώσεις σιπολιτικών μαρμάρων. Το πάχος τους φτάνει τα 400 μέτρα.
- Μάρμαρα Αγίας Μαρίνας: βρίσκονται στη περιοχή της Αγίας Μαρίνας και η συνέχεια τους διακόπτεται από τη θάλασσα του Ευβοϊκού κόλπου. Αποτελούν τα ανώτερα μέρη της σειράς των αυτόχθονων μεταμορφωμένων σχηματισμών (Ενότητα Αλμυροποτάμου). Τα μάρμαρα αυτά είναι τεφρά έως υπόλευκα και κατά θέσεις λευκά. Το πάχος τους, από την επιφάνεια, φτάνει τα 1000 μέτρα.

Οι χαλαροί σχηματισμοί που εντοπίζονται στη πεδιάδα του Μαραθώνα έχουν μέγιστο πάχος 80m (Σιέμος, 2010) και αποτελούνται από τα εξής στρώματα:

Οι σχηματισμοί του Νεογενούς περιλαμβάνουν πληθώρα κλαστικών ιζημάτων (κροκαλοπαγή, λατυποπαγή, αργίλους, άμμους) και μη κλαστικών ιζημάτων (μαργαϊκών και τραβερτινοειδών ασβεστόλιθων). Τα ιζήματα αυτά αποτελούν χερσοποτάμιες, ποταμολιμναίες και λιμναίες αποθέσεις.

Οι Τεταρτογενείς σχηματισμοί αποτελούνται από

- παράκτιους σχηματισμούς: άμμοι, χαλίκια, κροκάλες, συνεκτικοί ψαμμίτες),
- αλλουβιακές αποθέσεις: χαλαρά αργιλοαμμώδη υλικά από άμμους και κροκαλολατύπες στις κοίτες των χειμάρων
- πλευρικά κορήματα και κώνοι κορημάτων
- χερσαίες αποθέσεις: κυρίως παλαιές προσχώσεις και υλικά των παλιών κώνων κορημάτων. Πρόκειται για λεπτομερή υλικά με διάσπαρτες κροκαλολατύπες, ποικίλου μεγέθους και κυρίως ερυθρού χρώματος.

4.2.3 ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΔΙΑΔΑΣ ΜΑΡΑΘΩΝΑ

Ο όρμος του Μαραθώνα βρίσκεται στα ανατολικά του ορεινού όγκου της Πεντέλης. Σύμφωνα με τη Μαργώνη (2006), από στοιχεία γεωλογικής και τεκτονικής συγκρότησης της περιοχής, προκύπτει ότι η ευρύτερη περιοχή αποτελούσε ένα καρστικό σύστημα και η πεδιάδα του Μαραθώνα δημιουργήθηκε ως ένα καρστικό-τεκτονικό βύθισμα της λοφώδους ζώνης της ΒΑ Αττικής. Το βύθισμα δέχτηκε υλικά από εξωγενείς διεργασίες αποσάθρωσης και διάβρωσης τα οποία πλήρωσαν το πυθμένα του. Τα υλικά αυτά έχουν αποτεθεί επάνω σε μία καρστική επιφάνεια ανθρακικών πετρωμάτων. Άρα το υπόβαθρο των προσχώσεων αναμένεται να από μάρμαρα.

Η στρωματογραφία της πεδιάδας του Μαραθώνα έχει διαμορφωθεί από διάφορες εξελικτικές φάσεις και διεργασίες οι οποίες οδήγησαν στη παρακάτω στρωματογραφική διάρθρωση του αλλουβιακού πεδίου (από το πυθμένα προς την οροφή):

- Ο πυθμένας του αλλουβιακού σχηματισμού χαρακτηρίζεται από την απόθεση μαργαϊκού στρώματος σε όλη την έκταση της πεδιάδας. Το στρώμα αυτό αποτελείται από ερυθρό χονδροκλαστικό υλικό κοντά στη λοφώδη ζώνη και κίτρινο λεπτόκοκκο υλικό με πληθώρα συγκριμάτων CaCO_3 στην εξωτερική ζώνη.
- Υπερκείμενο του πυθμένα, έχει αποτεθεί στρώμα χερσοχειμάρρειων κροκάλων καστανέρυθρου χρώματος
- Στρώμα κροκάλων και άμμου τεφρού χρώματος με παράκτια χαρακτηριστικά εντοπίζεται στην ανατολική περιοχή του Σχινιά
- Απόθεση θαλάσσιων, λιμνοθαλάσσιων και ελωδών ιζημάτων με στρώματα τύρφης. Το στρώμα αυτό δημιουργήθηκε κατά το Ολόκαινο.
- Στρώμα χερσοποτάμιων αποθέσεων χειμάρρων ερυθρού χρώματος.

Τα παραπάνω δεδομένα για τη στρωματογραφία της πεδιάδας έχουν προκύψει από σχετική έρευνα της Μαργώνη (2006), βάσει δειγμάτων εδάφους από γεωτρήσεις που δεν ξεπερνούν το βάθος των 16m.

4.2.4 ΤΕΚΤΟΝΙΣΜΟΣ

Το αλπικό υπόβαθρο της περιοχής αποτελείται αποκλειστικά από μεταμορφωμένα πετρώματα τα οποία έχουν υποστεί δύο φάσεις πλαστικής παραμόρφωσης και μία φάση εύθραυστης (Λόζιος, 1993).

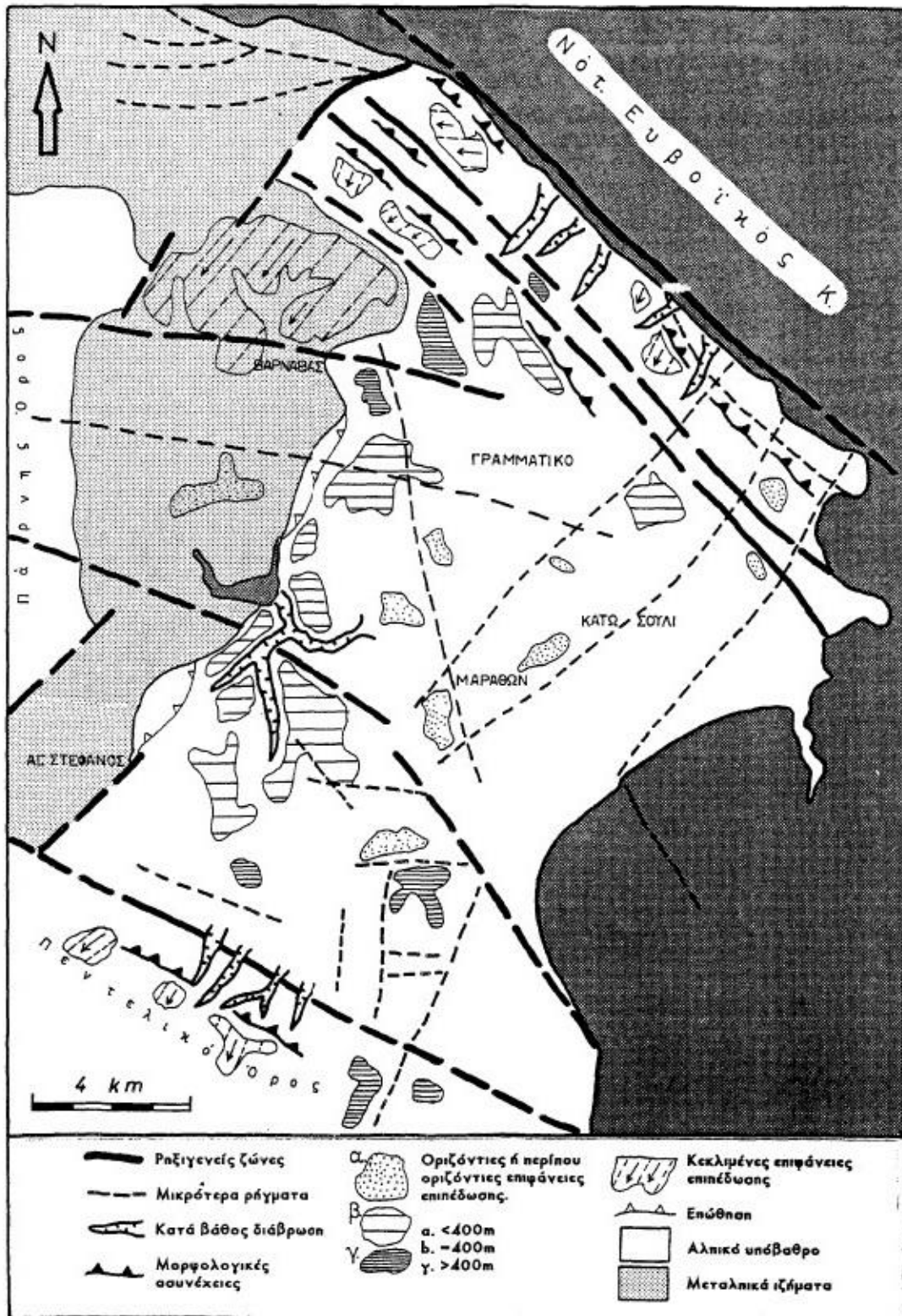
Σύμφωνα με τους Papanikolaou et al. (2007), η περιοχή της ΒΑ αττικής αποτελεί ένα ρηξιτέμαχος το οποίο οριοθετείται από το ρήγμα των Αιφιδνών στα νότια και το ρήγμα του Ωρωπού στα βόρεια, ενώ περιστρέφεται προς τα νότια-νοτιοδυτικά. Το ρηξιτέμαχος διαιρείται μέσω ενός ρήγματος αποκόλλησης, με διεύθυνση ΒΒΑ-ΝΝΔ, σε ένα ανατολικό τμήμα με μεταμορφωμένα πετρώματα και σε ένα δυτικό με αμεταμόρφωτα. Αυτό το ρήγμα αποκόλλησης, προκάλεσε μία καθοδική κίνηση της μη μεταμορφωμένης και την ανοδική κίνηση της μεταμορφωμένης ενότητας από ένα βαθύτερο επίπεδο της λιθόσφαιρας, όπου πραγματοποιήθηκε η παραμόρφωση κατά το Ηώκαινο- Ολιγόκαινο.

Στη στενότερη περιοχή μελέτης, οι μεγάλες ρηξιγενείς ζώνες της αυτόχθονης ενότητας έχουν διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ και διατάσσονται παράλληλα με την ακτογραμμή του νότιου Ευβοϊκού. Η κλίση των ρηξιγενών επιφανειών παρουσιάζει συνήθως φορά προς τα ΒΑ, δημιουργώντας μία σταδιακή κλιμακωτή καταβύθιση προς αυτήν τη κατεύθυνση.

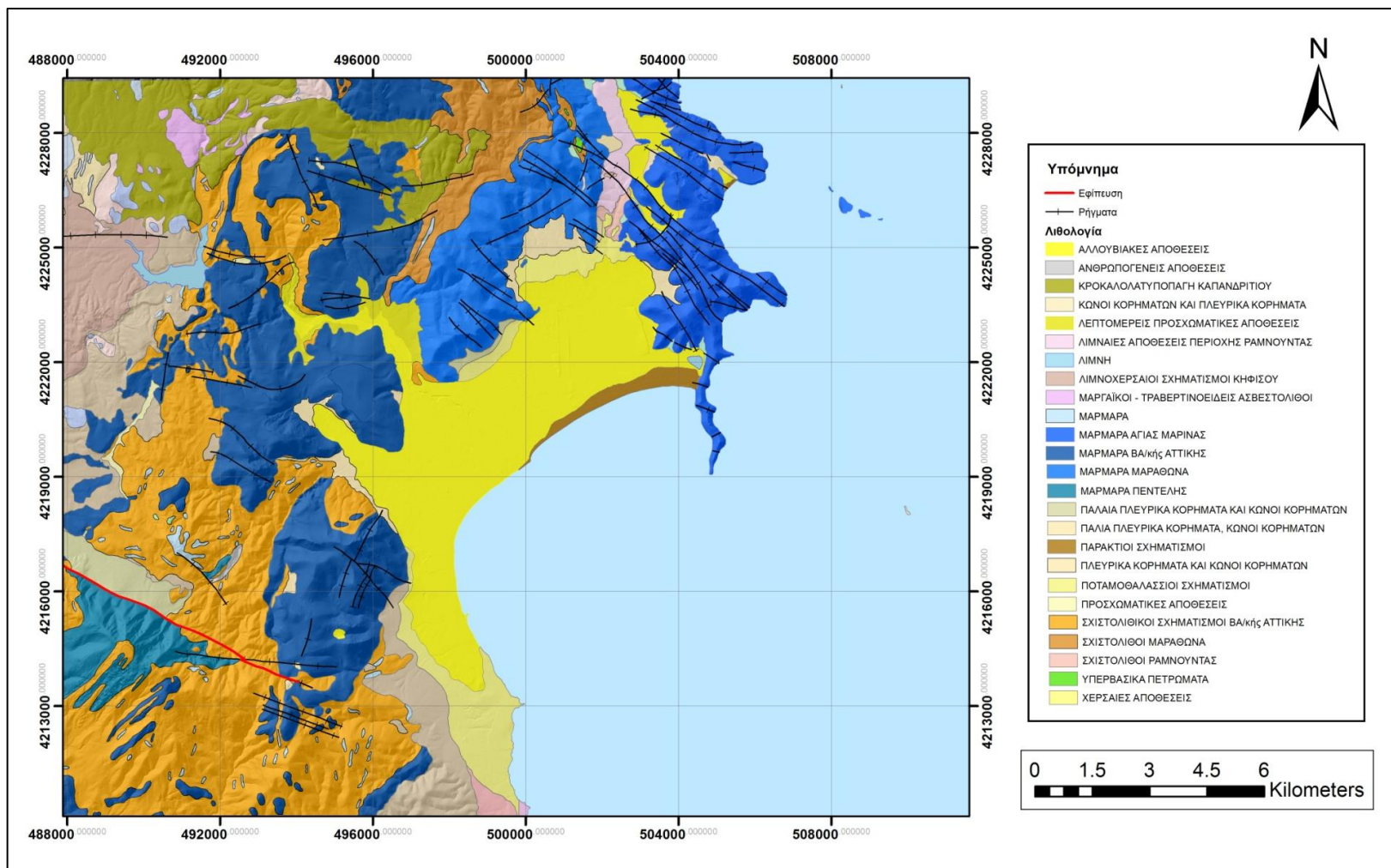
Στη περιοχή, αναπτύσσονται επίσης και μικρότερα ρήγματα διεύθυνσης ΒΔ-ΝΑ και ΒΑ-ΝΔ, διαχωρίζοντας τη περιοχή σε μικρότερα ρηξιτεμάχη (σχήμα 4.4). Η έντονη νεοτεκτονική δραστηριότητα έχει επιδράσει καθοριστικά στη διαμόρφωση του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης, χαρακτηρίζοντας το από ασύμμετρη ανάπτυξη και απότομες αλλαγές στη διεύθυνση των κλάδων του καθώς και τη κατεύθυνση αυτών σε ορισμένες μόνο διευθύνσεις.

Στον χάρτη του σχήματος 4.5, παρουσιάζεται η γεωλογία και ο τεκτονισμός

της ευρύτερης περιοχής της παράκτιας πεδιάδας του Μαραθώνα, βάσει των γεωλογικών φύλλων «Ραφήνα» και «Κηφισιά» του ΙΓΜΕ.



Σχήμα 4.4 Τεκτονικά στοιχεία περιοχής μελέτης (Λόζιος, 1993)



Σχήμα 4.5 Γεωλογικός χάρτης Μαραθώνα (Γεωλογικός χάρτης Ραφήνας(ΙΓΜΕ,1977), Γεωλογικός χάρτης Κηφισιάς(ΙΓΜΕ, 1997), με τροποποιήσεις)

5. ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

5.1 ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΚΑΘΕΣΤΩΣ ΜΑΡΑΘΩΝΑ

Η υπόγεια υδροφορία της υπό μελέτη περιοχής προσδιορίζεται από το είδος των γεωλογικών σχηματισμών και τα τεκτονικά χαρακτηριστικά αυτών. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που αναλύθηκαν παραπάνω για την πεδιάδα του Μαραθώνα και την ευρύτερη περιοχή, διακρίνονται σε υδροπερατούς και αδιαπέρατους. Στους αδιαπέρατους σχηματισμούς εντάσσονται οι σχιστόλιθοι και τα στρώματα αργίλων και αργιλοπηλών. Στα υδροπερατά στρώματα κατατάσσονται τα μάρμαρα και οι προσχλωσιγενείς αποθέσεις της παράκτιας πεδιάδας στα οποία αναπτύσσονται δύο υδροφόρα συστήματα: το καρστικό και το προσχλωματικό.

Στα παρακάτω υποκεφάλαια αναλύονται τα προαναφερθέντα υδροφόρα συστήματα και η υδραυλικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους.

5.1.1 ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΥΔΡΟΦΟΡΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

Πρόκειται για ένα σύστημα υψηλής υδροπερατότητας που διαμορφώνεται στα ανθρακικά πετρώματα της ΑΒΑ Αττικής και έχει έκταση 81 km². Στην πεδιάδα του Μαραθώνα, το εν λόγω σύστημα, αναπτύσσεται στα Μάρμαρα Μαραθώνα, Αγίας Μαρίνας και Γραμματικού. Τέτοιοι σχηματισμοί, είναι υψηλής υδροπερατότητας και η υδροφορία τους οφείλεται κυρίως στη δημιουργία καρστικών εγκοίλων και αγωγών, εξαιτίας διεργασιών εντατικής καρστικοποίησης, αλλά και στον κατακερματισμό των πετρωμάτων από ένα πυκνό δίκτυο ρωγμών και διακλάσεων.

5.1.1.1 Καρστικό σύστημα Μαρμάρων Μαραθώνα

Τα Μάρμαρα του Μαραθώνα αποτελούν τον ορεινό όγκο που διαχωρίζει τη πεδινή περιοχή από τους λοφώδεις σχηματισμούς στο βορειοδυτικό όριο της. Ο σχηματισμός εκτείνεται μέχρι την περιοχή Λιμνιώνα του Ευβοϊκού κόλπου και έχει διεύθυνση Β-Ν.

Πρόκειται για ένα έντονα καρστικοποιημένο σχηματισμό με έντονο τεκτονισμό που εκδηλώνεται με ρήγματα διεύθυνσης Α-Δ και Β-Ν. Το σύστημα κατά το μεγαλύτερο μέρος του περιβάλλεται από υδατοστεγανούς και ημιπερατούς σχηματισμούς ενώ στο βόρειο άκρο του συνορεύει με τη θάλασσα κατά μήκος ενός μικρού τμήματος. Η νότια πλευρά του βρίσκεται σε επαφή με τις αλλουβιακές αποθέσεις της πεδιάδας.

Σύμφωνα με υπολογισμούς των Μελισσάρη και Σταυρόπουλου (1999), ο όγκος νερού που δέχεται ο σχηματισμός από τις βροχοπτώσεις εκτιμάται σε 11,3×10⁶ m³/έτος από τα οποία τα 6,2 m³/έτος τροφοδοτούν τον υδροφορέα.

Το εν λόγω σύστημα εκφορτίζεται φυσικά εν μέρει στη θάλασσα αλλά και υπογείως τροφοδοτώντας τον κοκκώδη σχηματισμό της πεδιάδας, ενώ τεχνητά εκφορτίζεται μέσω πολυάριθμων γεωτρήσεων που έχουν διανοιχτεί στο πεδίο του

Μαραθώνα και χρησιμοποιούνται κυρίως για την άρδευση των γεωργικών εκτάσεων της περιοχής. Ποιοτικά, χαρακτηρίζεται ως υφάλμυρο με τιμές αγωγιμότητας να κυμαίνονται μεταξύ 1.000 και 4.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ και συγκέντρωση χλωριόντων από 40 έως 1.000 mg/lt . Ο υδροφορέας επιβαρύνεται και από νιτρικά ιόντα (15-150 mg/lt) γεγονός που πιθανότατα οφείλεται στη χρήση γεωργικών λιπασμάτων. Πρόκειται για ελαφρώς βασικά νερά με pH 7,2-7,8 και θερμοκρασία 19-20,5 $^{\circ}\text{C}$.

Ο καρστικός υδροφορέας, εκδηλώνεται και επιφανειακά μέσω της Μακαρίας πηγής που αναβλύζει στο Ν-ΝΑ άκρο του σχηματισμού στη περιοχή του Κάτω Σουλίου σε υψόμετρο 2,5m. Πρόκειται για πηγή που εκφορτίζει μεγάλους όγκους υπόγειου νερού που εκδηλώνονται επιφανειακά μέσω δύο λιμνών μικρής έκτασης. Το νερό της Μακαρίας παροχετεύεται σε κανάλι από το οποίο τροφοδοτείται με ελεγχόμενη ροή το Ολυμπιακό κωπηλατοδρόμιο του Σχινιά ενώ το υπόλοιπο εκφορτίζεται στη θάλασσα από το κεντρικό κανάλι αποστράγγισης. Δυστυχώς, δεν υπάρχει χρονοσειρά μετρήσεων της παροχής της πηγής. Οι μόνες διαθέσιμες μετρήσεις παρέχονται από τη υδρομετρήσεις του Υπουργείου Γεωργίας (Μελλισάρης και Σταυρόπουλος, 1999) για τα έτη 1997-1998. Σύμφωνα με αυτές τις μετρήσεις, η μέση παροχή της πηγής ανέρχεται στα 1548 m^3/h , δηλαδή $13,5 \times 10^6 \text{m}^3/\text{έτος}$. Η πηγή χαρακτηρίζεται υφάλμυρη με αγωγιμότητα περί των 1.200 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

5.1.1.2 Καρστικό σύστημα μαρμάρων Γραμματικού

Το καρστικό υδροφόρο σύστημα μαρμάρων Γραμματικού τοποθετείται στο δυτικό τμήμα της περιοχής μελέτης. Είναι ένας έντονα καρστικοποιημένος σχηματισμός με έντονο τεκτονισμό που εκφράζεται από μία σειρά ρηγμάτων διεύθυνσης ΝΑ-ΒΔ, Α-Δ και ΝΔ-ΒΑ. Η καρστική υδροφορία του συστήματος εκφορτίζεται μέσω των καρστικών πηγών της Οινόης. Σύμφωνα με μετρήσεις των Μελλισάρη και Σταυρόπουλου, η μέση παροχή των πηγών ανέρχεται στα $1,152 \times 10^6 \text{m}^3/\text{έτος}$.

5.1.1.3 Καρστικό σύστημα μαρμάρων Αγίας Μαρίνας

Ο συγκεκριμένος σχηματισμός αναπτύσσεται στο ΒΑ άκρο της πεδιάδας του Μαραθώνα. Είναι ένα σύστημα με έντονη καρστικοποίηση και έντονο τεκτονισμό σε όλη του την έκταση με παράλληλα ρήγματα διεύθυνσεως ΝΑ-ΒΔ. Η βόρεια και η ανατολική του πλευρά είναι σε επαφή με τη θάλασσα του Ευβοϊκού κόλπου και του όρμου του Μαραθώνα. Η δυτική του πλευρά επαφίεται σε ημιπερατούς νεογενείς και τεταρτογενείς σχηματισμούς της πεδιάδας. Η επιφανειακή εμφάνιση των μαρμάρων έχει έκταση 14km^2 και εμπλουτίζεται από τα νερά της βροχόπτωσης κατά $4,1 \times 10^6 \text{m}^3$ ετησίως.

Λόγω της εκτεταμένης και άμεσης υδραυλικής επικοινωνίας του υδροφόρου με τη θάλασσα, το σύστημα είναι ιδιαίτερα υφάλμυρο ($\text{Cl}^- > 1500 \text{ppm}$).

Το υπόγειο νερό του καρστ εκφορτίζεται απευθείας στη θάλασσα προς την ανατολική πλευρά, ενώ προς τα δυτικά στην επαφή των μαρμάρων με τις αποθέσεις

του υγροτόπου στο Σχινιά με μικρές υφάλμυρες πηγές που αναφέρονται ως πηγή Δρακονέρας. Το νερό της πηγής διαχέεται στο άκρο του έλους και στη συνέχεια απορρέει στη θάλασσα μέσω αποστραγγιστικών τάφρων. Η εκτίμηση της ετήσιας παροχής από τους Μελισσάρη και Σταυρόπουλο ανέρχεται στα $650 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{έτος}$.

5.1.2 ΚΟΚΚΩΔΕΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

Το παράκτιο κοκκώδες υδροφόρο σύστημα του Μαραθώνα, αναπτύσσεται σε σχηματισμούς νεογενών και τεταρτογενών αποθέσεων. Οι σχηματισμοί αυτοί χαρακτηρίζονται από λιθολογική ανομοιομορφία με συνεχείς στρωματογραφικές εναλλαγές από αργίλους, άμμους, χάλικες, αμμούχες αργίλους, μάργες, κροκαλοπαγή και ψαμμίτες.

Οι τεταρτογενείς αποθέσεις διακρίνονται σε πρόσφατες και παλαιότερες, με τις πρόσφατες να αναπτύσσονται σε όλη την επιφάνεια της πεδινής περιοχής και τις παλαιότερες να καλύπτονται από αυτές. Το πάχος των αποθέσεων ποικίλει, μεταξύ 30-40m για τις παλαιότερες και 5-10m για τις νεότερες (Μελισσάρης & Σταυρόπουλος, 1999).

Από υδρογεωλογικής άποψης, η συμπεριφορά του κοκκώδους συστήματος εξαρτάται από το βάθος και το πάχος του, τη στρωματογραφική διάταξη και τη λιθολογική σύσταση. Ο υδροφορέας που αναπτύσσεται, είναι κατά το μεγαλύτερο του μέρος αξιοποιήσιμος αφού διαμορφώνεται ένα φρεάτιο υδροφόρο στρώμα, ενώ η ύπαρξη υλικών με υψηλή περιεκτικότητα σε άργιλο, παρουσιάζει περιοχές περιορισμένης υδροφορίας.

Η τροφοδοσία του υπόγειου υδροφόρου γίνεται άμεσα μέσω της κατείσδυσης του βρόχινου νερού, μέσω των διηθήσεων των υδατορευμάτων και των τάφρων καθώς και μέσω πλευρικών μεταγίσεων του καρστικού νερού των μαρμάρων κατά το τόξο Ανατολή Πρώην Αμερικανική Βάση και βορειοδυτικά. Η μεγάλη διαφορά στην υδροπερατότητα μεταξύ των καρστικών μαρμάρων και των προσχώσεων, που έχει ως αποτέλεσμα και την εμφάνιση καρστικών πηγών, τις περισσότερες φορές δεν επιτρέπει σημαντικές υπόγειες μεταγίσεις νερών (Φωτόπουλος, 2004). Μικρή τροφοδοσία υπάρχει και από το κανάλι της Μακαρίας που διοχετεύει το νερό προς τη θάλασσα. Η εκφόρτιση του υδροφόρου γίνεται μετωπικά προς τη θάλασσα και μέσω πολυάριθμων πηγαδιών και γεωτρήσεων που χρησιμοποιούνται για αρδευτικούς σκοπούς.

Σύμφωνα με στοιχεία του Σιέμου (2010) το μέσο βάθος του υδροφόρου είναι στα 10 m και το πιεζομετρικό φορτίο στα 3m με ετήσιο εύρος διακύμανσης τα 2,5m. Το στρώμα χαρακτηρίζεται από σχετικά χαμηλή υδραυλική αγωγιμότητα (10^{-6} - 10^{-5} m/sec) και μεταβιβαστικότητα μεταξύ 2×10^{-5} και $2 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{sec}$.

Το ισοζύγιο του υδροφορέα θεωρείται ελλειμματικό αφού η τροφοδοσία υπολογίζεται στα $5 \times 10^6 \text{ m}^3$ ανά έτος και οι απολήψεις από το υδροφόρο σύστημα $6 \times 10^6 \text{ m}^3$ ανά έτος.

Η ποιοτική κατάσταση του υδροφορέα επιβαρύνεται λόγω της θαλάσσιας διείσδυσης και της εντατικής χρήσης αζωτούχων λιπασμάτων της γεωργικής δραστηριότητας. Ενδεικτικές για την ποιοτική κατάσταση, είναι οι τιμές της

αγωγιμότητας που κυμαίνονται μεταξύ 800 και 5.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, των χλωριόντων (100-1200 mg/l) και των νιτρικών ιόντων (10-180 mg/l) (Σιέμος, 2010).

Για την περεταίρω διερεύνηση των συνθηκών του αλλουβιακού υδροφορέα πραγματοποιήθηκε έρευνα πεδίου κατά την οποία έγινε απογραφή γεωτρήσεων και πηγαδιών σε όλη την έκταση της πεδιάδας του Μαραθώνα. Τα σημεία που καταγράφηκαν, παρουσιάζονται στο σχήμα 5.1. Στη συνέχεια, επιλέχθηκε δίκτυο παρακολούθησης του υδροφορέα από επιλεγμένα πηγάδια και γεωτρήσεις.

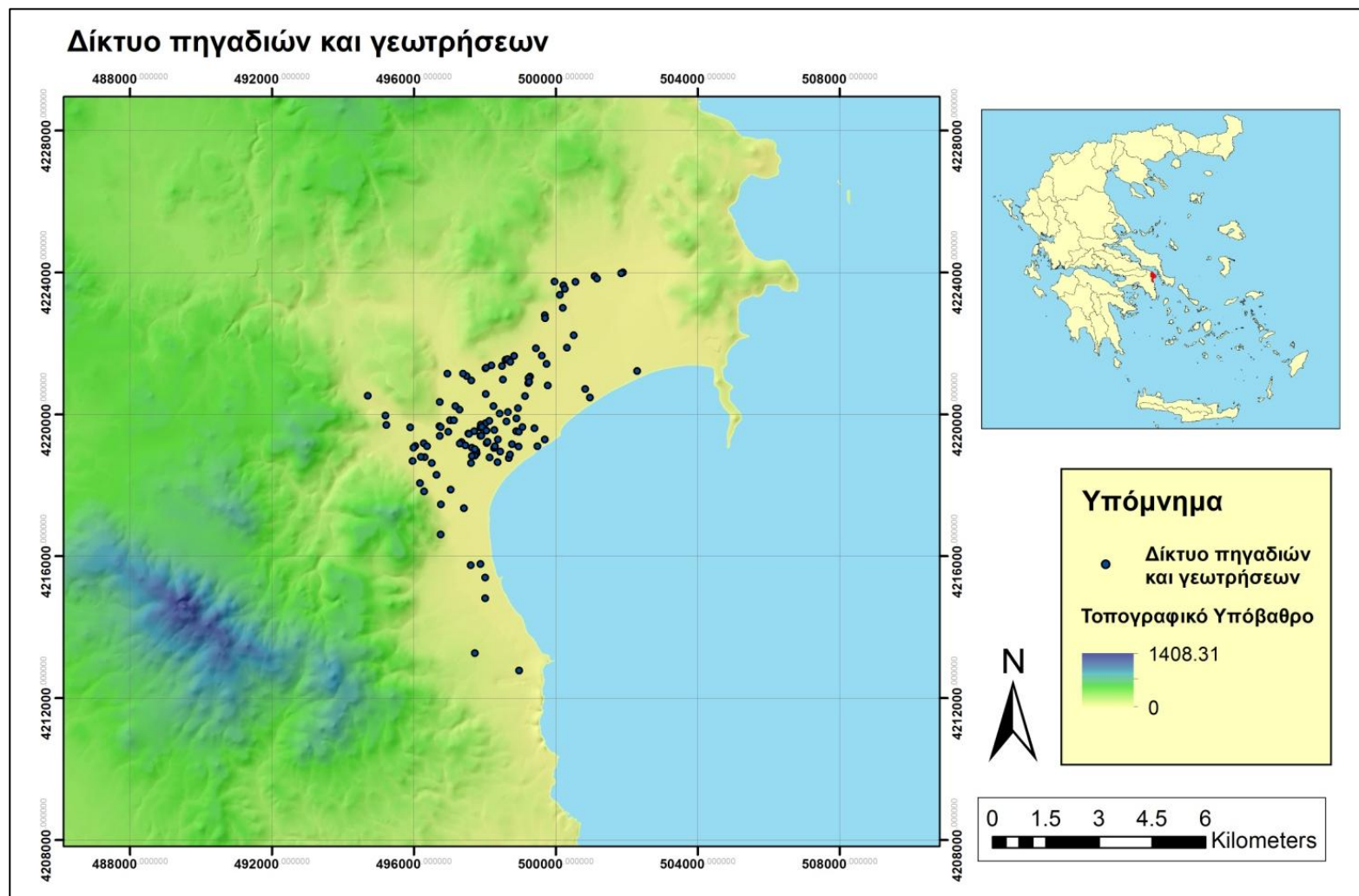
5.1.2.1 Πιεζομετρικές συνθήκες κοκκώδους συστήματος

Η εξέταση της ποσοτικής κατάστασης του αλλουβιακού υδροφορέα έγινε μέσω μετρήσεων στάθμης σε επιλεγμένες θέσεις στο δίκτυο πηγαδιών και γεωτρήσεων που εδραιώθηκε στη περιοχή (σχήμα 5.2). Από τις μετρήσεις και τα υψόμετρα των σημείων, σχεδιάστηκε ο πιεζομετρικός χάρτης του προσχωματικού συστήματος της πεδιάδας (σχήμα 5.3). Ο χάρτης σχεδιάστηκε με τα λογισμικά πακέτα ArcMap 10.1 και το πακέτο γεωστατιστικών μοντέλων του MAPINFO Professional 9.0 & Vertical Mapper 3.0.

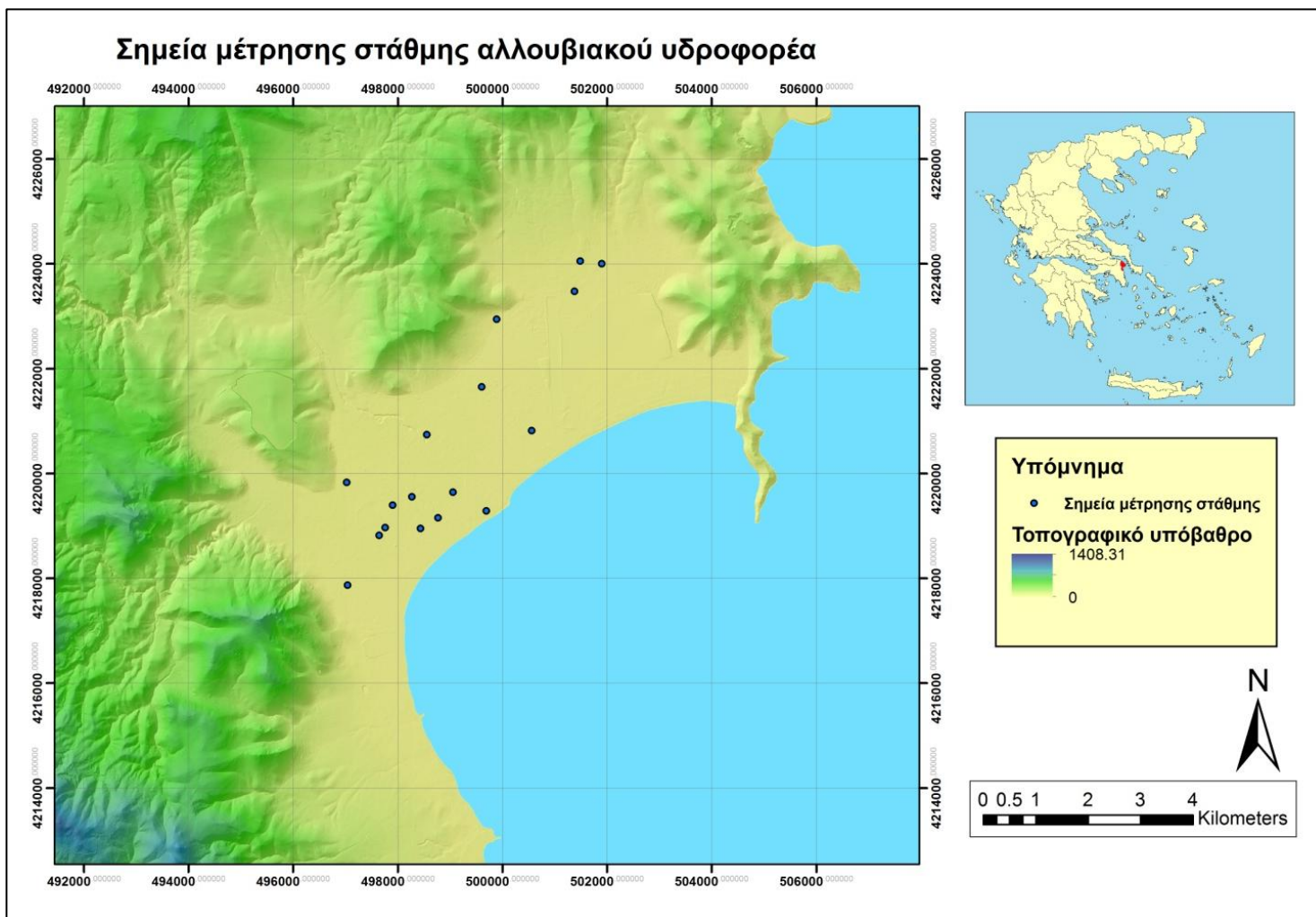
Το πιεζομετρικό φορτίο στη περιοχή, κυμαίνεται μεταξύ 0 και 2,5 μέτρα. Τα χαμηλότερα υδραυλικά φορτία παρατηρούνται κοντά στην ακτή. Οι γραμμές ροής στη περιοχή που συνορεύει με τα Μάρμαρα Μαραθώνα, έχουν διεύθυνση Β-Ν, ενώ στη περιοχή των Μαρμάρων Γραμματικού, η διεύθυνση είναι ΒΔ-ΝΑ και στο νοτιοδυτικό άκρο ΒΑ-ΝΔ. Από τις γραμμές ροής, συμπεραίνεται ότι ο αλλουβιακός υδροφορέας τροφοδοτείται από τα μάρμαρα που περικλείουν τη πεδιάδα, με εξαίρεση τα Μάρμαρα Αγ. Μαρίας στα ανατολικά.

Από την κατανομή των ισοπιεζομετρικών γραμμών στο χάρτη γίνεται αντιληπτό ότι στην περιοχή η υδραυλική κλίση δεν είναι ανεστραμμένη και επομένως η θαλάσσια διείσδυση 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 διείσδυσης είναι μικρότερες από της ενεργής καθώς η εισχώρηση του θαλασσινού νερού γίνεται με μικρότερους ρυθμούς, χωρίς να δημιουργείται κίνδυνος κατάπτωσης.

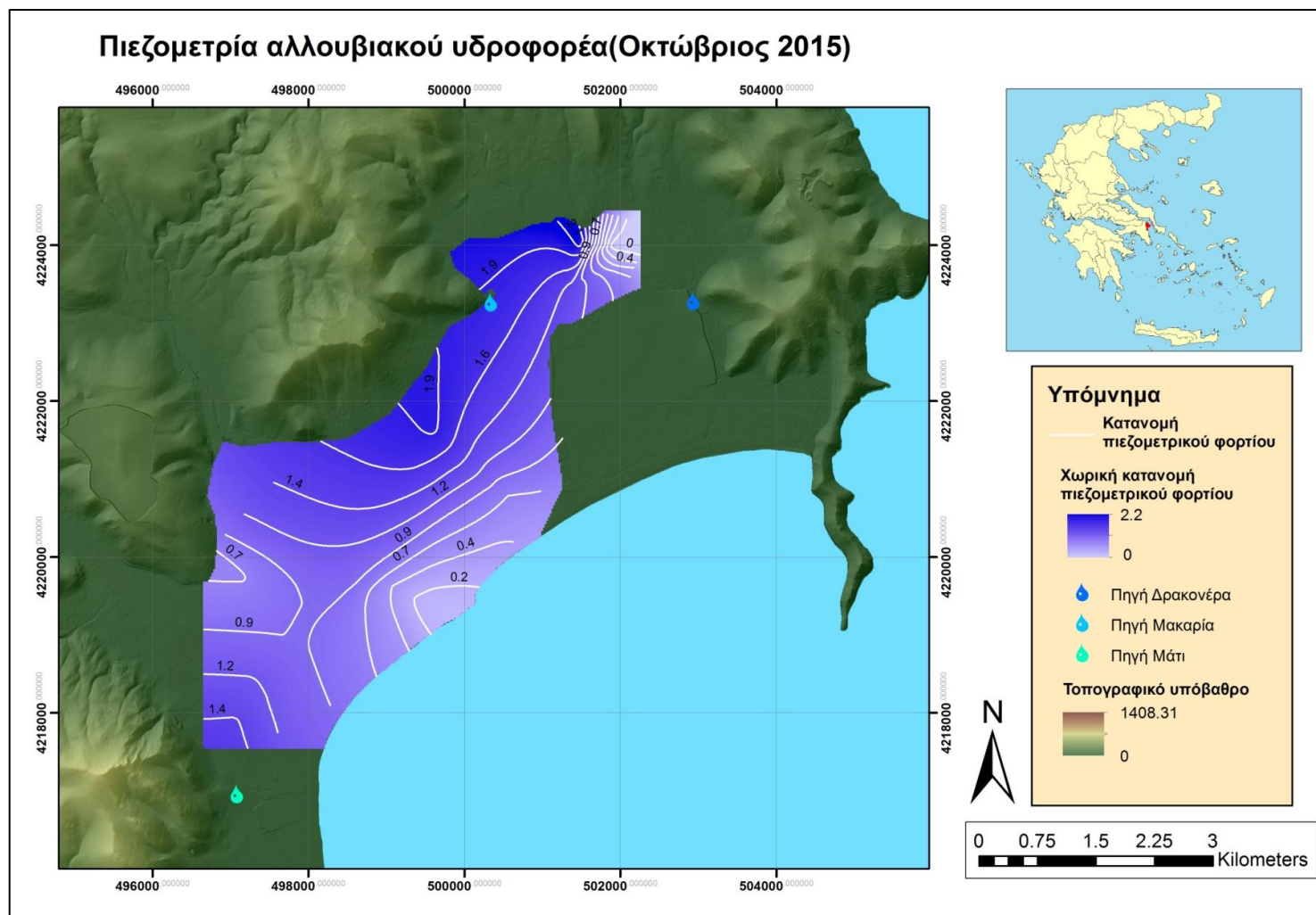
Στο χάρτη του σχήματος 5.4 φαίνεται η πιεζομετρία Οκτωβρίου του έτος 1991. Συγκρίνοντας τους δύο πιεζομετρικούς χάρτες (σχήμα 5.3 και 5.4) παρατηρείται σημαντική βελτίωση της πιεζομετρίας στη περιοχή των Μαρμάρων του Μαραθώνα (από μηδενικό πιεζομετρικό φορτίο στα 2m), ενώ στη περιοχή των Μαρμάρων Γραμματικού, η πιεζομετρία έχει ελαττωθεί περίπου κατά 1.3m (από 2m στα 0.7 m).



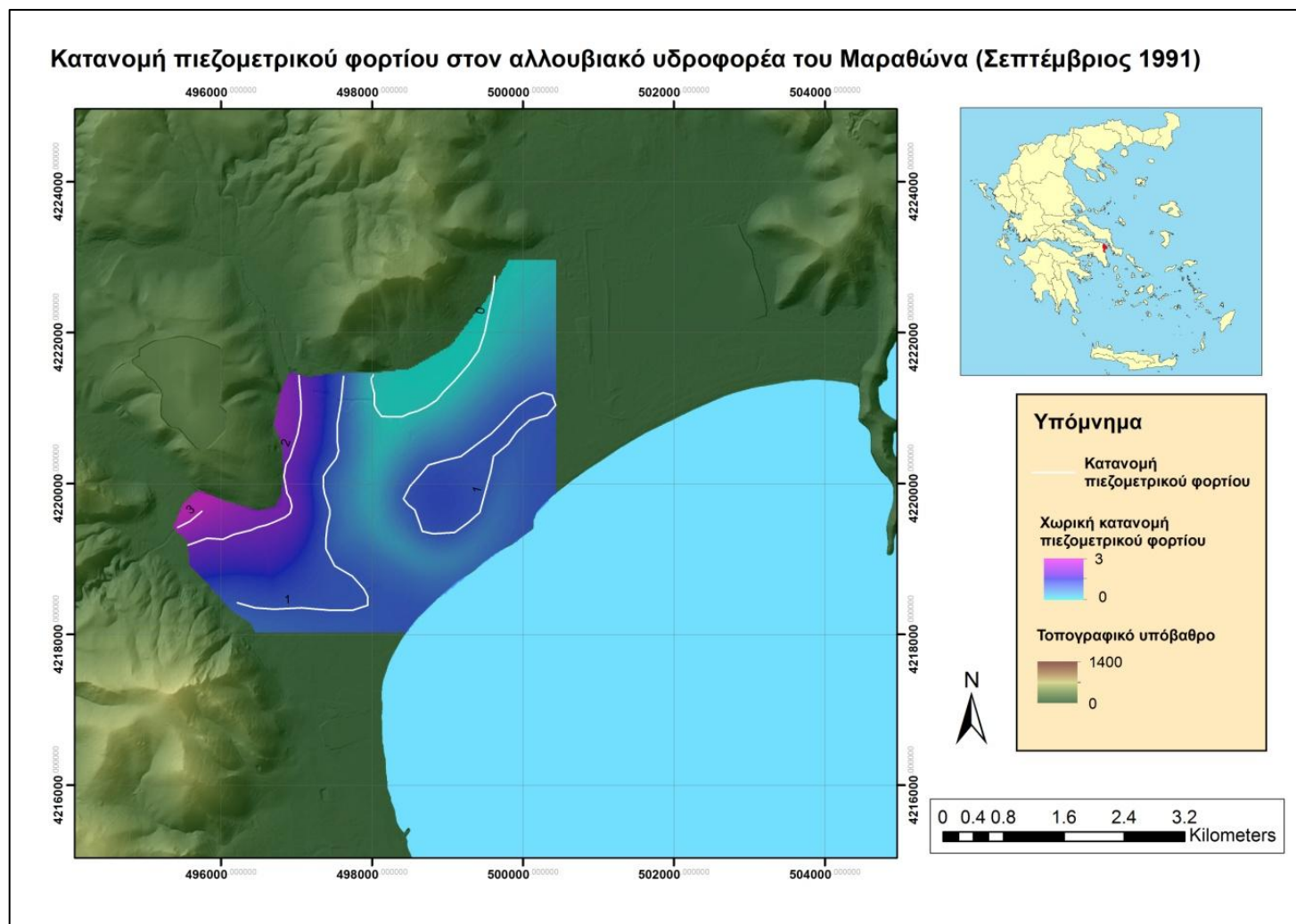
Σχήμα 5.1 Πλήρες δίκτυο πηγαδιών και γεωτρήσεων στη πεδιάδα του Μαραθώνα.



Σχήμα 5.2 Δίκτυο πηγαδιών/γεωτρήσεων μέτρησης στάθμης αλλουβιακού υδροφορέα



Σχήμα 5.3 Πιεζομετρικός χάρτης αλλουβιακού υδροφορέα (Οκτώβριος 2015)



Σχήμα 5.4 Πιεζομετρικός χάρτης Αλλουβιακού υδροφόρα (Οκτώβριος 1991)(Πηγή: Κουμαντάκης κ.α., 1993 με τροποποιήσεις)

6. ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ ΠΕΔΙΑΔΑΣ ΜΑΡΑΘΩΝΑ

Για τη διερεύνηση της ποιότητας των υπογείων νερών της πεδιάδας και την παρακολούθηση του μετώπου της θαλάσσιας διείσδυσης, αναπτύχθηκε δίκτυο παρακολούθησης υπόγειων νερών από επιλεγμένα πηγάδια του αλλουβιακού (28 θέσεις) και του καρστικού υδροφορέα (7 σημεία) και στη συνέχεια λήφθηκαν δείγματα νερού. Στα δείγματα αυτά έγιναν επιτόπιες μετρήσεις και στη συνέχεια μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π., όπου αναλύθηκαν χημικά ως προς τα βασικά ιόντα. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων και των χημικών αναλύσεων περιγράφονται στα παρακάτω κεφάλαια.

