



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ – ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»**

**ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΚΑΘΕΣΤΩΣ ΣΤΗ ΛΕΚΑΝΗ ΤΟΥ
ΜΑΡΑΘΩΝΑ ΜΕ ΕΜΦΑΣΗ ΣΤΗΝ ΠΕΔΙΝΗ ΖΩΝΗ**

Παναγιώτης Γ. Παπαζώτος

**«ΕΠΙΣΤΗΜΗ &
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ
ΠΟΡΩΝ»**

Αθήνα, Φεβρουάριος 2015

Επιβλέπων: Ι. Κουμαντάκης, Ομότιμος Καθηγητής ΕΜΠ

Ευχαριστίες

Με την περάτωση της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας και ταυτόχρονα ενός πολύ σημαντικού κύκλου στην εκπαίδευση μου, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που στάθηκαν αρωγοί στην προσπάθειά μου και χωρίς την πολύτιμη βοήθειά τους, θα ήταν ανέφικτη η ολοκλήρωσή της.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Ιωάννη Κουμαντάκη, Ομότιμο Καθηγητή ΕΜΠ και επιβλέποντα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου αναθέτοντάς μου αυτό το εξαιρετικά ενδιαφέρον θέμα, τις συμβουλές και την καθοδήγηση που μου έδωσε για την ολοκλήρωσή της.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Ανδρέα Καλλιώρα, Λέκτορα ΕΜΠ για το αμέριστο ενδιαφέρον, τις συμβουλές και τις παρατηρήσεις του καθ' όλη τη διάρκεια αυτής καθώς και για την βοήθειά του στην ύπαιθρο που χωρίς την καθοδήγησή του η ολοκλήρωση της θα ήταν ανέφικτη και με βοήθησε να μάθω πολλά και καινούργια πράγματα.

Επιπλέον, ο Δρ. Κωνσταντίνος Μαρκαντώνης ΕΕΔΙΠ της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών για τη βοήθεια του στην ύπαιθρο και για την προθυμία του να με βοηθήσει στις δυσκολίες που αντιμετώπισα.

Σημαντική ήταν η συμβολή της Δρ. Ελένης Βασιλείου ΕΕΔΙΠ της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών για τις συμβουλές, τις επισημανσεις και τις κατευθυντήριες οδούς.

Καθοριστική ήταν η βοήθεια του Δρ. Πάρη Τσαγκαράτου ΕΕΔΙΠ της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών για τις υποδείξεις και τη βοήθεια σε κάθε πρόβλημα που είχα και τον Δρ. Βασίλειο Πρωτονοτάριο για τη διεξαγωγή των χημικών αναλύσεων.

Θα ήθελα ακόμη να αναφερθώ και στους ανθρώπους που μου στάθηκαν σε κάθε δυσκολία, ήταν δίπλα μου βοηθώντας με ψυχικά και ουσιαστικά. Αρχικά, τη σύντροφό μου και συνάδελφο γεωλόγο Ηλιάνα Πολυχρόνη για τη βοήθειά της στην ύπαιθρο, τη συγγραφή της παρούσας εργασίας αλλά και όλη την ψυχολογική υποστήριξη. Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καλούς μου φίλους Θαλή-Κωνσταντίνο Δουκάκη και Γιώργο Αναγνωστόπουλο για την συμπαράσταση τους και τις γνώσεις του, οι οποίες υπήρξαν υπερπολύτιμες.

Τέλος, ένα ευχαριστώ, στους γονείς μου, για όλα όσα μου προσέφεραν, στους οποίους οφείλω ο,τι είμαι σήμερα και θα ήθελα πολύ -αν βρίσκονταν μαζί μου- να είναι περήφανοι για μένα.

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ Γ. ΠΑΠΑΖΩΤΟΣ

ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2015

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	i
Περιεχόμενα.....	ii
Κατάλογος πινάκων	v
Κατάλογος σχημάτων	vii
Περίληψη	xi
Abstract	xiii
1. Εισαγωγή	1-1
1.1 Το νερό στη φύση	1-1
1.2 Τα υπόγεια νερά	1-2
1.3 Υδρογεωλογία παράκτιων περιοχών.....	1-7
1.4 Θαλάσσια διείσδυση	1-8
1.5 Θαλάσσια διείσδυση στη Μεσόγειο και την Ελλάδα.....	1-13
1.6 Αντιμετώπιση της θαλάσσιας διείσδυσης	1-18
1.7 Εισαγωγή στην περιοχή έρευνας	1-20
2. Γεωλογία	2-1
2.1 Γενικά στοιχεία	2-1
2.2 Γεωλογία της περιοχής μελέτης.....	2-4
2.3 Γεωλογία περιοχής όρμου Μαραθώνα	2-8
2.4 Τεκτονική και νεοτεκτονική	2-11
3. Στοιχεία Επιφανειακής Υδρολογίας	3-1
3.1 Φράγματα	3-1
3.1.1 Το φράγμα του Μαραθώνα.....	3-3
3.1.2 Το φράγμα Ραπεντώσας	3-7
3.2 Κλίμα	3-9
3.2.1 Θερμοκρασία.....	3-10
3.2.2 Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα.....	3-11
3.2.3 Σχετική υγρασία	3-14
3.2.4 Σχέση υψομέτρου - θερμοκρασίας	3-15

3.2.5 Σχέση υψομέτρου - ύψους βροχής.....	3-15
4. Υδρογεωλογία - Υδροχημεία	4-1
4.1 Υδρολιθολογική κατάταξη γεωλογικών σχηματισμών	4-3
4.2 Υπόγεια υδροφορία.....	4-4
4.3 Πιεζομετρία	4.4
4.4 Υδροχημεία.....	4.9
4.4.1 Γενικά.....	4-9
4.4.2 Δειγματοληψία.....	4-12
4.4.3 Επιτόπιες μετρήσεις και εργαστηριακές αναλύσεις	4-12
4.4.4 Επεξεργασία δεδομένων	4.13
4.4.5 Φυσικοχημικές παράμετροι	4-15
4.4.5.1 Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα (E.C.) και τα συνολικά διαλυμέ- να στερεά (TDS)	4-15
4.4.5.2 Θερμοκρασία (T°C).....	4-17
4.4.5.3 pH	4-18
4.4.5.4 Σκληρότητα.....	4-20
4.4.6 Χημική σύσταση του υπόγειου νερού	4-22
4.4.6.1 Ιόντα Ασβεστίου (Ca ⁺²)	4-22
4.4.6.2 Ιόντα Μαγνησίου (Mg ⁺²).....	4-24
4.4.6.3 Ιόντα Καλίου (K ⁺)	4-25
4.4.6.4 Ιόντα Νατρίου (Na ⁺)	4-27
4.4.6.5 Όξινα ανθρακικά ιόντα (HCO ₃ ⁻).....	4-28
4.4.6.6 Ιόντα Χλωρίου (Cl ⁻)	4-29
4.4.6.7 Θειικά ιόντα (SO ₄ ⁻²).....	4-31
4.4.6.8 Νιτρικά (NO ₃ ⁻) και Νιτρώδη (NO ₂ ⁻) ιόντα.....	4-32
4.5 Ιοντικοί λόγοι.....	4-34
4.5.1 Ιοντικός λόγος Mg/Ca	4-38
4.5.2 Ιοντικός λόγος Na/Cl	4-39
4.5.3 Ιοντικός λόγος Na/K	4-40
4.5.4 Ιοντικός λόγος (Ca+Mg)/(Na+K)	4-41
4.5.5 Ιοντικός λόγος Cl/SO ₄	4-42
4.5.6 Ιοντικός λόγος Cl/HCO ₃	4-43
4.5.7 Ιοντικός λόγος BEX	4-44
4.6 Επεξεργασία αποτελεσμάτων χημικών αναλύσεων.....	4-46
4.6.1 Υδροχημικός τύπος νερών	4-46
4.6.2 Ταξινόμηση κατά Piper	4-47

4.6.3 Ταξινόμηση κατά Durov.....	4-49
4.6.4 Ταξινόμηση κατά Ludwig-Langellier	4-50
4.6.5 Ταξινόμηση κατά Schoeller	4-51
4.6.6 Ταξινομήσεις αρδευτικού νερού.....	4-52
4.6.6.1 Διάγραμμα Wilcox	4-52
4.6.6.2 Διάγραμμα Richards	4-54
4.6.7 Συντελεστής Revelle.....	4-57
4.7 Συντελεστές συσχέτισης.....	4-59
5. Συμπεράσματα.....	5-1
6. Βιβλιογραφία	6-1

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.1: Θερμοκρασιακά στοιχεία του μετεωρολογικού σταθμού Μαραθώνα 1986 - 1997.....	3-11
Πίνακας 3.2: Στοιχεία ατμοσφαιρικών κρημνισμάτων του μετεωρολογικού σταθμού Μαραθώνα από το 1932 - 2003.	3-12
Πίνακας 3.3: Στοιχεία σχετικής υγρασίας μετεωρολογικού σταθμού Μαραθώνα για τη χρονική περίοδο 1986 - 1997.	3-14
Πίνακας 4.1:Μερικές αντιπροσωπευτικές τιμές πορώδους και υδραυλικής αγωγιμότητας διαφορων γεωλογικών υλικών (Bowen, με τροποποίηση).	4-2
Πίνακας 4.2: Στοιχεία σταθμημετρήσεων στην πεδινή περιοχή Μαραθώνα.....	4-5
Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα χημικών αναλύσεων στην πεδινή περιοχή Μαραθώνα.....	4-10
Πίνακας 4.4:Περιγραφικά στατιστικά.	4-11
Πίνακας 4.5: Ταξινόμηση των νερών με βάση τη σκληρότητα.	4-21
Πίνακας 4.6: Ιοντικοί λόγοι (meq/l) υπολογισμένοι στις θέσεις των δειγμάτων.	4-36
Πίνακας 4.7: Περιγραφικά στατιστικά των ιοντικών λόγων.	4-37
Πίνακας 4.8: Υδροχημικός τύπος υπόγειων νερών.	4-46
Πίνακας 4.9: Τιμές βαθμού αλκαλίωσης και EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$) για προβολή τους στο διάγραμμα Wilcox. Οι συγκεντρώσεις Na, Mg, K και Ca είναι εκφρασμένες σε meq/l.	4-53
Πίνακας 4.10: Κατηγορίες νερών του διαγράμματος Wilcox βάσει των τιμών της Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας και του Συντελεστή Προσρόφησης Νατρίου.....	4-55
Πίνακας 4.11: Τα δείγματα με τις τιμές EC και SAR.	4-55
Πίνακας 4.12: Προτεινόμενα όρια του συντελεστή Revelle και ο αντίστοιχος χαρακτηρισμός του νερού της ρύπανσης από τη θαλάσσια διείσδυση.	4-57
Πίνακας 4.13: Η τιμή του συντελεστή Revelle για τα δείγματα της περιοχής μελέτης.	4-58

Πίνακας 4.14: Συντελεστές συσχέτισης των φυσικοχημικών παραμέτρων και στοιχείων των υπόγειων νερών στην πεδινή περιοχή Μαραθώνα.....	4-60
--	------

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Ο υδρολογικός κύκλος (πηγή: http://water.usgs.gov/).	1-3
Σχήμα 1.2: Η κατανομή του νερού στη Γη (πηγή: http://www.env-edu.gr/).	1-3
Σχήμα 1.3: Τα απειλούμενα υπόγεια υδροφόρα συστήματα της Ελλάδας (πηγή: http://static.pblogs.gr/).	1-6
Σχήμα 1.4: Υδροστατική ισορροπία μεταξύ θαλασσινού και γλυκού νερού, αναπαριστώμενη με σωλήνα σχήματος U (Todd, 1980).	1-9
Σχήμα 1.5: Μοντέλο της θεωρίας Ghyben - Herzberg για τη διεπιφάνεια γλυκού - αλμυρού νερού σε παράκτιο ελεύθερο υδροφόρο ορίζοντα (πηγή: http://www.solinst.com/).	1-10
Σχήμα 1.6: (α) Θέση της διεπιφάνειας κατά Ghyben - Herzberg (1) και κατά Hubbert (2). (β) υπολογισμός της γωνίας κλίσης της διεπιφάνειας κατά Hubbert.	1-12
Σχήμα 1.7: Υπερεκμετάλλευση παράκτιου υδροφόρου (πηγή: http://www.lenntech.com/).	1-14
Σχήμα 1.8: Θαλάσσια διείσδυση και υπερεκμετάλλευση υδροφόρων στην Ευρώπη (πηγή: http://www.eea.europa.eu/).	1-15
Σχήμα 1.9: Περιοχές με επικινδυνότητα θαλάσσιας διείσδυσης λόγω υπεράντλησης. (Πηγή: http://www.bankofgreece.gr/)	1-16
Σχήμα 1.10: Περιοχές υφάλμυρων υπόγειων νερών λόγω θαλάσσιας διείσδυσης (πηγή: Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης: Περγαλιώτης Π. – Παπαδάκου Στ).	1-17
Σχήμα 1.11: Μέθοδοι αντιμετώπισης της θαλάσσιας διείσδυσης σε υπό πίεση υδροφόρους με : (Α) ελεγχόμενες αντλήσεις, (Β) επιφανειακό τεχνητό εμπλουτισμό, (Γ) υπόγειο φυσικό φραγμό, (Δ) κοίλωμα άντλησης (rumping-trough), (Ε) συνδυασμό ελεγχόμενων αντλήσεων και γεωτρήσεων εμπλουτισμού (ASCE, 1987).	1-19
Σχήμα 1.12: Χάρτης της Ελλάδας όπου φαίνεται η θέση της περιοχής μελέτης (πηγή: google earth).	1-20
Σχήμα 1.13: Η θέση του Μαραθώνα στην Αττική (πηγή: google earth).....	1-21
Σχήμα 2.1: Στρωματογραφική στήλη βορειοανατολικής Αττικής (Περιοχή βορειοδυτικού τμήματος του γεωλογικού φύλλου «Ραφήνα», κλίμακας 1:50 000. Κατά Γ. Κατσικάτσο).	2-2
Σχήμα 2.2: Γεωλογικός χάρτης της περιοχής μελέτης με χαρακτηριστικές γεωλογικές τομές αυτού.	2-3

Σχήμα 2.3: Χάρτης ευρύτερης περιοχής Πεδιάδας Μαραθώνα (Μελισσάρης, Σταυρόπουλος, 1999).....	2-5
Σχήμα 2.4: Γεωλογικός χάρτης της περιοχής του Μαραθώνα (τροποποιημένος από Λόζιο, 1993; τα τεκτονικά στοιχεία από Botachtel and Paradeas, 1968; Καρκάνας και συνεργάτες, 2000).....	2-6
Σχήμα 2.5: Περιοχή που βρίσκεται ο όρμος Μαραθώνα (πηγή: google earth).....	2-8
Σχήμα 2.6:Γεωλογικός χάρτης περιοχής Μαραθώνα (Paranikolaou D. and Paranikolaou I., 2007).....	2-11
Σχήμα 3.1: Τομή του φράγματος του Μαραθώνα όπου φαίνονται 1) το φράγμα, 2) οι τσιμεντενέσεις, 3) Ο εκκενωτής πυθμένα και 4) το αντίγραφο του «Θησαυρού των Αθηναίων» (Ελληνική επιτροπή μεγάλων φραγμάτων, 2013).....	3-4
Σχήμα 3.2: Οριζοντιογραφία του φράγματος Μαραθώνα όπου φαίνονται 1) το φράγμα, 2) ο υπερχειλιστής του φράγματος, 3) ο Εκκενωτής πυθμένα, 4) η στοά αποστράγγισης και 5) το αντίγραφο του «Θησαυρού των Αθηναίων» (Ελληνική επιτροπή μεγάλων φραγμάτων, 2013).....	3-5
Σχήμα 3.3: Φράγμα Μαραθώνα (Φωτογραφικό υλικό ΕΥΔΑΠ).....	3-6
Σχήμα 3.4: Φράγμα Ραπεντώσας και τεχνητή λίμνη φράγματος. (Τα φράγματα της Ελλάδας, 2013).....	3-8
Σχήμα 3.5: Θερμοκρασία ανά μήνα στο Μαραθώνα (°C).....	3-11
Σχήμα 3.6: Υετός ανά μήνα στο Μαραθώνα (mm).....	3-13
Σχήμα 3.7: Ποσοστιαία αναλογία του ετήσιου υετού ανά εποχή.....	3-13
Σχήμα 3.8: Θερμοϋετόγραμμα για την περιοχή Μαραθώνα.....	3-14
Σχήμα 3.9: Κατανομή της σχετικής υγρασίας ανά μήνα.....	3-15
Σχήμα 4.1: Χάρτης σημείων πιεζομετρίας στην περιοχή μελέτης..	4-5
Σχήμα 4.2:Πιεζομετρικός χάρτης περιόδου Οκτωβρίου 2014.....	4-6
Σχήμα 4.3: Χάρτης πιεζομετρικών καμπυλών περιόδου χαμηλής στάθμης. Οκτώβριος 1998. (Μελισσάρης-Σταυρόπουλος, 1999).....	4-7
Σχήμα 4.4: Χάρτης πιεζομετρικών καμπυλών για την περίοδο χαμηλής στάθμης. Οκτώβριος 2003. (Φωτόπουλος, 2004).....	4-8
Σχήμα 4.5: Χάρτης θέσεων συλλογής δειγμάτων για χημικές αναλύσεις.....	4-12
Σχήμα 4.6: Α) Η γεωτρήση Α1 και Β) η εγκαταλελειμμένη γεώτρηση Ε2.....	4-13
Σχήμα 4.7: Διάγραμμα συσχέτισης TDS (mg/l) και ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας EC (μS/cm) τωβ υπόγειων νερών Μαραθώνα.....	4-16

Σχήμα 4.8: Χωρική κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας ($\mu\text{S}/\text{cm}$) στην πεδινή περιοχή του Μαραθώνα.....	4-17
Σχήμα 4.9: Κατανομή της θερμοκρασίας ($^{\circ}\text{C}$) στην πεδινή περιοχή του Μαραθώνα.	4-18
Σχήμα 4.10: Κατανομή του pH στην πεδινή περιοχή του Μαραθώνα.	4-19
Σχήμα 4.11: Συσχέτιση τιμών pH και ηλεκτρικής αγωγιμότητας E.C ($\mu\text{S}/\text{cm}$).....	4-20
Σχήμα 4.12: Χωρική κατανομή της ολικής σκληρότητας (T.H) στην πεδινή περιοχή Μαραθώνα.....	4-22
Σχήμα 4.13: Κατανομή των ιόντων Ca^{+2} στην πεδινή περιοχή του Μαραθώνα.....	4-23
Σχήμα 4.14:Κατανομή των ιόντων Mg^{+2} στην πεδινή ζώνη Μαραθώνα.....	4-25
Σχήμα 4.15: Κατανομή ανιόντων K^{+} στην πεδινή περιοχή Μαραθώνα.	4-26
Σχήμα 4.16: Συσχέτιση τιμών Cl^{-} (mg/l) και K^{+} (mg/l).	4-26
Σχήμα 4.17: Χωρική κατανομή Na^{+} στην πεδινή περιοχή του Μαραθώνα.....	4-28
Σχήμα 4.18: Χωρική κατανομή των ιόντων HCO_3^{-} στην πεδινή περιοχή του Μαραθώνα.	4-29
Σχήμα 4.19: Κατανομή των ανιόντων Cl^{-} στην πεδινή περιοχή Μαραθώνα.....	4-31
Σχήμα 4.20: Κατανομή θειικών ιόντων στην πεδινή περιοχή Μαραθώνα.....	4-32
Σχήμα 4.21: Κατανομή νιτρικών ιόντων (NO_3^{-}) στην πεδινή περιοχή του Μαραθώνα.	4-33
Σχήμα 4.22: Χωρική κατανομή των νιτρώδων ιόντων (NO_2^{-}) στην πεδινή περιοχή Μαραθώνα.....	4-34
Σχήμα 4.23: Κατανομή του λόγου Mg/Ca στην πεδινή περιοχή Μαραθώνα.....	4-38
Σχήμα 4.24: Κατανομή του ιοντικού λόγου Na/Cl στην πεδινή περιοχή Μαραθώνα.....	4-39
Σχήμα 4.25: Γραφική απεικόνιση του διαγράμματος διασποράς των τιμών ιοντικής σχέσης Na/Cl	4-40
Σχήμα 4.26: Κατανομή του ιοντικού λόγου Na/K στην πεδινή περιοχή Μαραθώνα.....	4-41
Σχήμα 4.27: Κατανομή του ιοντικού λόγου $(\text{Ca}+\text{Mg})/(\text{Na}+\text{K})$ στην πεδινή περιοχή Μαραθώνα.....	4-42

Σχήμα 4.28: Κατανομή του ιοντικού λόγου Cl/SO_4 της πεδινής περιοχής Μαραθώνα.	4-43
Σχήμα 4.29: Χάρτης χωρικής κατανομής του ιοντικού λόγου Cl/HCO_3	4-44
Σχήμα 4.30: Κατανομή του ιοντικού λόγου BEX στην πεδινή περιοχή Μαραθώνα.....	4-45
Σχήμα 4.31: Χωρική κατανομή του υδροχημικού τύπου στην πεδινή ζώνη Μαραθώνα.....	4-47
Σχήμα 4.32: Διάγραμμα Piper υπόγειων νερών πεδιάδας Μαραθώνα.	4-48
Σχήμα 4.33: Διάγραμμα Durov με προβολή των δειγμάτων της περιοχής μελέτης.	4-49
Σχήμα 4.34: Διάγραμμα Ludwig-Langelier με προβολή των δειγμάτων της περιοχής μελέτης.	4-51
Σχήμα 4.35: Διάγραμμα Schoeller για τα δείγματα της περιοχής μελέτης.	4-52
Σχήμα 4.36: Διάγραμμα Wilcox για την πεδινή περιοχή του Μαραθώνα.....	4-54
Σχήμα 4.37: Το διάγραμμα USSL (1954) για την ταξινόμηση του αρδευτικού νερού.....	4-56
Σχήμα 4.38: Χάρτης χωρικής κατανομής του συντελεστή Revelle.	4-58

Περίληψη

Η διατήρηση και προστασία των παράκτιων υδροφορέων, αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα του σύγχρονου κόσμου, γιατί είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με την οικονομία των παράκτιων περιοχών. Το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης αποτελεί μια ειδική περίπτωση αλμύρισης, και αφορά τους παράκτιους υδροφόρους. Σχεδόν το σύνολο των περιπτώσεων θαλάσσιας διείσδυσης που έχουν καταγραφεί, οφείλονται σε ανθρωπογενείς δραστηριότητες και ειδικότερα στην εντατική υπεράντληση των παράκτιων υδροφόρων. Η απόληψη του υπόγειου νερού σε μεγάλες ποσότητες επιφέρει ποσοτική υποβάθμιση στο υδάτινο δυναμικό του παράκτιου υδροφόρου, και εφόσον λάβει χώρα διείσδυση αλμυρού νερού, η υποβάθμιση λαμβάνει επίσης ποιοτικό χαρακτήρα.

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εξετάζει το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης, στην παράκτια πεδινή περιοχή του Μαραθώνα. Η περιοχή μελέτης παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον διότι αποτελεί παράδειγμα έντονων ανθρωπογενών επεμβάσεων, βρίσκεται στην βορειοανατολική Αττική και οριοθετείται στα βόρεια 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 τη χερσόνησο της Κυνοσούρας.

Αρχικά, προσεγγίζονται -στα πλαίσια της βιβλιογραφίας- ο συσχετισμός υπόγειων νερών και υδρολογικού κύκλου, η υδρογεωλογία και υδραυλική των παράκτιων περιοχών, το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης με χαρακτηριστικά παραδείγματα από περιοχές της Ελλάδας και της Μεσογείου και τρόποι αντιμετώπισης του φαινομένου.

Στη συνέχεια γίνεται εκτενής ανάλυση στη γεωλογία της περιοχής, καθώς είναι πολύ σημαντική για τον προσδιορισμό των επικρατούμενων υδρογεωλογικών συνθηκών. Λιθολογικά, η περιοχή αποτελείται από μάρμαρα, σχιστόλιθους, τεταρτογενείς και νεογενείς αποθέσεις. Τα μάρμαρα καλύπτουν σχεδόν όλη την λοφώδη και ορεινή περιοχή και οι τεταρτογενείς αποθέσεις καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος του αναπτύγματος της πεδιάδας του Μαραθώνα. Οι υδροφορείς που συναντώνται στην περιοχή έρευνας είναι οι καρστικοί και ο προσχωματικός.

Κατά τον μήνα Οκτώβριο του έτους 2014, έγιναν οι εργασίες υπαίθρου για την συλλογή δεδομένων με σκοπό την ανάλυση και επεξεργασία τους στα πλαίσια της παρούσας διατριβής. Συλλέχθηκαν 25 δείγματα υπόγειων νερών, από γεωτρήσεις και πηγάδια της πεδινής περιοχής Μαραθώνα. Σημαντική ήταν η καταγραφή συντεταγμένων με τη χρήση φορητού GPS χειρός και οι επί-τόπου μετρήσεις βασικών φυσικοχημικών παραμέτρων όπως η ειδική αγωγιμότητα (E.C), το pH και θερμοκρασία T. Επιπροσθέτως, με τη χρήση σταθμημέτρου, μετρήθηκε η στάθμη των υπόγειων νερών με σκοπό τον προσδιορισμό της πιεζομετρίας κατά την ίδια περίοδο.

Από την ανάλυση και ερμηνεία των ποσοτικών και ποιοτικών χαρακτηριστικών των υπόγειων υδάτων του Μαραθώνα γίνεται σαφές πως η περιοχή βρίσκεται υπό καθεστώς θαλάσσιας διείσδυσης. Αυτό επιβεβαιώνεται από την ανάλυση και τους χάρτες χωρικής

κατανομής - πού προέκυψαν μέσω του λογισμικού surfer 11 - των ιόντων που μελετήθηκαν, τους υπολογισθέντες ιοντικούς λόγους και τα υδροχημικά διαγράμματα Durog, Piper, Ludwig - Langellier. Επίσης προσδιορίστηκε και μια ομάδα δειγμάτων που ερμηνεύεται ως πλευρική τροφοδοσία υπόγειου ύδατος από τους καρστικούς υδροφόρους προς τον προσχωματικό με τα δείγματα του νερού να είναι εμφανώς λιγότερο επηρεασμένα από τη υφαλμύριση.

Η μεταπτυχιακή εργασία ολοκληρώνεται με την παράθεση των συμπερασμάτων που προέκυψαν στα πλαίσια αυτής, καθώς και με την βιβλιογραφία που ακολουθήθηκε για την ολοκλήρωσή της.

Abstract

The preservation and protection of coastal aquifers is one of the major challenges of the modern world, because it is inextricably linked to the economy of the coastal areas. The phenomenon of seawater intrusion constitutes a special case of salinization which affects the coastal aquifers. Almost all cases of seawater intrusion recorded were caused by human activities and especially by the intense overpumping of coastal aquifers. The abstraction of groundwater in large quantities results in a quantitative degradation of the water reservoirs, the depletion of the coastal aquifer, and if seawater intrusion takes place, there is a decline in water quality as well.

This postgraduate thesis examines the phenomenon of seawater intrusion into the coastal plain of Marathon. The examined area is of great interest because it is an example of intense human intervention, it is located in the northeastern part of the province of Attica and is bordered to the north by the mountainous regions of Kotroni, Strati and Terokorfi, to the west by Mount Penteli, to the east by the mountainous regions of Drakonera and Mytikas, and to the southeast by the Kynosoura peninsula.