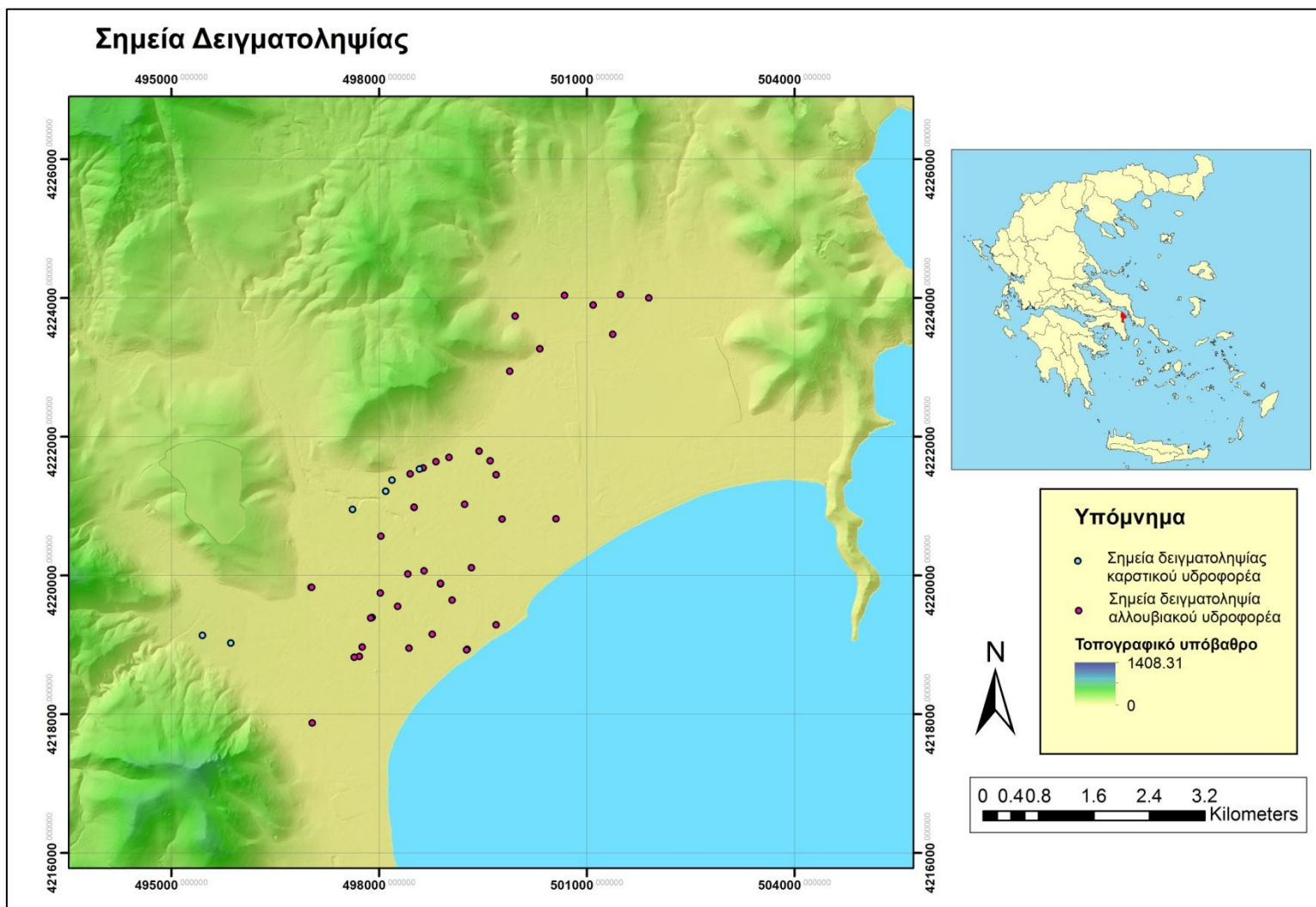
6.1 ΕΡΕΥΝΑ ΠΕΔΙΟΥ- ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Για την παρακολούθηση της υφιστάμενης κατάστασης του υδροφόρου, συλλέχθηκαν δείγματα νερού από πηγάδια και γεωτρήσεις που επιλέχθηκαν βάσει της τοποθεσίας τους. Η δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε κατά την έναρξη της υγρής περιόδου (Οκτώβριος) του έτους 2015. Στο παρακάτω σχήμα (6.1) φαίνονται τα σημεία δειγματοληψίας στον αλλουβιακό και στον καρστικό υδροφορέα.

Στα δείγματα έγιναν επί τόπου μετρήσεις ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας (SEC), pH και θερμοκρασίας (T) και διαλυμένων οξυγόνων με ειδικά φορητά όργανα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους πίνακες 6.1 και 6.2.

Πίνακας 6.1 Επιτόπου μετρήσεις δειγμάτων καρστικού υδροφορέα

ID	EC($\mu\text{S}/\text{cm}$)	T($^{\circ}\text{C}$)	pH
MG 84	2560	19.7	7.05
MG44	2150	19.7	7
MG53	2660	20.5	7.33
MG4	1986	19.4	7.43
MG 84	2560	19.7	7.05
MG119	2210	17.6	7.14
MG120	1603	18.6	7.18



Σχήμα 6.1 Σημεία δειγματοληψίας

Πίνακας 6.2 Επιτόπου μετρήσεις δειγμάτων αλλουβιακού υδροφορέα

ID	EC($\mu\text{S/cm}$)	T($^{\circ}\text{C}$)	pH
MG71	2810	20.4	7.12
MG24	4570	19.1	6.94
MG73	4340	22	7.15
MG74	3880	22.5	6.93
MG75	3140	19.7	7.1
MG76	2900	22	7.1
MG77	4030	20.1	7.01
MG13	3310	22.3	7.24
MG79	1905	21.9	6.9
MG 36	1990	20.5	7.18
MG 34	1295	18.5	7.19
MG 43	3310	18.9	7.04
MG 82	3880	18.9	7.09
MG 86	6650	19	6.9
MG 88	2720	20.3	7.18
MG48	3840	19.9	7.24
MG2	2610	19.4	7.68
MG57	3630	21.1	6.82
MG100	4320	18.3	6.82
MG101	3540	20.3	6.91
MG102	2000	19.2	7.2
MG11	3360	20.5	6.89
MG103	2170	20.2	7.37
MG104	1313	20.1	7.2
MG8	1120	19.8	7.3
MG9	1969	20	7.6
MG51	5750	20.1	7.12
MG 80	2320	19.2	7.76

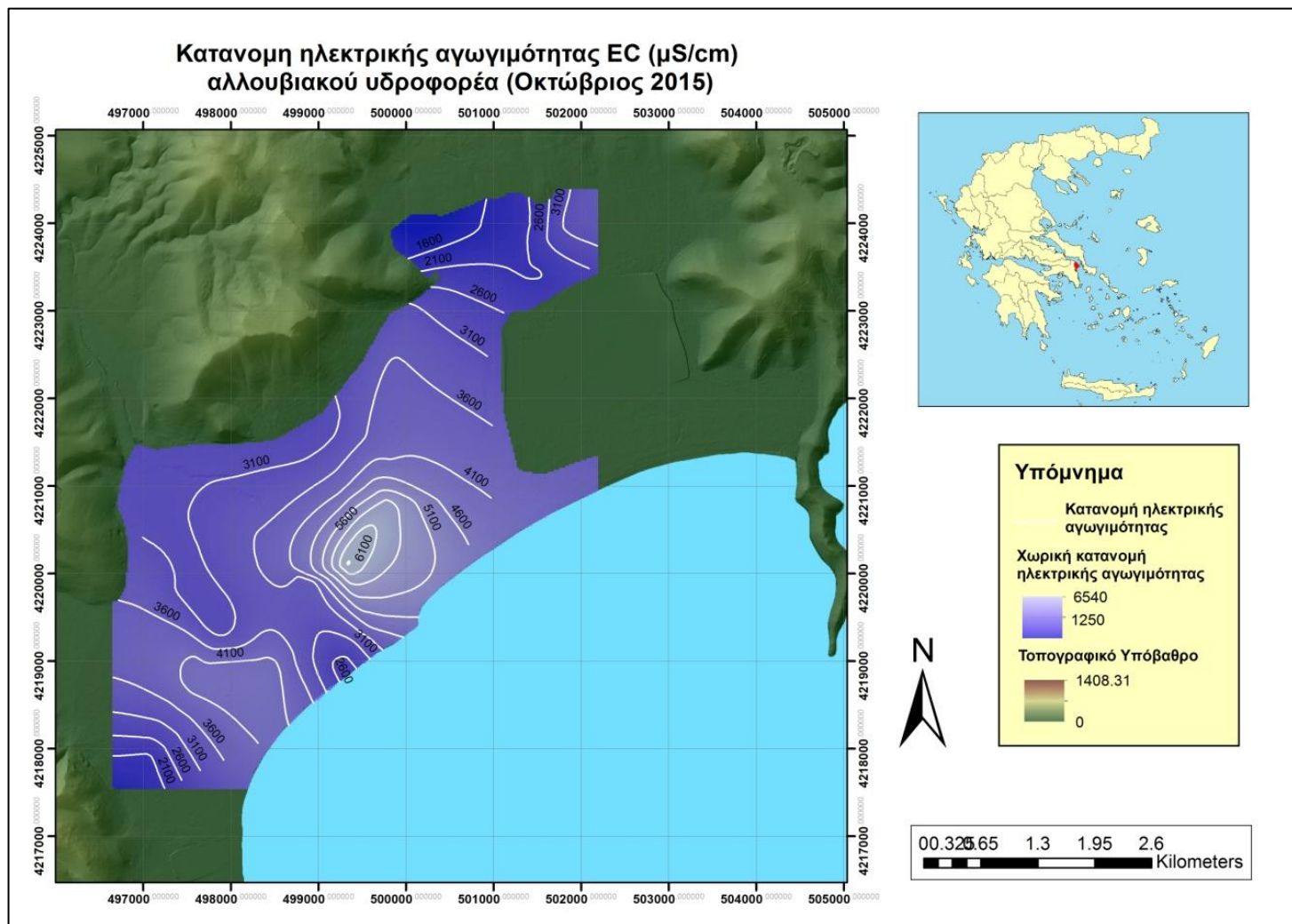
6.1.1 ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ (SPECIFIC ELECTRICAL CONDUCTIVITY, SEC)

Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα των υδάτων, αποτελεί μία πρώτη ασφαλή 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 $\mu\text{S/cm}$. Τιμές μεγαλύτερες των 1500 $\mu\text{S/cm}$ υποδεικνύουν ότι ο υπόγειος υδροφορέας έχει υποστεί κάποια μορφή ρύπανσης.

Από τις μετρήσεις που παρουσιάστηκαν στους πίνακες 6.1 και 6.2, παρατηρείται ότι η ηλεκτρική αγωγιμότητα του υπόγειου νερού στα περισσότερα δείγματα είναι ιδιαίτερα αυξημένη και μάλιστα οι μεγαλύτερες τιμές παρατηρούνται στα δείγματα του προσχωματικού υδροφορέα όπου η υφαλμύριση είναι ιδιαίτερα έντονη εξαιτίας των πολυάριθμων γεωτρήσεων και πηγαδιών που αντλούν το υπόγειο νερό. Στο χάρτη του σχήματος 6.2 παρουσιάζεται η κατανομή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στο αλλουβιακό στρώμα της περιοχής.

Σύμφωνα με τον παρακάτω χάρτη, παρατηρούνται ιδιαίτερα αυξημένες τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στο κεντρικό τμήμα της πεδιάδας, με μέγιστη τιμή τα 6650 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Σημεία με υψηλή αγωγιμότητα βρίσκονται πλησίον της ακτογραμμής, όπου η λεκάνη συνορεύει με τη θάλασσα. Στις επαφές του υδροφορέα με τα μάρμαρα παρατηρούνται μικρότερες αγωγιμότητες, κυρίως στα σημεία που εκδηλώνονται οι πηγές Μακαρία (Κάτω Σούλι) και Μάτι (Μπρεξίζα). Ο λόγος έγκειται πιθανώς στη τροφοδοσία του αλλουβιακού υδροφορέα από τα νερά του καρστ μέσω τις εκφόρτισης των πηγών αλλά και από την απομάκρυνση των περιοχών αυτών από την ακτή.

Η αυξημένη αγωγιμότητα στον υδροφορέα του Μαραθώνα μπορεί να προέρχεται από τη διείσδυση του θαλασσινού νερού, αφού το υπόγειο υδατικό σύστημα συνδέεται και τελικά απορρέει στη θάλασσα. Η υψηλή αγωγιμότητα αποτελεί ένα πρώτο δείκτη για αυτόν τον ισχυρισμό όμως για την εξακρίβωση της υφαλμύρισης του υδροφορέα είναι αναγκαίες περισσότερες ενδείξεις, όπως για παράδειγμα η συγκέντρωση χλωριόντων στα υπόγεια νερά της περιοχής.

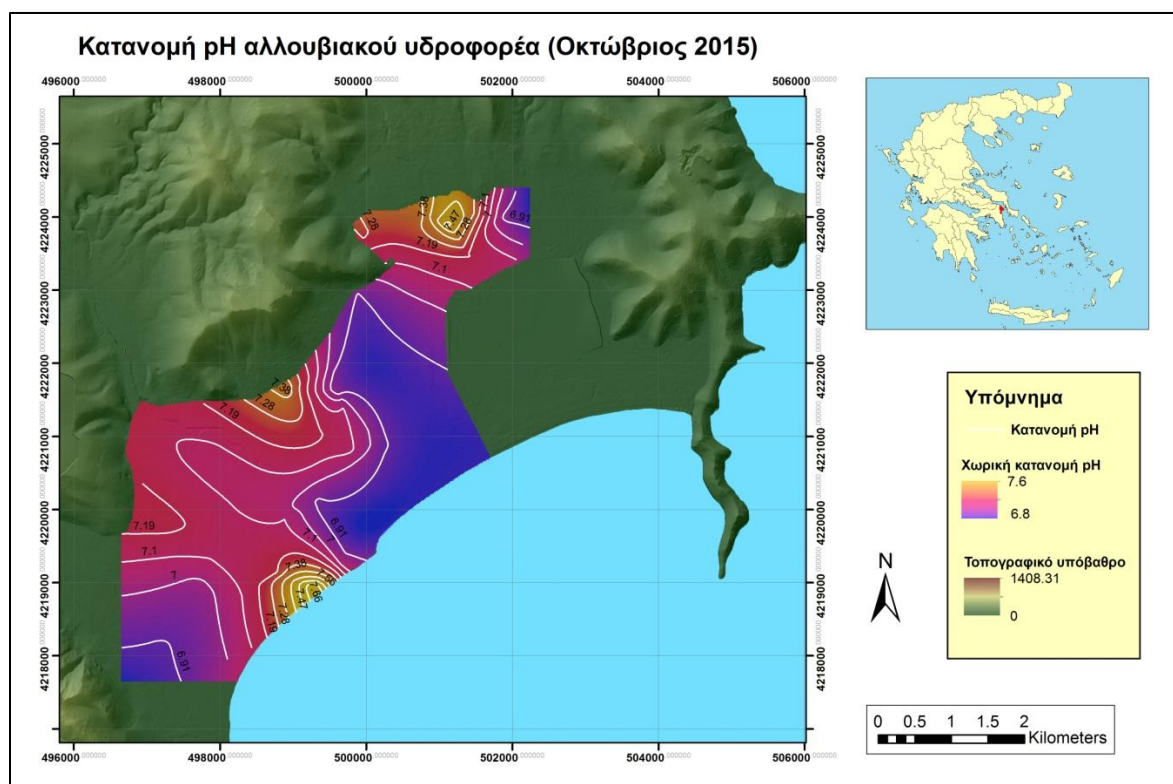


Σχήμα 6.2 Κατανομή ηλεκτρικής αγωγιμότητας στον αλλουβιακό υδροφορέα του Μαραθώνα

6.1.2 pH

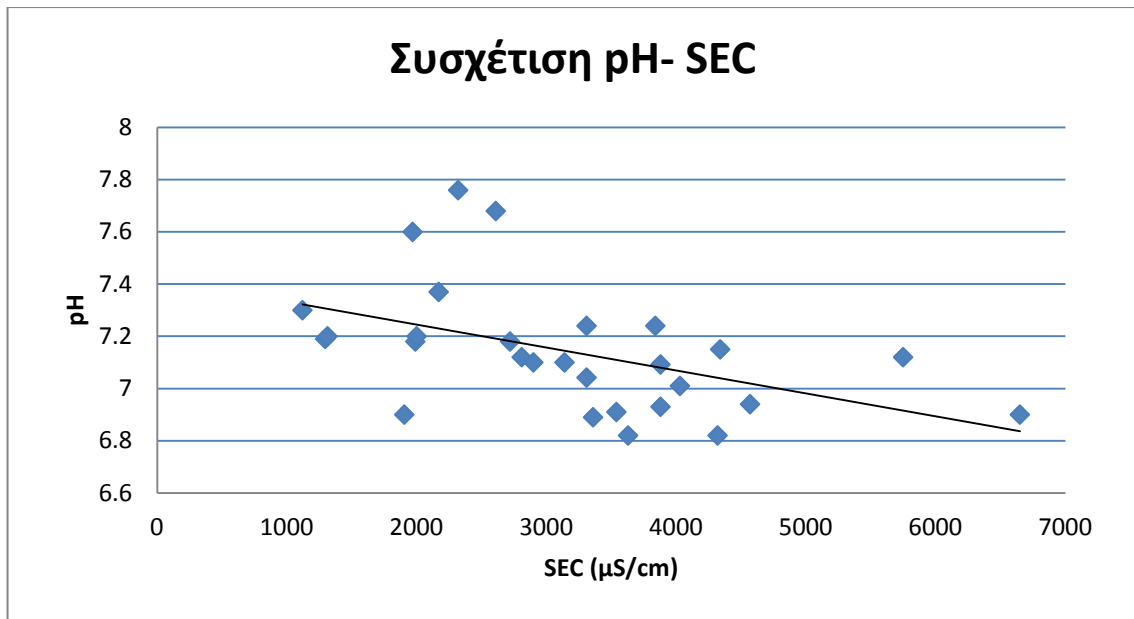
Το pH είναι ένας δείκτης με ιδιαίτερη σημασία όσον αφορά την ποιότητα νερού ενός δείγματος, αφού συνδέεται άμεσα με τη φυσικοχημική του κατάσταση. Κατά το Καλλέργη (2000), η μέτρηση του pH πρέπει να γίνεται στην ύπαιθρο, σε συνθήκες που να αποτρέπουν την ανταλλαγή αερίου του δείγματος νερού με τον ατμοσφαιρικό αέρα καθώς είναι ευαίσθητο στη συγκέντρωση CO₂. Οι μετρήσεις pH που έγιναν στα δείγματα του Μαραθώνα έχουν μικρές διαβαθμίσεις (από 6,8 έως 7,6) με μέση τιμή το 7,14. Τα δείγματα νερού υποδεικνύουν ελαφρώς όξινο έως ελαφρώς αλκαλικό περιβάλλον στη κλίμακα pH.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που φαίνονται στο πίνακα 6.2, σχεδιάστηκε ο χάρτης του σχήματος 6.3, με τη διαβάθμιση του pH στη περιοχή έρευνας.



Σχήμα 6.3 Κατανομή pH στον αλλουβιακό υδροφορέα του Μαραθώνα

Στο χάρτη, οι υψηλότερες τιμές pH (>7) φαίνεται να εντοπίζονται στις εκτάσεις που ο υδροφορέας συννορεύει με το καρστικό σύστημα της περιοχής του οποίου τα νερά είναι ουδέτερα έως ελαφρώς βασικά (πίνακας 6.1). Σε συσχέτιση που πραγματοποιήθηκε μεταξύ ειδικής αγωγιμότητας και pH (σχήμα 6.4), η τιμή του pH επηρεάζεται από την τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας, με τρόπο αντίστροφα ανάλογο. Έτσι, στις περιοχές που αυξάνεται η ηλεκτρική αγωγιμότητα (κεντρικό τμήμα πεδιάδας προς την ακτογραμμή) παρουσιάζονται χαμηλότερες τιμές pH και το περιβάλλον είναι ελαφρώς όξινο.



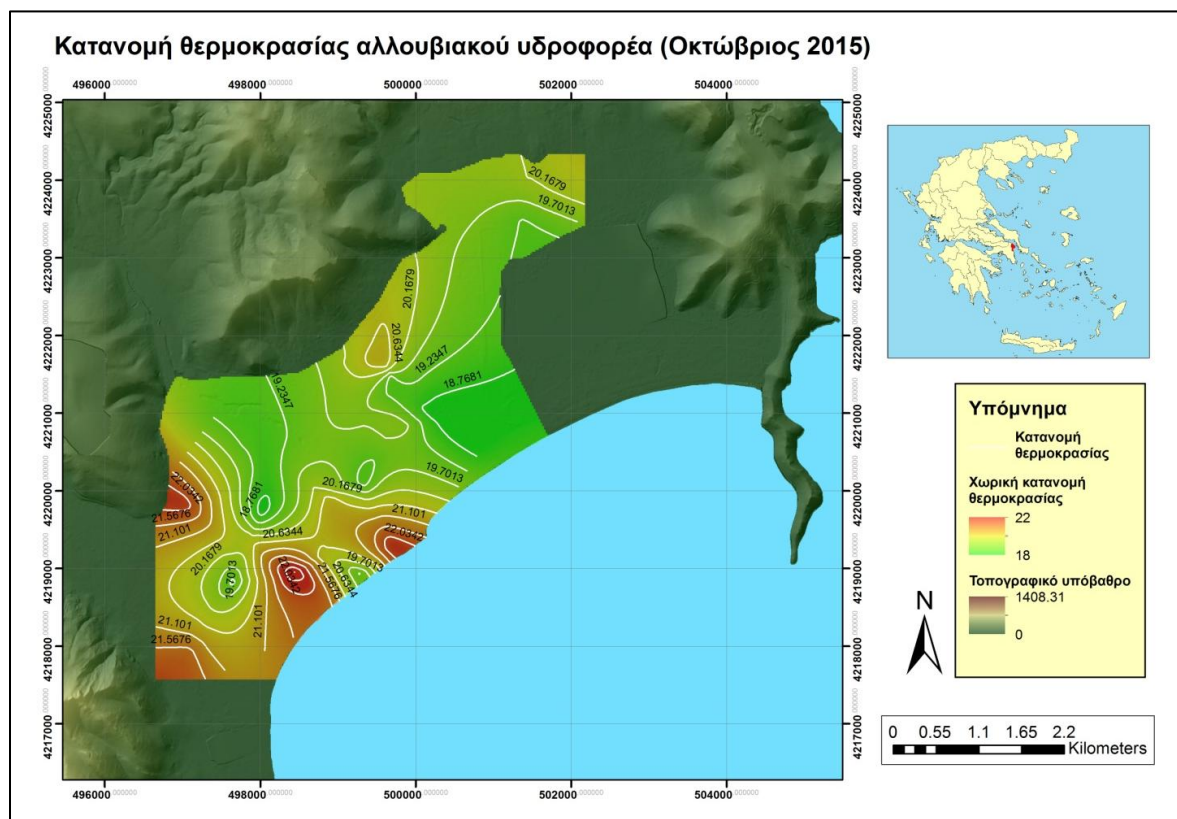
Σχήμα 6.4 Συσχέτιση τιμών pH και Ειδικής Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας SEC

6.1.3 Θερμοκρασία (°C)

Η θερμοκρασία αποτελεί σημαντικό δείκτη για διάφορες παραμέτρους του υπόγειου νερού δίνοντας πληροφορίες για την επαφή του νερού με το γεωλογικό υλικό, το είδος του γεωλογικού υλικού αλλά ακόμα και για την προέλευση του νερού. Ο Fetter (2001) αναφέρει ότι το υπόγειο νερό που βρίσκεται σε διαφορετικά υδροφόρα στρώματα παρουσιάζει διακριτές θερμοκρασιακές διαβαθμίσεις ανάλογα με το είδος του υλικού. Σύμφωνα με το Βουδούρη (2009), η θερμοκρασία των υπόγειων 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 μικρότερες θερμοκρασίες από ότι σε λιγότερο βαθιά.