In the beginning, a general approach on the connection between underground waters and the hydrologic cycle, the hydrogeology and hydraulics of coastal areas, the phenomenon of seawater intrusion with examples from areas of Greece and the Mediterranean and ways to prevent it, was made.

Afterwards, a thorough analysis of the geology of the area is done, very important for determining the prevailing weather conditions. Lithologically, the area is comprised of marble, schist, quarternary and neogene deposits. Marble covers almost all of the hilly and mountainous area and the quarternary deposits cover the biggest part of the plain of Marathon. The aquifers found in the examined area are the karstic and the alluvial.

During October 2014, geological and hydrogeological fieldwork was carried out for the collection of the data which was then processed and analyzed. 25 ground-water samples were collected from boreholes and wells located in the plain of Marathon. Particularly important was the recording of geographical coordinates using a handheld GPS and the in-situ measurements of basic parameters such as the Electrical Conductivity, the pH and temperature T. Furthermore, using a Water Level Meter, the groundwater level was measured in order to design the piezometric map of the study area.

From the analysis and understanding of the quality and quantity characteristics of the groundwater of Marathon it is clear that the area is subjected to seawater intrusion. This fact is confirmed from the analysis and the relative spatial distribution maps – generated using Surfer 11-, the concentration of basic water chemical constituents were measured, the calculated ionic ratios and the hydrochemical Durov, Piper and Ludwig–Langellier diagrams. A group of samples was also specified and recognized that belongs to a secondary supply of water from the karstic to the alluvial aquifer. These samples were less affected by seawater.

Lastly, the final conclusions drawn from this research are presented in the final chapter, including major findings with respect to the geological and hydrogeological framework of the study area, in connection to the aquifer's regime in terms of seawater intrusion.

1. Εισαγωγή

1.1 Το νερό στη φύση

Το νερό είναι απαραίτητο συστατικό στην ανθρώπινη διατροφή και κατέχει εξέχουσα θέση, όχι μόνο στην ανθρώπινη υγεία αλλά και στην κοινωνική, πολιτιστική, οικονομική ανάπτυξη και διατήρηση του περιβάλλοντος. Τόσο η ποσότητα, όσο και η ποιότητα του νερού παίζουν καθοριστικό ρόλο στην επιβίωση διαφόρων οργανισμών της τροφικής αλυσίδας αλλά και στις διάφορες ανθρώπινες δραστηριότητες.

Το νερό βρίσκεται σε αφθονία στον πλανήτη μας, καλύπτοντας το 75% της επιφάνειας της γης που αντιστοιχεί σε όγκο 1,3 δισεκατομμυρίων km³. Το μεγαλύτερο ποσοστό (97%) κατανέμεται στις θάλασσες και τους ωκεανούς και το υπόλοιπο 3% είναι γλυκό νερό που βρίσκεται κυρίως στους παγετώνες και τους πάγους των πόλων της Γης (Καλλέργης, 2000, Σούλιος, 2004).

Οι κατηγορίες του νερού στη φύση είναι οι εξής (Στουρνάρας, 2007):

- Το ατμοσφαιρικό ή μετεωρικό νερό, που αντιπροσωπεύεται από τη βροχή, το χιόνι και την υγρασία και μελετάται από τους επιστημονικούς κλάδους της Μετεωρολογίας και της Κλιματολογίας.
- Το επιφανειακό νερό, σε υγρή ή στερεή μορφή, τρεχούμενο (υδρογραφικό δίκτυο) ή όχι (ωκεανοί, λίμνες) και που μελετάται, κατά περίπτωση από την υδρολογία, Ωκεανογραφία, Λιμνολογία, Παγετολογία.
- Το υπόγειο νερό, που μελετάται από την Υδρογεωλογία, στην οποία εντάσσονται σε μεγάλο βαθμό, και άλλα υπόγεια ρευστά (υδρογονάνθρακες, μεταλλοφόρα διαλύματα κ.λ.π.). Αυτό υποδιαιρείται σε διάφορες κατηγορίες όπως είναι το νερό της ακόρεστης ζώνης που είναι μετεωρικής προέλευσης, αποτέλεσμα ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, κατεισδύσεως και υπόγειας ροής σε σχετικά, μικρά βάθη, το βαθύ νερό, που μπορεί να έχει - μερικώς ή ολικώς - διαφορετική προέλευση. Αυτό, με τη σειρά του υποδιαιρείται, σε απλό νερό, μετεωρικής προέλευσης, που σχηματίζει τους υδροφόρους ορίζοντες, σε σύμφυτο νερό, απολιθωμένο ή όχι, έχοντας κατεισδύσει κατά τη διαδικασία της ιζηματογένεσης και το νερό μεταμορφισμού, που εμφανίζεται με τη μορφή π.χ. των υδατωμένων πυριτικών ενώσεων. Τέλος, υπάρχει και το νεαρό νερό (juvenile), ηφαιστειακής ή μαγματικής προέλευσης, με ισοτοπική σύσταση νερού βάθους και, πρακτικώς, διακρινόμενο σε ψυχρό και θερμό (μεταλλικό).

Η γεωγραφική κατανομή του νερού στον πλανήτη δεν συμβαδίζει με την αντίστοιχη κατανομή του πληθυσμού. Οι αυξανόμενες απαιτήσεις σε νερό κι η σταδιακή υποβάθμιση της ποιότητάς του, καθιστά το νερό ολοένα και πιο πολύτιμο αγαθό, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται προβλήματα και διαπληκτισμοί, ιδιαίτερα σε χώρες που μοιράζονται διασυνοριακές λεκάνες (Χαμπίδη, 2012).

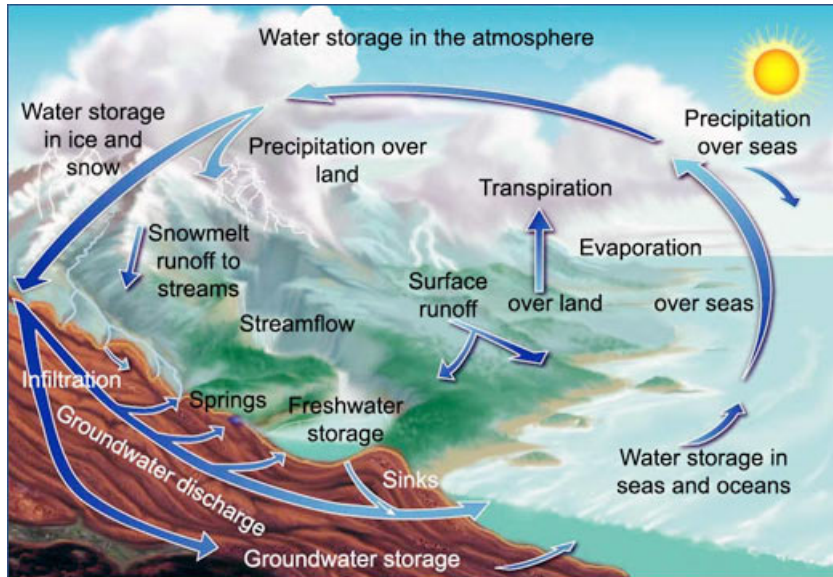
1.2 Τα υπόγεια νερά

Η λέξη περιβάλλον οδηγεί συνειρμικώς σε μόλυνση, ρύπανση, ποιοτική και ποσοτική υποβάθμιση και, γενικώς, καταστροφή του περιβάλλοντος. Αυτό είναι σωστό και αναμενόμενο ενώπιον των πολλών και σοβαρών ανθρωπογενών επιπτώσεων. Δεν πρέπει, όμως να αποπροσανατολίζει από τη βασική, αρχέγονη και θεμελιώδη σχέση ανθρώπου και φυσικού περιβάλλοντος, που υποστηρίζει ότι ο άνθρωπος, όχι για να αναπτυχθεί, αλλά απλώς για να επιβιώσει, είναι υποχρεωμένος να εκμεταλλευτεί το φυσικό περιβάλλον. Το ίδιο ακριβώς συμβαίνει και στο θέμα του νερού, βασικού στοιχείου του περιβάλλοντος, από το οποίο εξαρτώνται, αμέσως ή εμμέσως, όλα τα υπόλοιπα περιβαλλοντικά στοιχεία. Η κορυφή, απλώς, του παγόβουνου αποτελείται από το σύνολο των εκτροπών, αποξηράνσεων, υπεραντλήσεων, αποψιλώσεων και άλλων ανθρωπογενών επεμβάσεων προκειμένου το περιβάλλον να γίνει χωροταξικώς αποδεκτό.

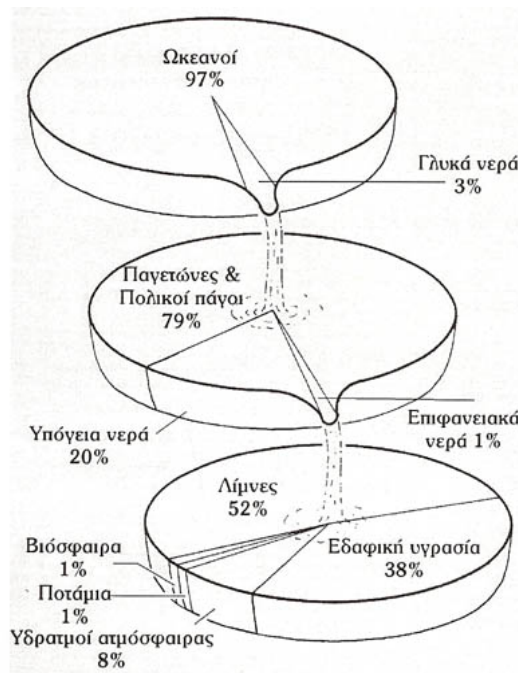
Η αέναη και γενικά σταθερή κυκλοφορία του νερού από τη θάλασσα μέσω της ατμόσφαιρας προς τη χέρσο και η επιστροφή του στην ατμόσφαιρα από τη θάλασσα και τη χέρσο ονομάζεται υδρολογικός κύκλος (hydrologic cycle) ή κύκλος του νερού (water cycle) (Σχήμα 1.1). Αυτό περιγράφει την ατέρμονη διαδικασία κατά την οποία, από την εξάτμιση των ωκεανών παράγονται υδρατμοί, που ανέρχονται στα κατώτερα 10-12 km της ατμόσφαιρας (τροπόςφαιρα), όπου ψύχονται και υγροποιούνται. Τα νέφη μετακινούνται μέσα από την ατμοσφαιρική κυκλοφορία και συμπυκνούμενα δίνουν ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, που πέφτουν είτε στους ωκεανούς είτε στη χέρσο ως βροχή, χιόνι, χαλάζι, δροσιά. Από τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα της χέρσου, ένα ποσοστό επανεξατμίζεται άμεσα από το έδαφος ή έμμεσα με τη διαπνοή των φυτών (φωτοσύνθεση) και επανέρχεται έτσι γρήγορα στην ατμόσφαιρα με τη μορφή υδρατμών. Το ποσοστό αυτό αποτελεί την εξατμισοδιαπνοή. Ένα άλλο ποσοστό απορροφάται από τους πόρους και τις κάθε είδους ασυνέχειες των γεωλογικών σχηματισμών της επιφάνειας (εδάφη, πετρώματα) και αποτελεί την κατείσδυση. Από αυτό, ένα μέρος κατακρατείται στην επιφανειακή ζώνη αερισμού (εδafική υγρασία), ενώ το υπόλοιπο κατεισδύει βαθύτερα σχηματίζοντας τα υπόγεια νερά. Το εναπομείνον ποσοστό απορρέει επιφανειακά διαμέσου των υδρογραφικών δικτύων καταλήγει στη θάλασσα. Το ποσοστό αυτό αποτελεί την επιφανειακή απορροή (Παπανικολάου και Σίδερης, 2005).

Τα υπόγεια νερά, από μια δεδομένη στιγμή και μετά (ανόρυξη φρεάτων και γεωτρήσεων), συμπλήρωσαν το θεμελιώδη ρόλο τους στην ανάπτυξη των ανθρωπίνων κοινωνιών, μετά τη χρήση του νερού των πηγαίων εκφορτίσεων. Το υπόγειο νερό είναι αυτό που βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, ανεξαρτήτως κατάστασης, βάθους και προέλευσης. Τα υπόγεια νερά αποτελούν μέρος του υδρολογικού κύκλου και αντιστοιχούν σε 0,61% του συνολικού νερού στον πλανήτη (Σχήμα 2). Η κυριότερη προέλευσή τους είναι τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα (μετεωρικά νερά). Μικρό ποσοστό των υπόγειων νερών είναι μαγματικής ή κοσμικής προέλευσης, που εισέρχεται για πρώτη φορά στον υδρολογικό κύκλο. Το συγγεντικό είναι νερό που δεν έχει έλθει σε επαφή με την ατμόσφαιρα για μεγάλο χρονικό διάστημα. Το μαγματικό και το μεταμορφωμένο νερό συνδέονται με την άνοδο του μάγματος και τις διαδικασίες της μεταμόρφωσης των πετρωμάτων, αντίστοιχα. Το νερό εισέρχεται στο υπέδαφος από την επιφάνεια του εδάφους, είτε κατευθείαν από τις βροχοπτώσεις, είτε από σώματα

επιφανειακού νερού (ποτάμια, λίμνες). Μετά κινείται αργά σε ποικίλες αποστάσεις μέχρι να επιστρέψει στην επιφάνεια του εδάφους είτε με φυσική εκφόρτιση (πηγές), είτε με ανθρώπινη παρέμβαση (πηγάδια, γεωτρήσεις), είτε τέλος με τη διαπνοή των φυτών. Ο χρόνος παραμονής του υπόγειου νερού στο υπέδαφος αποτελεί την ηλικία του νερού, η οποία μπορεί να προσδιορισθεί με φυσικά ραδιοϊσότοπα, κυρίως το τρίτιο (H^3) και τον άνθρακα 14 (C^{14}).



Σχήμα 1.1: Ο υδρολογικός κύκλος (πηγή: <http://water.usgs.gov/>).



Σχήμα 1.2: Η κατανομή του νερού στη Γη (Πηγή: <http://www.env-edu.gr/>).

Ως υπόγεια ροή εννοείται η κίνηση του νερού στο υπέδαφος και, ειδικά, μέσα στους υδροφόρους γεωλογικούς σχηματισμούς. Η κίνηση των υπόγειων νερών ακολουθεί τους νόμους των Νευτώνειων ρευστών. Το νερό είναι Νευτώνειο ρευστό και αυτό σημαίνει ότι η διατμητική τάση ($\tau =$ δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας) είναι ανάλογη της βαθμίδας ταχύτητας $\frac{\Delta u}{\Delta y}$ και του δυναμικού ιξώδους (μ): $\tau = \mu \frac{\Delta u}{\Delta y}$

Η σχέση αυτή αποτελεί το νόμο της εσωτερικής τριβής (ιξώδες) του Νεύτωνα. Ιξώδες είναι η αντίσταση ενός υγρού στη ροή και συσχετίζεται με τους διαμοριακούς δεσμούς. Η εσωτερική τριβή κατά την κίνηση του νερού, παράγει έργο το οποίο μετατρέπεται σε θερμότητα αυξάνοντας τη θερμοκρασία του νερού. Σε προβλήματα ροής, όπου αντεπιδρούν δυνάμεις αδράνειας και δυνάμεις τριβής εμφανίζεται ο λόγος του δυναμικού ιξώδους (μ) προς την πυκνότητα (ρ). Ο λόγος αυτός ονομάζεται κινηματικό ιξώδες: $\nu = \mu / \rho$. Οι συντελεστές μ και ν μειώνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας και έχουν διαστάσεις: $\mu = L^{-1}M^1T^{-1}$ και $\nu = L^2M^0T^{-1}$. Ένα υγρό είναι ιδανικό, όταν $\mu = 0$ (δεν εμφανίζει εσωτερική τριβή). Το νερό και τα υγρά γενικότερα εμφανίζουν μεγάλη αντίσταση σε κάθε μεταβολή του όγκου τους και γι' αυτό πρακτικά χαρακτηρίζονται σαν ασυμπίεστα. Οι δυνάμεις συνοχής (δυνάμεις μεταξύ ομοειδών μορίων) δίνουν στο νερό χαρακτηριστική επιφανειακή τάση, σχηματίζοντας σφαιρικές σταγόνες κατά την πτώση του. Οι δυνάμεις συνάφειας εμφανίζονται μεταξύ ετεροειδών μορίων, δηλ. μεταξύ του νερού και των στερεών σωμάτων με τα οποία έρχεται σε επαφή.

Ο κύριος νόμος που διέπει την κίνηση των υπόγειων ροών είναι ο νόμος του Darcy. Περιγράφεται από την εξίσωση $v = -k \text{grad}h$ που έχει θεμελιωθεί πάνω σε πειράματα υπό καθεστώς ισορροπίας (μόνιμη ροή). Δεχόμαστε όμως ότι ισχύει στιγμιαία και για τις μη μόνιμες ροές. Οι φυσικές υπόγειες ροές είναι κατά κανόνα «ανεπαίσθητα» μη μόνιμες και υπακούουν στον νόμο του Darcy. Ο νόμος του Darcy στην απλή μορφή του εκφράζεται με την εξίσωση: $v = -ki$, όπου: $k =$ η υδραυλική αγωγιμότητα και $i = \frac{dh}{dl}$ η υδραυλική κλίση, που αντιπροσωπεύει τη μεταβολή του φορτίου (h) ανά μονάδα μήκους διαδρομής (l) και στην πράξη αναπαριστά την κλίση (i) της πιεζομετρικής επιφάνειας του υδροφόρου ορίζοντα μεταξύ δύο σημείων. Το πρόσημο (-) στην εξίσωση Darcy υποδηλώνει ότι η ροή γίνεται από περιοχές υψηλότερου προς περιοχές χαμηλότερου υδραυλικού φορτίου. Η ταχύτητα που υπολογίζεται με το νόμο ονομάζεται φαινόμενη ταχύτητα Darcy (μακροσκοπική ταχύτητα), ενώ η πραγματική ταχύτητα (μικροσκοπική ταχύτητα) ισούται με: $v = \frac{v\phi}{S_y}$, όπου $S_y =$ το ενεργό πορώδες. Ένα μόριο νερού δεν κινείται ευθύγραμμα σε πορώδη μέσα, αλλά ακολουθεί μια σύνθετη τροχιά, λόγω πρόσκρουσης με τους κόκκους του μέσου και τα γειτονικά μόρια νερού.

Οι διαμορφωμένες, εσωτερικές (γεωλογική δομή) και εξωτερικές (ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, γεωμορφολογία) περιβαλλοντικές συνθήκες καθορίζουν, τόσο τα ποσοτικά (κίνηση και αποθήκευση νερού), όσο και τα ποιοτικά (χημισμός νερού, αντιδράσεις του με το περιβάλλον) χαρακτηριστικά της υπόγειας ροής. Τα υπόγεια νερά αποτελούν το σύνολο, σχεδόν, των αποθεμάτων γλυκού νερού της Γης, εκτιμώμενα στην τάξη μεγέθους των δέκα εκατομμυρίων δισεκατομμυρίων (10^{16}) m^3 . Τα υπόγεια νερά

συνδέονται με τα επιφανειακά, από τα οποία, άλλωστε, προέρχονται. Η σύνδεση αυτή είναι αμφίδρομη και ποικιλόμορφη. Τα επιφανειακά νερά οδηγούνται στο υπέδαφος, για να ενσωματωθούν στις υπόγειες υδροφορίες μέσα σ' ένα πλαίσιο φυσικό ή τεχνητό. Στο φυσικό πλαίσιο εντάσσεται η πρωτογενής κατείσδυση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, αλλά και η δευτερογενής, κατά την απορροή.

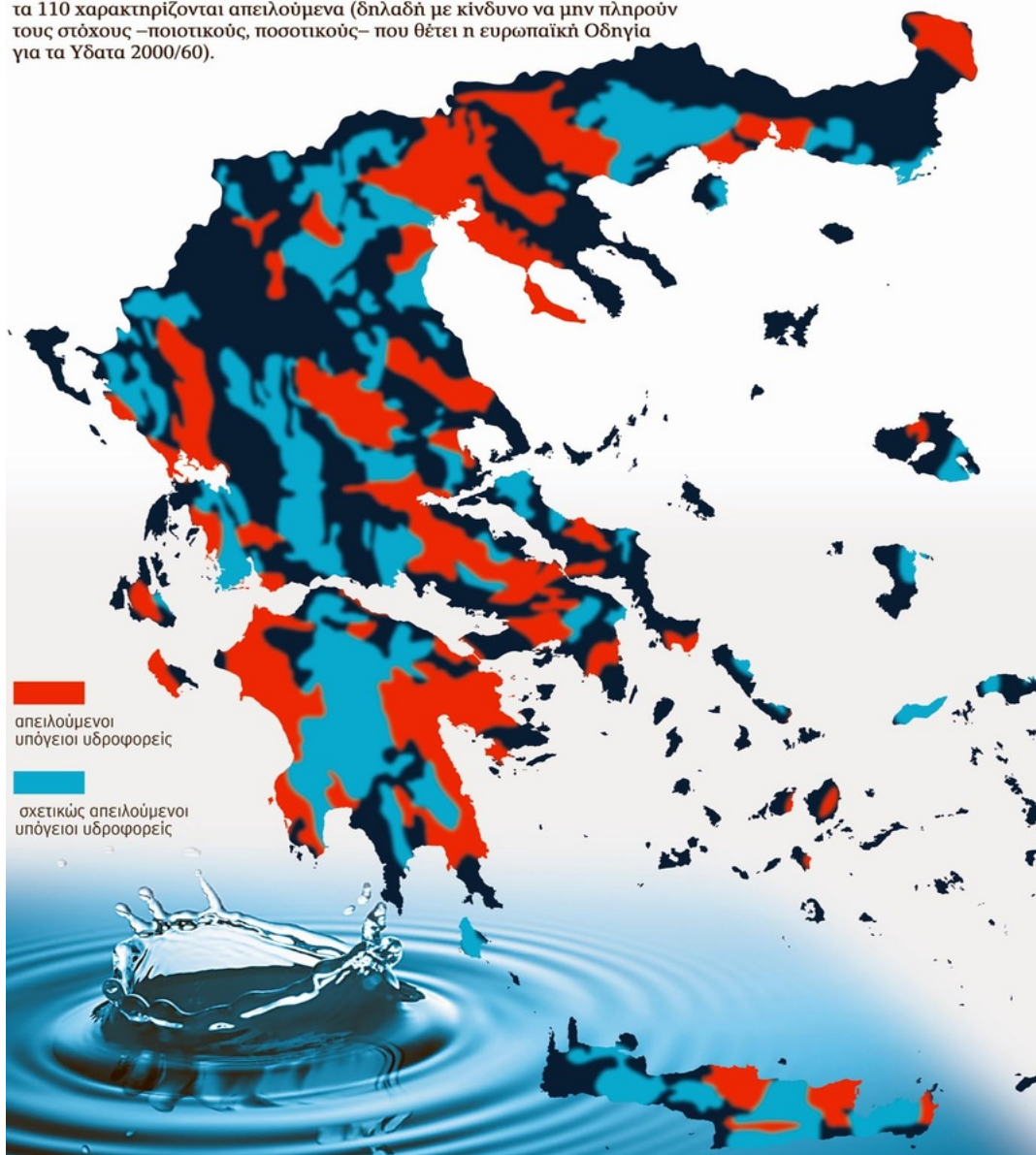
Στο τεχνητό πλαίσιο ανήκουν οι τεχνητοί εμπλουτισμοί των υδροφόρων οριζόντων. Η μετατόπιση υπογείων νερών πίσω στα επιφανειακά γίνεται, κι αυτή, σε φυσικό και τεχνητό πλαίσιο. Στο πρώτο ανήκουν οι πηγαίες εκφορτίσεις, η τελική εκφόρτιση προς το βασικό επίπεδο και οι απώλειες από τριχοειδή ανύψωση και εξάτμιση. Στο δεύτερο, οι αντλήσεις και κάθε μορφής αποστραγγίσεις.

Η εκμετάλλευση των υπόγειων νερών απαιτεί μικρότερες δαπάνες, σε σχέση με την εκμετάλλευση των επιφανειακών, λόγω μικρότερου κόστους των υδροληπτικών έργων, μηδαμινών απαλλοτριώσεων, αλλά και μικρότερης διαταράξεως του γενικότερου περιβάλλοντος. Παρουσιάζουν, πάντα σε σχέση με τα επιφανειακά, μια σχετική σταθερότητα στην απολήψιμη παροχή, μια σχετική σταθερότητα στη χημική σύσταση, στα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά και στους οργανοληπτικούς χαρακτήρες. Η εκμετάλλευση των υδροφόρων πραγματοποιείται με τη διαδικασία των αντλήσεων, που, πολλές φορές, οδηγείται στη κατάσταση των υπεραντλήσεων (Σχήμα 1.3).

Η οδηγία πλαίσιο για τα ύδατα ορίζει την καλή κατάσταση των υπόγειων υδάτων – το στόχο για το έτος 2015 – με κριτήριο τόσο την ποσότητα όσο και τη χημική κατάστασή τους. Προκειμένου να διασφαλιστεί μια σταθερή ποσότητα υπόγειων υδάτων, η οδηγία απαιτεί τη μακροπρόθεσμη βιώσιμη χρήση των υπόγειων υδάτων. Συνεπώς, η άντληση από ένα σύστημα υπόγειων υδάτων δεν πρέπει να υπερβαίνει το ρυθμό με τον οποίο ανανεώνονται από γλυκά ύδατα, ειδάλλως τα καθαρά υπόγεια ύδατα από το σύστημα αυτό προοδευτικά θα εξαντληθούν. Κάτι τέτοιο θα είχε ιδιαίτερα σοβαρές επιπτώσεις για τις παράκτιες περιοχές, όπου τα θαλάσσια ύδατα μπορούν να διεισδύσουν στον υδροφόρο ορίζοντα γλυκών υδάτων και να υποβαθμίσουν τα πολύτιμα αποθέματά τους. Σε εθνικό επίπεδο, τα κράτη μέλη ορίζουν τα πρότυπα ποιότητας – ή ανώτερες αποδεκτές τιμές – για τις χημικές ουσίες στα υπόγεια ύδατα. Αυτό γίνεται ακολουθώντας την προσέγγιση και τις μεθόδους που αναφέρονται στην οδηγία του 2006 σχετικά με τα υπόγεια ύδατα, η οποία λαμβάνει υπόψη τη γεωλογική ποικιλομορφία και άλλους παράγοντες σε όλη την Ευρώπη. Η επίτευξη καλής χημικής κατάστασης προϋποθέτει επίσης τη συμμόρφωση με πρότυπα ποιότητας σε επίπεδο Ε.Ε. σχετικά με τη νιτρορύπανση και τα φυτοφάρμακα. Σε αυτά περιλαμβάνεται η οδηγία για τη νιτρορύπανση, η οποία απαιτεί τη λήψη μέτρων για την προστασία των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων από τη ρύπανση λόγω αζωτούχων λιπασμάτων που χρησιμοποιούνται στη γεωργία. Η οδηγία πλαίσιο για τα ύδατα αναγνωρίζει τη σημασία του κύκλου που συνδέει τα υπόγεια και τα επιφανειακά ύδατα, ορίζει δε ότι η καλή κατάσταση – τόσο από ποσοτική όσο και από χημική άποψη – ενός συστήματος υπόγειων υδάτων σημαίνει επίσης προστασία των συστημάτων επιφανειακών υδάτων και των χερσαίων οικοσυστημάτων που εξαρτώνται από τα εν λόγω ύδατα.