Σύμφωνα με τα δεδομένα των μετρήσεων, η ελάχιστη θερμοκρασία που καταγράφηκε είναι 18,30°C, η μέγιστη 22,50°C και η μέση περί τους 20°C. Στον επισυναπτόμενο χάρτη της σχήματος 6.5 διακρίνεται η κατανομή της θερμοκρασίας στον προσχωματικό υδροφορέα. Οι χαμηλότερες θερμοκρασίες παρατηρούνται προς το εσωτερικό της πεδιάδας καθώς και στη περιοχή της Μακαρίας πηγής όπου εκφορτίζεται ο καρστικός υδροφορέας. Μεγάλες θερμοκρασίες παρατηρούνται προς την ακτή όπου ο υδροφορέας συνορεύει με τη θάλασσα και η ανάμιξη θαλασσινού και γλυκού νερού είναι έντονη. Οι μεγάλες θερμοκρασίες που παρατηρούνται στο δυτικό όριο που ο υδροφορέας επαφίεται με τα μάρμαρα μπορεί να οφείλεται στο μικρό πάχος του υδροφόρου στρώματος, έτσι ώστε το νερό να βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια του εδάφους.

Όσον αφορά τη θερμοκρασία των δειγμάτων από το καρστ, παρατηρείται μικρή μείωση του μέσου όρου σε σχέση με του αλλουβιακού υδροφορέα, στους 19,3°C, ενώ η θερμοκρασία κυμαίνεται από 17,6°C έως 20,5°C.



Σχήμα 6.5 Κατανομή θερμοκρασίας στον αλλουβιακό υδροφορέα του Μαραθώνα.

6.2 ΧΗΜΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

Στη συνέχεια της έρευνας, τα δείγματα που συλλέχθηκαν, μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο Τεχνικής γεωλογίας και Υδρογεωλογίας της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π., όπου αναλύθηκαν χημικά ως προς τα βασικά ιόντα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο πίνακα 6.3 και 6.4.

Πίνακας 6.3 Αποτελέσματα χημικών αναλύσεων καρστικού υδροφορέα

ID	Cl (mg/lit)	NO ₃ (mg/lit)	SO ₄ (mg/lit)	HCO ₃ (mg/lit)	NO ₂ (mg/lit)	Ca (mg/lit)	Mg (mg/lit)	Na (mg/lit)	K (mg/lit)
MG 84	464	64	145	524	0.028	243.49	7.78	288	8.2
MG44	417	27.9	500	545	0.21	192.23	7.76	109.6	14
MG53	575	30.8	130	296	0.027	161.39	34.26	310.4	13.6
MG4	363	36.9	25	329	0.015	147.38	46.66	202.8	6.4

Πίνακας 6.4 Αποτελέσματα χημικών αναλύσεων αλλουβιακού υδροφορέα

ID	Cl (mg/lit)	NO ₃ (mg/lit)	SO ₄ (mg/lit)	HCO ₃ (mg/lit)	NO ₂ (mg/lit)	Ca (mg/lit)	Mg (mg/lit)	Na (mg/lit)	K (mg/lit)
MG71	620	46.3	140	439	0.027	219.46	41.80	310.4	12
MG24	999	250	230	280.6	0.148	387.67	71.93	548	9.3
MG73	568	23.2	230	291	0.444	198.64	23.33	318	8.6
MG74	853	60.7	330	362	1.328	313.98	58.32	388	12
MG75	655	99	225	307	0.035	222.67	43.74	333.6	9.6

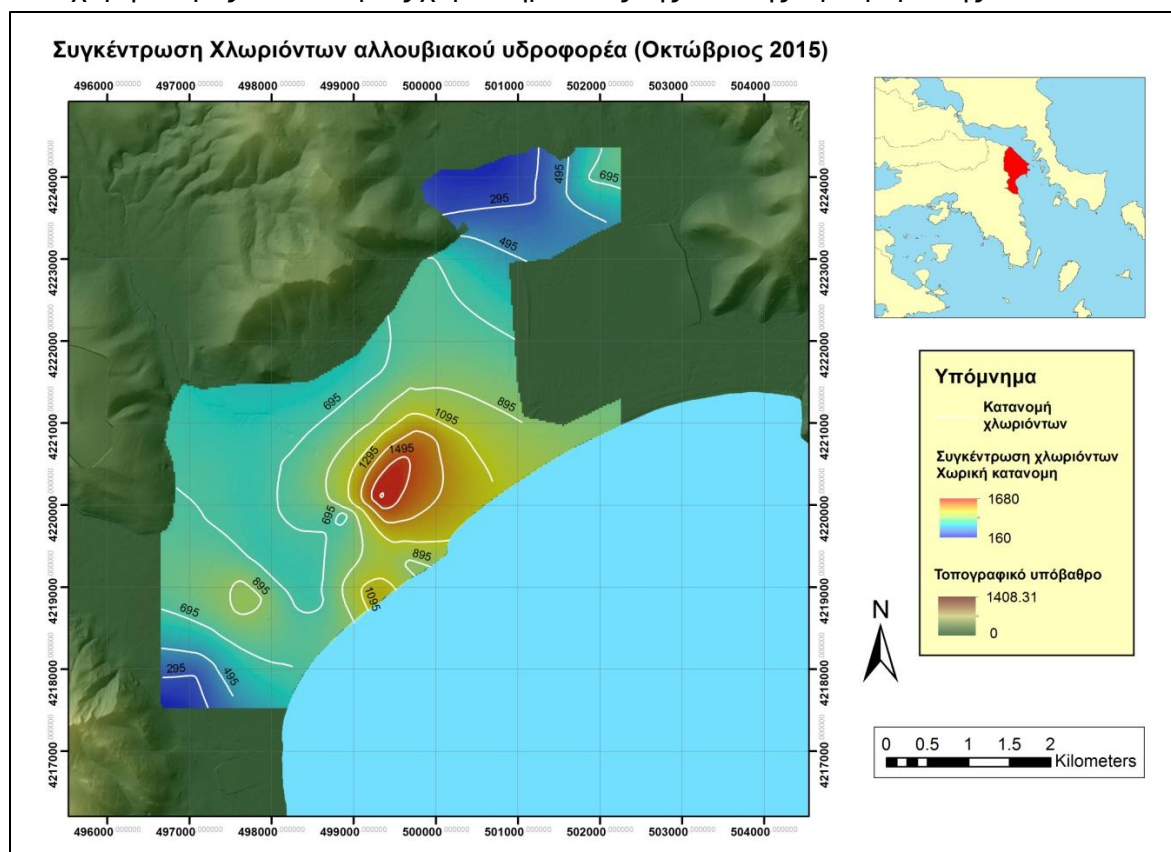
ID	Cl (mg/lit)	NO ₃ (mg/lit)	SO ₄ (mg/lit)	HCO ₃ (mg/lit)	NO ₂ (mg/lit)	Ca (mg/lit)	Mg (mg/lit)	Na (mg/lit)	K (mg/lit)
MG77	870	126.2	300	430	0.182	299.56	55.40	450	15
MG13	718	156.2	140	423	0.14	256.31	46.66	352	6.8
MG79	256	146	170	284	0.031	237.08	3.89	116	3.8
MG 36	347	36.1	100	524	0.021	217.86	23.33	183.2	6.8
MG 34	187	57.1	95	322	0.05	128.15	23.33	110.4	6
MG 43	666	96	205	483	0.026	278.73	36.94	344.8	10.4
MG 82	884	60.1	300	366	0.038	256.31	69.98	426.4	11.2
MG 86	1720	275.2	420	170	0.025	211.45	314.93	620	6.1
MG 88	582	43	150	381	0.021	224.27	15.55	318.4	1.2
MG48	898	105.6	220	335	0.019	269.12	66.10	404	12.8
MG2	548	65.2	125	471	0.017	185.82	42.77	312.8	8.8
MG57	756	78.6	250	511	0.038	358.83	15.55	380	8
MG100	1012	28.4	130	545	0.043	275.53	58.32	500	9.9
MG101	752	23	155	604	0.03	253.10	29.16	440	18.4
MG102	345	118.1	75	498	0.031	192.23	46.66	169.9	6
MG11	715	218	195	322	0.195	378.05	69.98	173.6	5.2
MG103	395	147	125	347	0.057	224.27	27.22	179.2	4
MG104	96	99.5	55	580	0.026	134.56	34.99	115.2	1.6
MG8	110	64.5	55	67.1	0.011	269.12	155.52	68.4	2
MG9	265	288	105	333	0.009	211.45	27.22	137.6	1.8
MG51	1405	87.5	440	538	1.214	379.66	142.88	640	8
MG 80	1264	64.2	110	257	0.064	224.27	27.22	104	15.2

6.2.1 Συγκέντρωση ιόντων χλωρίου (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 περιοχές 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 υπεράντλησης (Καλλιώρας, 2008). Στην περίπτωση του Μαραθώνα, οι ιδιαίτερα υψηλές συγκεντρώσεις χλωριόντων που φαίνονται στον πίνακα 6.3, προέρχονται ως επί το πλείστον από την εισχώρηση της θάλασσας στον υδροφόρο, με την οποία το υπόγειο σύστημα της περιοχής συνδέεται υδραυλικά και τελικά απορρέει σε αυτή. Το φαινόμενο έχει προκύψει από την υπεράντληση των πολυάριθμων πηγαδιών και γεωτρήσεων που υπάρχουν στη περιοχή, σε συνδυασμό με τις περιορισμένες βροχοπτώσεις και την ελλιπή 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/lit χρησιμοποιείται ως δείκτης θαλάσσιας εισβολής.

Η κατανομή των ιόντων χλωρίου με βάση τις μετρήσεις του Οκτωβρίου 2015, φαίνεται αναλυτικά στο χάρτη του σχήματος 6.6. Στο χάρτη, είναι εμφανές ότι η συγκέντρωση των χλωριόντων αυξάνεται στο κεντρικό τμήμα της πεδιάδας και στο τμήμα πλησίον της ακτογραμμής, όπως ακριβώς και η ηλεκτρική αγωγιμότητα ενώ στα βορειότερα τμήματα

και στα όρια του αλλουβιακού υδροφόρου με το καρστικό, οι τιμές που παρατηρούνται είναι χαμηλότερες, πάντα όμως χαρακτηριστικές της έντονης υφαλμύρισης.



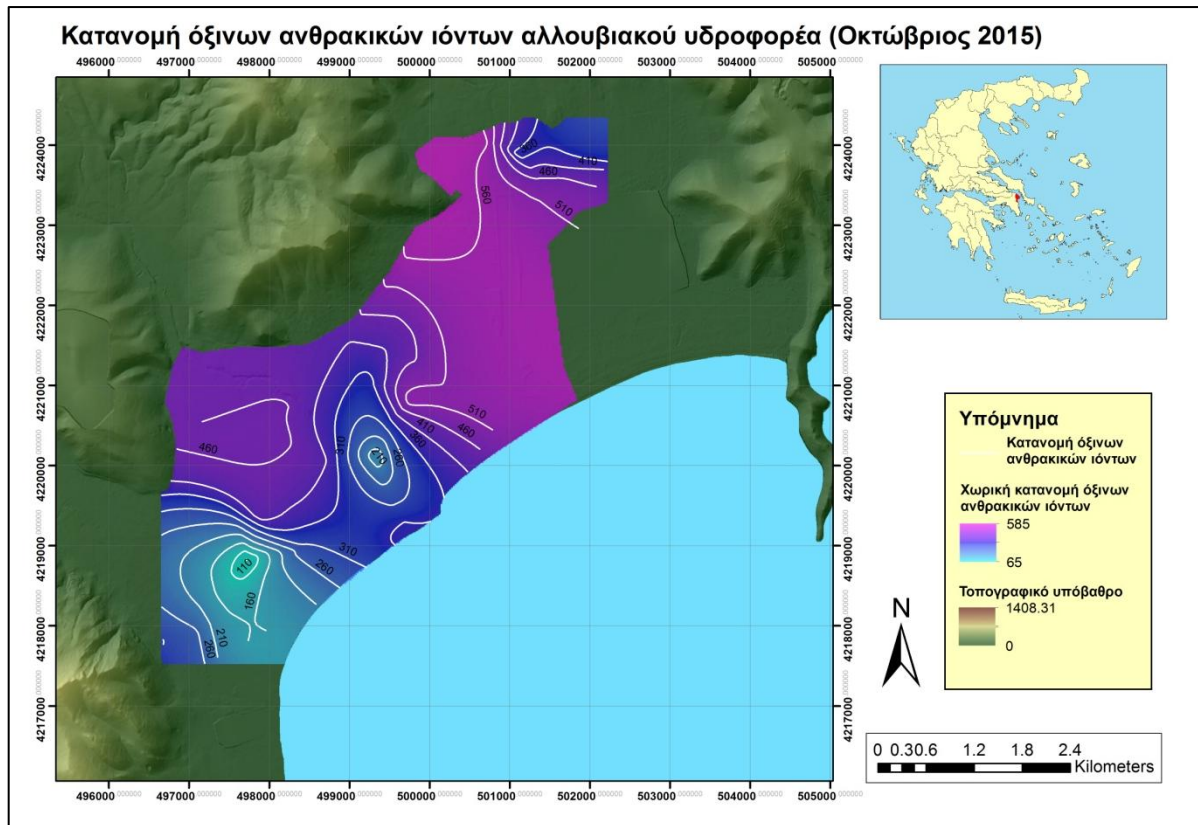
Σχήμα 6.6 Κατανομή ιόντων χλωρίου στον αλλουβιακό υδροφόρο του Μαραθώνα

Συγκρίνοντας τις συγκεντρώσεις στα χλωριόντα του καρστικού υδροφορέα με αυτά του αλλουβιακού, φαίνεται ότι η επιβάρυνση των υπόγειων νερών λόγω υφαλμύρισης βρίσκεται σε πολύ μικρότερα επίπεδα. Το γεγονός αυτό μπορεί να οφείλεται στη κατά πολύ μεγαλύτερη δυναμική υδροφορίας του καρστικού συστήματος από το αλλουβιακό, καθώς και στον περιορισμένο αριθμό βαθένων γεωτρήσεων (που αντλούν από τον καρστικό υδροφόρο) που εντοπίστηκαν στην περιοχή. Ακόμη, η περιοχή από την οποία ελήφθησαν τα καρστικά δείγματα (στα ανάντη της περιοχής μελέτης) παρουσιάζει μικρότερη ποιοτική υποβάθμιση (ως προς τα χλωριόντα) από την υπόλοιπη πεδιάδα ακόμη και στον αλλουβιακό υδροφόρο. Θα πρέπει να συνεκτιμηθεί ως προς αυτό, η απομάκρυνση του καρστικού υδροφορέα από τον κόλπο του Μαραθώνα σε σύγκριση με τον προσχωματικό.

6.2.2 Συγκέντρωση όξινων ανθρακικών ιόντων (HCO_3^-)

Σύμφωνα με το Βουδούρη (2009), τα όξινα ανθρακικά ιόντα είναι το επικρατέστερο ανιόν στο γλυκό νερό. Προέρχεται από το ατμοσφαιρικό CO_2 ή από το απελευθερούμενο στο έδαφος κατά την οργανική αποσάθρωση. Ο Καλλέργης (2000) αναφέρει ότι κύρια πηγή των ανθρακικών (CO_3^{2-}) και των όξινων ανθρακικών (HCO_3^-) αποτελούν οι ασβεστόλιθοι και οι δολομίτες, ενώ η τιμή τους είναι συνήθως μικρότερη των 500 mg/L και μερικές φορές υπερβαίνει τα 1000 mg/L.

Στην πεδιάδα του Μαραθώνα, τα όξινα ανθρακικά ιόντα του αλλουβιακού υδροφορέα κατανέμονται χωρικά όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 6.7).



Σχήμα 6.7 Κατανομή όξινων ανθρακικών ιόντων (HCO_3^-) στον αλλουβιακό υδροφορέα του Μαραθώνα

Από τους πίνακες 6.3 και 6.4, είναι ευκρινές ότι οι συγκεντρώσεις των HCO_3^- είναι υψηλές στα νερά του καρστ καθώς και σε πολλά δείγματα του αλλουβιακού στρώματος. Στο χάρτη κατανομής του σχήματος 6.7, οι μεγαλύτερες τιμές των εν λόγω ιόντων παρατηρούνται στις περιοχές που ο αλλουβιακός υδροφορέας τροφοδοτείται από τα μάρμαρα. Ιδιαίτερα στην περιοχή του Κάτω Σουλίου καθώς και στην πεδιάδα του Μαραθώνα στην περιοχή από την οποία διέρχεται το κανάλι της Μακαρίας πηγής, οι τιμές αυξάνονται κατακόρυφα. Η συγκεκριμένη αύξηση πιθανότατα οφείλεται στην εκφόρτιση της Μακαρίας πηγής με ταυτόχρονη τροφοδοσία του κοκκώδους συστήματος.

6.3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΧΗΜΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

Οι χημικές αναλύσεις των δειγμάτων, αποτέλεσαν τα δεδομένα για την εύρεση του χημικού τύπου του νερού και την περιγραφή των υδρογεωχημικών ιδιοτήτων κάθε δείγματος. Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων διεξήχθη με το λογισμικό Aquachem 4.0. Στα παρακάτω κεφάλαια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας.

6.3.1 Υδροχημικός τύπος νερών

Κατά την επεξεργασία των χημικών αναλύσεων, προέκυψαν οι χημικοί τύποι νερών του πίνακα 6.5 και 6.6.

Πίνακας 6.5 Υδροχημικός τύπος δειγμάτων αλλουβιακού υδροφορέα

Sample ID	Water Type	Station ID
MG 34	Ca-Na-HCO ₃ -Cl	Ag.Panteleimonas
MG 36	Ca-Na-Cl-HCO ₃	Ag.Panteleimonas
MG71	Na-Ca-Cl-HCO ₃	Ag.Panteleimonas
MG72	Ca-Na-Cl	Ag.Panteleimonas
MG73	Na-Ca-Cl	Ag.Panteleimonas
MG74	Na-Ca-Cl	Ag.Panteleimonas
MG75	Na-Ca-Cl	Ag.Panteleimonas
MG76	Na-Ca-Cl-HCO ₃	Ag.Panteleimonas
MG77	Na-Ca-Cl	Ag.Panteleimonas
MG102	Ca-Na-Cl-HCO ₃	Kato Souli
MG103	Ca-Na-Cl-HCO ₃	Kato Souli
MG104	Ca-Na-HCO ₃	Kato Souli
MG11	Ca-Na-Cl	Kato Souli
MG9	Ca-Na-Cl-HCO ₃	Kato Souli
MG 43	Na-Ca-Cl-HCO ₃	Marathon
MG 82	Na-Ca-Cl	Marathon
MG 86	Na-Mg-Cl	Marathon
MG 88	Na-Ca-Cl-HCO ₃	Marathon
MG100	Na-Ca-Cl-HCO ₃	Marathon
MG2	Na-Ca-Cl-HCO ₃	Marathon
MG48	Na-Ca-Cl	Marathon
MG51	Na-Ca-Mg-Cl	Marathon
MG57	Ca-Na-Cl-HCO ₃	Marathon
MG101	Na-Ca-Cl-HCO ₃	Sxinias
MG13	Na-Ca-Cl-HCO ₃	Vranas
MG79	Ca-Na-Cl-HCO ₃ -SO ₄	Vranas

Πίνακας 6.6 Υδροχημικός τύπος δειγμάτων καρστικού υδροφορέα

Sample ID	Water Type	Station ID
MG 84	Na-Ca-Cl-HCO ₃	Marathon
MG4	Na-Ca-Cl-HCO ₃	Marathon
MG44	Ca-Na-Cl-SO ₄ -HCO ₃	Marathon
MG53	Na-Ca-Cl-HCO ₃	Marathon

Τα νερά με υδροχημικό τύπο Ca-HCO₃, προέρχονται και από την αλληλεπίδραση του μετεωρικού νερού με τα πετρώματα, που είναι πλούσια σε ορυκτά με ασβέστιο. Τέτοια νερά στην περιοχή μελέτης, εντοπίζονται εξαιτίας της ύπαρξης των μαρμάρων. Από τους δύο πίνακες παρατηρείται ότι τα 3 δείγματα καρστικών νερών έχουν τύπο Na-Ca-Cl-HCO₃, όπως και μεγάλο μέρος των νερών του κοκκώδους σχηματισμού. Σε όλα τα δείγματα, είναι εμφανής η επικράτηση των ιόντων νατρίου(Na⁺) και χλωρίου(Cl⁻), γεγονός που οφείλεται στην υφαλμύριση των νερών εξαιτίας της θαλάσσιας διείσδυσης. Η ύπαρξη SO₄⁻² σε δύο από τα δείγματα νερού μπορεί να οφείλεται είτε στη χρήση γεωργικών λιπασμάτων στην περιοχή είτε σε ανεπεξέργαστα λύματα κτηνοτροφικών μονάδων της περιοχής.

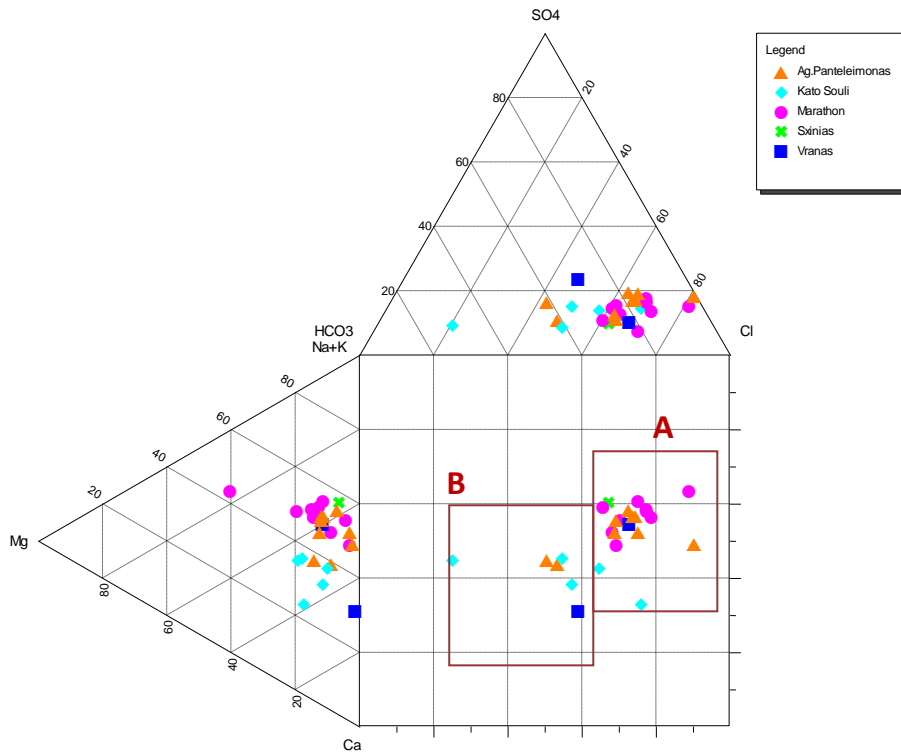
6.3.2 Ταξινόμηση κατά Durov

Το διάγραμμα Durov είναι ένας ευρέως χρησιμοποιούμενος τρόπος για την άμεση ταξινόμηση των υπογείων νερών σε διάφορους τύπους-φάσεις. Το εν λόγω διάγραμμα αποτελείται από δύο απλά τριγωνικά διαγράμματα, ιόντων και κατιόντων, που η τομή των προεκτάσεων τους προβάλλεται σε ένα κεντρικό ορθογώνιο διάγραμμα. Τα δείγματα ταξινομούνται, ανάλογα με τη χημική τους σύσταση και το επικρατέστερο ανιόν και κατιόν. Το διάγραμμα που κατασκευάστηκε για τον αλλουβιακό υδροφορέα του Μαραθώνα φαίνεται στο σχήμα 6.8. Το αντίστοιχο διάγραμμα για το καρστικό υδροφορέα παρατίθεται στο σχήμα 6.9.

Όσον αφορά τα δείγματα του αλλουβιακού υδροφορέα, στην ομάδα Α του σχήματος, ανήκουν τα περισσότερα δείγματα, έχοντας ως βασικό χαρακτηριστικό την επικράτηση των ιόντων Cl⁻. Πρόκειται για υπόγεια νερά στα οποία το φαινόμενο της αντίστροφης κατιοανταλλαγής βρίσκεται σε πλήρη εξέλιξη. Στην περιοχή αυτή ανήκουν κυρίως τα δείγματα που συλλέχθηκαν από το Μαραθώνα και τον Αγ. Παντελεήμονα, δηλαδή τις περιοχές που παρατηρείται έντονα το φαινόμενο της υφαλμύρισης. Στην ομάδα Β, ανήκουν νερά στα οποία δεν επικρατεί κανένα ιόν και πρόκειται για μικτά νερά ή νερά διαλυτοποίησης. Τα συγκεκριμένα δείγματα βρίσκονται πλησίον των Μαρμάρων Μαραθώνα για τις περιοχές Κάτω Σουλίου και Αγ. Παντελεήμονα και πλησίον των Μαρμάρων Γραμματικού για τη περιοχή του Βρανά.

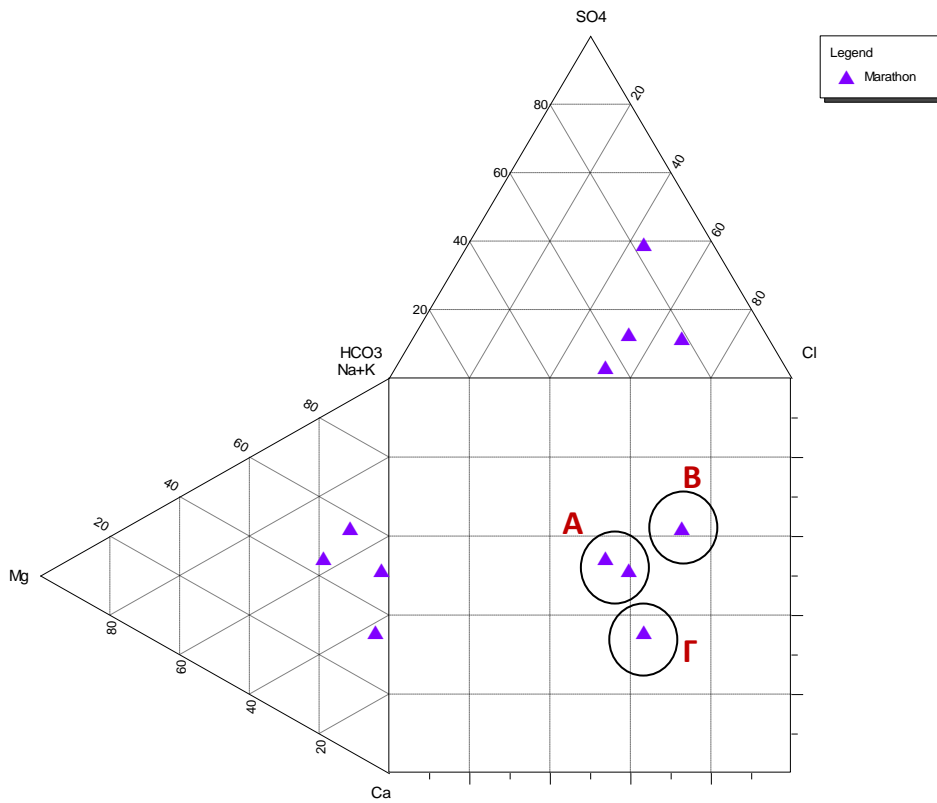
Τα δύο δείγματα του καρστικού υδροφορέα (σχήμα 5.12) αντιστοιχούν σε νερά διαλυτοποίησης όπου δεν επικρατεί κάποιο ανιόν (Α). Στο δείγμα Β, το κύριο ανιόν είναι το χλώριο και στο Γ επικρατούν τα ιόντα ασβεστίου (Ca⁺⁺) και χλωρίου (Cl⁻).

Durov Plot



Σχήμα 6.8 Διάγραμμα κατά Durov δειγμάτων αλλουβιακού υδροφορέα

Durov Plot



Σχήμα 6.9 Διάγραμμα κατά Durov δειγμάτων καρστικού υδροφορέα

6.3.3 Ταξινόμηση κατά Piper

Τα τριγραμμικά διαγράμματα κατά Piper (1944) περιλαμβάνουν τη σύνθεση των κύριων ανιόντων και κατιόντων των δειγμάτων υπόγειων νερών, τα οποία προβάλλονται σε ανεξάρτητα τρίγωνα. Το αποτέλεσμα είναι η αναγωγή της χημικής σύστασης του υπόγειου νερού σε μεμονωμένα σημεία τα οποία αντιπροσωπεύουν την ποσοστιαία συγκέντρωση (σε mg/L) κάθε ανιόντος ή κατιόντος. Η συγκεκριμένη μέθοδος κατάταξης, αποδεικνύεται χρήσιμη για τον εντοπισμό του υδροχημικού τύπου και για την ερμηνεία υδροχημικών σχέσεων μεταξύ των υπόγειων νερών. Τα σχήματα που ακολουθούν στις επόμενες σελίδες, περιλαμβάνουν τα διαγράμματα κατά Piper που σχεδιάστηκαν για τον αλλουβιακό και το καρστικό υδροφορέα της περιοχής μελέτης.

Όσον αφορά το διάγραμμα Piper του αλλουβιακού υδροφορέα, στο κάτω δεξί τριγωνικό τμήμα του διαγράμματος, το οποίο περιέχει τα ανιόντα των δειγμάτων, παρατηρείται συσσώρευση σημείων στο τμήμα των χλωριούχων ιόντων (κάτω δεξιά) καθώς επίσης και στο τμήμα ανάμιξης ανιόντων (κάτω μεσαίο τμήμα). Για το κάτω αριστερό τριγωνικό διάγραμμα, παρατηρείται συσσώρευση σημείων στο τμήμα ανάμιξης των κατιόντων (κάτω μεσαίο τμήμα) με μερικά δείγματα να κλίνουν προς το τμήμα των ασβεστούχων ιόντων (κάτω αριστερά). Τα δείγματα, όπως απεικονίζονται στο ρομβικό τμήμα του διαγράμματος, κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- Υφάλμυρα υπόγεια νερά: Στη συγκεκριμένη ομάδα ανήκουν σχεδόν όλα τα δείγματα στα οποία είναι εμφανής η υφαλμύριση, λόγω διείσδυσης της θάλασσας. Στην κατηγορία αυτή, από την πλευρά των κατιόντων κυριαρχούν τα ιόντα νατρίου ενώ από την πλευρά των ανιόντων επικρατούν κυρίως τα χλωριούχα και εν μέρει τα όξινα ανθρακικά.
- Γλυκά νερά: Πρόκειται για ένα δείγμα που ανήκει στη περιοχή του Κάτω Σουλίου το οποίο βρίσκεται πλησίον της Μακαρίας πηγής. Στην κατηγορία αυτή, από την πλευρά των κατιόντων κυριαρχούν τα ιόντα ασβεστίου και μαγνησίου, ενώ από την πλευρά των ανιόντων επικρατούν κυρίως τα όξινα ανθρακικά.

6.3.4 Ταξινόμηση κατά Wilcox

Το διάγραμμα Wilcox (1955) χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της καταλληλότητας του νερού όσον αφορά στη χρήση του για αρδευτικούς σκοπούς. Αποτελεί διάγραμμα διασποράς σημείων τα οποία προβάλλονται βάσει των τιμών του Συντελεστή Προσρόφησης Νατρίου, SAR, στον κατακόρυφο άξονα, και βάσει των τιμών της Ειδικής Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας (αλμυρότητα), SEC (σε $\mu\text{S}/\text{cm}$), στον οριζόντιο άξονα, οι τιμές του οποίου παρατίθενται σε λογαριθμική κλίμακα. Οι κατηγορίες νερών κατά το διάγραμμα έχουν ως εξής:

Πίνακας 6.7 Κατηγορίες νερών κατά Wilcox

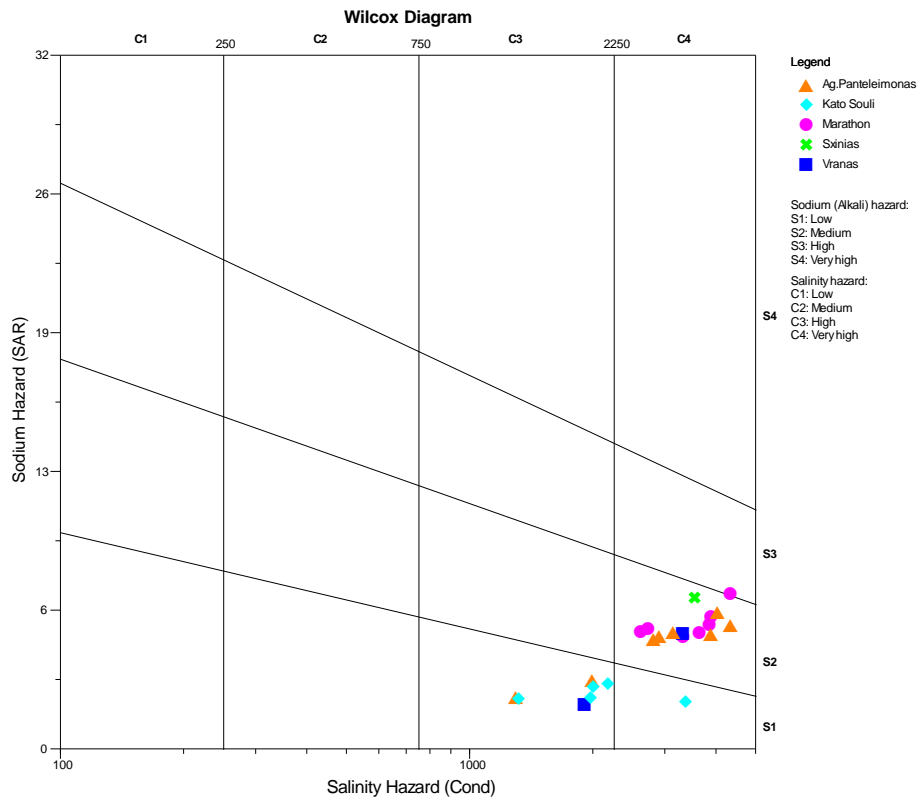
SEC (σε $\mu\text{S}/\text{cm}$)	SAR
C1: Χαμηλός κίνδυνος (0-249)	S1: Χαμηλός κίνδυνος
C2: Μέτριος κίνδυνος (250-749)	S2: Μέτριος κίνδυνος
C3: Υψηλός κίνδυνος (750-2249)	S3: Υψηλός κίνδυνος
C4: Πολύ υψηλός κίνδυνος (2250-5000)	S4: Πολύ υψηλός κίνδυνος

Στις επόμενες σελίδες παρουσιάζονται τα διαγράμματα κατά Wilcox για τον αλλουβιακό και το καρστικό υδροφορέα της περιοχής.

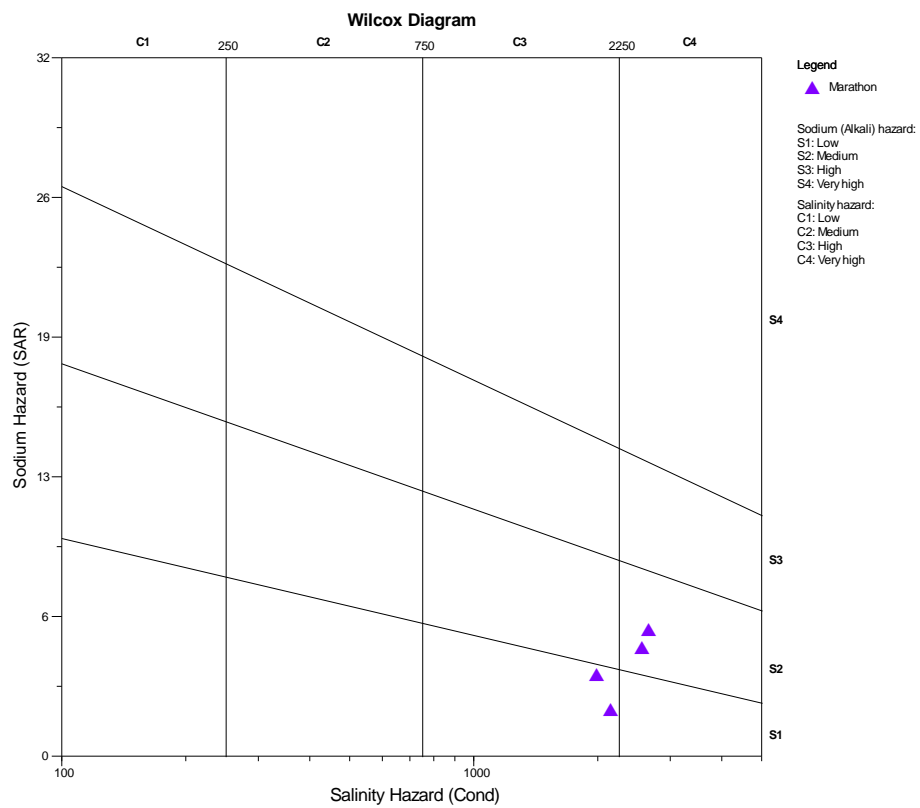
Σύμφωνα με το σχήμα 6.12, τα περισσότερα δείγματα του αλλουβιακού υδροφορέα ανήκουν στην κατηγορία S2-C4 όπου περιγράφει πολύ υψηλό κίνδυνο σε σχέση με την τιμή ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας και μέτριο κίνδυνο ως προς την τιμή του συντελεστή προσρόφησης νατρίου. Στη συγκεκριμένη κατηγορία ανήκουν όλα τα δείγματα από την περιοχή του Μαραθώνα, τα περισσότερα του Αγ. Παντελεήμονα και ένα από την περιοχή του Βρανά.

Τα υπόλοιπα δείγματα ανήκουν στη κατηγορία C3-S1, γεγονός που τα καθιστά νερά υψηλής επικινδυνότητας όσον αφορά στην τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας και χαμηλής επικινδυνότητας όσον αφορά στην τιμή του συντελεστή προσρόφησης νατρίου. Τέτοια είναι δύο δείγματα του Αγ. Παντελεήμονα, ένα του Βρανά και τρία του Κάτω Σουλίου. Ένα απομένον δείγμα του Κάτω Σουλίου ανήκει στη κατηγορία C4-S1 που αφορά μέτριο κίνδυνο σε σχέση με την τιμή ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας και χαμηλό κίνδυνο ως προς την τιμή του συντελεστή προσρόφησης νατρίου.

Όσον αφορά στον καρστικό υδροφορέα, τα δύο δείγματα ανήκουν στη κατηγορία C4-S2 και τα άλλα δύο στη κατηγορία C3-S1. Τα εν λόγω δείγματα ελήφθησαν στο σύνολο τους από την περιοχή του Μαραθώνα.



Σχήμα 6.12 Διάγραμμα κατά Wilcox δειγμάτων αλλουβιακού υδροφορέα



Σχήμα 6.13 Διάγραμμα κατά Wilcox δειγμάτων καρστικού υδροφορέα

7. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΡΟΗΣ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

7.1 ΕΝΝΟΙΟΛΟΓΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Σύμφωνα με τους Kresic N. Και Mikszewski A. (2012), ως εννοιολογικό μοντέλο ορίζεται «η περιγραφή ποικίλων φυσικών και ανθρωπογενών παραγόντων που διέπουν και συμβάλουν στη κίνηση του υπόγειου νερού στο υπέδαφος».

Ένα εννοιολογικό υδρογεωλογικό μοντέλο, περιγράφει:

- Τον τύπο του υδροφόρου στρώματος μέσα στο οποίο ρέει το νερό,
- Την ποσότητα του νερού που είναι αποθηκευμένο,
- Την ταχύτητα με την οποία κινείται μέσα στη μάζα του συστήματος,
- Από πού ανατροφοδοτείται ο υδροφορέας και που εκφορτίζει,
- Πως το σύστημα αυτό λειτουργούσε στο παρελθόν και πως θα εξελιχθεί στο μέλλον βάσει διαφόρων επιδράσεων· φυσικών και ανθρωπογενών.

Ένα εννοιολογικό μοντέλο μπορεί να περιλαμβάνει και περιγραφή της ποιοτικής κατάστασης ενός υδροφορέα. Τέτοιου είδους μοντέλα χρησιμοποιούνται κυρίως σε ρυπασμένα και ποιοτικά υποβαθμισμένα υδροφόρα συστήματα, όπως είναι τα παράκτια συστήματα λόγω της υπαλμύρισης τους από τη θαλάσσια διείσδυση.

Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της λεκάνης που διαμορφώνεται ένα υδροφόρο στρώμα, είναι καθοριστικά για τον προσδιορισμό του εννοιολογικού μοντέλου καθώς αυτά καθορίζουν τις διεργασίες που πραγματοποιούνται στο εσωτερικό ενός υδροφόρου και το εξωτερικό του περιβάλλον από το οποίο επηρεάζεται άμεσα. Τέτοια χαρακτηριστικά μπορεί να είναι:

- Η μορφολογία του εδάφους (τοπογραφία), η οποία σε τοπική κλίμακα καθορίζει τη διεύθυνση της υπόγειας ροής, οι επιλεκτικές διαδρομές από τις οποίες θα διέλθει το νερό, η ταχύτητα με την οποία θα κινηθεί καθώς και οι ζώνες τροφοδοσίας και εκφόρτισης του υδροφορέα.
- Η γεωλογία της περιοχής, δηλαδή το πορώδες μέσο μέσα στο οποίο δημιουργείται ο υδροφορέας και διαμορφώνει τις βασικές υδραυλικές παραμέτρους (k , T , S)
- Η υδρολογία της ευρύτερης περιοχής, καθώς το επιφανειακό και υπόγειο νερό συνδέονται μεταξύ τους και αλληλεπιδρούν. Ο όγκος των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων επηρεάζει άμεσα τη ποσότητα του νερού που θα εισέλθει στον υδροφορέα. Τα επιφανειακά υδάτινα σώματα (π.χ. ρέματα, ποτάμια, λίμνες) πολλές φορές βρίσκονται σε υδραυλική επικοινωνία με ελεύθερους υδροφόρους ορίζοντες, αλληλεπιδρώντας έτσι ποσοτικά και ποιοτικά.
- Οι κλιματικές συνθήκες ορίζουν τη θερμοκρασία και την υγρασία του αέρα, την ηλιοφάνεια, το είδος και τον όγκο της κατακρήμνισης, την ατμοσφαιρική πίεση και τη ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου. Τα προαναφερθέντα στοιχεία επηρεάζουν άμεσα τις ποσότητες νερού που εισέρχεται και εξέρχεται από τον υδροφόρο, κυρίως μέσω της βροχοπτώσης και της εξατμισοδιαπνοής.

- Η εδαφική κάλυψη και οι χρήσεις γης κάθε περιοχής επιδρούν τόσο στη ποσότητα των διαθέσιμων αποθεμάτων ενός υδροφορέα, όσο και στη ποιότητα. Για παράδειγμα, η εντατική αστικοποίηση έχει ως αποτέλεσμα την κάλυψη του εδάφους με τέτοια υλικά έτσι ώστε να δημιουργείται ένα αδιαπέρατο στρώμα στην επιφάνεια. Κατά αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η επιφανειακή απορροή, μειώνοντας τη κατείσδυση του νερού στον υδροφόρο. Στις γεωργικές περιοχές, προκαλείται ποιοτική και ποσοτική υποβάθμιση των υδροφορέων εξαιτίας της αλόγιστης άντλησης νερού και της χρήσης λιπασμάτων στο έδαφος που τελικά καταλήγουν να εισρέουν στον υδροφόρο σχηματισμό. Στις βιομηχανικές περιοχές, η απόρριψη αποβλήτων και νερών που προκύπτουν από τη βιομηχανική δραστηριότητα στο περιβάλλον, δημιουργεί εστίες ρύπανσης στο έδαφος, διαχέοντας τον ρύπο στον υδροφορέα μέσω της κατείσδυσης.
- Το νερό που είναι αποθηκευμένο στο υδροφόρο στρώμα. Δηλαδή η γνώση του ισοζυγίου της ποσότητας που κατεισδύει στον υδροφόρο εξαιτίας της βροχής ή άλλων επιφανειακών υδάτινων μαζών, το νερό που εισέρχεται στον υδροφόρο λόγω υδραυλικής επικοινωνίας με άλλα στρώματα, το νερό που εξέρχεται από αυτόν κατά την εκφόρτιση του λόγω φυσικών ή ανθρώπινων παραγόντων κ.α.. Ο όγκος του αποθηκευμένου νερού στον υδροφόρο δεν είναι άμεσα υπολογίσιμος καθώς δε μπορεί να είναι γνωστές όλες οι ποσότητες που εισέρχονται και εξέρχονται από τη μάζα του. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται έμμεσες μέθοδοι. Η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη εξ αυτών είναι η πιεζομετρική στάθμη και οι εποχιακές διακυμάνσεις αυτής.

Τα παραπάνω ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε εξεταζόμενης περιοχής, διαμορφώνουν και το εννοιολογικό μοντέλο καθώς έχουν άμεση επιρροή στο υδρολογικό ισοζύγιο και στη γενικότερη κατάσταση του υδροφόρου.

Τα παράκτια κοκκώδη υδροφόρα συστήματα αποτελούν μία ιδιαίτερη περίπτωση υδροφορέων καθώς επικοινωνούν υδραυλικά με τη θάλασσα. Κατά τη μελέτη ενός τέτοιου συστήματος για τη δημιουργία ενός εννοιολογικού μοντέλου, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και οι υδραυλικές σχέσεις υδροφορέα-θάλασσας, όπως αυτές περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 2.2.1.

7.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Λαμβάνοντας υπόψη τα προαναφερθέντα, το εννοιολογικό μοντέλο δημιουργείται και είναι απαραίτητο για την κατανόηση της υδρογεωλογικής συμπεριφοράς ενός συστήματος. Παρ' όλα αυτά, τα εννοιολογικά μοντέλα δεν είναι δυναμικά καθώς περιγράφουν την παρούσα κατάσταση του υδροφορέα. Για τη πρόβλεψη της μελλοντικής ποσοτικής και ποιοτικής κατάστασης χρησιμοποιούνται τα μαθηματικά μοντέλα. Πρόκειται για δυναμικά μοντέλα που προσομοιώνουν τη λειτουργία του υδροφορέα, λαμβάνοντας ως δεδομένα τα ιδιαίτερα στοιχεία και τη παρούσα κατάσταση στην οποία βρίσκεται. Είναι μία προσπάθεια να παρουσιαστεί η φυσική ροή ενός πραγματικού υδροφορέα μέσα από την επίλυση διαφορικών εξισώσεων.

Οι Alley et al. εξηγούν ότι η κύρια φιλοσοφία αφορά στην κατανόηση των βασικών νόμων της φυσικής, της χημείας και της βιολογίας που περιγράφουν την υπόγεια ροή καθώς και μία ακριβή περιγραφή του υπό εξέταση συστήματος έτσι ώστε να παρουσιαστεί

ποσοτικά η σχέση αίτιου-αποτελέσματος για το σύστημα αυτό. Μια τέτοια προσέγγιση επιτρέπει την πρόβλεψη για οποιαδήποτε περιοχή μελέτης με καθορισμένες συνθήκες ροής.

Η επίλυση των διαφορικών εξισώσεων πραγματοποιείται με την εφαρμογή αναλυτικών ή αριθμητικών μεθόδων ανάλογα με τη γεωμετρία του συστήματος, τις οριακές και τις αρχικές συνθήκες.