Στο «κόκκινο» τα υπόγεια αποθέματα

Η Ελλάδα έχει 236 υπόγεια υδροφόρα συστήματα, από τα οποία τα 110 χαρακτηρίζονται απειλούμενα (δηλαδή με κίνδυνο να μην πληρούν τους στόχους –ποιοτικούς, ποσοτικούς– που θέτει η ευρωπαϊκή Οδηγία για τα Υδατα 2000/60).



Σχήμα 1.3: Τα απειλούμενα υπόγεια υδροφόρα συστήματα της Ελλάδας (<http://static.pblogs.gr>).

1.3 Υδρογεωλογία παράκτιων περιοχών

Η διατήρηση και προστασία των παράκτιων υδροφόρων, αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα του σύγχρονου κόσμου, γιατί είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με την οικονομία των παράκτιων περιοχών. Οι υδατικοί πόροι των υπόγειων υδροφορέων, βρίσκονται σε δυναμική ισορροπία (εμπλουτισμός – εκφόρτιση) και χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένες χημικές και υδραυλικές παραμέτρους. Είναι πεπερασμένοι και ευάλωτοι σε εξωτερικούς ρύπους, καθώς οι παράκτιες περιοχές παρουσιάζουν ταχύτερη τουριστική, αγροτική και πληθυσμιακή ανάπτυξη, οι παράκτιοι υδροφόροι κινδυνεύουν να υποβαθμιστούν ποσοτικά και ποιοτικά. Πράγματι, η αυξημένη ζήτηση μειώνει τα αποθέματα του υδατικού υπόγειου δυναμικού, ενώ αυξάνει και την πιθανότητα ρύπανσής του λόγω υπαλμύρινσης (διείσδυσης του θαλασσινού νερού) ή χρήσης γεωργικών φαρμάκων. Για την απαιτούμενη βέλτιστη διαχείριση των παράκτιων υδροφόρων απαραίτητη προϋπόθεση, είναι η πλήρης κατανόηση της γεωλογίας και της τεκτονικής της υπό μελέτη περιοχής, γιατί αυτά τα δεδομένα καθορίζουν τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα. Για την πληρέστερη έρευνα, πρέπει να πραγματοποιείται λεπτομερής γεωλογική και τεκτονική χαρτογράφηση της περιοχής και απεικόνιση των δεδομένων σε Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών. Η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ), ορμώμενη από την αναγκαιότητα που έχει προκύψει για την προστασία και την ορθή διαχείριση των υδάτων, καθιέρωσε κοινοτικό πλαίσιο, την Οδηγία 2000/60, με την οποία οργανώνει τη διαχείριση των εσωτερικών, επιφανειακών, υπογείων, μεταβατικών και παράκτιων υδάτων. Στόχος, είναι η πρόληψη και μείωση της ρύπανσής τους, η προαγωγή της βιώσιμης αξιοποίησής τους, η προστασία του περιβάλλοντός τους, η βελτίωση της κατάστασης των υδατικών οικοσυστημάτων.

Υφαλμύριση είναι μια φυσική διαδικασία, που μπορεί να μετατραπεί σε περιβαλλοντικό πρόβλημα όταν πραγματοποιείται πολύ μεγάλη άντληση νερού από έναν υδροφορέα (Soni and Pujari, 2010). Αυτή η κατάσταση περιγράφει, σχεδόν, όλες τις παράκτιες περιοχές που κατοικούνται. Το τελικό αποτέλεσμα της υπερεκμετάλλευσης των υπόγειων υδάτων εντείνει το φαινόμενο της διείσδυσης αλμυρού νερού στο γλυκό με αποτέλεσμα πολλές χώρες να επηρεάζονται δεδομένου ότι έχουν μεγάλο πληθυσμό στις παράκτιες περιοχές τους. Το γεγονός ότι είναι δύσκολο να κατανοηθεί ο μηχανισμός της διείσδυσης θαλασσινού νερού είναι εξαιτίας των μεταβλητών φυσικών παραγόντων και των δυναμικών χαρακτηριστικών των εμπλεκόμενων παραμέτρων (CMRI, 2007).

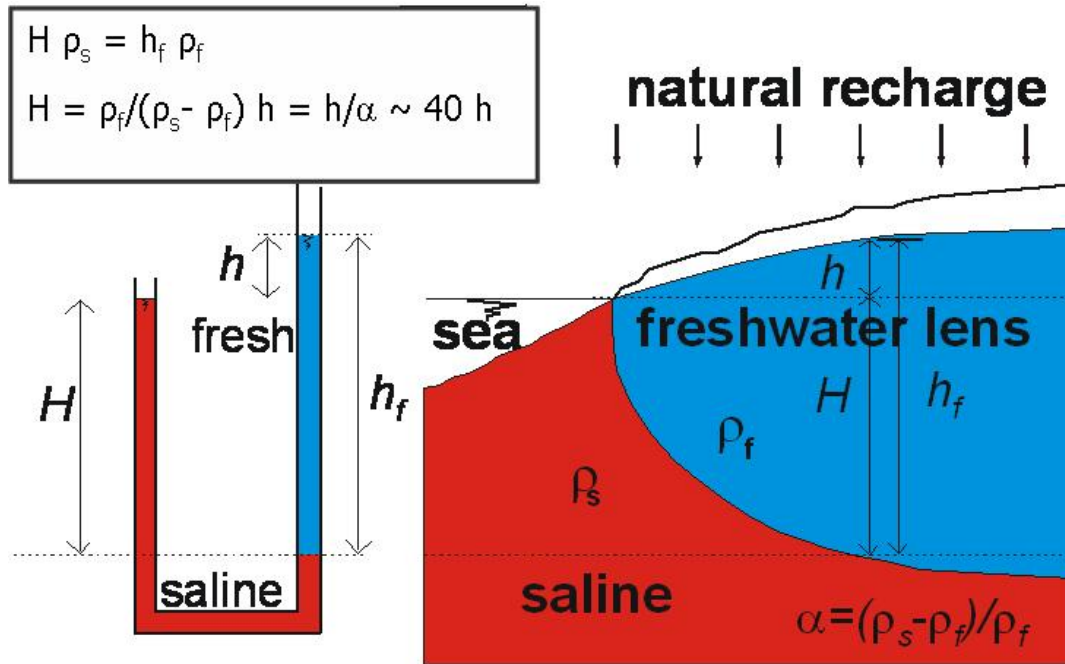
1.4 Θαλάσσια διείσδυση

Το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης αποτελεί μια ειδική περίπτωση αλμύρισης, και αφορά τους παράκτιους υδροφόρους. Σχεδόν το σύνολο των περιπτώσεων θαλάσσιας διείσδυσης που έχουν καταγραφεί, οφείλονται σε ανθρωπογενείς δραστηριότητες και ειδικότερα στην εντατική υπεράντληση των παράκτιων υδροφόρων. Η απόληψη του υπόγειου νερού σε μεγάλες ποσότητες επιφέρει ποσοτική υποβάθμιση στο υδάτινο δυναμικό του παράκτιου υδροφόρου, και εφόσον λάβει χώρα διείσδυση αλμυρού νερού, η υποβάθμιση λαμβάνει επίσης ποιοτικό χαρακτήρα. Πολλοί επιστήμονες περιγράφουν το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης με το χαρακτηρισμό «καταστροφή». Η διείσδυση της θάλασσας σε παράκτιους υδροφορείς της Ελλάδας προβάλλει τα τελευταία χρόνια ως ένα ιδιαίτερα σοβαρό πρόβλημα που απειλεί να περιορίσει τη χρήση σημαντικού μέρους των διαθέσιμων υπόγειων υδατικών πόρων. Σε ορισμένες περιπτώσεις μάλιστα, όπου τα υπόγεια νερά αποτελούν το μοναδικό διαθέσιμο υδατικό πόρο (όπως π.χ. στη νήσο Χίο κ.α.), η διείσδυση της θάλασσας μπορεί να οδηγήσει σε ολοκληρωτική έλλειψη γλυκού νερού. Η διείσδυση της θάλασσας σε παράκτιους υδροφορείς είναι μια σημαντική διαδικασία που μπορεί να οδηγήσει στην αλμύριση του υπόγειου νερού σε τέτοια επίπεδα που να υπερβαίνουν τα αποδεκτά όρια του πόσιμου νερού και του νερού της άρδευσης (Van Dam J.C, 1999). Τα υπόγεια νερά συντηρούν τόσο τους παράκτιους υδροβιολογικούς όσο και τις ευεργετικές για τους οργανισμούς του αβαθούς θαλασσιού περιβάλλοντος ιδιότητες. Η διείσδυση της θάλασσας σε χερσαίους υπόγειους υδροφορείς και η υποθαλάσσια εκροή υπόγειου νερού είναι διαδικασίες στενά συνδεδεμένες και επηρεάζουν άμεσα η μία την άλλη. Η ποσότητα της υποθαλάσσιας εκροής γλυκού νερού ελέγχει κάτω από ορισμένες συνθήκες τη διείσδυση της θάλασσας. Από την άλλη πλευρά, ο ρυθμός της διείσδυσης της θάλασσας και οι σχετιζόμενες με αυτή διαδικασίες (π.χ. ανοδική κίνηση αλμυρών νερών) μπορεί επίσης να επηρεάσει τους ρυθμούς της υποθαλάσσιας εκροής γλυκού νερού. Η υποθαλάσσια εκροή υπόγειου νερού είναι δυναμικά μια σημαντική συνιστώσα του νερού και των βιοχημικών κύκλων σε πολλά παράκτια περιβάλλοντα. Αυτή, σε αρκετές περιπτώσεις, αποτελεί σημαντικό κλάσμα των εισροών γλυκού νερού μέσα στο παράκτιο περιβάλλον (Moore W., 1996) και αποτελεί μια σημαντική διαδρομή τροφοδοσίας του με θρεπτικές ουσίες. Η αλμυρότητα στο νερό της άρδευσης μπορεί να είναι καταστροφική στη γεωργία, μέσω της μείωσης της παραγωγής και του θανάτου φυτών μικρής αντοχής στα άλατα (Maimone M., 1998).

Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι συνθήκες μπορεί να επιβάλουν την αλλαγή των καλλιεργειών με φυτά πιο ανθεκτικά στα άλατα. Η διείσδυση της θάλασσας σε λίγες μόνο περιπτώσεις έχει μελετηθεί επαρκώς. Η επιστημονική προσέγγιση του φαινομένου περικλείει σημαντικές δυσκολίες που αναφέρονται ιδιαίτερα στο χαρακτηρισμό της διαδικασίας υφαλμύρισης και τη διάκριση των διαφορετικών πηγών που την προκαλούν. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο παράκτιος υδροφορέας στην περιοχή Oxnard Plain, Ventura County στην California, όπου παρατηρήθηκε διείσδυση της θάλασσας από τη δεκαετία του 1930 και η οποία απετέλεσε ένα σοβαρό πρόβλημα στα μέσα της δεκαετίας 1950. Πολλά χρόνια μετά πρόσφατη έρευνα (Izbicki J.A., 1991) έδειξε ότι και άλλες πηγές νερού υψηλής περιεκτικότητας σε χλώριο (Cl⁻) τροφοδοτούν τις γεωτρήσεις

και ότι η επίδραση της θαλάσσιας διείσδυσης υπερεκτιμήθηκε (Ventura County Public Works Agency, 1995).

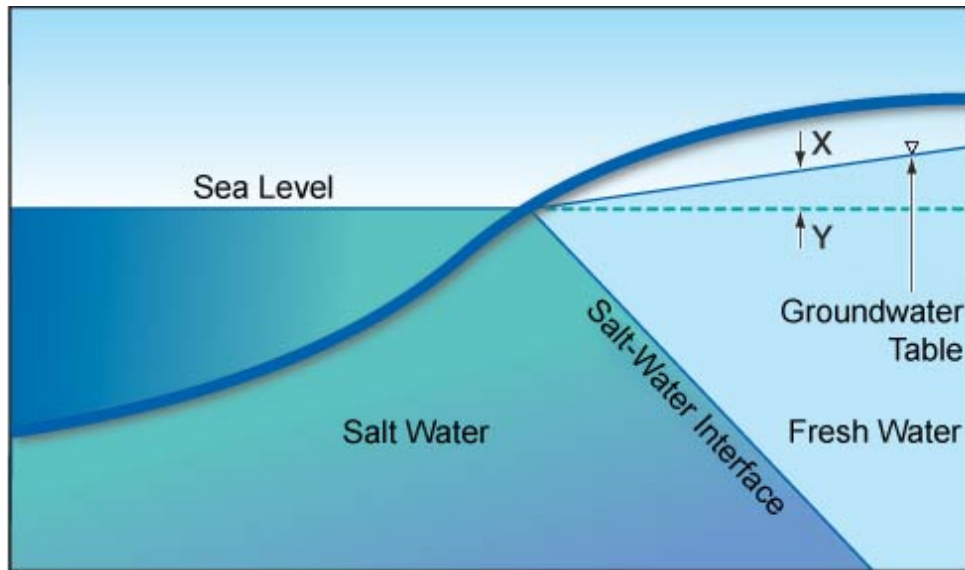
Η μελέτη του φαινομένου της υφαλμύρισης, η οποία βασίζεται στην υδροστατική ισορροπία δύο υγρών, μπορεί μελετηθεί εργαστηριακά σε διατάξεις παρόμοιες με αυτή του Σχήματος 1.4. Η υδροστατική ισορροπία μεταξύ γλυκού και θαλασσινού νερού μπορεί να αναπαρασταθεί σε σωλήνα σχήματος U στον οποίο παρέχεται στις δύο εισόδους του σωλήνα αλμυρό και γλυκό νερό, χωρίς να αναμιγνύονται μεταξύ τους. Οι υδροστατικές πιέσεις σε κάθε πλευρά του σωλήνα θα πρέπει να είναι ίσες.



Σχήμα 1.4: Υδροστατική ισορροπία μεταξύ θαλασσινού και γλυκού νερού, αναπαριστώμενη με σωλήνα σχήματος U (Todd, 1980).

Η συνηθέστερη περίπτωση υποβάθμισης της ποιότητας του νερού ενός παράκτιου υδροφόρου είναι η διείσδυση της θάλασσας. Το αλμυρό νερό μπορεί να συναντάται είτε ως συγγενετικό νερό, είτε ως υπόγεια ροή θαλασσινού νερού κάτω από υδροφόρους γλυκού νερού, είτε στα περιθώρια των παράκτιων υδροφόρων, είτε ως παλιρροϊκό νερό σε εκβολές ποταμών ή τεχνητών καναλιών.

Η θέση και το σχήμα της διεπιφάνειας μεταξύ υπόγειου γλυκού και αλμυρού νερού, είναι συνάρτηση του όγκου του νερού του υδροφόρου που εκφορτίζεται. Οποιαδήποτε ενέργεια που αλλάζει τον όγκο αυτό, οδηγεί αυτόματα και σε αλλαγή της θέσης ή/και του σχήματος της διεπιφάνειας. Επίσης, σε τέτοια αλλαγή μπορεί να οδηγήσουν και οι παλιρροϊκές κινήσεις της θάλασσας. Άρα, η διεπιφάνεια αυτή βρίσκεται σε κατάσταση δυναμικής ισορροπίας. Συνήθως, η ισορροπία αυτή διαταράσσεται με την επέμβαση του ανθρώπου (Σχήμα 1.5).



Σχήμα 1.5: Μοντέλο της θεωρίας Ghyben - Herzberg για τη διεπιφάνεια γλυκού - αλμυρού νερού σε παράκτιο ελεύθερο υδροφόρο ορίζοντα.

Κατά τον Fetter (1994) η παθητική προσβολή από αλμυρό νερό συμβαίνει όταν η υδραυλική κλίση του υδροφόρου μειώνεται, παραμένει όμως με κατεύθυνση προς τη θάλασσα. Στην περίπτωση αυτή, το αλμυρό νερό κινείται με αργό ρυθμό προς τα ηπειρωτικά μέχρι να βρεθεί στην καινούρια θέση ισορροπίας, που να ανταποκρίνεται στις νέες υδραυλικές συνθήκες. Η ενεργητική προσβολή από αλμυρό νερό συμβαίνει όταν αντιστραφεί η υδραυλική κλίση, οπότε έχουμε άμεση και σχετικά γρήγορη διείσδυση του θαλασσινού νερού, η οποία μπορεί να φτάσει αρκετά χιλιόμετρα μέσα στα ηπειρωτικά.

Εξετάζοντας τη σχέση γλυκού – αλμυρού νερού διαπιστώνεται διαφορετική περιεκτικότητα σε άλατα, το αλμυρό νερό παρουσιάζει σημαντικά μεγαλύτερη πυκνότητα από το γλυκό νερό. Στην επαφή του γλυκού με το αλμυρό νερό σχηματίζεται μία ζώνη ανάμιξης, όπου υπάρχει βαθμιαία μετάβαση από το γλυκό στο αλμυρό νερό. Αυτή η «διεπιφάνεια», άλλοτε μπορεί να είναι λεπτή και άλλοτε πιο εκτεταμένη, όπως όταν το υδραυλικό φορτίο του υδροφόρου υπόκειται σε διακυμάνσεις λόγω της παλίρροιας. Ροή υπάρχει και στη ζώνη του αλμυρού και στη ζώνη του γλυκού νερού. Η ροή του αλμυρού υπόγειου νερού εκτρέπεται παράλληλα προς τη «διεπιφάνεια», για να εκφορτιστεί κοντά στην ακτή.

Η κλασική εξίσωση που περιγράφει το σχήμα και τη θέση της «διεπιφάνειας» είναι η εξίσωση Ghyben – Herzberg (Fetter, 1994):

$$z_{(x,y)} = \left(\frac{\rho_w}{\rho_s - \rho_w} \right) h_{(x,y)z}$$

όπου:

$z_{(x,y)}$ το βάθος της «διεπιφάνειας» κάτω από το επίπεδο της θάλασσας στη θέση (x,y)

$h_{(x,y)}$ το υψόμετρο της ελεύθερης επιφάνειας του υδροφόρου από το επίπεδο της θάλασσας στη θέση (x,y)

ρ_w η πυκνότητα του γλυκού νερού

ρ_s η πυκνότητα του αλμυρού νερού.

Η εφαρμογή της εξίσωσης αυτής περιορίζεται σε περιπτώσεις όπου τα ρευστά βρίσκονται σε στατικές συνθήκες.

Σύμφωνα με το νόμο Ghyben – Herzberg, η «διεπιφάνεια» θα πρέπει να τέμνει την υδροστατική στάθμη ακριβώς στην ακτή, πράγμα το οποίο δεν είναι ακριβές. Η εμπειρία έχει αποδείξει ότι οι υδροφόροι είναι δυνατόν να εκφορτίζονται και μέσα στη θάλασσα από τον πυθμένα της, είτε μέσω ρωγμών είτε ως διάχυτη ροή.

Ο Hubbert, 1940, διατύπωσε την άποψη ότι το $h_{(x,y)}$ θα έπρεπε να είναι το υδραυλικό φορτίο της «διεπιφάνειας» στη θέση (x,y) . Επειδή όμως οι ισοδυναμικές γραμμές είναι κυρτές, η κατακόρυφη που περνάει από την ελεύθερη επιφάνεια του υδροφόρου και έχει υδραυλικό φορτίο $h_{(x,y)}$ θα έχει κάποια απόσταση από την κατακόρυφη που περνάει από σημείο της «διεπιφάνειας» με το ίδιο δυναμικό. Οπότε η πραγματική απόσταση ανάμεσα στην ελεύθερη επιφάνεια του υδροφόρου και στη «διεπιφάνεια» θα είναι μεγαλύτερη από εκείνη που δίνει η εξίσωση Ghyben – Herzberg (Σχήμα 1.6).

Παρόλα αυτά, για υδροφόρους με μεγάλη κατακόρυφη εξάπλωση, η παραδοχή Dupuit (Fetter, 1994), ότι οι ισοδυναμικές γραμμές είναι κατακόρυφες μπορεί να γίνει, οπότε το υδραυλικό φορτίο σε ένα σημείο της «διεπιφάνειας» μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι ίσο με το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα σε εκείνο το σημείο.

Η υπόγεια ροή σε παράκτιους υδροφόρους μπορεί να περιγραφεί με συνδυασμό των εξισώσεων Ghyben – Herzberg και Dupuit. Το μοντέλο Dupuit – Ghyben – Herzberg (Fetter, 1994) για μονοδιάστατη ροή σε παράκτιους υδροφόρους δίνει την παρακάτω έκφραση για τις x και z συντεταγμένες της «διεπιφάνειας»:

$$z = \sqrt{\frac{2q' xG}{k}}$$

όπου:

z το βάθος της «διεπιφάνειας» κάτω από το επίπεδο της θάλασσας σε θέση που απέχει x από την ακτή προς το εσωτερικό

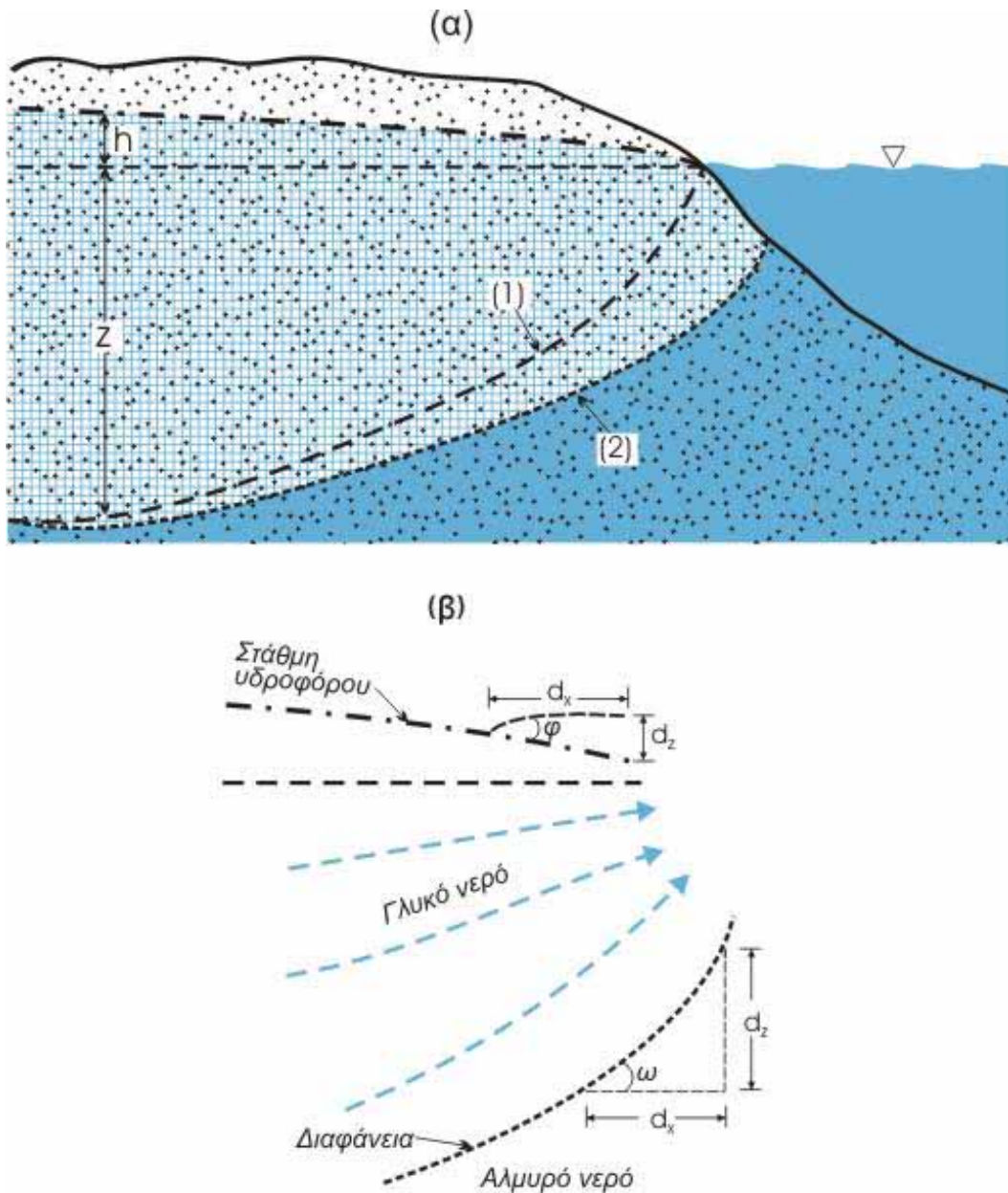
x η απόσταση της θέσης από την ακτή

q' η εκφόρτιση του υδροφόρου στην ακτογραμμή ανά μονάδα πλάτους

k η υδροπερατότητα

$$G = \frac{\rho_w}{\rho_s - \rho_w}$$

Και σε αυτό όμως το μοντέλο η «διεπιφάνεια» τέμνει την επιφάνεια του υδροφόρου στην ακτή.



Σχήμα 1.6: (α) Θέση της διεπιφάνειας κατά Ghyben - Herzberg (1) και κατά Hubbert (2). (β) υπολογισμός της γωνίας κλίσης της διεπιφάνειας κατά Hubbert.

Για να αρθεί η ανακρίβεια αυτή, ο Glover (1964), πρότεινε την παρακάτω σχέση:

$$z = \sqrt{\frac{G^2 q'^2}{k^2} + \frac{2q'xG}{k}}$$

Εδώ παρατηρούμε, πως ακόμα κι αν $x = 0$, το z έχει τιμή. Το πλάτος του υποθαλάσσιου μετώπου εκφόρτισης x_0 δίνεται από τη σχέση:

$$x_0 = -\frac{Gq'}{2k}$$

ενώ το ύψος της επιφάνειας του υδροφόρου σε απόσταση x από την ακτή δίνεται από τον τύπο:

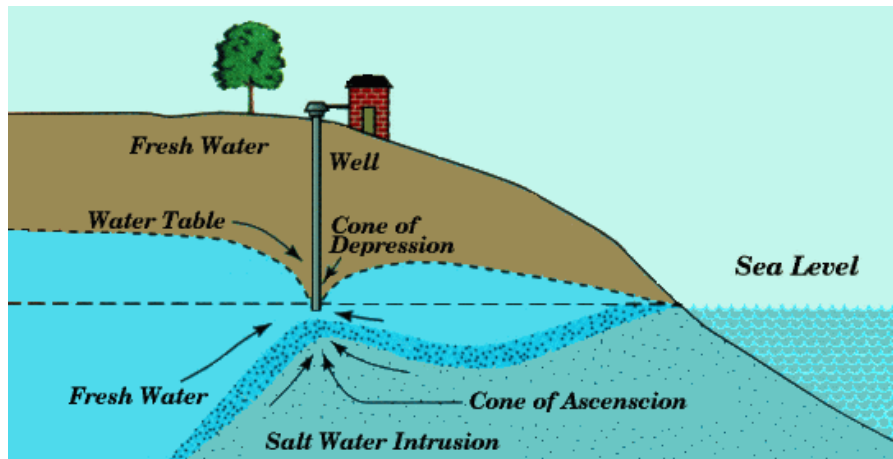
$$h = \sqrt{\frac{2q'x}{Gk}}$$

1.5 Θαλάσσια διείσδυση στη Μεσόγειο και την Ελλάδα

Η ραγδαία επέκταση των υπεραντλήσεων τα τελευταία χρόνια για την κάλυψη των υδατικών αναγκών της αγροτικής και κοινωνικοοικονομικής ανάπτυξης παρατηρήθηκε σε περιοχές όπου οι επιφανειακοί υδάτινοι πόροι ήταν ανεπαρκείς, αβέβαιοι ή απαιτούν μεγάλο κόστος για την εκμετάλλευσή τους. Οι αρδεύσεις αποτελούν την κύρια αιτία υπεράντλησης στις γεωργικές περιοχές της Ελλάδας και των χωρών της Μεσογείου. Η υπεράντληση αυτή οδήγησε σε εξάντληση των υδατικών πόρων και υποβάθμιση της ποιότητας των νερών. Οι δυο κύριες επιπτώσεις στην ποιότητα των υπόγειων νερών είναι η υφαλμύριση λόγω θαλάσσιας διείσδυσης στους παράκτιους υδροφορείς και η νιτρορύπανση λόγω εντατικής χρήσης λιπασμάτων στη γεωργία.

Λόγω της γειννίας με τη θάλασσα οι παράκτιοι υδροφόροι ορίζοντες βρίσκονται σε υψηλή διακινδύνευση θαλάσσιας διείσδυσης, όταν η εντατική εκμετάλλευση οδηγεί σε αλλαγές της δυναμικής ισορροπίας της διεπιφάνειας θαλασσινού / γλυκού νερού (Voudouris et al., 2004). Υπερεκμετάλλευση ενός υπόγειου υδροφορέα συμβαίνει όταν οι απολήψεις υπερβαίνουν τον εμπλουτισμό και αυτό οδηγεί σε ταπείνωση της στάθμης του υπόγειου νερού ή σε αντιστροφή της διεύθυνσης ροής. Στο σχήμα που ακολουθεί, παρουσιάζεται ένα σχηματικό διάγραμμα της υφαλμύρισης των παράκτιων υδροφορέων, λόγω υπεράντλησης (Σχήμα 1.7).

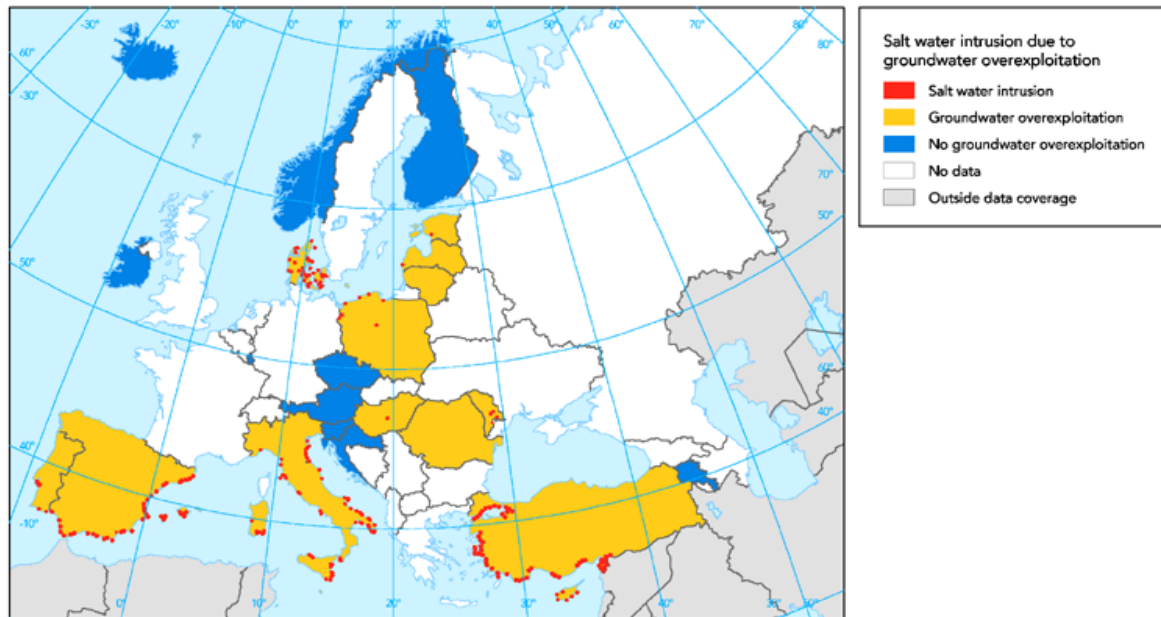
Το φαινόμενο της υφαλμύρισης αναμένεται να πάρει μεγαλύτερες διαστάσεις, λόγω των κλιματικών αλλαγών και των συνεπειών τους, π.χ. άνοδος της στάθμης της θάλασσας, ιδιαίτερα στις χώρες της Μεσογείου (Lambrakis et al., 1997, Arnell, 1999, Croke et al., 2000, Chartzoulakis et al, 2001, Βουδούρης & Καλλέργης, 2002).



Σχήμα 1.7: Υπερεκμετάλλευση παράκτιου υδροφόρου (πηγή: <http://www.lenntech.com/>).

Η αποκατάσταση ενός υπόγειου υδατικού συστήματος επηρεασμένου από θαλάσσια διείσδυση είναι σχεδόν αδύνατη και απαιτεί πολύ χρόνο. Ως εκ τούτου η ζήτηση γλυκού νερού πρέπει να καλυφθεί από πολλές πηγές, όπως απολήψεις από άλλους υδροφόρους ορίζοντες ή επιφανειακά συστήματα νερού μεταφέροντας και αυξάνοντας τις υδατικές πιέσεις σε μακρινές περιοχές. Εναλλακτικά σε πολλές περιοχές η κάλυψη των αναγκών σε γλυκό νερό μπορεί να γίνει με αφαλάτωση υφάλμυρου ή θαλασσινού νερού. Κοινό χαρακτηριστικό και των δύο προαναφερθέντων λύσεων είναι ότι, είναι πολύ δαπανηρές. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται οι παράκτιες περιοχές της Ευρώπης που έχουν επηρεαστεί από το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης και την υπερεκμετάλλευση των υπόγειων υδροφόρων (Σχήμα 1.8).

Ο Ευρωπαϊκός Περιβαλλοντικός Οργανισμός (ΕΕΑ) εισήγαγε το δείκτη «θαλάσσια διείσδυση» (saltwater intrusion indicator), σε συμφωνία με την ευρωπαϊκή νομοθεσία, εστιάζοντας στις ανθρωπογενείς επιπτώσεις. Στόχος είναι η βιώσιμη χρήση των υπόγειων νερών σε πολλές παράκτιες περιοχές, όπου οι απολήψιμες ποσότητες υπόγειου νερού και ο εμπλουτισμός είναι σε ισορροπία ή όχι. Με βάση τα στοιχεία του ΕΕΑ σε 10 από 12 χώρες, όπου καταγράφηκε υπερεκμετάλλευση των παράκτιων υδροφορέων, η θαλάσσια διείσδυση είναι άμεσο αποτέλεσμα. Εκτεταμένες παράκτιες περιοχές στην Τουρκία, την Ιταλία, την Ισπανία είναι επηρεασμένες από τη θαλάσσια διείσδυση. Πάνω από 100 περιοχές στις 10 χώρες αναφέρονται να έχουν υποστεί θαλάσσια διείσδυση, λόγω των εντατικών απολήψεων υπόγειου νερού για την κάλυψη των υδατικών αναγκών. Σε άλλες 10 χώρες κυρίως της κεντρικής και βόρειας Ευρώπης δεν αναφέρονται φαινόμενα υφαλμύρισης. Η πλέον δραματική περίπτωση υφαλμύρισης της Μεσογείου αναφέρεται στη Λιβυή, όπου η περιεκτικότητα των ολικών διαλυμένων στερεών (TDS) αυξήθηκε από 265-675 mg/L το έτος 1976 σε 10.000 mg/L το έτος 1993 (El-Baruni, 1995).



Σχήμα 1.8: Θαλάσσια διείσδυση και υπερεκμετάλλευση υδροφορέων στην Ευρώπη (πηγή: <http://www.eea.europa.eu/>).

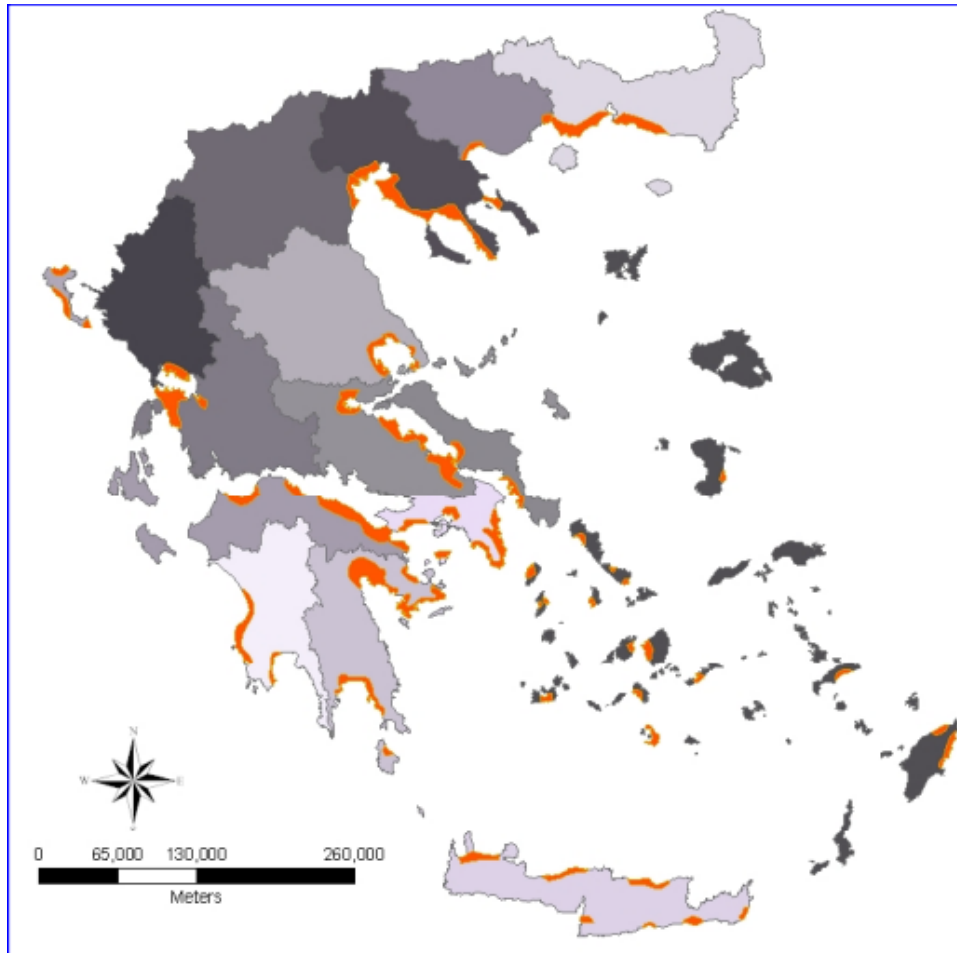
Στην Ελλάδα η συνολική έκταση των υφάλμυρων υπόγειων νερών, λόγω υπεραντλήσεων, με περιεκτικότητα χλωριόντων >500 mg/L ανέρχεται σε $1,6 \times 10^6$ στρέμματα (Περγιαλιώτης & Παπαδάκου, 1998, Σαμπατακάκης & Ζόραπας, 2001, Δασκαλάκη, 2002, Σούλιος, 2004). Η υφαλμύριση των παράκτιων υδροφορέων της Ελλάδας οφείλεται, κατά κύριο λόγο, στις ανθρώπινες δραστηριότητες (Σχήμα 1.9).

Η ποιοτική υποβάθμιση των υπόγειων νερών στους παράκτιους υδροφόρους αποτελεί τροχοπέδη στην οικονομική ανάπτυξη των περιοχών αυτών. Η μακροχρόνια χρήση υφάλμυρου νερού για άρδευση ευαίσθητων καλλιεργειών έχει αρνητικές επιπτώσεις στο έδαφος και τα φυτά. Λόγω της συσσώρευση νατρίου προκαλείται αποκροκίδωση του εδάφους με συνέπεια τη μείωση της υδροπερατότητας και της γονιμότητας. Τα φαινόμενα της θαλάσσιας διείσδυσης προκαλούν επίσης σοβαρές αλλοιώσεις στα παράκτια ποτάμια και λιμναία οικοσυστήματα. Η πτώση στάθμης του υπόγειου νερού στους παράκτιους υδροφόρους ορίζοντες προκαλεί αλάτωση των γλυκών νερών και υποβάθμιση των οικοσυστημάτων.

Ο χρόνος απορρύπανσης των επηρεασμένων υδροφορέων από θαλάσσια διείσδυση είναι σχετικά μεγάλος. Οι Καλλέργης κ.α (1997) υπολόγισαν ότι ο χρόνος αυτός κυμαίνεται από 180 έως 600 χρόνια σε παράκτιους υδροφορείς της Νότιας Ελλάδας, με την προϋπόθεση πλήρους διακοπής των αντλήσεων. Ο χρόνος απορρύπανσης συντομεύεται εφαρμόζοντας τεχνητό εμπλουτισμό με νερό πλούσιο σε ανταλλάξιμο Ca^{2+} .

Για τη μελέτη της εξέλιξης και τον προσδιορισμό της εξάπλωσης του μετώπου υφαλμύρισης χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι και δείκτες, όπως: χάρτες κατανομής, γεωφυσικές μέθοδοι, ιοντικοί λόγοι, δείκτης Revelle (Voudouris et al., 2004). Η γνώση της

εξέλιξης του μετώπου υφαλμύρισης μπορεί να συμβάλει στην καλύτερη διαχείριση των υδροφόρων της περιοχής και στη λήψη των κατάλληλων μέτρων για τον περιορισμό της υφαλμύρισης και των αρνητικών συνεπειών της. Για το λόγο αυτόν απαιτείται συνεχής καταγραφή (monitoring) της ποιότητας των υπόγειων νερών στις ευάλωτες περιοχές από θαλάσσια διείσδυση σε επιλεγμένες θέσεις (Βουδούρης κ.α, 2004).

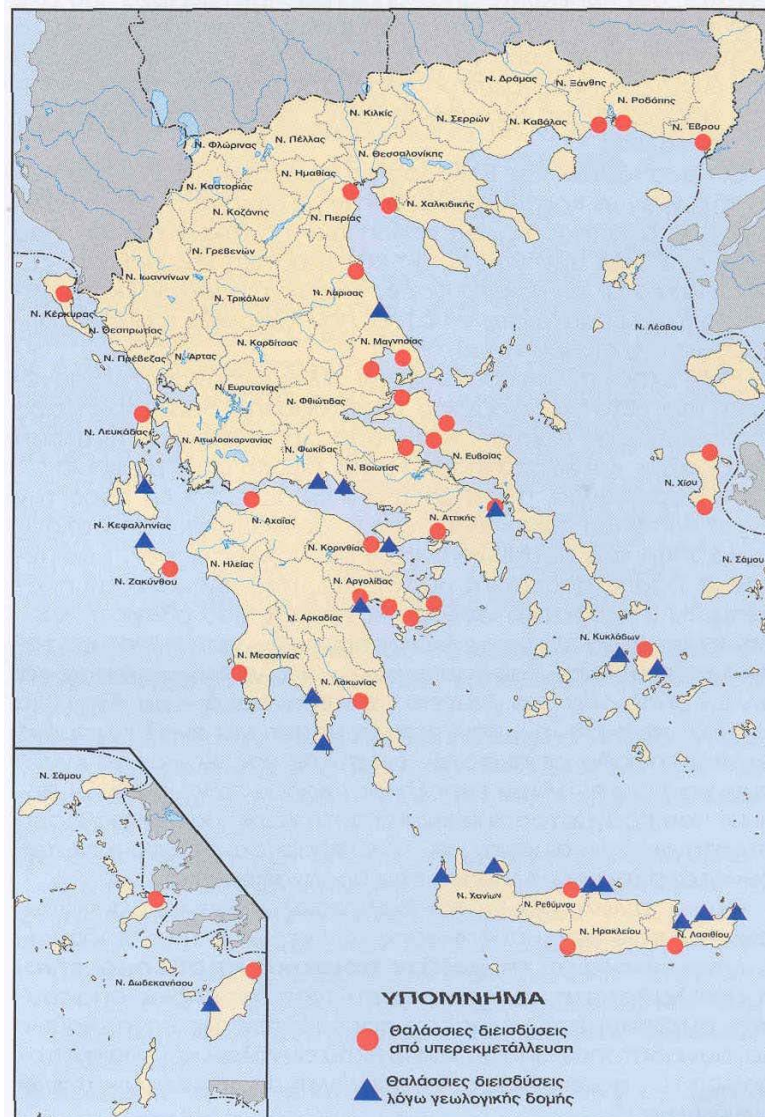


Σχήμα 1.9: Περιοχές με επικινδυνότητα θαλάσσιας διείσδυσης λόγω υπεράντλησης. (Πηγή: <http://www.bankofgreece.gr>)

Στο Σχήμα 1.10 παρουσιάζονται παράκτιες περιοχές που πάσχουν από υφαλμύρωση λόγω θαλάσσιας διείσδυσης, που αυτή προέρχεται είτε λόγω υπερεκμετάλλευσης, είτε λόγω της υπάρχουσας γεωλογικής δομής. Σε πολλές περιοχές, η υπεράντληση των υπόγειων υδάτων για την κάλυψη των τοπικών αναγκών σε ύδρευση και άρδευση, έχει ως αποτέλεσμα την πτώση του υδροφόρου ορίζοντα, την αύξηση του κινδύνου υποβάθμισης της ποιότητας του υπόγειου νερού και την παραγωγικότητα του εδάφους με υφαλμύρωση. Από την άλλη μεριά, στους παράκτιους καρστικοποιημένους υδροφορείς, οι συνθήκες για την εμφάνιση του φαινομένου της υφαλμύρισης είναι ιδιαίτερα ευνοϊκές λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους. Η δημιουργία καρστικών

φαινομένων συνδέεται με την παρουσία πετρωμάτων τα οποία είναι ευδιάλυτα με αποτέλεσμα να διευρύνονται τα διάκενα με τη διάλυσή τους οπότε είναι δυνατή η κίνηση του νερού στο υπέδαφος.

Τέτοια πετρώματα είναι οι εβαπορίτες, τα ανθρακικά, οι ηφαιστίτες, οι χαλαζίτες και οι υπερβασίτες. Το κύριο χαρακτηριστικό των παράκτιων καρστικοποιημένων υδροφορέων είναι η στενή υδραυλική τους σχέση με το αλμυρό νερό και η άμεση επαφή του γλυκού με το αλμυρό νερό. Η εμφάνιση του φαινομένου της υφαλμύρισης είναι δυνατόν να προκληθεί από κανάλια που καταλήγουν στον πυθμένα της θάλασσας ακόμα και σε μεγάλη απόσταση από την ακτή. Η άμεση σύνδεση του καρστικού συστήματος και της θάλασσας, οδηγεί σε μεγάλη διακύμανση της περιεκτικότητας των χλωριόντων στην υφάλμυρη ζώνη.



Σχήμα 1.10: Περιοχές υφάλμυρων υπόγειων νερών λόγω θαλάσσιας διείσδυσης (πηγή: Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης: Περγαλιώτης Π. – Παπαδάκου Στ.)

1.6 Αντιμετώπιση της θαλάσσιας διείσδυσης

Η επιτυχής αντιμετώπιση του φαινομένου της θαλάσσιας διείσδυσης απαιτεί την όσο το δυνατόν ολοκληρωμένη γνώση των φυσικών συνθηκών μέσα στις οποίες λαμβάνει χώρα το φαινόμενο. Ο στόχος επιτυγχάνεται με τη χρησιμοποίηση όλων των διαθέσιμων γεωλογικών εργαλείων (γεωμορφολογία, στρωματογραφία, τεκτονική, υδρογεωλογία) σε συνδυασμό με τη χρησιμοποίηση γεωφυσικών τεχνικών. Στις γεωφυσικές τεχνικές, που χρησιμοποιούνται στη μελέτη της θαλάσσιας διείσδυσης, περιλαμβάνονται οι επιφανειακές γεωφυσικές μέθοδοι (ηλεκτρικής αντίστασης, ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι, ground penetrating radar και ηλεκτρικές, ραδιομετρικές διαγραφίες μέσα σε γεώτρηση).

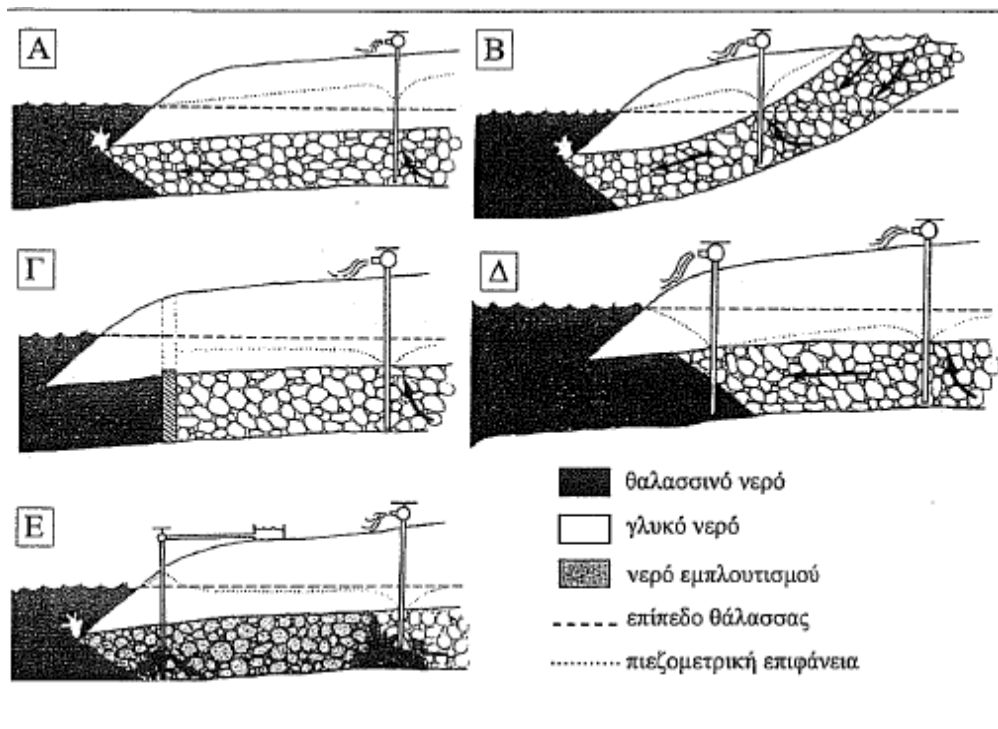
Η παροχή πληροφοριών, τόσο για το φυσικό πλαίσιο όσο και για τη διακύμανση της ποιότητας του νερού συνήθως απαιτεί συνδυασμένη χρήση δύο ή περισσότερων συμπληρωματικών γεωλογικών, γεωφυσικών ή γεωχημικών μεθόδων. Οι γεωχημικές μέθοδοι συμβάλλουν στη μελέτη των γεωχημικών διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα κατά τη θαλάσσια διείσδυση καθώς και στη διάκριση μέσω κριτηρίων των διαφορετικών μηχανισμών αλμύρισης. Η διάκριση των διαφορετικών μηχανισμών αλμύρισης είναι κρίσιμη για την αξιολόγηση της προέλευσης, των διαδρομών, των ρυθμών και της μελλοντικής αλμύρισης των παράκτιων υδροφόρων.

Τα μέτρα προστασίας και ορθολογικής διαχείρισης των παράκτιων υδροφορέων συνδέονται με τον τρόπο και την ένταση εκμετάλλευσης αυτών. Για τη βελτίωση της ποιότητας του αντλούμενου νερού από τις υφάλμυρες γεωτρήσεις και τον περιορισμό του φαινομένου της διείσδυσης της θάλασσας στην ενδοχώρα απαιτείται (Βουδούρης, 1996, Πεταλάς κ.α., 2002, Σούλιος, 2004) μείωση των αντλήσεων από τους παράκτιους υδροφορείς ώστε να μην υπερβαίνουν την ασφαλή απόδοση (safe yield) αυτών, τροποποίηση του σχεδίου άντλησης, τεχνητός εμπλουτισμός με την αξιοποίηση των επιφανειακών χειμερινών απορροών ή τη χρήση των επεξεργασμένων λυμάτων σε δραστηριότητες που το επιτρέπουν. Αντιμετώπιση της θαλάσσιας διείσδυσης μπορεί να γίνει είτε με την εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού (T.E.) είτε με την εφαρμογή κατάλληλου διαχειριστικού σχεδίου ή και με την ταυτόχρονη εφαρμογή και των δύο πρακτικών.

Οι κύριες μέθοδοι παρεμπόδισης της θαλάσσιας διείσδυσης (Σχήμα 1.11) είναι (ASCE 1987, Πεταλάς κ.α. 2002):

- Μείωση των αντλούμενων ποσοτήτων υπόγειου νερού και διατήρηση της στάθμης του υπόγειου νερού πάνω από το επίπεδο της θάλασσας με τροποποίηση του σχεδίου άντλησης μιας ευρύτερης περιοχής (Σχήμα 1.11Α).
- Εφαρμογή επιφανειακού τεχνητού εμπλουτισμού με κατάκλυση, όταν οι συνθήκες το επιτρέπουν με στόχο την αναστροφή της υδραυλικής κλίσης προς την κατεύθυνση της θάλασσας (Σχήμα 1.11Β).
- Κατασκευή υπόγειου φυσικού φραγμού αδιαπέρατου που διακόπτει την υδραυλική επικοινωνία των υδροφορέων με τη θάλασσα (Σχήμα 1.11Γ).

- Δημιουργία κοιλώματος άντλησης, που περιλαμβάνει τη δημιουργία μίας γραμμής από γεωτρήσεις ελεγχόμενης άντλησης αλμυρού νερού, κατάλληλα διατεταγμένες κατά μήκος της ακτής ανάμεσα στις παραγωγικές γεωτρήσεις και τη διαδρομή του νερού της θάλασσας (Σχήμα 1.11Δ). Η μέθοδος μπορεί να συνδυασθεί και με παράλληλη εγκατάσταση γεωτρήσεων εμπλουτισμού (Σχήμα 1.11Ε).
- Δημιουργία «υδραυλικού υβώματος» μετά από έντονο τεχνητό εμπλουτισμό με πεδία κατάκλυσης ή γεωτρήσεις εμπλουτισμού ή συνδυασμό των δύο, ανάλογα με τις επικρατούσες γεωλογικές συνθήκες (Σχήμα 1.11ΣΤ).



Σχήμα 1.11: Μέθοδοι αντιμετώπισης της θαλάσσιας διείσδυσης σε υπό πίεση υδροφόρους με : (Α) ελεγχόμενες αντλήσεις, (Β) επιφανειακό τεχνητό εμπλουτισμό, (Γ) υπόγειο φυσικό φραγμό, (Δ) κοίλωμα άντλησης (pumping-trough), (Ε) συνδυασμό ελεγχόμενων αντλήσεων και γεωτρήσεων εμπλουτισμού (ASCE, 1987).