Κατά τον Παπαγεωργίου (2002), η αναλυτική λύση μίας διαφορικής εξίσωσης είναι ένας κλειστός τύπος μέσω του οποίου μπορούμε να υπολογίσουμε την τιμή της συνάρτησης της λύσης σε κάθε σημείο «x». Στην επίλυση της εξίσωσης ροής του υπογείου νερού, μία τυπική εφαρμογή των αναλυτικών μεθόδων αποτελεί η επίλυση εξισώσεων του υδραυλικού φορτίου και της παροχής του υπόγειου νερού. Το κύριο μειονέκτημα των αναλυτικών μεθόδων είναι ότι περιορίζονται στην επίλυση απλών προβλημάτων, όπως είναι αυτά των ομογενών υδροφορέων μονοδιάστατης είτε διδιάστατης ροής ενώ για τη περίπτωση προβλημάτων θαλάσσιας διείσδυσης, η διεπιφάνεια αλμυρού-γλυκού θεωρείται σταθερή (παραδοχή που σπανίως ισχύει).

Για το λόγο αυτό, σε περιπτώσεις πολύπλοκων υδρογεωλογικών προβλημάτων όπως είναι ένας ανομοιογενής και ανισότροπος υδροφορέας (που έτσι είναι πάντα), χρησιμοποιούνται οι αριθμητικές επιλύσεις κατά τις οποίες είναι απαραίτητη η χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Αντίθετα με τις αναλυτικές μεθόδους, η αριθμητική επίλυση μίας εξίσωσης είναι ένας πίνακας από προσεγγιστικές τιμές της λύσης σε διακεκριμένα σημεία του πεδίου ορισμού. Κύριο χαρακτηριστικό των αριθμητικών μεθόδων αποτελεί η χωρική και χρονική διακριτοποίηση του συστήματος ενός υδροφορέα με ένα πλέγμα κελιών, η θέση των οποίων περιγράφεται με όρους γραμμών, στηλών και επιπέδων.

7.3 Ο ΚΩΔΙΚΑΣ MODFLOW

Ο κώδικας MODFLOW αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο, ευρέως διαδεδομένο, για την προσομοίωση της υπόγειας ροής στους υδροφορείς με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων και πεπερασμένων διαφορών. Με βάση τη συγκεκριμένη επίλυση, είναι δυνατό να προσομοιωθούν προβλήματα μονοδιάστατης, διδιάστατης ή τριδιάστατης ροής όπως επίσης και μόνιμης ή μη μόνιμης ροής.

7.3.1 Η ΕΞΙΣΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών είναι μια μέθοδος επίλυσης διαφορικών εξισώσεων κατά την οποία ο χώρος διακριτοποιείται από ένα τρις ορθογώνιο πλέγμα χωρίζοντας έτσι τον χώρο σε κελιά. Η προσέγγιση με πεπερασμένες διαφορές επομένως εφαρμόζεται στο διακριτοποιημένο χώρο με βάση την υπόθεση ότι κάθε κελί αντιστοιχεί σε έναν αντιπροσωπευτικό όγκο αναφοράς.

Κατά τον Essink (2000), η εξίσωση πεπερασμένης διαφοράς του MODFLOW θεωρώντας σταθερή την πυκνότητα του υγρού, έχει ως εξής:

$$\sum Q_i = S_s \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \Delta V \quad (2.14)$$

όπου:

S_s = η ειδική αποθηκευτικότητα του πορώδους υλικού

Q_i = ο συνολικός ρυθμός παροχής σε κάθε κελί

ΔV = ο όγκος του συγκεκριμένου κελί

$\Delta\phi$ = η μεταβολή του υδραυλικού φορτίου για χρονικό διάστημα Δt .

7.3.2 ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ

Η μαθηματική έκφραση που περιγράφει ποσοτικά το μέγεθος της υδραυλικής αγωγιμότητας ορίζεται ως εξής (Essink, 2000):

$$CR_{i,j+1/2,k} = \frac{k_{i,j+1/2,k} \Delta y \Delta z}{\Delta x} \quad (2.15)$$

όπου:

$CR_{i,j+1/2,k}$ = η υδραυλική αγωγιμότητα μεταξύ κόμβων $[i, j, k]$ και $[i, j + 1, k]$ στην κατεύθυνση της γραμμής.

Παρόμοια μαθηματική διαδικασία ακολουθείται και κατά τη διεύθυνση των στηλών και των στρωμάτων.

7.3.3 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Τα απαραίτητα δεδομένα για τη λειτουργία ενός μαθηματικού μοντέλου προσομοίωσης είναι οι βασικές παράμετροι του υδροφορέα, όπως είναι η μεταβιβαστικότητα (T) και η υδραυλική αγωγιμότητα (K). Αναγκαίο δεδομένο αποτελεί επίσης και το πάχος του υδροφόρου στρώματος ή και των γεωλογικών σχηματισμών που ανήκουν στο φυσικό σύστημα που θα προσομοιωθεί. Σε αντίθεση με τη μόνιμη ροή, στην περίπτωση της μη μόνιμης, απαραίτητα στοιχεία για τη λειτουργία του μαθηματικού μοντέλου είναι ο προσδιορισμός του συντελεστή αποθηκευτικότητας S και/ή η ειδική απόδοση μ , ανάλογα με το είδος του υδροφόρου (υπό πίεση και ελεύθερος αντίστοιχα).

7.3.4 ΑΡΧΙΚΕΣ ΚΑΙ ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Οι αρχικές συνθήκες περιγράφουν την κατανομή του υδραυλικού φορτίου (ή της συγκέντρωσης) σε κάποια συγκεκριμένη χρονική στιγμή η οποία αντιστοιχεί στις πρότερες υδρολογικές συνθήκες του υδροφόρου σχηματισμού. Η αρχική αυτή χρονική στιγμή είναι και η αφετηρία ή ο χρόνος μηδέν που αποτελεί, με άλλα λόγια, την οριακή συνθήκη στο

χρόνο. Η αρχική συνθήκη δηλαδή, δίνει την κατανομή του υδραυλικού φορτίου (ή της μεταβλητής της κατάστασης γενικότερα) στο χώρο σε χρόνο $t=0$, δηλαδή $h=f(x,y,z,t=0)$.

Οι οριακές συνθήκες στην εξίσωση ροής διακρίνονται σε καθορισμένου φορτίου ή Dirichlet, καθορισμένης ροής ή Neumann, συνδυασμό μεταβλητού φορτίου και ροής ή Cauchy.

Στην οριακή συνθήκη “καθορισμένου φορτίου ή Dirichlet ή πρώτου είδους”, το υδραυλικό φορτίο ορίζεται ως συνάρτηση της θέσης και του χρόνου κατά μήκος μιας οριακής επιφάνειας της περιοχής προσομοίωσης. Γενικά στο όριο αυτό το υδραυλικό φορτίο μπορεί είτε να μεταβάλλεται με το χρόνο είτε να παραμένει σταθερό. Έτσι, η οριακή αυτή συνθήκη διακρίνεται σε όριο μεταβαλλόμενου φορτίου και σε όριο σταθερού φορτίου. Σε συνθήκες μόνιμης ροής περιγράφεται από τη σχέση $h=f(x,y,z)$ ενώ σε συνθήκες μη μόνιμης ροής από τη σχέση $h=f(x,y,z,t)$

Στη συνθήκη τύπου “καθορισμένης ροής ή Neumann ή δευτέρου είδους”, καθορίζεται η ροή κατά μήκος μιας οριακής επιφάνειας, ως συνάρτηση της θέσης και του χρόνου. Σε περίπτωση μόνιμης ροής περιγράφεται μαθηματικά από τη σχέση $\partial h/\partial n = f(x,y,z,t)$, ενώ στην περίπτωση μη μόνιμης ροής από τη σχέση $\partial h/\partial n = f(x,y,z)$. Στην ειδικότερη περίπτωση αδιαπέρατου υδραυλικού ορίου (π.χ. αδιαπέρατος γεωλογικός σχηματισμός, υπόγειος υδροκρίτης) ισχύει $\partial h/\partial n = 0$, όπου n η διεύθυνση κάθετα στη ροή.

Η συνθήκη μεταβλητού φορτίου και ροής ή Cauchy ή τρίτου είδους χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου η ροή διαμέσου μιας οριακής επιφάνειας εξαρτάται τόσο από τις μεταβολές του υδραυλικού φορτίου που επικρατεί στην αντίστοιχη επιφάνεια όσο και από την υδραυλική κλίση εγκάρσια στην επιφάνεια.

7.3.5 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Το λογισμικό MODFLOW επιλύει την εξίσωση συνέχειας στα υπόγεια νερά στο επίπεδο των τριών διαστάσεων με βάση το νόμο του Darcy. Επιπρόσθετα, έχει τη δυνατότητα προσομοίωσης ποικίλων υδρογεωλογικών συστημάτων και οριακών συνθηκών σε διάφορους τύπους υδροφόρων σχηματισμών. Τα υδροφόρα στρώματα, προσομοιώνονται ως υπό πίεση ή ελεύθερα ή και ως συνδυασμός των δύο, όπως υφίστανται και στο φυσικό περιβάλλον.

Η επίλυση ενός μοντέλου πραγματοποιείται με διακριτοποίηση ως προς το χρόνο. Για κάθε μοντέλο ορίζονται χρονικές περιόδους προσομοίωσης (stress periods). Η μονάδα του χρόνου μπορεί να είναι δευτερόλεπτα, ημέρα, μήνας, εποχή, έτος κ.α. Κάθε χρονική προσομοίωση περιλαμβάνει τα χρονικά βήματα (time steps) που διαιρούν τη χρονική περίοδο σε υπο-περιόδους που μπορούν να είναι επίσης δευτερόλεπτο, ώρα, ημέρα κτλ.. Η διάρκεια κάθε περιόδου και κάθε χρονικού βήματος ορίζεται από τον διαχειριστή του μοντέλου προσομοίωσης.

Σύμφωνα με τον κώδικα MODFLOW, η τριδιάστατη κίνηση των υπόγειων νερών σταθερής πυκνότητας μέσω του πορώδους σχηματισμού περιγράφεται για τους ελεύθερους υδροφόρους από την εξίσωση (McDonald and Harbaugh, 1988):

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_x h \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y h \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_z h \frac{\partial h}{\partial z}) \pm W = S_y \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.16)$$

Για τους υπό πίεση υδροφόρους από την εξίσωση:

$$\frac{\partial}{\partial x} (T_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (T_y \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (T_z \frac{\partial h}{\partial z}) \pm W = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.17)$$

όπου:

K_x, K_y, K_z = η υδραυλική αγωγιμότητα κατά μήκος των x, y και z αξόνων, που θεωρούνται παράλληλοι προς τους κυρίους άξονες της υδραυλικής αγωγιμότητας (LT^{-1})

T_x, T_y, T_z = η μεταβιβαστικότητα κατά μήκος των x, y και z αξόνων συντεταγμένων, που θεωρούνται παράλληλοι προς τους κυρίους άξονες της μεταβιβαστικότητας (L^2T^{-1})

h = το υδραυλικό φορτίο (L)

W = δηλαδή οι εισροές και /ή οι εκροές του νερού (LT^{-1})

S = ο συντελεστής αποθηκευτικότητας

S_y = η ειδική απόδοση του πορώδους υλικού

t = ο χρόνος (T).

Η παραπάνω εξίσωση μαζί με τον προσδιορισμό της ροής των αρχικών και οριακών συνθηκών του πιεζομετρικού φορτίου, αποτελεί τη μαθηματική αναπαράσταση της ροής του υπόγειου νερού σε ένα υδροφόρο σύστημα.

Για την επίλυση μίας διαφορικής εξίσωσης μέσω των πεπερασμένων διαφορών, εκτός από τη χρονική διακριτοποίηση, πρέπει να διακριτοποιηθεί και το πεδίο ροής, δηλαδή το υδροφόρο στρώμα. Η χωρική διακριτοποίηση του υδροφόρου συστήματος γίνεται εφικτή με τη δημιουργία ενός ορθογωνικού δικτύου(κανάβου) από τρισδιάστατα ορθογώνια που ονομάζονται κελιά (cells), η θέση των οποίων περιγράφεται με όρους γραμμών, στηλών και επιπέδων. Η στάθμη του υδροφορέα για κάθε κελί, υπολογίζεται σε ένα συγκεκριμένο σημείο που ονομάζεται κόμβος. Στα περισσότερα μοντέλα, ο κόμβος αυτός ορίζεται στο κέντρο του κελιού. Με τον παραπάνω τρόπο παρέχεται η δυνατότητα μιας πολυποίκιλης χωρικής ανάλυσης για την περιοχή έρευνας. Τα στοιχεία του μοντέλου μπορούν να διαφέρουν μεταξύ τους ως προς το μέγεθος και τον όγκο τους, αλλά η κατανομή των υδραυλικών παραμέτρων καθενός από αυτά θεωρείται ομοιογενής.

Για να περιγραφούν τα όρια του μοντέλου, τα κελιά χαρακτηρίζονται ως ενεργά (active) ή ανενεργά (inactive). Στα ενεργά κελιά προσομοιώνεται η ροή του υδροφορέα ενώ στα ανενεργά οι εισροές και εκροές είναι μηδενικές και δεν πραγματοποιείται προσομοίωση.

Οι οριακές συνθήκες στο κώδικα MODFLOW περιγράφονται από τρεις καταστάσεις:

- κελιά σταθερού φορτίου (constant-head), όπου η στάθμη είναι σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Παρ' όλα αυτά, η ποσότητα του νερού που εισέρχεται ή εξέρχεται από το κελί, διαμορφώνεται ανάλογα με τις αλλαγές στη στάθμη των γειτονικών κελιών

- κελιά μεταβαλλόμενου φορτίου (variable-head), όπου η στάθμη δεν προσδίδεται από την αρχή αλλά μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης
- κελιά σταθερής εισροής (general head boundaries), όπου η εισροή παραμένει σταθερή στο κελί αλλά η στάθμη αλλάζει ανάλογα με τις μεταβολές αυτής στα γειτονικά κελιά.

7.4 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ ΚΟΚΚΩΔΟΥΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΑΡΑΘΩΝΑ

Για την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας και την περαιτέρω έρευνα των υδρογεωλογικών συνθηκών του κοκκώδους φρεάτιου υδροφορέα του Μαραθώνα, επιχειρήθηκε η μαθηματική του προσομοίωση με χρήση του υπολογιστικού κώδικα MODFLOW. Κατά την προσομοίωση του συστήματος χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ModelMuse version 3.6.3. Αποτελεί ένα από τα πλέον εύχρηστα λογισμικά για τη προσομοίωση υδροφόρων συστημάτων και χρησιμοποιεί τον κώδικα MODFLOW 2005. Τόσο το λογισμικό όσο και ο κώδικας διατίθενται δωρεάν από τη U.S. Geological Survey μαζί με εγχειρίδιο λειτουργίας και βοηθητικά βίντεο (<http://water.usgs.gov/nrp/gwsoftware/ModelMuse/ModelMuse.html>).

Η συγκεκριμένη προσομοίωση δεν αποσκοπεί στην ανάπτυξη σεναρίων για τη μελλοντική κατάσταση του υδροφόρου συστήματος αλλά πραγματοποιήθηκε με σκοπό τη κατανόηση της λειτουργίας του υπόγειου υδροφορέα ως προς τις υδραυλικές συνθήκες και την αλληλεπίδραση αυτού με τα υδάτινα σώματα της περιοχής. Η επίδραση του κωπηλατοδρομίου στο σύστημα δεν συμπεριλήφθηκε στην επίλυση καθώς τα διαθέσιμα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τη ρύθμιση του μοντέλου αφορούν στο έτος 1998, πριν την κατασκευή του.

7.4.1 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΝΝΟΙΟΛΟΓΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Όπως αναφέρθηκε στα υποκεφάλαια 7.1 και 7.2, η προσομοίωση της ροής του υπόγειου νερού ενός υδροφόρου συστήματος με την ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου απαιτεί την όσο το δυνατόν πληρέστερη κατανόηση του υπό εξέταση υδροφόρου. Για την επίτευξη αυτού του στόχου απαιτείται η συλλογή γεωλογικών, κλιματικών, υδρολογικών, υδρογεωλογικών κ.α. στοιχείων μέσα από τη βιβλιογραφία, από έρευνα πεδίου και μετρήσεις υπαίθρου στη περιοχή μελέτης. Η πραγματοποίηση της συγκεκριμένης διαδικασίας περιγράφηκε στα προηγούμενα κεφάλαια. Η σύνθεση και η επεξεργασία των παραπάνω αποτελεί την ανάπτυξη του εννοιολογικού μοντέλου, βάσει του οποίου θα αναπτυχθεί στη συνέχεια το μοντέλο ροής. Έτσι το εννοιολογικό μοντέλο αποτελεί μια απλοποιημένη αναπαράσταση του πραγματικού συστήματος και μπορεί στη συνέχεια να τροφοδοτήσει με τις πληροφορίες του το μαθηματικό σκελετό που περιέχει τις εξισώσεις που διέπουν την κίνηση του νερού και περιγράφουν τις φυσικές ή χημικές διεργασίες (Πλιάκας, 1998).

Η προσομοίωση των υδρογεωλογικών συνθηκών της περιοχής πραγματοποιήθηκε μόνο στον αλλουβιακό υδροφορέα καθώς η κίνηση του υπόγειου νερού δεν είναι σαφής στους καρστικούς σχηματισμούς. Αυτό συμβαίνει λόγω της ελλιπούς γνώσης ως προς την ακριβή δομή των καρστικών συστημάτων (καρστικά έγκοιλα, βαθμός καρστικοποίησης, βαθμός ρωγμάτωσης κ.α.) και της ανισοτροπίας και ανομοιογένειας που επικρατεί στους συγκεκριμένους γεωλογικούς σχηματισμούς έτσι ώστε να μην ισχύουν οι εξισώσεις που επιλύει ο κώδικας MODFLOW. Παρ' όλα αυτά, στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή θεωρήθηκε ότι το καρστικό σύστημα της περιοχής συμμετέχει δραστικά στην τροφοδοσία του προσχωματικού υδροφορέα.

Για την επίτευξη της προσομοίωσης πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική ανασκόπηση για τις υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής μέσα από μελέτες και διπλωματικές εργασίες που έγιναν κατά το παρελθόν. Καθοριστικά δεδομένα για τη διαμόρφωση του εννοιολογικού μοντέλου της περιοχής, λήφθηκαν από την υδρογεωλογική μελέτη των Μελισσάρη και Σταυρόπουλου (1999) για το πεδινό τμήμα του Μαραθώνα που εκπονήθηκε για λογαριασμό του Υπουργείου Γεωργίας αλλά και από την υδρογεωλογική μελέτη του Σιέμου (2010) για το υδατικό διαμέρισμα Αττικής. Πρωτογενή δεδομένα πεδίου τα οποία συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια της παρούσης μεταπτυχιακής διατριβής (βλ. Κεφάλαια 5, 6) χρησιμοποιήθηκαν επίσης για τον καθορισμό των οριακών συνθηκών (π.χ. περιοχές εμπλουτισμού του κοκκώδους συστήματος από τις καρστικές γεωλογικές μονάδες). Βάσει αυτών των δεδομένων, της έρευνας πεδίου και των μετρήσεων υπαίθρου που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια του Ιουνίου - Δεκεμβρίου 2015, διαμορφώθηκε μία απλοποιημένη μορφή του εννοιολογικού μοντέλου για το παράκτιο κοκκώδες υδροφόρο σύστημα της περιοχής.

Ως προς την έκταση, τα υδρογεωλογικά όρια του μοντέλου καθορίστηκαν σύμφωνα με το γεωλογικό χάρτη της περιοχής (σχήμα 4.5). Από τους γεωλογικούς σχηματισμούς που αναπαριστώνται, το υπό προσομοίωση στρώμα αποτελούν οι αλλουβιακές αποθέσεις. Ως προς το βάθος, ο υδροφορέας σχηματίστηκε βάσει των ισοβαθών καμπυλών του πυθμένα του υδροφορέα, που λήφθηκαν από τον Καραγιάννη (2003) με δεδομένα της μελέτης των Μελισσάρη και Σταυρόπουλου (1999).

Στην παρούσα διατριβή συμπεριλήφθηκαν τα εξής είδη τροφοδοσίας για τον υδροφόρο:

- Ενεργή κατείσδυση από βροχοπτώσεις (φυσικός εμπλουτισμός),
- Μέτωπα πλευρικές εισροών από το καρστικό σύστημα, που προέρχονται από το πορώδες ρωγμάτωσης του καρστ,
- Σημειακές εισροές από το καρστικό σύστημα που προέρχονται από το πορώδες διάλυσης του καρστ και εκδηλώνονται μέσω πηγών επαφής, με κύρια τη Μακαρία πηγή,
- Επαγωγικός εμπλουτισμός (incidental recharge) μέσω των επιστροφών άρδευσης.

Τέλος, θεωρήθηκε ότι ο υδροφορέας αντλείται από ένα πυκνό δίκτυο γεωτρήσεων και πηγαδιών, όπως αυτά καταγράφηκαν κατά την έρευνα πεδίου.

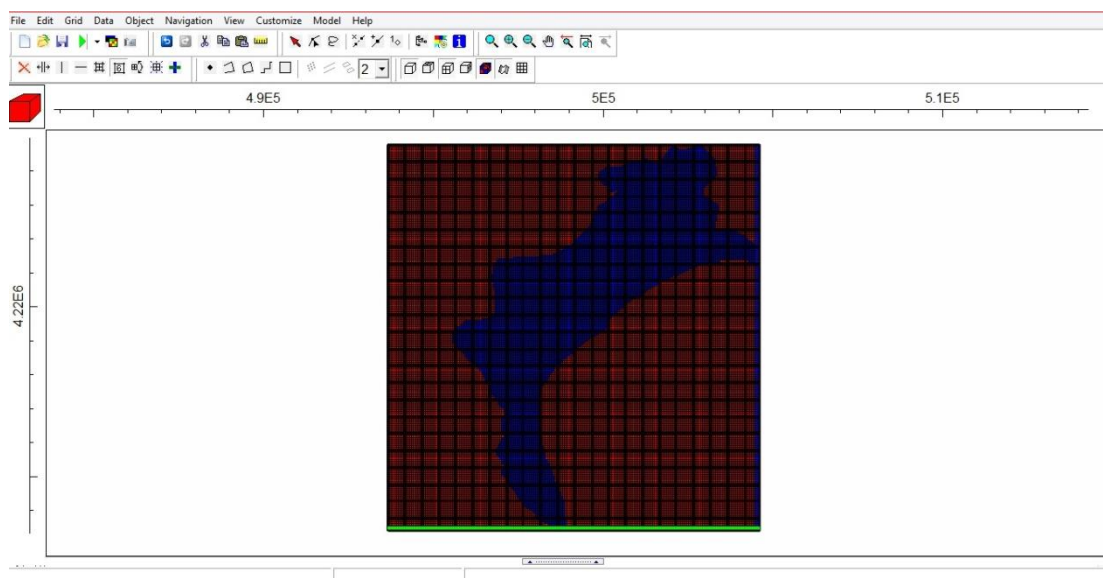
7.4.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ModelMuse 3.6.3 ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ

Για την προσομοίωση ενός υδροφόρου συστήματος με τη χρήση του λογισμικού ModelMuse, είναι αναγκαία η ακολουθία συγκεκριμένων βημάτων. Στο σημείο αυτό, είναι απαραίτητο να αναφερθεί ότι τα απαραίτητα στοιχεία για την αναπαράσταση του υδροφορέα, των αρχικών και οριακών συνθηκών και όλων των δομών που διέπουν τη λειτουργία του συστήματος, εισάγονται στο λογισμικό ως «αντικείμενα» (objects). Τα αντικείμενα αυτά αποτελούν κυρίως αρχεία shapefile που δημιουργούνται σε λογισμικά Γ.Π.Σ. (GIS) ή και στο ίδιο το πρόγραμμα και έχουν τη δυνατότητα να λάβουν παραμέτρους και να τροποποιηθούν. Στη προκειμένη περίπτωση τα αρχεία shapefile σχεδιάστηκαν με το λογισμικό ArcMap 10.1 της ESRI. Η αναπαράσταση επιφανειών με

ανομοιογενή χαρακτηριστικά (π.χ. ανάγλυφο υδροφορέα) πραγματοποιείται με την εισαγωγή αρχείων ASCII που αποτελούν αρχεία κειμένου και σχεδιάστηκαν επίσης στο ArcMap 10.1.

Σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν, τα βήματα που πραγματοποιήθηκαν για τη δημιουργία του μοντέλου είναι τα εξής:

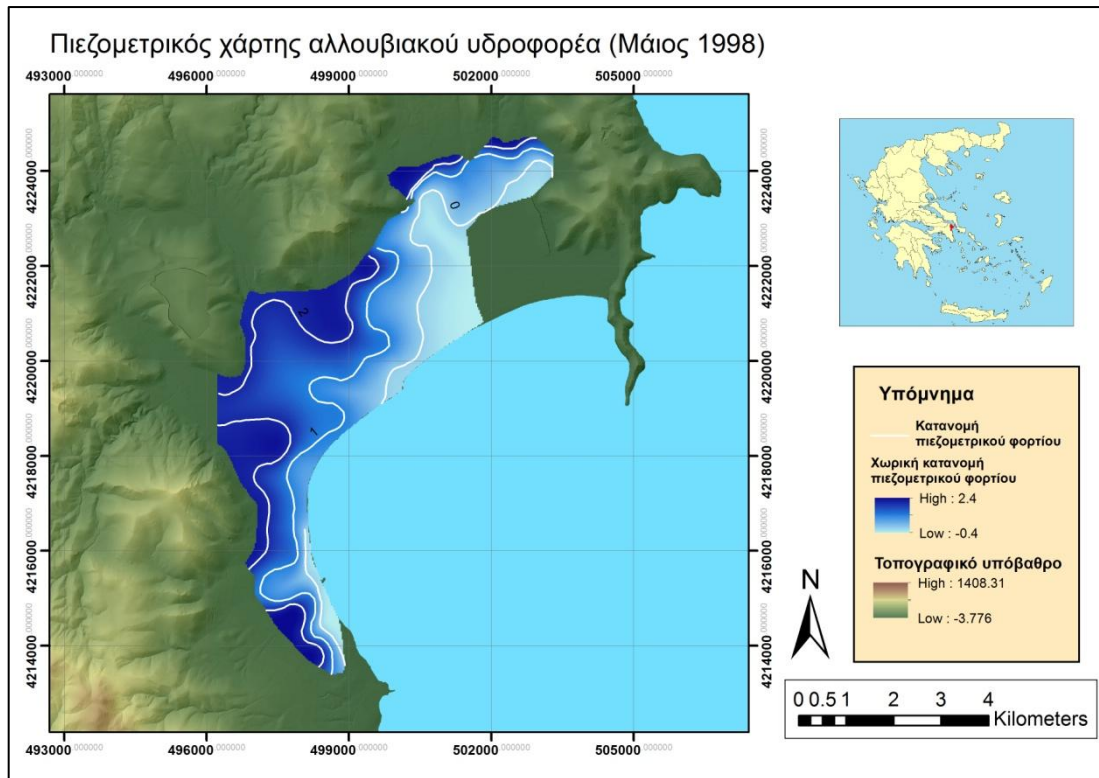
- Δημιουργία αρχείου στο οποίο θα προσομοιωθεί ο υδροφορέας
- Εισαγωγή του ορίου του υδροφορέα. Ο υδροφόρος εισήχθη ως αρχείο shapfile (shp) με έκταση και όρια του αλλουβιακού στρώματος της περιοχής
- Δημιουργία κανάβου (grid) για τη χωρική διακριτοποίηση του σχηματισμού. Ο κάνναβος δημιουργήθηκε βάσει της έκτασης της υπό μελέτης περιοχής. Τα κελία δημιουργήθηκαν με ισοδιάσταση 50m. Ο κάνναβος και το περιβάλλον εργασίας του ModelMuse φαίνονται στο σχήμα 7.1. Στο εν λόγω σχήμα φαίνεται ο κάνναβος και το όριο του μοντέλου.



Σχήμα 7.1 Δημιουργία κανάβου και ορίου του μοντέλου στο περιβάλλον του λογισμικού ModelMuse.

- Δημιουργία πάχους υδροφόρου στρώματος. Με βάση τα στοιχεία που επεξεργάστηκε ο Καραγιάννης (2003), λήφθηκαν οι ισοβαθείς του πυθμένα και της επιφάνειας εδάφους του υδροφόρου στρώματος. Τα υψόμετρα αυτά επεξεργάστηκαν με το λογισμικό ArcMap 10.1 και μετατράπηκαν σε αρχεία raster, ενώ στη συνέχεια εισήχθησαν στο μοντέλο με τη μορφή αρχείων ASCII. Κατά αυτό τον τρόπο ο υδροφορέας έχει μεταβαλλόμενο πάχος σε όλη του την έκταση..
- Καθορισμός μονάδων φυσικών μεγεθών. Κατά την έναρξη της ανάπτυξης του μοντέλου καθορίστηκαν οι χρονικές μονάδες σε ημέρες και οι χωρικές σε μέτρα. Έτσι, οι μονάδες των φυσικών μεγεθών καθορίστηκαν ως:
 - Μήκος: m
 - Χρόνος: day

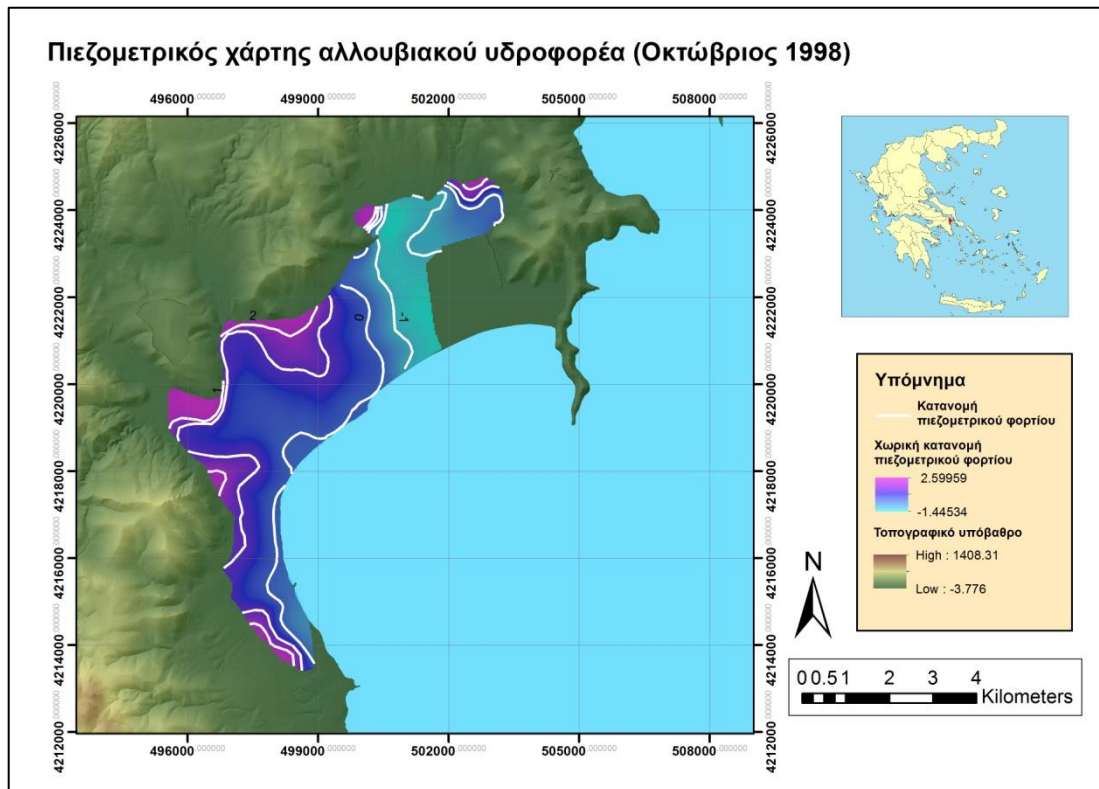
- Υδραυλική αγωγιμότητα: m/day
- Ρυθμός άντλησης: m³/day
- Εμπλουτισμός: m/day
- Ορισμός αρχικών–τελικών συνθηκών. Ως αρχικές συνθήκες για τη προσομοίωση του συστήματος, ορίσθηκε ο πιεζομετρικός χάρτης του μήνα Μαΐου για το έτος 1998 από τη μελέτη Μελισσάρη-Σταυρόπουλου (1999). Οι πιεζομετρικός χάρτης γεωαναφέρθηκε στο ArcMap 10.1 και στη συνέχεια ψηφιοποιήθηκαν τα υδραυλικά φορτία. Τέλος, το αρχείο μετατράπηκε σε raster και εισήχθη στο μοντέλο σαν αρχείο ASCII. Ο τροποποιημένος χάρτης φαίνεται στο σχήμα 7.2. Στο σχήμα 7.3 παρουσιάζονται οι συνθήκες για το τέλος της πρώτης περιόδου φόρτισης, τροποποιημένες από τους Μελισσάρη-Σταυρόπουλο (1999)
- Υδραυλική αγωγιμότητα : Βάσει της μελέτης του Σιέμου (2010) η αγωγιμότητα του υδροφορέα κυμαίνεται μεταξύ 10^{-6} και 10^{-5} m/sec. Μετά από επαναλαμβανόμενες δοκιμές με τη μέθοδο “trial and error”, επιλέχθηκε για τη συγκεκριμένη επίλυση τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας ίση με 2 m/day που ισοδυναμεί με $2,3 \times 10^{-5}$ m/sec για όλη την έκταση του υδροφορέα.
- Χρονική διακριτοποίηση. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για μία χρονική περίοδο (stress period) διάρκειας 5 μηνών για την οποία ήταν γνωστές οι αρχικές και οι τελικές συνθήκες. Η περίοδος ξεκινάει το Μάιο του 1998 και τελειώνει τον Οκτώβριο του ίδιου έτους. Πρόκειται για τη προσομοίωση της ξηρής περιόδου όπου οι αντλήσεις νερού από τον υδροφορέα αυξάνονται σημαντικά. Το χρονικό βήμα (time step) για τη περίοδο είναι η ημέρα και η συνολική διάρκεια είναι 153 ημέρες (5 μήνες). Στο συγκεκριμένο μοντέλο επιλέχθηκε η απλή επίλυση σε συνθήκες μόνιμης ροής.
- Ορισμός οριακών συνθηκών. Οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι :
 - Όριο σταθερού φορτίου: στα κατάντη που ο υδροφορέας συνορεύει με τη θάλασσα καθώς και στη περιοχή του έλους το φορτίο ορίστηκε ίσο με το 0
 - Όριο μεταβαλλόμενου φορτίου: οι εκφορτίσεις του καρστικού υδροφορέα στο κοκκώδες σύστημα διαμορφώθηκαν ως οριακή συνθήκη μεταβαλλόμενου φορτίου. Η συγκεκριμένη συνθήκη χρησιμοποιήθηκε εξαιτίας της έλλειψης δεδομένων ως προς τις παροχές των πηγών και τη συμμετοχή του καρστικού νερού στη φόρτιση του υδροφορέα. Το καρστικό σύστημα θα μπορούσε να αναπαρασταθεί και ως αδιαπέρατο όριο όμως λόγω καρστικοποίησης και ρωγμάτωσης του συγκεκριμένου σχηματισμού θεωρήθηκε ότι υπάρχει εισροή νερού από το καρστ στον κοκκώδη σχηματισμό. Τα φορτία που χρησιμοποιήθηκαν για τις συγκεκριμένες οριακές συνθήκες επιλέχθηκαν βάσει του πιεζομετρικού χάρτη 7.2 (2 m στα μάρμαρα Μαραθώνα και Γραμματικού και 2,5 m στη Μακαρία πηγή).
 - Αδιαπέρατο όριο: Ως αδιαπέρατα όρια ορίστηκαν οι ανάντη περιοχές της πεδιάδας οι οποίες δεν συνορεύουν άμεσα με τα μάρμαρα.



Σχήμα 7.2 Αρχικές πιεζομετρικές συνθήκες μοντέλου (Πηγή: Μελισσάρης-Σταυρόπουλος, 1999 με τροποποιήσεις)

- **Επιφανειακή τροφοδοσία (Recharge):** η τροφοδοσία του υδροφόρου στρώματος από τα νερά της βροχής υπολογίστηκε λαμβάνοντας υπ' όψιν τον όγκο της βροχόπτωσης από το Μάιο έως το Σεπτέμβρη του 1998 ο οποίος έφτασε τα 34mm. Ο όγκος αυτός καταμεμήθηκε ισόποσα για κάθε μία από της 153 μέρες της περιόδου και θεωρώντας ως κατείσδυση το 20% αυτού του όγκου υπολογίστηκε η ημερήσια επιφανειακή τροφοδοσία. Ο τελικός όγκος που εισρέει στον υδροφόρο είναι 0,00044mm/day ή $4,4 \times 10^{-5}$ m/day. Η περιοχή του έλους εξαιρέθηκε κατά τη χρήση του συγκεκριμένου πακέτου καθώς θεωρείται ότι τα νερά του αποστραγγίζονται στη θάλασσα και δε συμμετέχουν στη τροφοδοσία του υδροφορέα εξαιτίας του στρώματος αργίλου που καλύπτει τη συγκεκριμένη επιφάνεια.
- **Αντλήσεις:** οι αντλήσεις εισήχθησαν στο μοντέλο με το πακέτο για τα πηγάδια (Well Package) του ModelMuse. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 100 πηγάδια, σύμφωνα με την απογραφή που προηγήθηκε κατά την έρευνα πεδίου. Ο αριθμός των πηγαδιών είναι ενδεικτικός καθώς είναι αδύνατο να καταγραφούν όλα τα πηγάδια της περιοχής στα πλαίσια της διατριβής. Το συνολικό ύψος των αντλήσεων για τη συγκεκριμένη περίοδο έφτασε τα 2×10^6 m³/year. Σε αυτή τη τιμή αφαιρέθηκε το 20% καθώς θεωρήθηκε ως επιστροφή στον υδροφορέα από τις αρδεύσεις. Οι αντλήσεις δεν καταμεμήθηκαν ομοιόμορφα σε όλη τη πεδιάδα αλλά ανάλογα με τις χρήσεις γης που επικρατούν σε κάθε περιοχή. Γενικά οι αντλήσεις είναι πολύ μικρές κοντά στην ακτή (-30m³/day για κάθε γεώτρηση) οπου εκλείπουν οι αρδευόμενες εκτάσεις, ενώ προς την ενδοχώρα αυξάνονται, ιδιαίτερα σε περιοχές που υπάρχουν θερμοκήπια και εκτάσεις με καλλιέργειες

οπωροκηπευτικών. Τέτοιες είναι οι περιοχές του Βρανά και του Κάτω Σουλίου κάθε γεώτρηση στο μοντέλο αντλεί με ρυθμό $-100 \text{ m}^3/\text{day}$.



Σχήμα 7.3 Πιεζομετρικές συνθήκες Οκτωβρίου 1998 (Πηγή: Μελισσάρης-Σταυρόπουλος, 1999 με τροποποιήσεις)

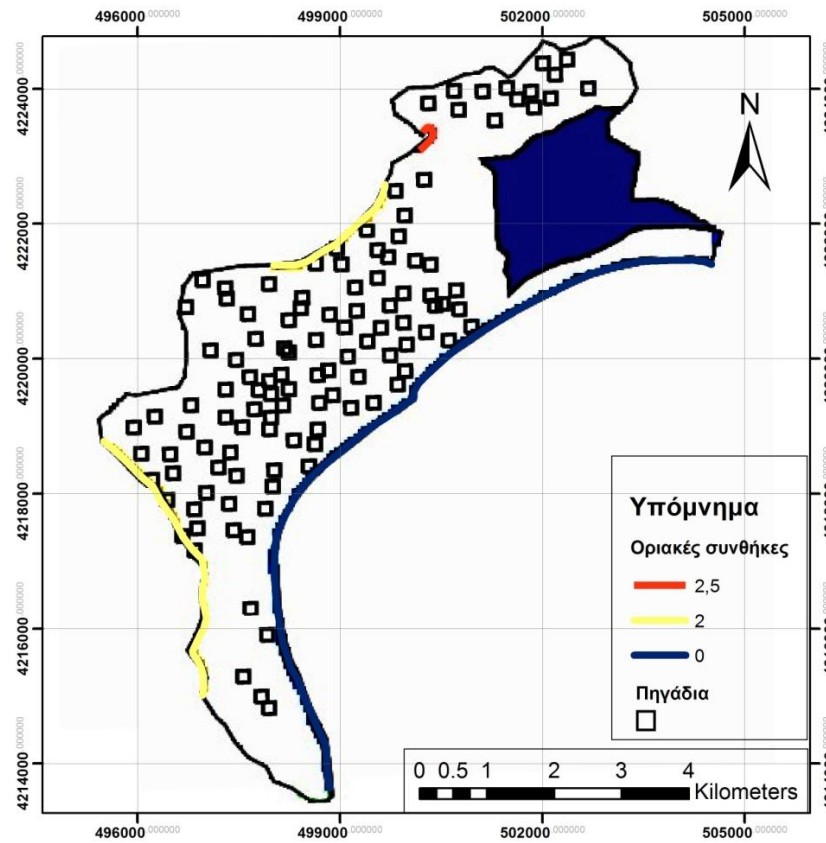
- Πηγάδια παρακολούθησης: Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων ενεργοποιήθηκε το πακέτο παρακολούθησης φορτίου (head observation package) κατά το οποίο μερικά από τα πηγάδια άντλησης χρησιμοποιήθηκαν και ως πηγάδια παρακολούθησης. Αρχικά καταγράφηκε η στάθμη των πηγαδιών σύμφωνα με το διαθέσιμο πιεζομετρικό χάρτη του Οκτωβρίου 1998 και στη συνέχεια μετά τη προσομοίωση, η τιμή των συγκεκριμένων πηγαδιών χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Η τελική μορφή του μοντέλου συμπεριλαμβάνει όλα τα παραπάνω και παρουσιάζεται στο σχήμα 7.4. Στην εικόνα φαίνονται:

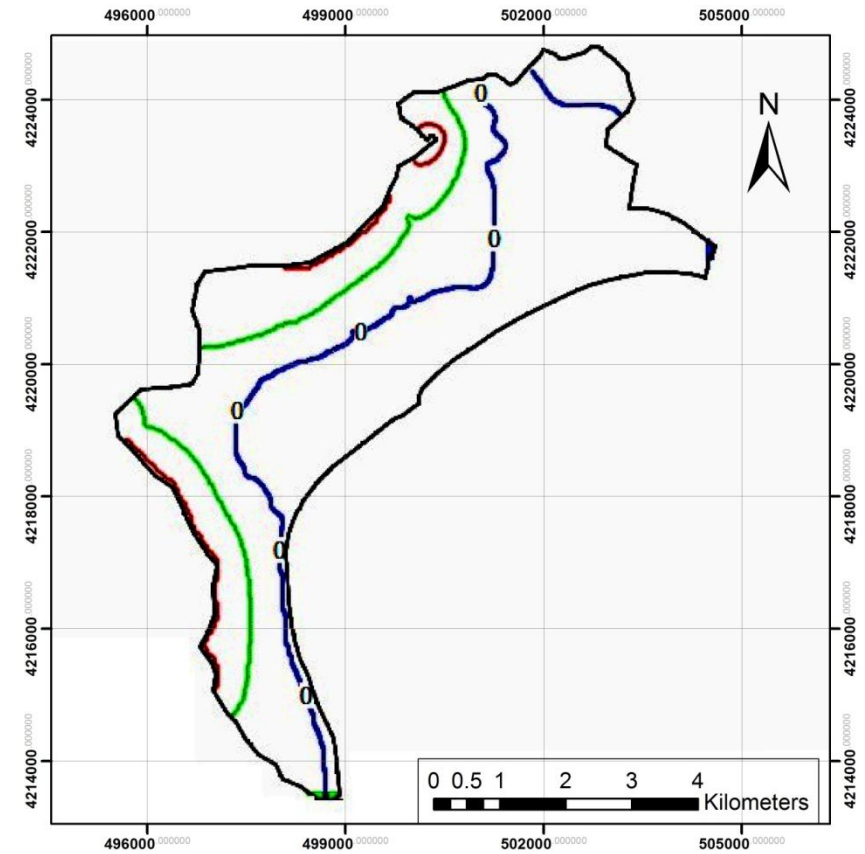
- το όριο του μοντέλου,
- τα πηγάδια (με τετραγωνικό σχήμα), και
- οι οριακές συνθήκες:
 - με μπλε χρώμα οι συνθήκες σταθερού φορτίου,
 - με κίτρινο και κόκκινο συνθήκες μεταβαλλόμενου φορτίου.

7.4.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

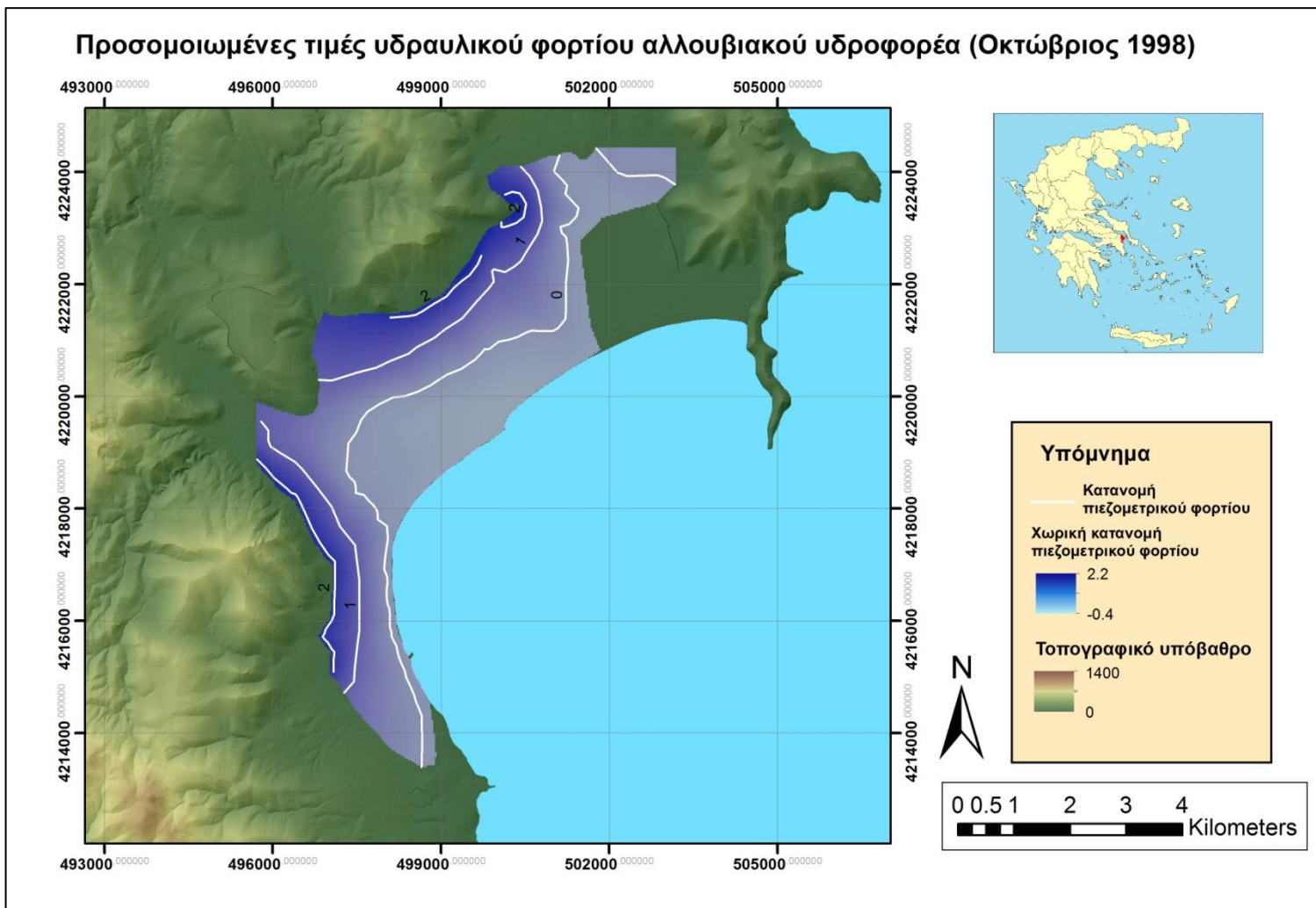
Τα αποτελέσματα που παράχθηκαν κατά την προσομοίωση του μοντέλου αξιολογήθηκαν βάσει του πιεζομετρικού φορτίου. Οι ισοπιεζομετρικές γραμμές που προέκυψαν από την επίλυση του μαθηματικού μοντέλου αναπαριστούν την κατάσταση του υδροφορέα μετά το πέρας της ξηρής περιόδου του έτους 1998 (σχήμα 7.5). Στο σχήμα 7.6 φαίνονται οι προσομοιωμένες πιεζομετρικές συνθήκες μετά από επεξεργασία με το λογισμικό ArcMap 10.1. Συγκρίνοντας τις παρατηρημένες τιμές τις πιεζομετρίας με τις προσομοιωμένες, θεωρείται ότι ο πιεζομετρικός χάρτης του μοντέλου προσεγγίζει ικανοποιητικά τον αντίστοιχο της μελέτης(σχήμα 7.3), κυρίως ως προς την ισοπιεζομετρία του παράκτιου τμήματος, πράγμα που επαληθεύει τη ρύθμιση του μοντέλου.