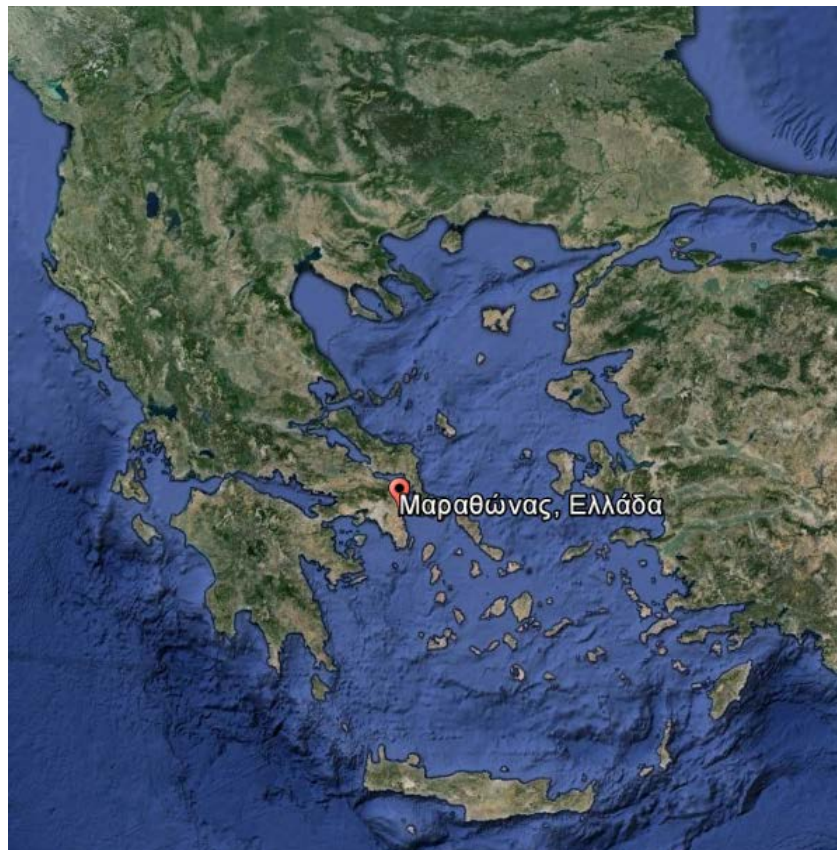
Η αποκατάσταση διαταραγμένων υπόγειων υδροφόρων συστημάτων σε παράκτιες περιοχές προϋποθέτει τη γνώση της τρέχουσας υδρογεωλογικής κατάστασης με την καταγραφή των θέσεων και των ρυθμών απόληξης νερού (στάθμες των υπόγειων νερών και κατανομή της αλμυρότητας) και τον προσδιορισμό της επιθυμητής κατάστασης μετά την αποκατάσταση του υδροφόρου συστήματος. Γενικά, η ολοκληρωμένη διαχείριση του νερού στην αποκατάσταση και αξιοποίηση του γλυκού υπόγειου νερού σε παράκτιους υδροφορείς κρίνεται επιβεβλημένη. Απαιτεί συνεργασίες, πληροφορίες, έρευνα, σωστό σχεδιασμό και κατάλληλα νομοθετικά μέτρα για την αποτελεσματική κατανομή των διαθέσιμων γλυκών υπόγειων υδατικών πόρων. Στον Ελλαδικό χώρο, υπάρχουν αρκετές

περιπτώσεις εφαρμογής τεχνητού εμπλουτισμού για την αντιμετώπιση της θαλάσσιας δειύδωσης. Τέτοιες είναι, το υδροφόρο σύστημα του Αργολικού πεδίου σε προσπάθεια του υπουργείου Γεωργίας την περίοδο 1963-1968, στο ανατολικό Δέλτα του Νέστου και στο Δήμο ορφανού.

1.7 Εισαγωγή στην περιοχή έρευνας

Η παράκτια πεδιάδα του Μαραθώνα βρίσκεται στην βορειοανατολική Αττική και είναι γνωστή από τη μάχη του Μαραθώνα, που πραγματοποιήθηκε μεταξύ των Αθηναίων και των Περσών το 490 π.Χ. Η πεδιάδα οριοθετείται στα βόρεια 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 τη χερσόνησο της Κυνοσούρας.

Στην Σχήμα 1.12 φαίνεται ο χάρτης της Ελλάδας, επισημαίνοντας της θέση του Μαραθώνα σε αυτόν. Από θέση του, διαπιστώνεται πως πρόκειται για παραθαλάσσιο οικισμό, ο οποίο βρίσκεται πολύ κοντά στην Αθήνα, μόλις 42 km. Αυτά φαίνονται ακόμα καλύτερα στο χάρτη της Σχήμας 1.13, όπου η κλίμακα είναι μεγαλύτερη.



Σχήμα 1.12: Χάρτης της Ελλάδας όπου φαίνεται η θέση της περιοχής μελέτης (Πηγή: google earth).



Σχήμα 1.13: Η θέση του Μαραθώνα στην Αττική. (Πηγή: google earth)

Η περιοχή μελέτης σύμφωνα με το νέο αυτοδιοικητικό Νόμο του 2011 εντάσσεται σε τέσσερις Καλλικρατικούς Δήμους, τον Δήμο Μαραθώνα, Διονύσου, Αχαρνών και Ωρωπού. Από την 1η Ιανουαρίου 2011 οι Δήμοι Νέας Μάκρης και Μαραθώνα καθώς και οι Κοινότητες Γραμματικού και Βαρνάβα ενοποιήθηκαν σε ένα νέο Δήμο με το ιστορικό όνομα του Μαραθώνα. Έδρα του νέου Δήμου είναι ο Μαραθώνας. Ο νέος Δήμος Μαραθώνα, πέμπτος σε έκταση Δήμος της Αττικής και από τους μεγαλύτερους σε έκταση Δήμους στη χώρα, έχει συνολική έκταση 222.170 στρέμματα. Παρά την ταχεία διαφοροποίηση των χαρακτηριστικών των γειτονικών του δήμων, ο Μαραθώνας διατηρεί ακόμα σε μεγάλο βαθμό την αρχική του μορφή (<http://www.dionysos.gr/,5/2/2013>). Ο Δήμος Διονύσου περιλαμβάνει τις Δημοτικές ενότητες Αγίου Στεφάνου, Άνοιξης, Διονύσου, Δροσιάς, Κρουονερίου, Ροδόπολης, Σταμάτας. Η έκταση του νέου δήμου είναι 68,66 km² (<http://www.dionysos.gr/,5/2/2013>). Ο Δήμος Ωρωπού ιδρύθηκε το 2010 με την συνένωση εννέα πρώην Δήμων και Κοινοτήτων. Υποδιαιρείται στις εξής Δημοτικές Ενότητες: Αυλώνας, Αφίδναι, Κάλαμος, Καπανδρίτι, Μαλακάσα, Μαρκόπουλο, Νέα Παλάτια, Πολυδένδρι, Συκάμινο, Σκάλα Ωρωπού, Ωρωπός (<http://ororos.gov.gr,5/2/2013>). Ο Δήμος Αχαρνών είναι δήμος της περιφέρειας Αττικής που συστάθηκε με το πρόγραμμα Καλλικράτης. Προέκυψε από τη συνένωση των προϋπαρχόντων δήμων Αχαρνών και Θρακομακεδόνων. Περιλαμβάνει τις Αχαρνές, τους Θρακομακεδόνες και ένα μεγάλο τμήμα του ορεινού όγκου της Πάρνηθας. Έδρα του είναι οι Αχαρνές. Αυτό που αξίζει να επισημανθεί είναι ότι η εξεταζόμενη λεκάνη ανήκει σε τέσσερις διαφορετικούς Δήμους,

γεγονός που δυσχεραίνει τη διαχείριση των προβλημάτων που μπορεί να ανακύψουν σε επίπεδο λεκάνης απορροής. Επιπλέον αναφέρεται ότι στην περίπτωση αυτής της λεκάνης, η επιλογή των ορίων των Δήμων δεν ακολούθησε τα γεωμορφολογικά ή υδρολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής.

Η περιοχή μελέτης παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον διότι αποτελεί παράδειγμα έντονων γεωμορφολογικών αλλαγών και ανθρωπογενών επεμβάσεων. Η ελάττωση της στερεοπαροχής του ποταμού, λόγω των πολυάριθμων ανθρωπογενών επεμβάσεων, όπως η κατασκευή του φράγματος του Μαραθώνα (1929), η επέκταση του αρδευτικού δικτύου της πεδιάδας, οι εκτεταμένες αμμοληψίες από την κοίτη του ποταμού Οινόη έχουν αλλοιώσει τα φυσιογραφικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της πεδιάδας. Για να προστατευτεί το φυσικό περιβάλλον των βιο-υδροτόπων του Μαραθώνα από την άναρχη δόμηση, τη παράνομη επιχωμάτωση και καταπάτηση, η Ελληνική Κυβέρνηση ανακήρυξε την περιοχή Natura 2000. Ο δήμος Μαραθώνα παρουσιάζει πλούσιο φυσικό τοπίο. Το 41,5% της έκτασης του δήμου αποτελούν δασικές εκτάσεις, με κυριότερο το Πεντελικό Όρος που αποτελεί και περιοχή προστασίας. Ποσοστό 42% καταλαμβάνουν αγροτικές εκτάσεις και βοσκότοποι. Εξαιρετικής σημασίας, τοπικής και υπερτοπικής, αποτελεί το Εθνικό Πάρκο Σχοινιά που βρίσκεται στην πεδιάδα Μαραθώνα και αποτελεί το σημαντικότερο παράκτιο οικοσύστημα της Αττικής με έκταση 13,84 km².

Η μεταβολή του πληθυσμού στους οικισμούς του δήμου Μαραθώνα μεταπολεμικά και μέχρι το 1981 είναι σχετικά ομαλή. Αντίθετα τη δεκαετία του 1981-1991 παρατηρείται ραγδαία πληθυσμιακή αύξηση στους περισσότερους οικισμούς με εξαίρεση τους οικισμούς Άνω Σούλι και Βόθων, όπου η μεταβολή είναι σχετικά μικρή. Τη δεκαετία 1991-2001 σημειώνεται σχετική μείωση του πληθυσμού. Η μεγαλύτερη συγκέντρωση πληθυσμού και η μεγαλύτερη πληθυσμιακή μεταβολή παρατηρείται στο κέντρο του δήμου και στους παραθαλάσσιους οικισμούς. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται κυρίως στους παραθεριστές που εισρέουν στην περιοχή και τείνουν να μετατρέψουν την παραθεριστική τους κατοικία, σε μόνιμη. Επιπλέον, ο Μαραθώνας υπήρξε ανέκαθεν κέντρο της περιοχής με αποτέλεσμα να πλαισιωθεί με υπηρεσίες ώστε να εξυπηρετεί την οικιστική ανάπτυξη και να την συγκεντρώνει. Επίσης, η άφιξη σημαντικού αριθμού μεταναστών, κυρίως στους ηπειρωτικούς οικισμούς, οι οποίοι δεν είναι καταγεγραμμένοι με αποτέλεσμα η φαινομενική μείωση του πληθυσμού εκείνης της περιόδου να μην είναι και τόσο ακριβής.

2. Γεωλογία

2.1 Γενικά στοιχεία

Πολλοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί με τη γεωλογία της Ανατολικής Αττικής και έχουν διατυπωθεί διάφορες απόψεις. Οι απόψεις αυτές, αναφέρονται στην εκάστοτε μελέτη κάθε ερευνητή και στη συνέχεια παρουσιάζονται οι σημαντικότερες από αυτές κατά σειρά διατύπωσής τους.

Ο Κατσικάτσος (1971, 1977), παρουσιάζει τις απόψεις του για τη λιθοστρωματογραφική διάρθρωση της Αττικής – Ν. Ευβοίας, θεωρώντας ότι στην περιοχή των μεταμορφωμένων της Αττικής εμφανίζονται δύο ζώνες τύπου «Εσωτερικών Ελληνίδων». Την πρώτη από αυτές, τη σχετικά αυτόχθονη, ονομάζει «Ζώνη Αττικής» και αποτελείται στη βάση από το «μεταμορφωμένο σύστημα Αττικής» τριαδικό-ιουρασικής ηλικίας με παραμόρφωση και μεταμόρφωση στο Αν. Ιουρασικό. Το κομμάτι αυτό αντιστοιχεί στα κανονικά μεταμορφωμένα του Lepsius. Τη δεύτερη ζώνη την ονομάζει «Ζώνη Αλμυροποτάμου», εμφανίζεται σε Εύβοια και ΒΑ Αττική και βρίσκεται επωθημένη στην προηγούμενη σχετικά αυτόχθονη ζώνη, αποτελούμενη από εναλλαγές μαρμάρων και σχιστόλιθων με μετά-φλύσχη στην οροφή που επικάθεται σε Άνω-Τριαδικά μάρμαρα Αγίου Γεωργίου Ευβοίας.

Ο Clement (1982), στη διατριβή του για το χώρο της Αττικο-Βοιωτίας, ασχολείται με τους αμεταμόρφωτους σχηματισμούς της Πελαγονικής ενώ διακρίνει για την περιοχή της ΒΑ Αττικής τρεις ενότητες, τις οποίες ονομάζει «Ενότητα Εκάλης», «Ενότητα Πεντελικού» και «Ενότητα Μαραθώνα». Για την πρώτη ενότητα παρουσιάζει λιθοστρωματογραφική στήλη που αποτελείται από λεπτές εναλλαγές μαρμάρων και σχιστόλιθων με κύριες εμφανίσεις στο δυτικό και νότιο Πεντελικό και τη θεωρεί επωθημένη στη δεύτερη ενότητα. Η δεύτερη ενότητα αποτελείται από υποκείμενα μάρμαρα και υπερκείμενους σχιστόλιθους με ενδιστρώσεις μαρμάρων και εξαπλώνεται στο κεντρικό και ανατολικό Πεντελικό ενώ βόρεια περίπου μέχρι το ύψος του Μαραθώνα. Οι δύο προηγούμενες ενότητες βρίσκονται επωθημένες πάνω στην «Ενότητα Μαραθώνα». Η λιθοστρωματογραφική στήλη αποτελείται στη βάση από σχιστόλιθους, ακολουθούν τριαδικά μάρμαρα με καρστικά έγκοιλα πληρωμένα με μεταλλεύματα και τέλος ασύμφωνα Άνω-Κρητιδικά μάρμαρα με σχιστόλιθους στην κορυφή. Η ενότητα αυτή εμφανίζει χαρακτήρες αντίστοιχους με την Πελαγονική και εντάσσεται στις «Εσωτερικές Ελληνίδες».

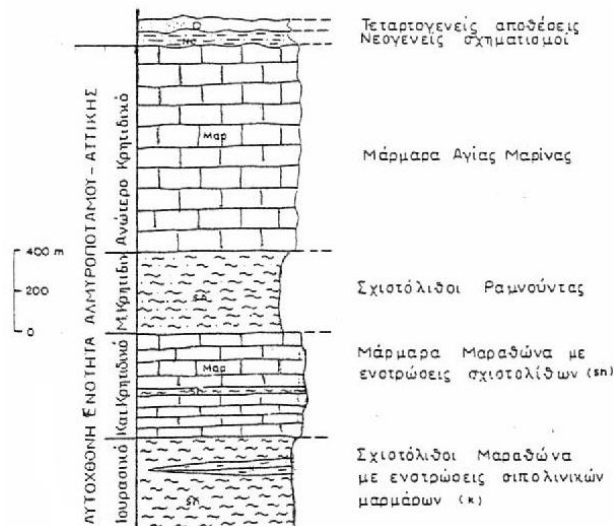
Ο Παπανικολάου (1984, 1986), στην περιοχή της Αττικής διακρίνει τρεις μεταμορφωμένες γεωτεκτονικές ενότητες, την ανώτερη που πρόκειται για την ενότητα «Ολύμπου-Αλμυροποτάμου-Κερατέας», η οποία εμφανίζεται στη ΒΑ Αττική με ομόλογες εμφανίσεις σε Όλυμπο, Εύβοια και Σάμο και εντάσσεται στις «Εξωτερικές Ελληνίδες», την «Ενότητα Αττικής» (σχετικά αυτόχθονο Πεντέλης-Υμηττού-Λαυρίου) παρουσιάζεται τεκτονικά υποκείμενη στην προηγούμενη και εντάσσεται στις «Εσωτερικές Ελληνίδες» και την αλλόχθονη «Ενότητα Λαυρίου» που υπέρκειται τεκτονικά της προηγούμενης και αποτελείται από το φυλλιτικό κάλυμμα Λαυρίου και τους σχηματισμούς του λεκανοπεδίου Αθηνών. Στην ουσία πρόκειται για ένα τεκτονικό μίγμα (melange) που περιλαμβάνει

διαφορετικού βαθμού μεταμόρφωσης και ηλικίας πετρώματα, του οποίου υπέρκειται Άνω Κρητιδικό ασβεστόλιθοι (ανθρακικά Λαυρίου και λόφοι λεκανοπεδίου Αττικής).

Ο Παπαδέας (1987, 1991), σε μια σειρά εργασιών παρουσιάζει τη στρωματογραφική διάρθρωση της ευρύτερης περιοχής της Αττικής. Η συνθετική στρωματογραφική στήλη που παραθέτει χαρακτηρίζεται από συνεχείς εναλλαγές οριζόντων μαρμάρων και σχιστόλιθων – γνευσίων, περιλαμβάνοντας μεταμορφωμένους σχηματισμούς με ηλικίες από το προ-Μέσο Λιθανθρακοφόρο μέχρι το Τριτογενές, που μεταβαίνουν πλευρικά στους μη μεταμορφωμένους σχηματισμούς της Πάρνηθας.

Οι Κατσικάτσος κ.α. (1986), ανασκευάζοντας τις παλαιότερες απόψεις του, σε μια εργασία για τις «Εσωτερικές Ελληνίδες», υποστηρίζουν πλέον ότι οι παλαιότερα ορισθείσες ζώνες «Αττικής» και «Αλμυροποτάμου», συνιστούν πλέον ομόλογες ενότητες τύπου «Εξωτερικών Ελληνίδων». Αποτελούν την νότια απόληξη των ενοτήτων Ολύμπου-Όσσας και Κρανιάς – Ελασσόνας βορειότερα (Κατσικάτσος et al, 1983). Την «αλλόχθονη» ενότητα της Αττικής τη θεωρούν πλέον αντίστοιχη με την ενότητα “Στείρων” στην Εύβοια. Οι ανωκρητιδικοί σχηματισμοί της Αττικής αναφέρεται ότι παρουσιάζουν σχέση βαθμιαίας εξέλιξης και όχι ασυμφωνίας όπως παρουσίαζε ο ερευνητής παλαιότερα.

Οι Κατσικάτσος κ.α. (1990), στους γεωλογικούς χάρτες του Ι.Γ.Μ.Ε. (φύλλα «Ραφήνα» και «Αλιβέρι») παρουσιάζουν τη λιθοστρωματογραφική διάρθρωση της ΒΑ Αττικής – Νοτίου Ευβοίας (Σχήμα 2.1).

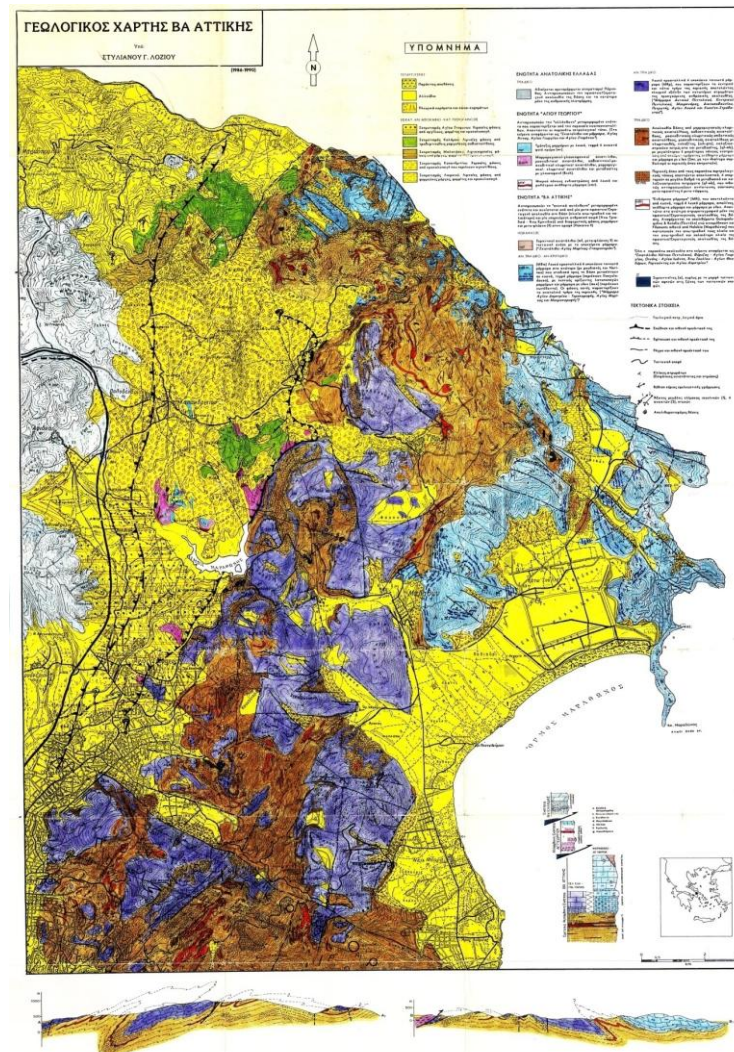


Σχήμα 2.1: Στρωματογραφική στήλη βορειοανατολικής Αττικής (Περιοχή βορειοδυτικού τμήματος του γεωλογικού φύλλου «Ραφήνα», κλίμακας 1:50 000. Κατά Γ. Κατσικάτσο).

Για τη ΒΑ Αττική δίνουν μια συνεχή στήλη 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-φλύσχη). Την ενότητα αυτή ονομάζουν «αυτόχθονη ενότητα Αλμυροποτάμου-Αττικής» και στην οποία υπόκεινται τεκτονικά οι ενότητες των κυανοσχιστολίθων και των αμεταμόρφωτων της Πελαγονικής.

Σύμφωνα με τον Λόζιο Σ. (1993) τρεις γεωλογικές ενότητες δομούν την περιοχή της ΒΑ Αττικής. Υπάρχουν δύο μεταμορφωμένες γεωτεκτονικές ενότητες, με διαφορετικά χαρακτηριστικά και από τις οποίες η μεν πρώτη που καταλαμβάνει και το μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής αντιπροσωπεύει τη σχετικά αυτόχθονη ενότητα της «ΒΑ Αττικής», με άγνωστο υπόβαθρο και η δεύτερη την αλλόχθονη ενότητα «Αγίου Γεωργίου», που εμφανίζεται σε πολύ μικρές υπολειμματικές εμφανίσεις και υπέρκειται τεκτονικά στην προηγούμενη. Τέλος, η τρίτη ενότητα που αποτελείται από τους αμεταμόρφωτους σχηματισμούς της Πάρνηθας, που είναι γνωστό ότι αντιπροσωπεύουν τμήματα της ενότητας της Ανατολικής Ελλάδας (Υποπελαγονική) και υπέρκειται και αυτοί με την σειρά τους τις δύο προηγούμενες μεταμορφωμένες ενότητες.



Σχήμα 2.2: Γεωλογικός χάρτης της περιοχής μελέτης με χαρακτηριστικές γεωλογικές τομές (Λόζιος, 1993).

2.2 Γεωλογία της περιοχής μελέτης

Η περιοχή μελέτης είναι ο χώρος της λεκάνης του Μαραθώνα, στο σχηματισμό και την εξέλιξη του οποίου έχει διαδραματίσει σημαντικό ρόλο και ο ποταμός Χάραδρος (ή Οινόης), που έχει συνολικό μήκος κοίτης 31 km και έχει διαμορφώσει μια λεκάνη απορροής έκτασης 177,2 km², η οποία οριοθετείται δυτικά από τον ορεινό όγκο της Πάρνηθας και νότια από το Πεντελικό όρος. Στο νότιο και ανατολικό τμήμα της λεκάνης απορροής του Οινόη ποταμού εμφανίζονται οι σχηματισμοί της «αυτόχθονης ενότητας Αλμυροπόταμου – Αττικής». Πρόκειται για μια ενότητα που παλαιογραφικά ανήκει στο χώρο της πλατφόρμας Γαβρόβου – Τρίπολης και εμφανίζεται στο χώρο των Εσωτερικών Ελληνίδων με τη μορφή τεκτονικών παραθύρων (Λόζιος 1993). Οι γεωλογικές ενότητες που συναντώνται είναι οι ακόλουθες (Παυλόπουλος et al., 2002):

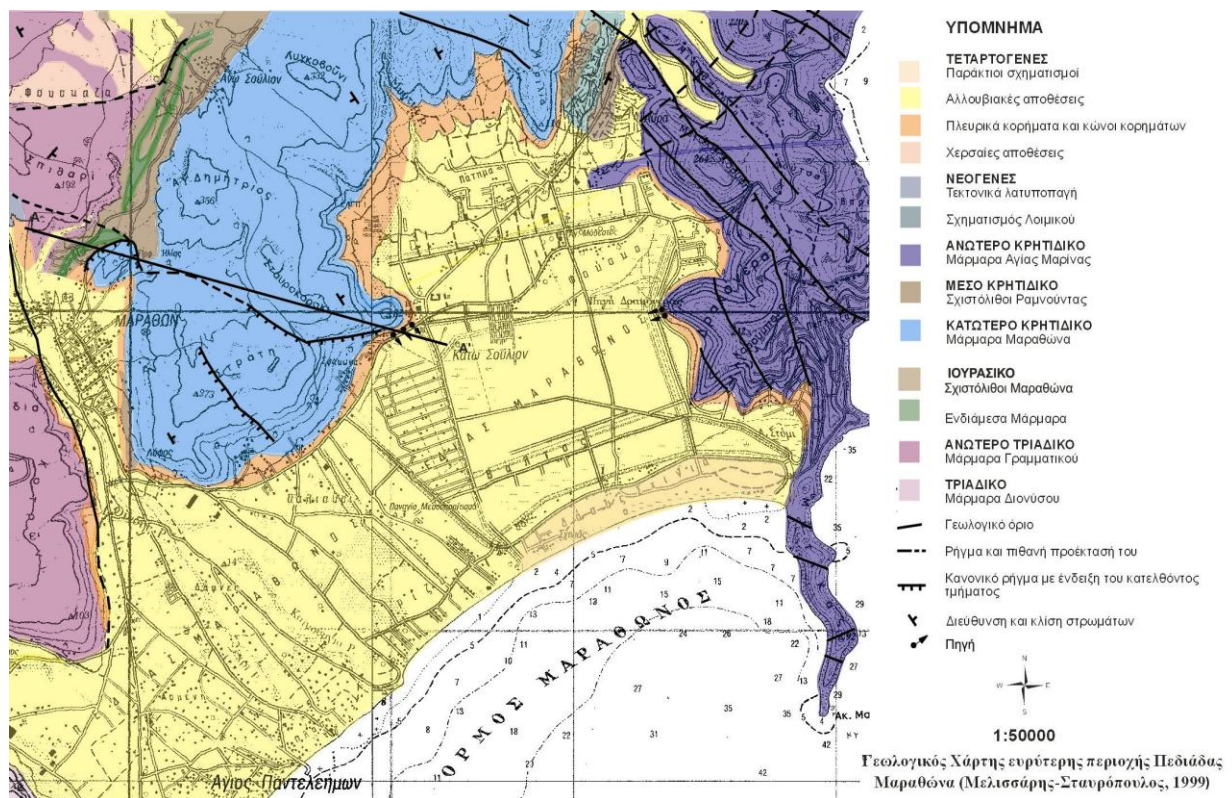
Ενότητα Αλμυροπόταμου. Υποκείμενη αυτόχθονη ενότητα είναι αυτή του Αλμυροπόταμου που εμφανίζεται στο χώρο των Εσωτερικών Ελληνίδων με μορφή τεκτονικών παραθύρων. Η στρωματογραφική κολώνα της ενότητας αυτής, αποτελείται από Μεσοζωικά έως Ηωκαινικά (Λουτήσιο) μάρμαρα μεγάλου πάχους και σχηματισμούς μεταφλύσχη καθώς και από μεταμορφωμένους κάτω - μέσοτριάδικούς (ίσως και νεοπαλαιοζωικούς) σχηματισμούς υποβάθρου. Πετρογραφικά παρουσιάζονται μοσχοβιτικοί, επιδοτικοί, χλωριτικοί, χαλαζιακοί και ανθρακικοί σχιστόλιθοι, με επιδοτικούς αμφιβολίτες και ενδιστρώσεις μαρμάρων. Στο ανώτερο τμήμα τους παρεμβάλλονται βασικά μεταεκριξιγενή πετρώματα και μικρές μάζες σερπεντινιτών. Η πιθανή ηλικία του ανώτερου τουλάχιστον τμήματος των σχηματισμών είναι Κάτω - Μέσο Τριαδική (Λόζιος 1993). Στη συνέχεια παρουσιάζεται μια στρωματογραφική ασυμφωνία που λείπει ολόκληρο το Ιουρασικό και το κάτω Κρητιδικό και υπέρκειται των σχιστολίθων, μάρμαρα μεσοστρωματώδη με ενδιστρώσεις πυριτολίθων και συχνές παρεμβολές δολομιτών και δολομιτικών ασβεστολίθων Μεσοζωικής έως και μέσο Ηωκαινικής ηλικίας.