Σχήμα 7.4 Τελική μορφή υδρογεωλογικού μοντέλου παράκτιου κοκκώδους



Σχήμα 7.5 Προσομοιωμένες τιμές πιεζομετρικού φορτίου (Οκτώβριος 1998)



Σχήμα 7.6 Προσομοιωμένες τιμές πιεζομετρικού φορτίου (Οκτώβριος 1998)

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κατά την εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής προκύπτουν κάποια βασικά συμπεράσματα και προβληματισμοί που αναλύονται παρακάτω.

Τα παράκτια κοκκώδη συστήματα είναι σχηματισμοί που φέρουν υδροφορία, η οποία εξαρτάται από την κοκκομετρική σύσταση του εδάφους, τους γεωλογικούς σχηματισμούς που αναπτύσσονται στην ευρύτερη περιοχή καθώς και από τις επικρατούσες υδρογεωλογικές συνθήκες. Η συσσώρευση πληθυσμού στις παράκτιες περιοχές έχει καταστήσει αναγκαία την εκμετάλλευση των υπόγειων υδροφόρων συστημάτων με αποτέλεσμα τη διείσδυση του θαλασσινού νερού στη μάζα του υδροφορέα. 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 καταστεί μη αναστρέψιμο.

Για την αντιμετώπιση της θαλάσσιας διείσδυσης σε έναν υδροφόρο, απαραίτητη προϋπόθεση είναι ο προσδιορισμός του βαθμού του προβλήματος. Κάτι τέτοιο πραγματοποιείται με την ανάπτυξη ενός κατάλληλου δικτύου παρακολούθησης του υπό εξέταση υδροφόρου με συνεχείς μετρήσεις του πιεζομετρικού φορτίου, της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας (SEC), των χλωριόντων και άλλων χημικών στοιχείων και ιοντικών λόγων που αποτελούν ένδειξη θαλάσσιας διείσδυσης.

Η πεδιάδα του Μαραθώνα, βρίσκεται στο ΒΑ άκρο της Αττικής και αποτελεί μία παράκτια περιοχή με ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Η ιδιαιτερότητα της έγκειται τόσο στην ιστορική σημασία της (μάχη του Μαραθώνα, 490π.Χ.), όσο και στα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά της που την καθιστούν μοναδική στο είδος της. Το Εθνικό Πάρκο Σχινιά είναι ένα εξαιρετικό φυσικό τοπίο στο οποίο περιλαμβάνονται ο υγρότοπος του του Σχινιά, το Ολυμπιακό Κωπηλατοδρόμιο, το δάσος με τις κουκουναριές, η περιοχή της Μακαρίας πηγής και ο όρμος του Μαραθώνα, μία έκταση τουρισμού, αναψυχής και παραθεριστικής κατοικίας. Όλα αυτά τα χαρακτηριστικά κατατάσσουν το Εθνικό πάρκο στις προστατευόμενες περιοχές.

Η ευρύτερη περιοχή του Μαραθώνα χαρακτηρίζεται από έντονες ανθρωπογενείς παρεμβάσεις, μεγάλης και μικρής κλίμακας. Τέτοιες παρεμβάσεις είναι τα φράγματα του Μαραθώνα και της Ραπεντώσας, οι τάφροι αποστράγγισης των ελωδών εκτάσεων του Σχινιά και της Μπρεξίζας, η κατασκευή του Ολυμπιακού κωπηλατοδρομίου και τα εκατοντάδες κατακόρυφα υδρομαστευτικά έργα στην πεδινή έκταση. Όλες αυτές οι παρεμβάσεις έχουν αλλάξει το υδρολογικό και υδρογεωλογικό σύστημα της περιοχής καθιστώντας τη λειτουργία του ιδιαίτερα περίπλοκη.

Από γεωμορφολογική άποψη, το παράκτιο πεδίο του Μαραθώνα παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω των έντονων γεωμορφολογικών αλλαγών που συνεχώς πραγματοποιούνται, εξαιτίας φυσικών διεργασιών και ανθρωπογενών παρεμβάσεων.

Τεκτονικά, η περιοχή του Μαραθώνα ανήκει στην Αττικο-Κυκλαδική ζώνη. Οι κύριοι γεωλογικοί σχηματισμοί που εμφανίζονται είναι τα μάρμαρα και οι σχιστόλιθοι που εντάσσονται στον ορεινό όγκο της Πεντέλης, ενώ στην πεδινή περιοχή αναπτύσσεται ένα κοκκώδες σύστημα που περιλαμβάνει νεογενείς και τεταρτογενείς αποθέσεις. Στη περιοχή παρατηρούνται μεγάλες ρηξιγενείς ζώνες με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ ενώ εντοπίζονται και μικρότερα ρήγματα διεύθυνσης ΒΔ-ΝΑ και ΒΑ-ΝΔ, διαχωρίζοντας τη περιοχή σε μικρότερα ρηξιτεμάχη.

Η διαφορετική λιθολογία που υπάρχει στην περιοχή έρευνας, έχει οδηγήσει στη δημιουργία διαφορετικών υδρογεωλογικών συστημάτων. Στις αλλουβιακές αποθέσεις της πεδιάδας, αναπτύσσεται ελεύθερος υδροφόρος που αντλείται μέσω πηγαδιών και γεωτρήσεων από τους κατοίκους της περιοχής. Ο προσχωματικός αυτός υδροφόρος εφάπτεται προς τα ανάντη με τον καρστικό σχηματισμό των μαρμάρων ο οποίος χαρακτηρίζεται από πλούσια τροφοδοσία με υπόγειες και επιφανειακές εκφορτίσεις. Στις επιφανειακές εκφορτίσεις περιλαμβάνονται οι πηγές της Μακαρίας, της Δρακονέρας και η πηγή Μάτι. Στον πιεζομετρικό χάρτη που σχεδιάστηκε, με πρωτογενή δεδομένα στάθμης, παρατηρείται ευδιάκριτα η τροφοδοσία του προσχωματικού υδροφορέα από το καρστικό υδροφόρο σύστημα των μαρμάρων.

Κατά τη διάρκεια εκπόνησης της ανά χείρας μεταπτυχιακής διατριβής, πραγματοποιήθηκε έρευνα πεδίου κατά την οποία καταγράφηκε ένα πυκνό δίκτυο πηγαδιών και γεωτρήσεων στη πεδιάδα του Μαραθώνα. Μέσα από το δίκτυο υδροληψίας, επιλέχθηκαν συγκεκριμένα σημεία βάσει της τοποθεσίας τους, για τα οποία μετρήθηκε η στάθμη και συλλέχθηκαν δείγματα νερού. Ύστερα από χημικές αναλύσεις των δειγμάτων και επεξεργασία των συγκεντρώσεων των ιόντων που εντοπίστηκαν, εξήχθη το συμπέρασμα ότι οι υδρογεωλογικοί σχηματισμοί έχουν υποβαθμιστεί ποιοτικά από το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης και της νιτρορύπανσης. Ο κοκκώδης υδροφορέας είναι φανερά πιο υφαλμυρισμένος από τον καρστικό, εξαιτίας της υπεράντλησης του.

Στην προσπάθεια κατανόησης της λειτουργίας του αλλουβιακού υδροφορέα, επιχειρήθηκε η μαθηματική του προσομοίωση. Η διαδικασία διεξήχθη με τη χρήση του λογισμικού ModelMuse και του κώδικα MODFLOW 2005, που αφορά στην επίλυση των εξισώσεων ροής σε κοκκώδη υδροφόρα στρώματα.

Η συγκεκριμένη προσπάθεια επικεντρώθηκε στη ρύθμιση του μοντέλου, χωρίς την παραγωγή μελλοντικών σεναρίων κατάστασης του υδροφόρου. Η ρύθμιση πραγματοποιήθηκε με δεδομένα πιεζομετρικών φορτίων που έχουν καταγραφεί στην υδρογεωλογική μελέτη των Μελλισάρη και Σταυρόπουλου (1999) που πραγματοποιήθηκε για λογαριασμό του Υπουργείου Γεωργίας.

Για τις αρχικές συνθήκες, έγινε εισαγωγή του πιεζομετρικού χάρτη Μαΐου για το έτος 1998 και το αποτέλεσμα αξιολογήθηκε βάσει του πιεζομετρικού χάρτη Οκτωβρίου του ίδιου έτους.

Το μοντέλο προσομοιώθηκε για μία χρονική περίοδο 5 μηνών (Μάιο έως Σεπτέμβριο) με ημερήσιο χρονικό βήμα και συνθήκες μόνιμης ροής. Η υδραυλική αγωγιμότητα του

υδροφορέα επιλέχθηκε ίση με 2 m/day ($2,3 \times 10^{-5} \text{ m/sec}$), ύστερα από βιβλιογραφική ανασκόπηση αλλά και συνεχόμενες δοκιμές κατά την εκτέλεση του μοντέλου.

Ως οριακές συνθήκες, χρησιμοποιήθηκαν το όριο σταθερού φορτίου (στην επαφή του υδροφορέα με τη θάλασσα και το έλος), το όριο μεταβαλλόμενου φορτίου (για τις περιοχές που ο υδροφορέας φαίνεται να τροφοδοτείται από τα μάρμαρα) και το αδιαπέρατο όριο (για τις περιοχές που δε συνορεύουν άμεσα με τα μάρμαρα).

Ο συνολικός όγκος των αντλήσεων θεωρήθηκε ως $2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ και κατανεμήθηκε ανομοιόμορφα μέσω πολυάριθμων πηγαδιών, ανάλογα με το είδος των γεωργικών εκτάσεων της πεδιάδας. Διαδοχικές επισκέψεις υπαίθρου και προσωπική επικοινωνία με αγρότες της περιοχής συντέλεσαν στον καθορισμό των όγκων άντλησης ανά τμήματα για όλη την έκταση της περιοχής έρευνας.

Τέλος, τα αποτελέσματα που παράχθηκαν κατά την προσομοίωση του μοντέλου αξιολογήθηκαν βάσει του πιεζομετρικού φορτίου, συγκρίνοντας τις παρατηρημένες τιμές τις πιεζομετρίας με τις προσομοιωμένες. Βάσει αυτών, θεωρήθηκε ότι ο πιεζομετρικός χάρτης του μοντέλου προσεγγίζει ικανοποιητικά τον αντίστοιχο της μελέτης.

Η εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής, δίνει έναυσμα για περαιτέρω έρευνα του υδρογεωλογικού καθεστώτος της περιοχής. Η έρευνα θα μπορούσε να εστιαστεί σε ποικίλα ζητήματα που αφορούν στο καρστικό και αλλουβιακό υδροφορέα.

- 1.** Μείζον θέμα, αποτελεί η γεωλογική χαρτογράφηση του καρστικού συστήματος του Μαραθώνα και γενικότερα της Πεντέλης. Με την ενέργεια αυτή, είναι δυνατό να εξακριβωθεί εάν τα καρστικά συστήματα της περιοχής επικοινωνούν μεταξύ τους, που και πως εκφορτίζονται και τι ποσότητες νερού μπορούν να διαθέσουν ως τροφοδοσία του αλουβιακού συστήματος, γεγονός που θα συντελέσει στην καλύτερη διαχείριση των υδατικών πόρων της περιοχής. Ζήτημα καθοριστικής σημασίας για την παραπάνω έρευνα θα είναι ο καθορισμός του είδους του πορώδους, πορώδες ρωγμάτωσης ή διάλυσης, κατά θέσεις ή κατά περιοχές.
- 2.** Αναγκαίο είναι ακόμη να διερευνηθούν εις βάθος τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά (υδραυλική αγωγιμότητα, μεταβιβαστικότητα, αποθηκευτικότητα) των δύο υδροφόρων στρωμάτων. Κάτι τέτοιο μπορεί να επιτευχθεί με την εφαρμογή δοκιμαστικών αντλήσεων σε κομβικά σημεία του αλλουβιακού και καρστικού υδροφορέα.
- 3.** Η εφαρμογή γεωφυσικών διασκοπήσεων στην πεδιάδα του Μαραθώνα θα δώσει απαντήσεις για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εκάστοτε στρώματος, το μέγεθος της εισχώρησης του θαλάσσιου μετώπου στον υπόγειο κοκκώδη υδροφορέα, την ύπαρξη ρηγμάτων που καθορίζουν τη διεύθυνση ροής του υπόγειου νερού καθώς και των υδρογεωλογικών/υδραυλικών ορίων της λεκάνης του καρστικού συστήματος.
- 4.** Η μελέτη των υδραυλικών συνθηκών του κωπηλατοδρομίου και η αλληλεπίδραση του με τον κοκκώδη υδροφόρο είναι ιδιαίτερα σημαντική για τον υπολογισμό της τροφοδοσίας του υδροφορέα μέσω διηθήσεων από τις διαφυγές του κωπηλατοδρομίου. Ακόμη, σημαντική παράμετρος είναι η εξακρίβωση της

ποσότητας νερού που εισρέει στους στίβους των εγκαταστάσεων από το κανάλι της Μακαρίας πηγής. Μία τέτοια μελέτη θα μπορεί να απαντήσει στο πόσο η Μακαρία πηγή συμμετέχει στην τροφοδοσία του υδροφορέα μέσω του καναλιού αποστράγγισης. Όσον αφορά στο έλος, η έρευνα των υδρογεωλογικών διεργασιών που συμβαίνουν μέσα σε αυτό, απαντάει σε ερωτήματα για την αλληλεπίδραση του με το υπόλοιπο υδροφόρο κοκκώδες στρώμα της περιοχής αλλά και για την τροφοδοσία που δέχεται από τις πηγές της Δρακονέρας και από τους αγωγούς υπερχείλισης του κωπηλατοδρομίου. Κατά αυτό τον τρόπο θα επιτευχθεί η παρακολούθηση και συντήρηση του, προστατεύοντας έτσι το Εθνικό πάρκο Σχινιά και την πλούσια πανίδα της περιοχής.

9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

9.1 ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αλεξίου Δ. (2013). Η εξέλιξη της λεκάνης του Μαραθώνα: Φυσικοί και ανθρωπογενείς παράγοντες. Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
- Βουδούρης Κ., 2009. Υδρογεωλογία Περιβάλλοντος, Υπόγεια νερά και Περιβάλλον, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη
- Ελληνική επιτροπή μεγάλων φραγμάτων (2013). Τα φράγματα της Ελλάδας
- Καλλέργης, Γ. (2000). Εφαρμοσμένη Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία. Τόμος Β'. Εκδόσεις ΤΕΕ, Αθήνα
- 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.
- Κατσικάτσος Γ. (1977) Γεωλογικός χάρτης Ραφήνας ΙΓΜΕ
- Κατσικάτσος Γ. (1994 –1997) Γεωλογικός χάρτης Κηφισιάς, ΙΓΜΕ
- Κατσικάτσος Γ., Primolivosilva L, Kollmann H., Zapfe, H., Sauvage I., Bruijn,de,H., Meulen,der,V., Brother P. (1990): Γεωλογικός Χάρτης της Ελλάδας σε κλίμακα 1:50.000. Φύλλο "Αλιβέρι". Εκδ. ΙΓΜΕ, Αθήνα.
- Κατσικάτσος Γ.,Kollmann H., Zapfe H., Brother P. (1990): Γεωλογικό χάρτης της Ελλάδας σε κλίμακα 1:50.000. Φύλλο "Ραφήνα". Εκδ. ΙΓΜΕ, Αθήνα.
- Κουμαντάκης Ι., Γεωργαλάς Λ., Μορφόπουλος ζ. (1993). Ποιοτική υποβάθμιση υπόγειων νερών πεδιάδας Μαραθώνα και τάσεις διαφοροποίησής της. 2ο Υδρογεωλογικό συνέδριο, Πάτρα.
- Λόζιος, Σ. (1993). Τεκτονική ανάλυση των μεταμορφωμένων σχηματισμών της Νοτιοανατολικής Αττικής. Διδακτορική Διατριβή. Πανεπιστήμιο Αθηνών.
- Μαργώνη, Σ., Περιβαλλοντική εξέλιξη – συγκρότηση της περιοχής Σχοινιά της πεδιάδας του Μαραθώνα κατά το Ολόκαινο και ανθρωπογενείς επεμβάσεις για τη διαχείριση αυτής (2002). Διατριβή Ειδίκευσης, Τμήμα Γεωλογίας , Α.Π.Θ. Θεσσαλονίκη,
- Μελισσάρης Π., Σταυρόπουλος Ξ. (1999), Υδρογεωλογική Μελέτη Κάμπου Μαραθώνα Ν.Αττικής, Υπουργείο Γεωργίας, Γεν. Δ/ση Εγγ/κων Έργων & Γ.Δ., Αθήνα.
- Μητρόπαπας Α. (2010), Προσομοίωση παράκτιου υπόγειου υδροφορέα Ιρίων Ν. Αργολίδας. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών Ε.Μ.Π.
- Ντρίνια Χ.(2012). Σημειώσεις Ιζηματολογίας. Σημειώσεις Μαθήματος, Τμήμα Γεωλογίας και Περιβάλλοντος, Ε.Κ.Π.Α.
- Καραγιάννης Ν.(2003). Μαθηματική προσομοίωση υπόγειου υδροφορέα περιοχής Σχινιά Μαραθώνα, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Δ.Π.Μ.Σ. Επιστήμης και Τεχνολογίας Υδατικών Πόρων, Ε.Μ.Π. Αθήνα
- Παπαγεωργίου Γ., (2002). Σύντομες σημειώσεις στην Αριθμητική Ανάλυση Διαφορικών εξισώσεων. Σημειώσεις Μαθήματος «Αριθμητική Ανάλυση II», Τμήμα Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών Ε.Μ.Π.

- Παπαδέας Γ. (1987). Γεωλογική - Τεκτονική εξέλιξη στην Αττική και η βαρίσκιος μεταλλοφορία μικτών θειούχων και άλλων ορυκτών στην Ελλάδα. Πρακτ.Ακαδ.Αθηνών.
- Παπαδέας Γ. (1991). Νεότερα πορίσματα στη γεωλογική – τεκτονική εξέλιξη των μεταμορφωμένων πετρωμάτων της Αττικής και στη βαρίσκια μεταλλοφορία, Πρακτ. Ακαδ. Αθηνών, τομ. 66, Αθήνα
- Παπαζώτος Π. (2015), Υδρογεωλογικό καθεστώς στη λεκάνη του Μαραθώνα με έμφαση στη πεδινή ζώνη. Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π.
- Παπανικολάου Δ., Σίδερης Χ. (2005). Γεωλογία: η επιστήμη της Γης. Εκδόσεις Πατάκη, Αθήνα.
- Παυλόπουλος Κ., Καρύμπαλης Ε. & Μαρουκιάν Χ.(2002), Γεωμορφολογική εξέλιξη της λεκάνης απορροής του Οινόη ποταμού (Β. Αττική) κατά το Τεταρτογενές. Πρακτικά του 6ου Πανελληνίου Γεωγραφικού Συνεδρίου της Ελληνικής Γεωγραφικής Εταιρείας, Ι: 287-295, Θεσσαλονίκη
- Πλιάκας Φ. (1998). Έρευνα επί των κατάλληλων μεθόδων τεχνητού εμπλουτισμού σε ετερογενείς υδροφορείς αλλουβιακών σχηματισμών. Εφαρμογές σε υδροφορείς του πεδινού τμήματος Ξάνθης, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη
- Σιέμος Ν. (2010). Αξιολόγηση Υδατικών Πόρων Αττικής και νησων Αργοσαρωνικού. Στρατηγικά αποθέματα (υ.δ. 06, τμ. 03). Γ' ΚΠΣ Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Ανταγωνιστικότητα. Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών ερευνών, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος Διεύθυνση Υδρογεωλογίας, Αθήνα, 2010, σελ. 148
- Σκούντζος Φ. (1992), Υδρογεωλογική Μελέτη περιοχής Μαραθώνα Αττικής. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών Ε.Μ.Π.
- Σωτηριάδης Γ., 1932. Ανασκαφή Μαραθώνος. Πρακτικά Αρχαιολογικής Εταιρείας, Αθήνα, 28-43
- Φωτόπουλος Φ. (2004), Υδρογεωλογικό καθεστώς πεδιάδας Μαραθώνα και επιδράσεις από τα ολυμπιακά έργα. Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Χατζημπίρος Κ. (2005), Παράκτιο Πάρκο Σχινιά Μαραθώνα. Πρακτικά 3ου Πανελληνίου Συνεδρίου «Διαχείριση και Βελτίωση Παράκτιων Ζωνών», Ε.Μ.Π., Αθήνα, σ. 503-516

9.2 ΔΙΕΘΝΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Appelo C., Postma D. (2005). Geochemistry, groundwater and pollution.2nd edition A.A Balkema Publishers, Great Britain
- 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
- Boetechtel, J. and Papadeas, G (1968). Tectonic aerial interpretation in the Mediterranean Region exemplified by the metamorphic series at Eastern Greece, near Marathon.
- Bouderbala A. (2014). Groundwater Salinization In Semi-Arid Zones: An Example From Nador Plain (Tipaza, Algeria)". Environ Earth Sci 73.9: 5479-5496. Web.

- Clement B., Katsikatsos G. (1982): Etudes géologique d'un secteur des zones internes des Hellénique: L'Attique septentrionale (Grèce continentale). Annales de la Société géologique du Nord, v. 51.
- Department of the Army U.S. Army Corps of Engineers (1995), Engineering and Design, Coastal Geology, Washington, DC 20314-100
- Errol L. Montgomery & Associates, inc. (2011). Condiciones Hidrogeológicas, Isle De Pascua, Chile. Santiago
- Essink Gualbert H. P. Oude (2001). Density Dependent Groundwater Flow, Academic Publishing of Utrecht University, f. 12.50.
- Fetter C.W., Applied Hydrogeology, 4th Edition
- Food and Agricultural Organization of the United Nations (1997). Seawater Intrusion in Coastal Aquifers-Guidelines for Study, Monitoring and Control. FAO, Italy
- Krešić N., Mikszewski A.(2013) Hydrogeological Conceptual Site Models. Boca Raton, FL: CRC Press
- Rey, J., Martinez J., Barbera G., Garcia-Arostequi J., Martinez-Vicente D. (2013), Geophysical Characterization Of The Complex Dynamics Of Groundwater And Seawater Exchange In A Highly Stressed Aquifer System Linked To A Coastal Lagoon (SE Spain)". Environ Earth Sci 70.5 : 2271-2282
- Strack O. D. L. (1989). Groundwater Mechanics, Prentice Hall, New Jersey, USA, p. 732
- Todd D., Mays L. (2005). Groundwater Hydrology. 3rd Edition. Wiley, USA
- 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
- Yousif M., Olaf B.(2012). An Integrated Approach For Groundwater Assessment At The Northwestern Coast Of Egypt (Ras El Hekma Area): Case Study. Environ Earth Sci 69.7: 2227-2246

9.3 ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΟΙ ΤΟΠΟΙ

- <http://www.site.marathon.gr/>
- <http://www.kallikratis.eu/>
- <http://www.npschiniasmarathon.gr/>