Μεταξύ της Πελαγονικής ενότητας και της αυτόχθονης ενότητας της Αλμυροπόταμου βρίσκονται δύο ενότητες, η ενότητα των Αφιδνών – Τουρκοβουνίων και του Νεοελληνικού Τεκτονικού καλύμματος. Οι σχηματισμοί των Αφιδνών είναι αμεταμόρφωτοι και έχουν περιγραφεί από τον Κτενά (1930) στην ονομασθείσα απ' αυτόν «Ζώνη Βερόρο - Σπάτι». Αργότερα ο Κατσιάτσος (1977) διέσπασε την ενότητα αυτή στην ενότητα Κοκκινόβραχου (υπερκείμενη) και στην ενότητα Κοτρώνι, οι οποίες βρίσκονται σε τεκτονική επαφή μεταξύ τους. Η ενότητα Κοκκινόβραχου αποτελεί την ενότητα Αφιδνών και η ενότητα Κοτρώνι αντιστοιχεί στο Νεοελληνικό Τεκτονικό Κάλυμμα.

Η ενότητα Νεοελληνικού Τεκτονικού Καλύμματος. Οι σχηματισμοί της «ενότητας του Νεοελληνικού τεκτονικού καλύμματος» είναι μεταμορφωμένοι και συναντώνται κυρίως στις περιοχές της λίμνης του Μαραθώνα, Βαρνάβα, και Αγίου Στεφάνου σε μικρές εμφανίσεις διότι ο κύριος όγκος τους καλύπτεται από μεταλλικά ιζήματα. και είναι επωθημένοι στους μεταμορφωμένους σχηματισμούς της αυτόχθονης ενότητας Αλμυροπόταμου (Katsikatsos, 1976). Οι σχηματισμοί αυτοί εμφανίζουν ορισμένες μικροδιαφορές από περιοχή σε περιοχή. Στην περιοχή της λίμνης του Μαραθώνα συνίστανται από εναλλασσόμενους γλαυκοφανιτικούς, μοσχοβιτικούς, ασβεστιτικούς, επιδοτικούς και χλωριτικούς σχιστόλιθους με ενδιστρώσεις και φακούς μαρμάρων ποικίλου χρώματος, λέπτο - έως παχυστρωματώδη με κονδύλους πυριτολίθων που κατά θέσεις μεταπίπτουν σε

σιπολινομάρμαρα. Κατά θέσεις επίσης εμφανίζονται σχιστοποιημένα βασικά ηφαιστειακά και μικροί όγκοι σερπεντινιτών. Στην περιοχή του Βαρνάβα αποτελούνται από σχιστόλιθους με πολλές ενδαστρώσεις λεπτοστρωματωδών μαρμάρων και σιπολινομαρμάρων. Στην περιοχή του Αγίου Στεφάνου, η ενότητα αυτή αντιπροσωπεύεται από μια μικρή εμφάνιση κρυσταλλικών ασβεστόλιθων.

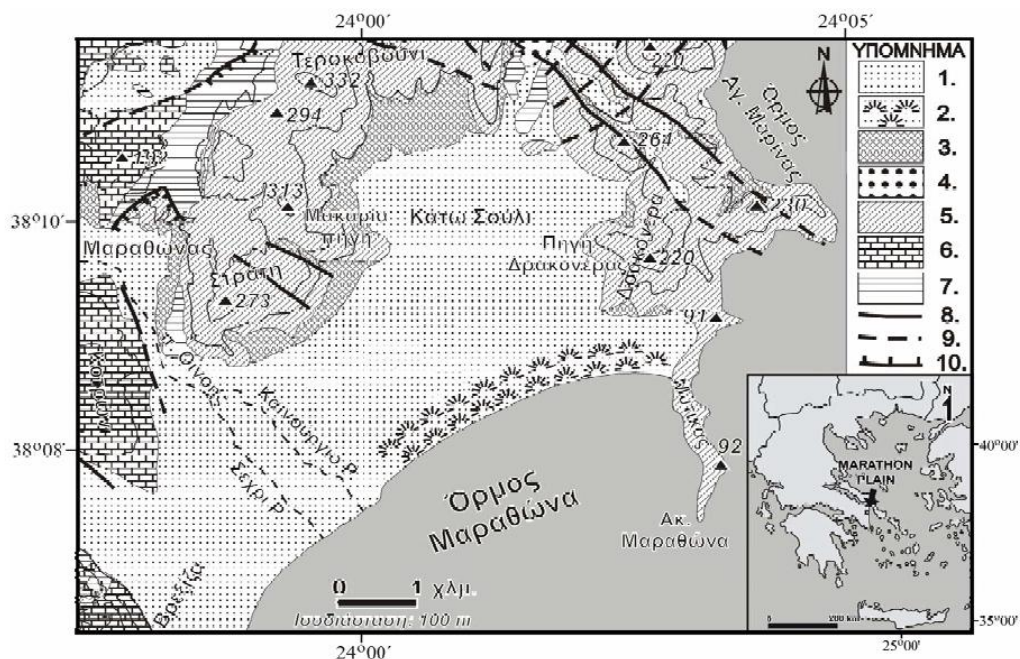
Ενότητα Αφιδών - Τουρκοβουνίων. Οι σχηματισμοί της «ενότητας Αφιδών - Τουρκοβουνίων» καταλαμβάνουν την περιοχή Αφιδών (Κιούρκα) και είναι μια σειρά μη μεταμορφωμένων φλυσχοειδών σχηματισμών, που αποτελούνται από ψαμίτες, αργιλικούς σχιστόλιθους και ψηφιδοπαγή με ενστρώσεις κρυσταλλικών ασβεστόλιθων. Η ηλικία τους είναι Άνω Κρητιδικό – Παλαιόκαινο και είναι επωθημένοι στους σχηματισμούς του «Νεοελληνικού τεκτονικού καλύμματος».



Σχήμα 2.3: Χάρτης ευρύτερης περιοχής Πεδιάδας Μαραθώνα (Μελισσάρης, Σταυρόπουλος, 1999).

Ενότητα Μαυρηνόρας - Κατσιμιδίου. Στην περιοχή του γεωλογικού χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε (Φύλλο Κηφισιάς) η Πελαγονική ζώνη αντιπροσωπεύεται από δυο τεκτονικές ενότητες, αυτή της Σφενδάλης και αυτή της Μαυρηνόρας - Κατσιμιδίου. Η ενότητα της Σφενδάλης δεν εντοπίζεται εντός της λεκάνης του Οινόη ποταμού. Η ενότητα Κατσιμιδίου καταλαμβάνει μεγάλη έκταση και είναι επωθημένη πάνω στην ενότητα Αφιδών - Τουρκοβουνίου. Περιλαμβάνει φλύσχη Αν.Μαιστριχτίου – Παλαιόκαινου που αποτελείται από εναλασσόμενα στρώματα αργιλικών σχιστολίθων και ψαμιτών, μεσόκοκκων έως

χονδρόκοκκων υποπράσινου χρώματος με παρεμβολές λατυποπαγών ασβεστολίθων. Υποκείμενο βρίσκεται ένα στρώμα ανωκρητιδικών νηρητικών ασβεστολίθων (Κενομάνιο - Μαιστρίχτιο) με πάχος από λίγα έως μερικές δεκάδες μέτρα. Δεν εμφανίζονται σε όλη την περιοχή λόγω της ανωκρητιδικής διάβρωσης που έχουν υποστεί πριν την απόθεση του φλύσχη. Το μέσο Τριαδικό - Κ.Ιουρασικό αντιπροσωπεύεται από τους νηρητικούς ασβεστολίθους Μαυρηνόρας - Μπελετσίου οι οποίοι είναι ανοικτότεφροι / σκουρότεφροι και κατά θέσεις ροδόχρωμοι ή υποκίτρινοι λόγω αγγερίτιωσης, μέσο - έως παχυστρωματώδεις κατάθέσεις άστρωτοι, ωλιθικοί και έντονα καρστικοποιημένοι. Εντοπίζονται με παρεμβολές δολομιτών και δολομιτικών ασβεστολίθων. Κατώτερος σχηματισμός αυτής της ενότητας είναι μια σειρά εναλλασσόμενων αργιλοψαμμιτικών πετρωμάτων με ενδιαστρώσεις ασβεστολίθων με ηλικία Λιθανθρακοφόρο -Μ.Τριαδικό.



Σχήμα 2.4: Γεωλογικός χάρτης της περιοχής του Μαραθώνα (τροποποιημένος από Λόζιο, 1993; τα τεκτονικά στοιχεία από Botachtel and Papadeas, 1968; Καρκάνας και συνεργάτες, 2000). ΥΠΟΜΝΗΜΑ: 1. Αλλουβιακές αποθέσεις (Ολόκαινο), 2. Παράκτιες αμμόδεις θίνες (Ολόκαινο), 3. Κορήματα και κώνοι κορημάτων (Τεταρτογενές), 4. Λιμναίες αποθέσεις που αποτελούνται από μάργες, ψαμμίτες και κροκαλοπαγή (Α. Μειόκαινο-Κ. Πλειόκαινο), 5. Μάρμαρα (Α. Τριαδικό-Α. Κρητιδικό), 6. Λευκά κρυσταλλικά μάρμαρα (Α. Τριαδικό). 7. Σχιστόλιθοι (κυρίως μαρμαρυγιακοί και χλωριτικοί) με χαλαζιοαστριούχα πετρώματα και μεταβασίτες, 8. Ρήγμα ορατό, 9. Ρήγμα πιθανό, 10. Επώθηση.

Αποτελείται από δύο τμήματα. Το Ανώτερο Κάτω - Μ. Τριαδικής ηλικίας αποτελείται από εναλλασσόμενα αργιλοψαμμιτικά πετρώματα (σερικιτικοί ψαμμίτες, γραουβάκες, φυλλίτες, κροκαλοπαγή), βασικά ηφαιστειακά από υποθαλάσσιες εκχύσεις μάγματος που έλαβαν χώρα κατά το Λαδίνιο και ενδιαστρώσεις ασβεστολίθων με μικρό βαθμό μεταμόρφωσης. Το κατώτερο τμήμα αποτελείται από εναλλασσόμενους αργιλικούς, χλωριτικούς και

αρκοζικούς σχιστολίθους υποπράσινου χρώματος, φυλλίτες, ψαμμίτες και γραουβάκες με παρεμβολές κροκαλολατυποπαγών.

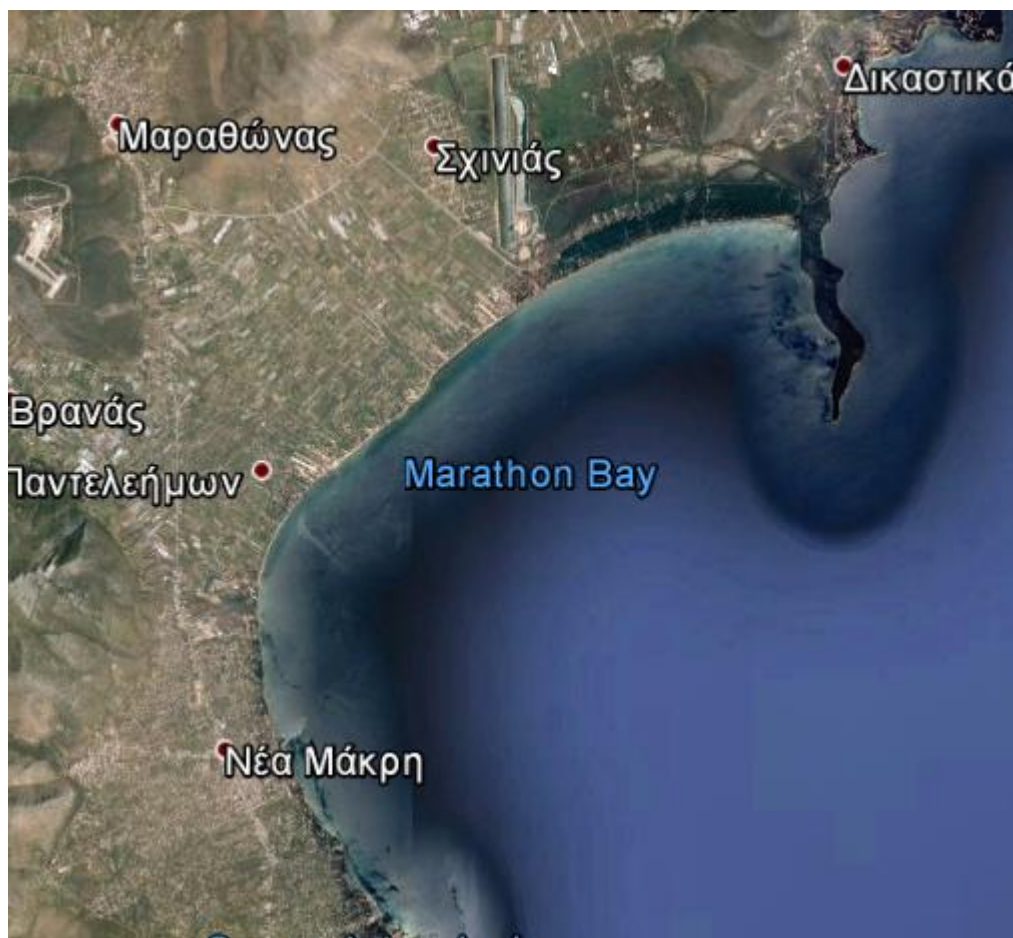
Μεταλτικοί σχηματισμοί. Οι μεταλτικοί σχηματισμοί που καλύπτουν την περιοχή διακρίνονται σε Νεογενείς και Τεταρτογενείς σχηματισμούς.

Οι Νεογενείς σχηματισμοί διακρίνονται στους Ανδρομερείς ποταμολιμναίους σχηματισμούς της Πάρνηθας και του Πεντελικού, ηλικίας Άνω Μειοκαίνου και στα κροκαλολατυποπαγή Καπανδριτίου, Άνω Μειοκαινικής ηλικίας. Οι πρώτοι σχηματισμοί, αποτελούνται από λατυποπαγή και κροκαλοπαγή και βρίσκονται στις παρυφές των ορεινών όγκων της Πάρνηθας και του Πεντελικού. Με την απομάκρυνση από τους όγκους αυτούς, οι αποθέσεις αυτές εναλλάσσονται με λεπτομερέστερα υλικά. Επίσης σε ορισμένες θέσεις παρεμβάλλονται ενδιαστρώσεις μαργαϊκών – τραβερτινοειδών ασβεστολίθων. Οι δεύτεροι σχηματισμοί είναι μικρής συνεκτικότητας και πρόκειται για ποταμολιμναίες αποθέσεις, άστρωτες ή με ασαφή στρώση. Οι διαστάσεις των περιεχόμενων κροκαλών και λατυπών ποικίλει από πολύ μικρά μεγέθη μέχρι ογκόλιθους. Όπως και στους αδρομερείς ποταμολιμναίους σχηματισμούς της Πάρνηθας και του Πεντελικού, έτσι και τα κροκαλολατυποπαγή Καπανδριτίου, κατά θέσεις παρουσιάζουν παρεμβολές ενδιαστρώσεων μαργαϊκών – τραβερτινοειδών ασβεστολίθων. Επίσης εντοπίζονται υλικά χειμάρριων αναβαθμίδων μικρού πάχους, ασύνδετα υλικά όπως άμμοι και κροκαλολατύπες στις κοίτες των χειμάρρων και παράκτιοι σχηματισμοί με άμμους και κροκάλες και συνεκτικούς ψαμμίτες (beachrocks). Επίσης εντοπίζονται πλευρικά κορήματα και κώνοι κορημάτων με ασύνδετα αδρομερή υλικά.

Οι Τεταρτογενείς αποθέσεις διακρίνονται σε Πλειστοκαινικής ηλικίας συνεκτικά πλευρικά κορήματα και κώνους κορημάτων, ασύνδετα Ολοκαινικά κορήματα, που αποτελούνται συνήθως από γωνιώδη και αδρομερή υλικά, λεπτομερείς προσχωματικές αποθέσεις Πλειστοκαινικής ηλικίας καστανέρυθρου χρώματος με διάσπαρτες κροκάλες, που συχνά αποτελούν υλικά πατάμιων αναβαθμίδων και Ολοκαινικής ηλικίας, χαλαρές ποταμοχειμάρριες αποθέσεις από άμμους, κροκάλες και λατύπες που εμφανίζονται κατά μήκος των πατάμιων κοιτών.

2.3 Γεωλογία Περιοχής όρμου Μαραθώνα

Ο παράκτιος χώρος του Όρμου Μαραθώνα (Σχήμα 2.5) αποτελείται από Τεταρτογενείς αποθέσεις (περιοχή έλους Μαραθώνα, δελταϊκούς σχηματισμούς, πεδία θινών), οι οποίες προς Βορρά περικλείονται από τα κάτω-Κρητιδικά Μάρμαρα του Μαραθώνα και Ανατολικά από τα άνω-Κρητιδικά μάρμαρα Αγίας Μαρίνας, που ανήκουν στην σχετικά αυτόχθονη ενότητα Αλμυροποτάμου. Επίσης, στην περιοχή του έλους του Σχοιριά, όπου έχει δεχθεί λεπτόκοκκα ιζήματα σχηματίζοντας μια ακολουθία στρωμάτων, αλλά και στο χώρο της λεκάνης εκσκαφής του Ολυμπιακού Κωπηλατοδρομίου διακρίνονται πέντε στρώματα (Μαργώνη et al., 2002).



Σχήμα 2.5: Περιοχή που βρίσκεται ο όρμος Μαραθώνα (πηγή: google earth).

Στρώμα Α: Το κορυφαίο και επιφανειακό στρώμα με πάχος από 0.7 m έως 1.5 m. Παρατηρείται αύξηση προς το εσωτερικό τμήμα του έλους. Πρόκειται για στρώμα τεφρόμαυρης ιλύος – αργίλου και με σημαντική ποσότητα φυτικού οργανικού υλικού. Περιέχει πολλά κελύφη μαλακίων γλυκέων υδάτων, τα οποία ευδοκιμούν σε γλυκό νερό πλούσιο σε ανθρακικό ασβέστιο (*Theodoxus*, *Bithynia*, *Lymnaea*, *Planorbis*), καθώς επίσης και ωγόνια χαροφύτων, με κατά θέσεις παρουσία περιαιβεστομένων φυτικών

λειψάνων. Τα δεδομένα αυτά οδηγούν στο συμπέρασμα πως το παλαιοπεριβάλλον στο οποίο έγινε η απόθεση των υλικών του στρώματος A ήταν έλος με γλυκό νερό, πλούσιο σε ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3) εν διαλύσει και με υδροχαρή βλάστηση. Η διατήρηση του έλους αυτού, καθώς επίσης και η περιεκτικότητα του νερού σε CaCO_3 (μαλάκια που ευδοκιμούν σε γλυκό νερό με αυξημένο ποσοστό CaCO_3) δείχνουν τροφοδοσία του από νερό καρστικών πηγών της ανάντη περιοχής. Δεν αποκλείεται το έλος αυτό να επηρεάζονταν τοπικά και για σύντομα χρονικά διαστήματα από εισβολές θαλασσινού νερού, όπως δείχνει η σποραδική παρουσία ελάχιστων μαλακίων υφάλμυρων (*Hydrobia*, *Phytia*) και θαλασσίων υδάτων (*Cerastoderma*, *Abra*). Η έκταση του έλους αυτού ήταν μεγάλη και φαίνεται πως κάλυπτε τις βόρειες και δυτικές παρυφές του σημερινού έλους, μέχρι το βορειότερο όριο του χώρου κατασκευής του Ολυμπιακού Κωπηλατοδρομίου.

Στρώμα Β: Είναι υποκείμενο του Στρώματος Α, με ασαφή οριακή επιφάνεια. Παρουσιάζεται με πάχος από 0.75 m στα Νότια και Βόρεια, μέχρι 2.35 m στα κεντρικά του έλους. Σε ορισμένα σημεία των στρωματογραφικών τομών φαίνεται πως αποσφηνώνεται. Πρόκειται για ανοιχτόχρωμο καστανότεφρο λεπτόκοκκο υλικό αργίλου και ιλυοαργίλου με πρισματικό αποχωρισμό. Περιέχει ελάχιστα διάσπαρτα κελύφη μαλακίων υφάλμυρου και γλυκού νερού, κελύφη οστρακωδών, αρκετά ασβεστιτικά και λειμωνιτικά συγκρίματα, περιασβεστωμένα φυτικά λείψανα, ωογόνια χαροφύτων και κατά θέσεις σημαντικά ποσοστά κρυστάλλων γύψων υπό μορφή *desert rose*. Το στρώμα αυτό στερείται εσωτερικής δομής, σε στρώσεις και δείχνει ένα μαζώδη χαρακτήρα. Τα στοιχεία που αναφέρθηκαν για το στρώμα 2 ενισχύουν την άποψη πως το παλαιοπεριβάλλον σχηματισμού του και απόθεσης του υλικού αντιστοιχεί σε ένα εκτεταμένο έλος, με έντονη εξάτμιση και απόθεση γύψου κατά θέσεις (εβαποριτική διαδικασία). Το έλος αυτό προς το εσωτερικό – βόρειο τομέα του φαίνεται να είχε τροφοδοσία σε γλυκό καρστικό νερό, όπως δείχνουν τα ωογόνια χαροφύτων και τα περιασβεστομένα λείψανα φυτών που περιέχονται στα λεπτόκοκκα υλικά του. Το στρώμα αυτό δε φαίνεται να φτάνει στο βορειότερο άκρο του χώρου, τουλάχιστον με τους ίδιους χαρακτήρες. Πιθανώς να εμπλουτίζεται με περισσότερα κλαστικά υλικά και να αντιστοιχεί σε στρώμα καστανής έως τεφροκίτρινης ιλυοαργιλούχου άμμου.

Στρώμα Γ: Είναι υποκείμενο του Στρώματος Β, με ασαφή οριακή επιφάνεια. Στο νότιο άκρο του χώρου εκσκαφής (του κωπηλατοδρομίου) εμφανίζεται η οροφή του, ενώ προς τα κεντρικά και βόρεια αποκαλύπτεται ολόκληρο σε σημαντική έκταση. Το πάχος του, παρότι δεν είναι ορατό στο νότιο άκρο, φαίνεται να υπερβαίνει τα 2.0 m, ενώ στον κεντρικό τομέα της εκσκαφής υπερβαίνει τα 3.0 m. προς τα βόρεια ελαττώνεται με τάσεις αποσφηνωσης. Είναι βέβαιο πως το στρώμα αυτό δεν απαντά στο βορειότατο άκρο του χώρου εκσκαφής. Αποτελείται από τεφροπράσινο αργιλικό υλικό πλούσιο σε κελύφη μαλακίων, οστρακώδη, περιασβεστωμένα φυτικά λείψανα και χαρόφυτα. Στο νότιο τμήμα περιέχει κλαστικούς κόκκους αργίλου και ιλύος στη μάζα του, ενώ προς τα κεντρικά και βόρεια ολόκληρο το υλικό είναι χημικό και βιογενές (μη κλαστικό). Περιέχει άφθονα κελύφη θαλάσσιων ευρύαλων ειδών, όπως *Cerastoderma* και *Abra*, καθώς επίσης και υφάλμυρων ειδών μαλακίων, όπως *Hydrobia*. Μόνο τοπικά συναντώνται κελύφη μαλακίων των γλυκών υδάτων, όπως *Bithynia*, *Lymnaea*, *Planorbis*. Το παλαιοπεριβάλλον απόθεσης του υλικού του στρώματος 3 ήταν λιμνοθάλασσιο. Ίσως μια ρηχή εκτεταμένη παράκτια λιμνοθάλασσα, η οποία επικοινωνούσε συχνά με τη θάλασσα μέσω διαύλων στο χώρο

του αμμώδους φράγματος (λουρονησίδας / ζώνη θινών Σχινιά) ή των ορίων του. Μέσα στο χώρο της ρηχής λιμνοθάλασσας κατά θέσεις, η τροφοδοσία σε γλυκό νερό από την πλευρά της χέρσου δημιούργησε μικροπεριβάλλοντα έλους. Εκεί επικρατούσε η υδροχαρής βλάστηση και κατά σύντομες περιόδους το γλυκό νερό.

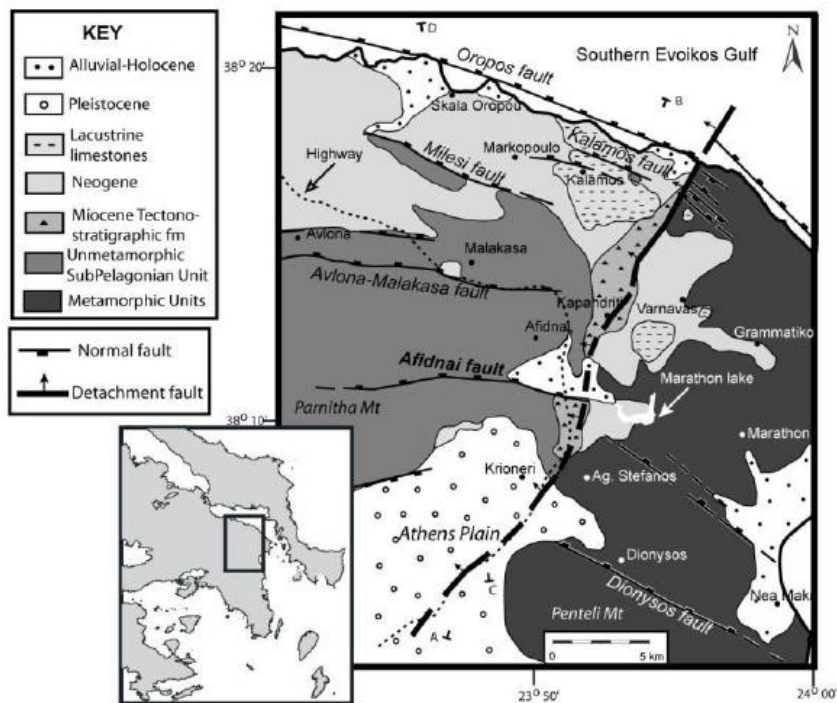
Στρώμα Δ: Πρόκειται για ένα στρώμα τύρφης, πάχους περίπου 0.30 m στο κεντρικό τμήμα και μικρότερου πάχους προς τα νότια. Προς τα βόρεια διατηρεί το πάχος του και έχει τάσεις σχηματισμού εναλλασσόμενων λεπτών στρώσεων τύρφης μέσα στο Στρώμα Ε που το φιλοξενεί. Η τύρφη αποτελείται από υπολείμματα υδροχαρούς βλάστησης και περιέχει κυρίως κελύφη μαλακίων γλυκού νερού, όπως *Bithynia*, *Lymnaea* και *Planorbis*. Ο σχηματισμός της τύρφης απαιτεί ένα τελματικό – τεναγώδες παλαιοπεριβάλλον απόθεσης, στο οποίο η στασιμότητα του νερού το οδηγεί σε έλλειψη οξυγόνου, η δε μεγάλη ανάπτυξη υδροχαρούς βλάστησης προσφέρει το πρωτογενές οργανικό υλικό. Δεν είναι γνωστή η έκταση του στρώματος της τύρφης, εκτιμάται πως είχε σημαντική εξάπλωση στο κεντρικό και βόρειο τμήμα του έλους. Λεπτές στρώσεις τύρφης παρατηρούνται σε όλα τα στρώματα τα οποία έχουν σχηματιστεί σε περιβάλλον έλους, όπως είναι τα Α και Β, καθώς και το υποκείμενο στρώμα Ε.

Στρώμα Ε: Πρόκειται για το κατώτερο στρώμα που ήταν προσιτό στην παρατήρηση στη βάση των скаμμάτων. Άρχισε να φαίνεται στη βάση του 4ου σκάμματος και προς τα βόρεια έχει πλήρη ανάπτυξη. Το ορατό πάχος του στρώματος αυτού είναι περίπου 0.50-0.60 m, αλλά πρέπει να έχει πολύ μεγαλύτερο πάχος προς τα βαθύτερα. Αποτελείται από χαρακτηριστική λευκοκίτρινη – λευκότεφρη ανθρακική (ποσοστό μεγαλύτερο του 95% σε CaCO_3) «ιλουόχο άμμο», λίγο συνεκτική και πορώδη. Περιέχει αρκετά κελύφη μαλακίων γλυκών υδάτων (*Bithynia*, *Lymnaea*, *Planorbis*), αλλά και λίγα θαλάσσια ευρύαλα (*Cerastoderma*, *Abra*). Περιέχει ακόμα πολλά οστακώδη και χαρόφυτα, καθώς επίσης και φυτικά λείψανα. Η απόθεση των υλικών του στρώματος Ε πρέπει να έγινε σε υδάτινο περιβάλλον, πλούσιο σε CaCO_3 , με έντονη φυσικοχημική και βιογενή δραστηριότητα, η οποία δημιούργησε λεπτόκοκκο χημικό – βιογενές υλικό. Τα περιασβεστομένα φυτικά λείψανα, τα χαρόφυτα και τα κελύφη μαλακίων του γλυκού νερού μέσα στο στρώμα Ε έχουν αποθεθεί σε ένα περιβάλλον γλυκού νερού με μεγάλη περιεκτικότητα σε CaCO_3 . Οι καρστικές πηγές της ανάντη λεκάνης ίσως τροφοδοτούσαν το έλος με σημαντικούς όγκους νερού. Φυσικά προβληματίζει η έστω και περιορισμένη παρουσία των θαλάσσιων οργανισμών (*Cerastoderma*, *Abra*), η οποία πιθανώς προέκυψε λόγω περιοδικών εισβολών θαλασσινού νερού στο χώρο του έλους. Ίσως η έρευνα στα βαθύτερα αποκαλύψει τί πραγματικά συνέβαινε κατά την περίοδο σχηματισμού του στρώματος Ε. Το στρώμα 5 δε φαίνεται να επεκτείνεται μέχρι το βορειότερο άκρο του χώρου κατασκευής του Ολυμπιακού Κωπηλατοδρομίου.

2.4 Τεκτονική και νεοτεκτονική

Το βόρειο περιθώριο της περιοχής, αναπτύσσεται παράλληλα με τη ΒΔ-ΝΑ διεύθυνση παραλιακή ζώνη του νότιου Ευβοϊκού και εκτείνεται από την Αγία Μαρίνα μέχρι τους Αγίους Αποστόλους. Αντιπροσωπεύει το πιο ενεργό από νεοτεκτονική άποψη τμήμα και χαρακτηρίζεται από την παρουσία μεγάλων ρηξιγενών ζωνών. Οι ζώνες αυτές έχουν ΒΔ-ΝΑ διεύθυνση και διατάσσονται κλιμακωτά δημιουργώντας το βύθισμα και τις απότομες ακτές του νότιου Ευβοϊκού, μέσα από μια απότομη μορφολογική ζώνη, όπου από το υψόμετρο των 650 m περίπου μεταπίπτουν απότομα στο επίπεδο της θάλασσας. Η ζώνη αυτή αποτελεί συνέχεια των ρηξιγενών ζωνών Μαλακάσας – Ωρωπού και Αγίων Αποστόλων που αναπτύσσονται δυτικότερα.

Η νεοτεκτονική δομή της μεγάλης κλίμακας της ευρύτερης περιοχής σχετίζεται με τη διάκριση των μεταλπικών αποθέσεων από το αλπικό υπόβαθρο και τα μεγάλα ενεργά ρήγματα, των οποίων το μήκος ξεπερνά τα επτά με οχτώ χιλιόμετρα, και επομένως το σεισμικό τους δυναμικό ξεπερνά το μέγεθος 5. Η γενική διάταξη των ρηγμάτων στην περιοχή της Δυτικής Αττικής, στην περιοχή του Κορινθιακού Κόλπου όπου εντάσσονται και τα ρήγματα που ενεργοποιήθηκαν κατά τους σεισμούς του 1981, μεγέθους 6.5 έως 7, έχουν διεύθυνση ΑΒΑ – ΔΝΔ, τα οποία στο χώρο της Πάρνηθας περνάνε σε διεύθυνση Α-Δ και προς τα ανατολικά προς το Νότιο Ευβοϊκό Κόλπο η διεύθυνσή τους γίνεται ΒΔ – ΝΑ (Λόζιος, 1993).



Σχήμα 2.6: Γεωλογικός χάρτης Βόρειας Αττικής (Papanikolaou D. and Papanikolaou I., 2007).

Η περιοχή χαρακτηρίζεται από μεγάλες ρηξιγενείς ζώνες έχουν διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ και διατάσσονται παράλληλα με τη γραμμή του νότιου Ευβοϊκού, η κλίση των ρηξιγενών επιφανειών παρουσιάζει συνήθως φορά προς τα ΒΑ δημιουργώντας μια σταδιακή κλιμακωτή καταβύθιση προς τα ΒΑ, δηλαδή προς την πλευρά του νότιου Ευβοϊκού κόλπου. Τα μικρότερα ρήγματα, είτε της ίδιας διεύθυνσης, είτε ΒΑ-ΝΔ, αναπτύσσονται ανάμεσα στις μεγαλύτερες ζώνες τεμαχίζοντας την περιοχή σε ακόμη μικρότερα ρηξιτεμάχη. Τα υδρογραφικά δίκτυα των επιμέρους λεκανών χαρακτηρίζονται από ασύμμετρη ανάπτυξη των κλάδων τους, από απότομες αλλαγές στη διεύθυνσή τους, από επιλεγμένες κατευθύνσεις σε ορισμένες διευθύνσεις, από υπέρμετρη ανάπτυξη συγκεκριμένων κλάδων και συμβολή σε συγκεκριμένα σημεία ή ζώνες περισσότερων παραποτάμων. Η έντονη κατά βάθος διάβρωση αναπτύσσεται συνήθως στις απότομες κλιτύες προς την απότομη πλευρά του ανερχόμενου ρηξιτεμάχους, με ανάπτυξη εγκάρσια προς τις ρηξιγενείς ζώνες και τις μορφολογικές ασυνέχειες. Οι επιφάνειες επιπέδωσης με κλίση συνήθως προς τα ΝΔ και σπανιότερα προς τα ΒΔ, παρουσιάζουν μία σταδιακή μείωση του υψομέτρου τους, προς τη πλευρά του Ευβοϊκού, φανερώνοντας έτσι την κλιμακωτή καταβύθιση (Λόζιος 1993).

Σύμφωνα με όσα έχουν αναφερθεί είναι πολύ σημαντικό ότι τα ρήγματα και οι ρηξιγενείς ζώνες με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ αντιπροσωπεύουν τόσο παλαιές τεκτονικές δομές, που συνδέονται με τα τελευταία στάδια της πτυχογόνου μεταμορφικής φάσης, όσο και τις νεότερες σύγχρονες δομές, που συνεχίζουν επαναδραστηριοποιούμενες σε τοπική βέβαια κλίμακα, να λειτουργούν μέχρι σήμερα (νότιο περιθώριο Ευβοϊκού), οριοθετώντας έτσι τόσο παλαιά Μέσο-Άνω Μειοκαινικά ιζήματα, όσο και πολύ νεότερα σύγχρονα ιζήματα.

Μικρότερης κλίμακας ρηξιγενείς ζώνες παρουσιάζουν διάφορες διευθύνσεις, όπως Β-Ν (Αγγιλίκι - Παλαιό Μοναστήρι), Α-Δ (Αγγιλίκι – Άγιος Λουκάς) αλλά και ΒΑ-ΝΔ (περιοχή ανάμεσα Γραμματικό και όρμο Μαραθώνα) και εντοπίζονται κυρίως από τις έντονες μορφολογικές ασυνέχειες και τα πλευρικά κορήματα που αναπτύσσονται παράλληλα με αυτές.

Στην περιοχή της Κοκκίνης και του Στραβαετού η έντονη εφελκυστική γράμμωση χαρακτηρίζει τα μάρμαρα και παρατηρούνται μεγάλες συγκεντρώσεις από δευτερογενή υδροθερμικά κοιτάσματα σιδήρου τα οποία γεμίζουν διάκενα παράλληλα με τα ρήγματα και τις ασυνέχειες. Τα κοιτάσματα αυτά στο παρελθόν έτυχαν έντονης εκμετάλλευσης στην περιοχή του Γραμματικού. Η νότια μάζα των μαρμάρων που αντιπροσωπεύεται από τους μικρούς λόφους Σπίθαρι, Κοκκίνη, Παλαιό Μοναστήρι και Πετρώματα, επικάθεται αμφιθεατρικά στο σχηματισμό των σχιστόλιθων (Φωτόπουλος, 2004).

3. Στοιχεία Επιφανειακής Υδρολογίας

3.1 Φράγματα

Με τον όρο «Φράγματα» εννοείται κάθε μόνιμη ή προσωρινή ανάσχεση της επιφανειακής απορροής. Τα φράγματα αποτελούν τα μεγαλύτερα υδραυλικά έργα του ανθρώπου που διακόπτουν φαινομενικά τον φυσικό υδρολογικό κύκλο. Κατασκευάζονται για διάφορες χρήσεις και για την εξυπηρέτηση πολλών σκοπιμοτήτων, όπως η προμήθεια νερού για άρδευση, ύδρευση και παραγωγή ενέργειας. Στην Ελλάδα το ¼ της επιφανειακής απορροής καταλήγει σε φράγματα (Ξανθόπουλος, 1996). Ένα τέτοιο έργο επηρεάζει τα επιφανειακά και τα υπόγεια νερά σε πολύ μεγαλύτερη έκταση από τη λεκάνη κατάκλισης του φράγματος, επηρεάζει τα ίδια τα πετρώματα, τις χρήσεις γης, τους φυσικούς πόρους αλλά και τη διάθεση των υποπροϊόντων της ανθρώπινης δραστηριότητας. 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. Μάλιστα σε περίπτωση μόνιμης διακοπής υφίσταται και το ζήτημα της αλλαγής του επιπέδου βάσεως, που επηρεάζει το καθεστώς της διάβρωσης στα ανάντη. Εκτός από τα επιφανειακά νερά επηρεάζονται σε μικρό ή μεγάλο βαθμό και τα υπόγεια νερά. Ειδικά σε περιπτώσεις στις οποίες το νερό του φράγματος χρησιμοποιείται για κατανάλωση, υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση των συνθηκών στα κατάντη αφού η απώλεια νερού είναι δεδομένη (Στουρνάρας, 2007).

Ένα φράγμα είναι στοιχείο ανάπτυξης για τη γειτνιάζουσα περιοχή αλλά και πιθανό έργο καταστροφής. Ιστορικές καταστροφές φραγμάτων με μεγάλες υλικές ζημιές και με πολλά θύματα έχουν καταγραφεί ανά τον κόσμο. Χαρακτηριστικές είναι οι περιπτώσεις των φραγμάτων St. Francis στην Καλιφόρνια, Malpasset στη Ν.Α. Γαλλία, Vaiont στην Ελβετία κ.α. Ευτυχώς στον ελληνικό χώρο δεν έχουν παρατηρηθεί καταστροφικά γεγονότα, αλλά μόνο αστοχίες μικρότερης σημασίας. Πιο συγκεκριμένα, αυτές οι περιπτώσεις είναι τα φράγματα Περδίκια στη Πτολεμαΐδα, Καμαρών στη Σίφνο, Αγιάς Χανίων στην Κρήτη, Μυλοπόταμου στην Ίο, Μαραθώνα -που αποτελεί και την περιοχή μελέτης της εν λόγω διπλωματικής εργασίας- στο ομώνυμο μέρος, Κρεμαστών στον Αχελώο και Φανερωμένης στη Νάξο (Μουτάφης, 2008).

Η κατασκευή φραγμάτων έχει τις ρίζες της πολλούς αιώνες πριν. Αρχικά κατασκευάστηκαν για λόγους αντιπλημμυρικής προστασίας και στη συνέχεια για αρδευτικούς και υδρευτικούς λόγους. Τα φράγματα του παρελθόντος, είναι μικρότερα, ενώ τα σημερινά φράγματα είναι σαφώς πολύ μεγαλύτερα αξιοποιώντας όλη την υπάρχουσα γνώση. Τα τελευταίες δεκαετίες τα φράγματα έχουν βρεθεί στο προσκήνιο όσον αφορά τις έμμεσες ή άμεσες, οικονομικές ή μη επιπτώσεις που «δέχεται» η γειτνιάζουσα περιοχή, οι οποίες έχουν αυξηθεί σημαντικά σε σχέση με το παρελθόν (Φιλίντας, 2008).

Τα συνοδά έργα ενός φράγματος είναι κοινά για όλους τους τύπους φραγμάτων:

- Ο εκκενωτής πυθμένα, που συνήθως πρόκειται για τη σήραγγα εκτροπής. Χρησιμοποιείται για την ταχεία εκκένωση του ταμιευτήρα.

- Ο υπερχειλιστής κατασκευάζεται για τη παροχέτευση, προς τα κατάντη, της πλημμυρικής απορροής του ποταμού, που δεν μπορεί να αποθηκευτεί στη λίμνη. Στα άκαμπτα φράγματα - κατασκευασμένα από σκυρόδεμα - βρίσκεται πάνω από το σώμα του φράγματος, ενώ στα εύκαμπτα φράγματα, βρίσκεται έξω από το έργο.
- Η υδροληψία η οποία είναι ένα σύνολο αγωγών για την υδροδότηση της εκάστοτε χρήσης του έργου. Τοποθετούνται, είτε στη βάση του, πάνω στο φράγμα είτε έξω από αυτό ή ψηλότερα από τη βάση.
- Τα όργανα ελέγχου παραμονής και λειτουργίας, ώστε να παρακολουθείται συνεχώς το έργο, τα πρηνή και το έδαφος θεμελίωσης. Πρόκειται για γεωδαιτικό δίκτυο ελέγχου των μετακινήσεων, από κλισιόμετρα, πιεσόμετρα και πιεζόμετρα για τον έλεγχο της στάθμης του νερού.

Οι επιπτώσεις ενός φράγματος εκτός από τη μεταβολή των υδρολογικών συνθηκών είναι μοναδικές, πολυάριθμες και σημαντικές. Σήμερα είναι γνωστό ότι οι επιδράσεις των φραγμάτων στα οικοσυστήματα είναι αλληλοεξαρτώμενες και βαθύτατα εδραιωμένες. Εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες όπως: η κατασκευή του φράγματος, ο τρόπος λειτουργίας του, η υδρογεωλογία της ευρύτερης περιοχής, η ιζηματογένεση, η γεωμορφολογία, το κλίμα και τα χαρακτηριστικά του βιοκόσμου (η πανίδα και η χλωρίδα της λεκάνης κατάκλισης) (Kondolf G.M 1997). Αρχικά, επηρεάζεται η πανίδα και η χλωρίδα της περιοχής και μεταβάλλεται το μικροκλίμα της ευρύτερης περιοχής. Στα κατάντη εμφανίζονται σημαντικές διαφοροποιήσεις στον υδρογεωλογικό κύκλο, διότι υπάρχει απώλεια τροφοδοσίας σε νερό των υδροφόρων οριζώντων. Αλλάζουν επομένως το ιζηματολογικό καθεστώς και τα θρεπτικά συστατικά στα κατάντη. Μεταβάλλεται η θερμοκρασία του νερού και η χημική του σύσταση. Στα οικοσυστήματα επιφέρει σημαντικές αλλαγές καθότι προκαλεί μεταναστεύσεις ζώων (Dynesius and Nilsson 1994). Η αλλαγή του επιπέδου βάσεως της απορροής επιφέρει σημαντικά προβλήματα στο καθεστώς διάβρωσης και απόθεσης. Οι περιοχές στα κατάντη έχουν έλλειψη σε υλικό απόθεσης (ίζημα) αφού το νερό που διοχετεύεται από το φράγμα έχει διαβρωτική δράση και όχι αποθετική διότι δεν περιλαμβάνει διαλυμένα συστατικά. Τέλος, προβλήματα υφίστανται και στην περιοχή των εκβολών με αποτέλεσμα η διαβρωτική δράση της θάλασσας να είναι πλέον μεγαλύτερη από την αποθετική δράση του ποταμού. Επομένως οι επιπτώσεις μπορούν να χωριστούν σε επιπτώσεις της λεκάνης απορροής, της λεκάνης κατάκλισης, της ζώνης του φράγματος και επιπτώσεις στα κατάντη (Στουρνάρας 2007).

Οι ταμειυτήρες σχεδιάζονται και κατασκευάζονται με σκοπό τον έλεγχο και τη ρύθμιση της παροχής των υδατορευμάτων. Ανάλογα με το μέγεθος τους καλούνται δεξαμενές, λιμνοδεξαμενές ή τεχνητές λίμνες. Πριν από το φράγμα η περιοχή κατακλύζεται με το νερό που διοχετεύει ο ποταμός και ονομάζεται λεκάνη κατάκλισης. Όσο μεγαλύτερη είναι η αναλογία αποθηκευμένου όγκου νερού με τον όγκο του σώματος του φράγματος τόσο αποδοτικότερο θεωρείται το έργο.

Η λειτουργία ενός φράγματος βασίζεται στη σχέση του αποθηκευμένου όγκου με την εισροή, την απόληψη και τις υπάρχουσες απώλειες, δηλαδή ο αποθηκευμένος όγκος ισούται με την διαφορά του αθροίσματος απόληψης και απωλειών από τις υπάρχουσες

εισροές. Απώλειες είναι οι απώλειες όγκου νερού από εξάτμιση, διήθηση ή ακόμα και υπερχειλίση. Ο συνολικός όγκος του ταμιευτήρα είναι πάντοτε αρκετά μεγαλύτερος από τον ωφέλιμο όγκο του διότι λαμβάνονται υπόψη τα υλικά της λεκάνης απορροής που μεταφέρονται μέσω των υδατορευμάτων και καταλήγουν στον πυθμένα του ταμιευτήρα και ο πλεονάζων όγκος πάνω από τον ωφέλιμο για ανάσχεση των πλημμύρων, μετά την πλήρωση του ταμιευτήρα.

Τα φράγματα από σκυρόδεμα είναι μονολιθικές κατασκευές. Οι κυριότεροι τύποι είναι τα φράγματα βαρύτητας και τα τοξωτά φράγματα. Τα πρώτα, χρησιμοποιούν το βάρος τους ώστε να αντιτίθενται στις υδατικές πιέσεις. Ένα φράγμα βαρύτητας λειτουργεί ως τείχος αντιστήριξης των πρηνών της κοιλάδας και αντέχουν σε θλιπτικές δυνάμεις παράλληλες στον άξονα τους σε περίπτωση κατολίσθησης ή ερπυσμού των πρηνών. Μεταφέρουν τις τάσεις στη βάση τους. Το τοξωτό φράγμα απαιτεί 35% - 65% λιγότερο σκυρόδεμα από τον προηγούμενο τύπο και είναι προτιμότερο για περιβαλλοντικούς λόγους διότι απαιτούνται λιγότεροι δανειοθάλαμοι (Καλκάνη, 1994). Τα τοξωτά φράγματα διοχετεύουν τις δυνάμεις που δέχονται στη θεμελίωση τους, στην οποία λόγω του μικρού πλάτους της ενεργούν ήδη υψηλές δυνάμεις διήθησης που θεωρούνται ελεγχόμενες μέσω του πετάσματος αποστράγγισης.

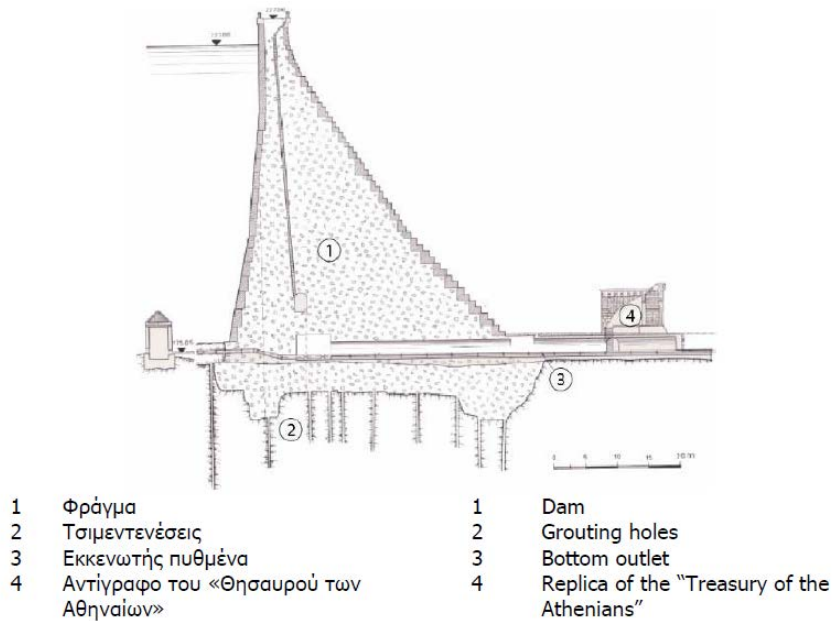
3.1.1 Το φράγμα του Μαραθώνα

Το έργο δρομολογήθηκε το 1925 και η κύρια υπεύθυνη εταιρεία ήταν η Ανώνυμη Ελληνική Εταιρεία Υδάτων (ΕΕΥ). Η κατασκευή του ξεκίνησε τον Οκτώβριο του 1926 και ολοκληρώθηκε του 1929 για την κατασκευή του οποίου εργάστηκαν 900 εργάτες. Η εταιρεία που ανέλαβε τη μελέτη και την κατασκευή του έργου ήταν ULENandCo. USA. Πρόκειται για ένα φράγμα βαρύτητας κατασκευασμένο από σκυρόδεμα και επενδυμένο με λαξεμένους λίθους Πεντελικού μαρμάρου, γεγονός που το καθιστά μοναδικό στο είδος του. Επίσης μαζί με το φράγμα έγιναν άλλα τρία μικρότερα έργα που θα διευκόλυναν τη διαχείριση του νερού. Αρχικά δημιουργήθηκε μια σήραγγα μήκους 13,4 km (σήραγγα Μπογιατίου) για τη μεταφορά του νερού από τον Μαραθώνα στην Αθήνα, το δεύτερο έργο περιλάμβανε το διυλιστήριο του Γαλασίου και τέλος το τρίτο έργο ήταν το δίκτυο διανομής από την Αθήνα στον Πειραιά.

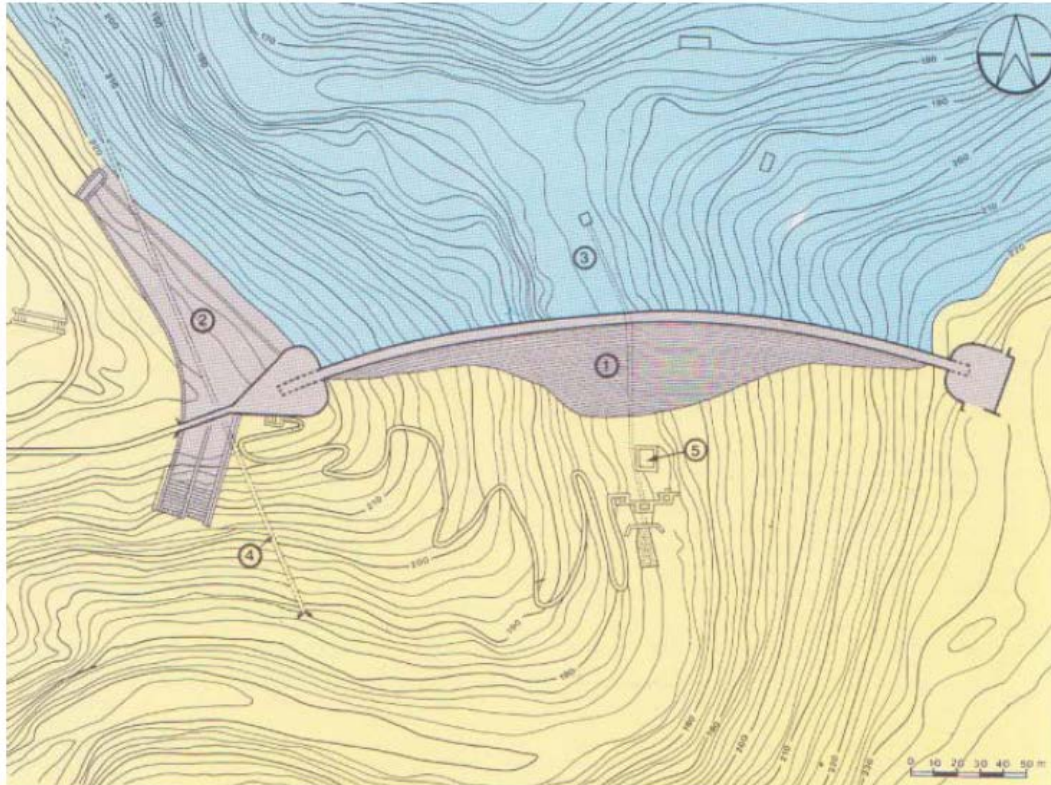
Η ΕΥΔΑΠ χρησιμοποιεί την τεχνητή λίμνη ως ταμιευτήρα νερού, ενώ η αστικοποίηση και η συνεχώς αυξανόμενη πληθυσμιακή κατάσταση οδήγησε στην ανεπάρκεια των αποθεμάτων και κατέστη αναγκαία η χρήση του υδατικού αποθέματος της λίμνης Υλίκης της Βοιωτίας. Η συγκεκριμένη λίμνη βρίσκεται σε χαμηλό υψόμετρο και έτσι η άντληση του νερού γίνεται με χερσαία και πλωτά αντλιοστάσια. Αξίζει να αναφερθεί ότι η λίμνη Υλίκη κατέχει το μεγαλύτερο αντλιοστάσιο της Ευρώπης.

Το μέγιστο ύψος του φράγματος είναι 54 m από τη θεμελίωση του, το μέγιστο πλάτος στη βάση είναι 48 m ενώ το πλάτος της στέψης (στο επίπεδο του δρόμου κυκλοφορίας) είναι 4,5 m. Το μήκος της στέψης είναι 285 m. Η επιφάνεια του τεχνητού ταμιευτήρα του Μαραθώνα είναι 2,45 km στη στάθμη υπερχειλίσης. Το μέγιστο βάθος φτάνει τα 54 m. Η μέγιστη χωρητικότητα του είναι $41 \times 10^6 \text{ m}^3$. μέγιστος ωφέλιμος όγκος

είναι $34 \times 10^6 \text{ m}^3$, ενώ η μέση ημερήσια κατανάλωση της Αθήνας εκτιμάται στις 800.000 m^3 . Υφίσταται πύργος υδροληψίας, πρόκειται για ένα κατακόρυφο κτίσμα ύψους 50 m το οποίο βυθίζεται εντός της λίμνης κατά 40-45m. Στη βάση του λειτουργούν δυο βάνες μέσω των οποίων γίνεται η διοχέτευση του νερού στη σήραγγα Μπογατσίου. Ο υπερχειλιστής του φράγματος είναι πλευρικός, διατεταγμένος στο δεξιό αντέρεισμα, παροχής $100\text{m}^3/\text{s}$ με κεκλιμένη διώρυγα πτώσης, χωρίς έργο εκτόξευσης. Τα νερά καταλήγουν με ελεύθερη πτώση σε λεκάνη αποτόνωσης (www.eydap.gr). Στην Σχήμα 20 και 21 φαίνονται μια τυπική τυπική τομή και μια οριζοντιογραφία του φράγματος του Μαραθώνα αντίστοιχα.



Σχήμα 3.1: Τομή του φράγματος του Μαραθώνα όπου φαίνονται 1) το φράγμα, 2) οι τσιμεντενέσεις, 3) Ο εκκενωτής πυθμένα και 4) το αντίγραφο του «Θησαυρού των Αθηναίων» (Ελληνική επιτροπή μεγάλων φραγμάτων, 2013).



1	Φράγμα	1	Dam
2	Υπερχειλιστής	2	Spillway
3	Εκκενωτής πυθμένα	3	Bottom outlet
4	Στοά αποστράγγισης	4	Drainage gallery
5	Αντίγραφο του «Θησαυρού των Αθηναίων»	5	Replica of the "Treasury of the Athenians"

Σχήμα 3.2: Οριζοντιογραφία του φράγματος Μαραθώνα όπου φαίνονται 1) το φράγμα, 2) ο υπερχειλιστής του φράγματος, 3) ο Εκκενωτής πυθμένα, 4) η στοά αποστράγγισης και 5) το αντίγραφο του «Θησαυρού των Αθηναίων» (Ελληνική επιτροπή μεγάλων φραγμάτων, 2013).

Μετά το 1974 άλλα δύο σημαντικά έργα προστίθενται στην περιοχή με σκοπό την ενίσχυση του υδροδοτικού προβλήματος της Αθήνας. Ένα νέο σημαντικό έργο, το οποίο ενίσχυσε την υδροδότηση της Αθήνας, ήταν το τεχνικό έργο που έγινε στον ποταμό Μόρνο. Το φράγμα που βρίσκεται επί του ποταμού Μόρνου θεωρείται το υψηλότερο χωμάτινο φράγμα στην Ευρώπη με ύψος 126 m, ενώ το υδραγωγείο του είναι το δεύτερο μεγαλύτερο υδραγωγείο στην Ευρώπη. Ένα άλλο μεγάλο έργο που ενισχύει την υδροδότηση της Αθήνας είναι η εκτροπή του ποταμού Εύηνου προς τον ταμιευτήρα του Μόρνου με την κατασκευή φράγματος και σήραγγας. Η έναρξη των εργασιών στον Εύηνο έγινε το 1992 και το έργο ολοκληρώθηκε το 2001 οπότε και τέθηκε σε λειτουργία. Η ενωτική σήραγγα προσαγωγής που μεταφέρει τα νερά του Εύηνου στον ταμιευτήρα του Μόρνου, μήκους 29,4 km, ολοκληρώθηκε σε διάστημα λιγότερο των δύο ετών, γεγονός που αποτελεί παγκόσμιο επίτευγμα για την ολοκλήρωση σήραγγας μεγάλου μήκους. Το υδραγωγείο του Μόρνου επικοινωνεί με το υδραγωγείο της Υλίκης με

ενωτικά υδραγωγεία με σκοπό τη σωστή διαχείριση του νερού. Το ακατέργαστο νερό του Μόρνου και της Υλίκης κατευθύνεται σε 4 Μονάδες Επεξεργασίας Νερού (Μ.Ε.Ν) που βρίσκονται στο Γαλάτσι, στο Πολυδένδρι, στις Αχαρνές και στη Μάνδρα. Εκεί πραγματοποιείται ο καθαρισμός του νερού με κροκίδωση, καθίζηση, διύλιση και απολύμανση μέσω χλωρίου με σκοπό τον καθαρισμό του νερού από μικροοργανισμούς και παντός είδους ρύπους. Διάσπαρτες εντοπίζονται 45 δεξαμενές σε διάφορα σημεία των πόλεων. Από τις δεξαμενές το νερό διοχετεύεται στους κατοίκους με σωληνώσεις μήκους 7×10^6 m (www.eydap.gr).

Στην περίπτωση του φράγματος του Μαραθώνα, το έργο εντάχθηκε πλήρως στο περιβάλλον αποτελώντας αναπόσπαστο στοιχείο της λεκάνης (Σχήμα 3.3).



Σχήμα 3.3: Φράγμα Μαραθώνα (Φωτογραφικό υλικό ΕΥΔΑΠ).

Οι προστατευόμενες περιοχές του Μαραθώνα απαρτίζουν το «Εθνικό Πάρκο Σχοινιά», το οποίο αποτελείται από τον ομώνυμο υγρότοπο και δάσος, στις οποίες απαγορεύεται κάθε ανθρώπινη δραστηριότητα (δόμηση, καλλιέργεια, κυνήγι κ.α). Στην περιοχή του Σχοινιά διαμορφώνονται έλη τα οποία αποτελούν σημαντικό υδροβιότοπο, ενώ ακόμα υπάρχει ένα από τα μεγαλύτερα δάση Κουκουναριάς στην Ελλάδα. Η περιοχή ανήκει στο δίκτυο Natura 2000 με κωδικό αριθμό GR 3000003 με συνολικά 115 είδη πτηνών με δυνητική ποικιλότητα 215 ειδών ενώ υπάρχουν απειλούμενα είδη ψαριών γλυκού νερού, αμφιβίων και ερπετών. Οι καλλιεργούμενες εκτάσεις περιορίζονται μόνο σε επιλεγμένες θέσεις παλαιότερων γεωργικών καλλιεργειών και περιλαμβάνουν κυρίως αμπελώνες και ελαιώνες. Βόρεια και ανατολικά του δάσους εκτείνεται το έλος του Μαραθώνα. Η περιοχή περιλαμβάνει μια ποικιλία οικοσυστημάτων σπάνιων και ιδιαίτερα σημαντικών για την περιοχή της Αθήνας (πηγή: Εθνικό Πάρκο Σχοινιά Μαραθώνα). Είναι ένα σημαντικό

σύνολο οικοσυστημάτων απαραίτητο για τη γεινιάζουσα πόλη των Αθηνών, στην οποία η άναρχη δόμηση και η αστικοποίηση έχει μειώσει σημαντικά τις περιοχές πρασίνου.

Κατά τη διάρκεια της κατασκευής του έργου και ενώ είχε ανυψωθεί το πρόφραγμα και εκτελούντο εργασίες στην περιοχή θεμελίωσης του, λόγω έντονων βροχοπτώσεων η παροχή του Χάραδρου αυξήθηκε, το σύστημα εκτροπής δεν μπόρεσε να διοχετεύσει την πλημμυρική αυτή παροχή με αποτέλεσμα την πλήρωση του χώρου του φράγματος στα ανάντη, την υπερπήδηση του και τελικά την καταστροφή του. Το φαινόμενο αυτό αποδίδεται είτε σε λανθασμένη εκτίμηση και σχεδιασμού ενός πλημμυρικού γεγονότος είτε σε ακραίο πλημμυρικό φαινόμενο. Δεν υπάρχουν καταγραφές συνεπειών του συγκεκριμένου συμβάντος (Μουτάφης, 2008¹).

Η ερευνητική ομάδα των Καραστάθη et al (2001). πραγματοποίησε τη μέθοδο σεισμική διάθλασης (ακουστική/ηλεκτρική τομογραφία) στο κεντρικό εσωτερικό τούνελ του φράγματος του Μαραθώνα με σκοπό τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων του σκυροδέματος. Η μέθοδος αυτή επιλέχτηκε λόγω έλλειψης στοιχείων από άλλες μεθόδους εξαιτίας της ύπαρξης του διακοσμητικού μαρμάρου, το οποίο εμφανίζει μεγαλύτερες σεισμικές ταχύτητες από το εσωτερικό υλικό. Η έρευνα πραγματοποιήθηκε με αφορμή το σεισμό της Αθήνας το 1999, με σκοπό τον εντοπισμό διαρροών και στο φράγμα και κρίθηκε ως κατασκευή υψηλής ποιότητας (όσον αφορά το σκυρόδεμα) αφού οι σεισμικές ταχύτητες βρέθηκαν ιδιαίτερα υψηλές, όπως ισχύει και το μέτρο ελαστικότητας. Μεγάλο ποσοστό υγρασίας εντοπίστηκε στους πόρους του σκυροδέματος, όπως αντικατοπτρίζεται στις διαφοροποιήσεις των σεισμικών ταχυτήτων, η υγρασία μειώνει σημαντικά τις τιμές της ηλεκτρικής αντίστασης. Αυτό που αξίζει να αναφερθεί είναι ότι εντοπίστηκαν 3 περιοχές αργής διήθησης νερού.

3.1.2 Το φράγμα Ραπεντώσας

Η Λεκάνη Ραπεντώσας ξεκινά από την περιοχή Διονύσου και καταλήγει λίγο βορειότερα της Νέας Μάκρης σε περιοχή του δήμου Μαραθώνα. Το έργο, που βρίσκεται στο ρέμα της Ραπεντώσας, στην περιοχή του Βρανά, ολοκληρώθηκε το 2004 από την Ε.ΥΔ.Α.Π. Ο σκοπός της δημιουργία του είναι για αντιπλημμυρική προστασία της περιοχής. Το ύψος του φράγματος είναι 39 m, το μήκος στέψης του 145 m, ο όγκος του $155,5 \times 10^3 \text{ m}^3$ και η χωρητικότητά του είναι $1285 \times 10^3 \text{ m}^3$. Το εμβαδόν της λεκάνης απορροής στην οποία βρίσκεται έχει έκταση $24,94 \text{ Km}^2$. 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 περί τα 20 m και ύψους 3 m.

Στις 22-25 Νοεμβρίου 2005, η περιοχή της Πεντέλης - που βρίσκεται κοντά στο φράγμα Ραπεντώσας- δέχθηκε μεγάλο όγκο βροχής. Το συνολικό ύψος βροχής για 60 περίπου ώρες που διήρκεσε το γεγονός ήταν 200 mm. Από την όμβρια καμπύλη της περιοχής, φάνηκε ότι ήταν ένα ακραίο γεγονός με περίοδο επαναφοράς πάνω από 50

¹ <http://portal.tee.gr/portal/page/portal/teelar/EKDILWSEIS/damConference/eisigiseis/7.2.pdf>

χρόνια. Ο όγκος της πλημμύρας εισροής στο ταμιευτήρα ήταν 2,22 εκατ. m^3 . Ο όγκος πλημμύρας που έφυγε από το φράγμα ήταν περί τα 2 εκατ. m^3 . Από πλευράς μέγιστης έντασης το γεγονός δεν ήταν ιδιαίτερα μεγάλο με εκτιμώμενη περίοδο επαναφοράς περί τα 15 έτη. Συνεπώς το γεγονός αυτό δημιούργησε μεγάλο συνολικό όγκο πλημμύρας αλλά χωρίς ιδιαίτερα μεγάλες εντάσεις.



Σχήμα 3.4: Φράγμα Ραπεντώσας και τεχνητή λίμνη φράγματος. (Τα φράγματα της Ελλάδας, 2013).

Το φράγμα λειτούργησε ικανοποιητικά. Το βασικό πρόβλημα δεν οφείλεται στο έργο αλλά στην μειωμένη διοχετευτική ικανότητα του ρέματος κατάντη και στον μεγάλο συνολικό όγκο της πλημμύρας. Αν το κατάντη τμήμα από το φράγμα μέχρι την έξοδο είχε σχεδιασθεί με παροχή σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 50 ετών - όπως θα έπρεπε - δεν θα υπήρχε πρόβλημα με ή χωρίς το φράγμα. Η ύπαρξη του φράγματος ήταν σίγουρα ευεργετική για τη ρύθμιση της παροχής εξόδου και εντάσσεται στα έργα που αποσκοπούν στη συγκράτηση για λίγο και καθυστέρηση της πλημμύρας με αποτέλεσμα να μειώνεται η αιχμή και να καθυστερεί η εκδήλωση της χρονικά. Το ρέμα, όμως, εκφυλίζεται και ο

μεγάλος όγκος νερού, που διέρχεται από αυτό είχε ως αποτέλεσμα την καταστροφή περιουσιών και γεωργικών παραγωγών.

Το πεδινό τμήμα της Λεκάνης Βρανά κυρίως ανάντη της Μαραθώνιας διαδρομής είναι μια γεωργική έκταση με μονάδες θερμοκηπίων και αγρών, και διάσπαρτα σπίτια με κύριο χαρακτηριστικό το περιορισμένο υδρογραφικό δίκτυο με πολλές ανθρωπίνες επεμβάσεις (μπαζώματα κλπ). Συνεπώς, το πεδινό αυτό τμήμα παρουσιάζει περιορισμένο δυναμικό στην αποστράγγιση του. Στο συγκεκριμένο γεγονός, από το πεδινό τμήμα και μόνο, προέκυψαν παροχές αιχμής της τάξης των 14 m³/s που μαζί με τα 5 – 6 m³/s έφτασαν περί τα 18 m³/s που βέβαια δεν μπορούν να διοδευτούν ούτε από το ανεπαρκέστατο υδρογραφικό δίκτυο ούτε τελικά από τον κλειστό αγωγό που οδηγεί τα πλημμυρικά νερά στη θάλασσα. Αν δεν υπήρχε το φράγμα οι παροχές αιχμής στην έξοδο της λεκάνης θα έφταναν σε μέγεθος μεγαλύτερο των 40 m³/s. Είναι λοιπόν εμφανές ότι το φράγμα λειτούργησε ευεργετικά χωρίς βέβαια να αποτρέψει την πλημμύρα που λόγω της αδυναμίας διόδευσής της προς τη θάλασσα και του ιδιαίτερα μεγάλου της όγκου κάλυψε μεγάλες εκτάσεις και δημιούργησε μεγάλες ζημιές κυρίως στην γεωργική παραγωγή.

3.2 Κλίμα

Το κλίμα της ευρύτερης περιοχής, ανήκει στον τυπικά ημί-ξηρό μεσογειακό τύπο και εμφανίζει επομένως κατά τη χειμερινή κυρίως περίοδο τα χαρακτηριστικά του κλίματος των εύκρατων ζωνών και κατά τη θερινή τα χαρακτηριστικά του κλίματος των υποτροπικών ζωνών των υψηλών πιέσεων. Δηλαδή, έχουμε ήπιους και υγρούς χειμώνες, με θερμά και ξηρά καλοκαίρια και γενικά, μακρές περιόδους ηλιοφάνειας κατά την μεγαλύτερη διάρκεια του έτους. Η περιοχή χαρακτηρίζεται από μικρά ετήσια ύψη βροχής, κυρίως το χειμώνα και ξηρά περίοδο κυρίως το καλοκαίρι, από καλοκαίρια θερμά ή και με καύσινα, από χειμώνες ήπιους που συχνά τους διακόπτουν περίοδοι πολύ καλού ή κακού καιρού, από μεγάλη ηλιοφάνεια, ιδίως κατά τη θερμή περίοδο του έτους και τέλος από εποχές άνοιξης και φθινοπώρου πολύ μικρής διάρκειας. Η κατανομή των βροχοπτώσεων ακολουθεί τα χαρακτηριστικά των ξηρών περιοχών με το μεγαλύτερο μέρος των βροχοπτώσεων να παρατηρούνται κατά την υγρή περίοδο υπό τη μορφή ισχυρών καταιγίδων. Έντονες καταιγίδες παρατηρούνται ακόμα και την περίοδο του καλοκαιριού και χαρακτηρίζονται από μικρή διάρκεια, μεγάλες εντάσεις και πολύ μεγάλη χωρική ανομοιομορφία.

Με βάση το χάρτη Ύψους Βροχής της Ελλάδας του ΙΓΜΕ (1993) η περιοχή του Μαραθώνα ανήκει σε μια περιοχή με μέσο ύψος βροχής περί τα 600mm, με χαρακτηριστικά μεσογειακού κλίματος με σχετικά θερμό καλοκαίρι και ήπιο χειμώνα. Η βλάστηση της περιοχής χαρακτηρίζεται ως ένα τυπικό Μεσογειακό οικοσύστημα με πευκοδάση, πρινώνες, φρύγανα και πόες (Ξανθάκης 2011).

Στην Ελλάδα η ορογένεση έχει επηρεάσει το κλίμα με αποτέλεσμα να διαχωρίζονται δύο ζώνες η ανατολική και η δυτική. Η δυτική χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερο ύψος βροχής, οι ανατολικές περιοχές στις οποίες κατατάσσεται και η περιοχή του Μαραθώνα, δέχεται λιγότερα νερά σε σχέση με την έκταση των λεκανών απορροής.

Η μέση ετήσια θερμοκρασία με βάση τα έτη 1986 - 1997 είναι 17-18 °C στην παράκτια περιοχή και χαμηλότερη στις ορεινές περιοχές, ενώ το μέσο ύψος υετού, για τα έτη 1932-2003, είναι 588,9 mm. Οι θερμοκρασίες κυμαίνονται από -4 °C έως 40,2 °C.

Τα κλιματικά στοιχεία που ακολουθούν προέρχονται από δεδομένα του μετεωρολογικού σταθμού της Εταιρείας Ύδρευσης Αποχέτευσης Πρωτεύουσας (ΕΥΔΑΠ) που βρίσκεται σε υψόμετρο 2,60 m και έχει συντεταγμένες στο παγκόσμιο προβολικό σύστημα γεωγραφικό μήκος 24°00' Α και γεωγραφικό πλάτος 38°08' Β (Ξανθάκης, 2011).

3.2.1 Θερμοκρασία

Η σημαντικότερη κλιματική παράμετρος είναι η θερμοκρασία, καθώς έχει καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση του υδρολογικού ισοζυγίου μιας περιοχής. Η θερμοκρασία διαμορφώνει σε μεγάλο βαθμό την εξατμοδιαπνοή, την ηλιακή ακτινοβολία και την ταχύτητα του ανέμου (Φλόκας, 1994).

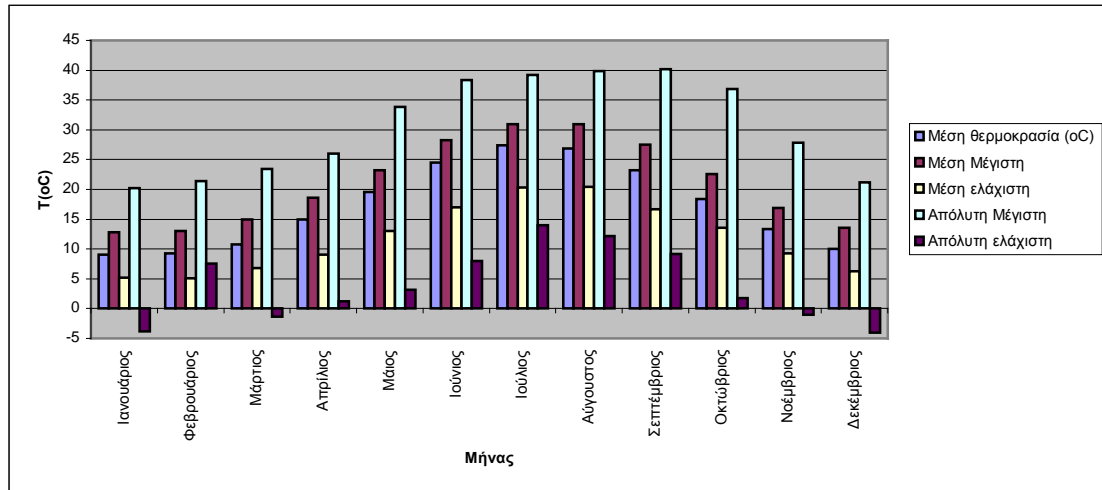
Η ημερήσια μεταβολή της θερμοκρασίας αέρα μιας κανονικής ημέρας (χωρίς σύννεφα και με νηνεμία) ακολουθεί με κάποια καθυστέρηση την αντίστοιχη μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας. Οι μέγιστες τιμές σημειώνονται 1-2 ώρες μετά τη μεσουράνηση του ηλίου, ενώ οι ελάχιστες λίγα λεπτά μετά την ανατολή του ηλίου. Η ετήσια μεταβολή της θερμοκρασίας παρουσιάζει συνήθως απλή κύμανση με τις μέγιστες τιμές να σημειώνονται τους μήνες Ιούλιο ή Αύγουστο και τις ελάχιστες τον Ιανουάριο ή Φεβρουάριο (Φλόκας, 1994).

Όπως προκύπτει από τον πίνακα 3.1, οι υψηλότερες μέσες θερμοκρασίες παρατηρούνται τους θερινούς μήνες (Ιούνιο - Ιούλιο -Αύγουστο) με μεγαλύτερες μέσες μέγιστες θερμοκρασίες αυτές του Ιουλίου και Αυγούστου με 30,9° C. Αντίθετα, οι ελάχιστες μέσες θερμοκρασίες παρατηρούνται τους χειμερινούς μήνες (Δεκέμβριο - Ιανουάριο - Φεβρουάριο) με χαμηλότερες μέσες θερμοκρασίες αυτές του Φεβρουαρίου.

Πίνακας 3.1: Θερμοκρασιακά στοιχεία του μετεωρολογικού σταθμού Μαραθώνα 1986 - 1997.

Μήνας	Μέση θερμοκρασία	Μέση Μέγιστη	Μέση ελάχιστη	Απόλυτη Μέγιστη	Απόλυτη ελάχιστη
Ιανουάριος	9,1	12,8	5,2	20,2	-3,8
Φεβρουάριος	9,3	13	5,1	21,4	7,6
Μάρτιος	10,8	15	6,8	23,4	-1,4
Απρίλιος	15	18,6	9,1	26	1,2
Μάιος	19,6	23,2	13	33,8	3,2
Ιούνιος	24,5	28,3	17	38,4	8
Ιούλιος	27,4	30,9	20,3	39,2	14
Αύγουστος	26,9	30,9	20,4	39,8	12,2
Σεπτέμβριος	23,2	27,5	16,7	40,2	9,2
Οκτώβριος	18,4	22,6	13,6	36,8	1,8
Νοέμβριος	13,3	16,9	9,3	27,8	-1
Δεκέμβριος	10	13,6	6,3	21,2	-4

Η μέση μηνιαία θερμοκρασία βρίσκεται πιο κοντά στη μέση μέγιστη παρά στην ελάχιστη και αυτό επιβεβαιώνει τον τυπικά ξηρό μεσογειακό τύπο κλίματος με θερμά καλοκαίρια και ήπιους χειμώνες. Η ετήσια διακύμανση των στοιχείων του Πίνακα 3.1 φαίνεται στο Σχήμα 3.5 για την περιοχή μελέτης.



Σχήμα 3.5: Θερμοκρασία ανά μήνα στο Μαραθώνα (mm).

3.2.2 Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα

Τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα είναι οι διάφορες μορφές νερού, σε στερεή ή υγρή φάση που πέφτουν στην ατμόσφαιρα και απολήγουν τελικά στην επιφάνεια του εδάφους. Ο "υετός" είναι η μετρήσιμη ποσότητα νερού των κατακρύφρων ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων (βροχή, χιόνι, χαλάζι κλπ.). Ο υετός μετράται σε mm κι αντιστοιχεί σε ποσότητα νερού (Kg) που πέφτει σε επιφάνεια $1m^2$ (Φλόκας, 1994).

Η ετήσια πορεία της βροχής στην περιοχή έρευνας ακολουθεί το Μεσογειακό τύπο κατά τον οποίον το μέγιστο και το ελάχιστο ύψος βροχής σημειώνεται κατά το χειμώνα και το θέρος αντίστοιχα (Φλόκας, 1994) και αυτό επιβεβαιώνεται από την Σχήμα 3.7.

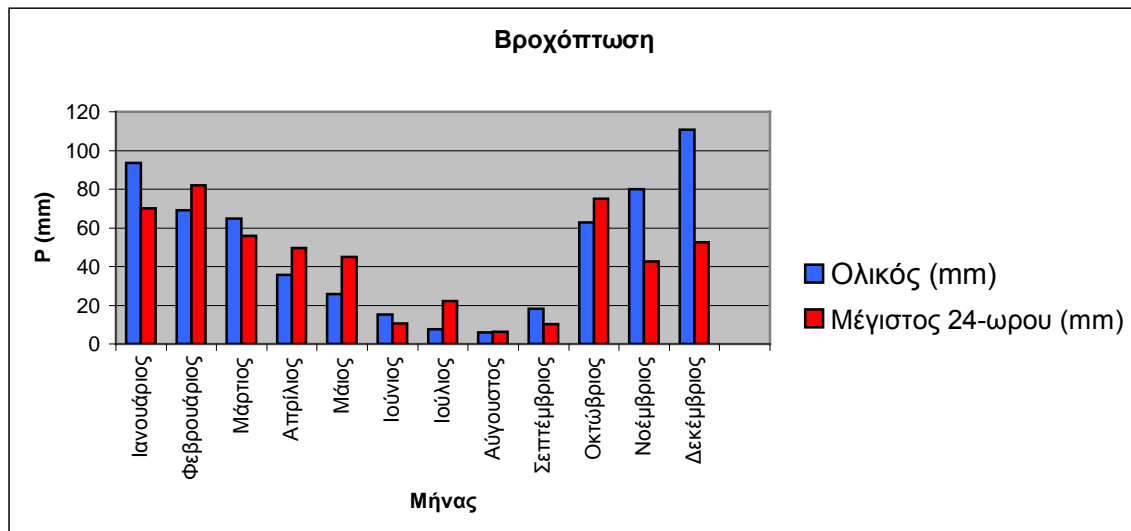
Σύμφωνα με τον πίνακα 3.2, το μέσο ετήσιο ολικό ύψος υετού για την περιοχή του Μαραθώνα είναι 588,9 mm. Ο ξηρότερος μήνας είναι ο Αύγουστος με μέσο μηνιαίο υετό 5,8 mm, ενώ ο υγρότερος είναι ο Δεκέμβριος με 110,7 mm. Στο σχήμα 3.6 παρουσιάζεται η διακύμανση του μέσου ολικού υετού ανά μήνα και ο μέσος μέγιστος υετός ανά 24-ωρο.

Στο σχήμα 3.8 φαίνεται το θερμοϋετόγραμμα που προέκυψε από συνδυασμό των δεδομένων υετού και θερμοκρασίας. Στην τετμημένη του βρίσκονται οι μήνες του έτους, στην μία τεταγμένη οι μηνιαίες βροχοπτώσεις σε mm και στην άλλη οι μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες T σε °C. Η κλίμακα του άξονα των βροχοπτώσεων είναι διπλάσια από αυτή των θερμοκρασιών. Από το σχήμα αυτή διαπιστώνεται πως η υγρή περίοδος ξεκινά από τα μέσα Οκτωβρίου και σταματά στα μέσα Μαρτίου. Η ξηρή περίοδος ξεκινά στα μέσα Μαρτίου και σταματά στα μέσα Οκτωβρίου. Το θερμοϋετόγραμμα επιβεβαιώνει το ξηρό

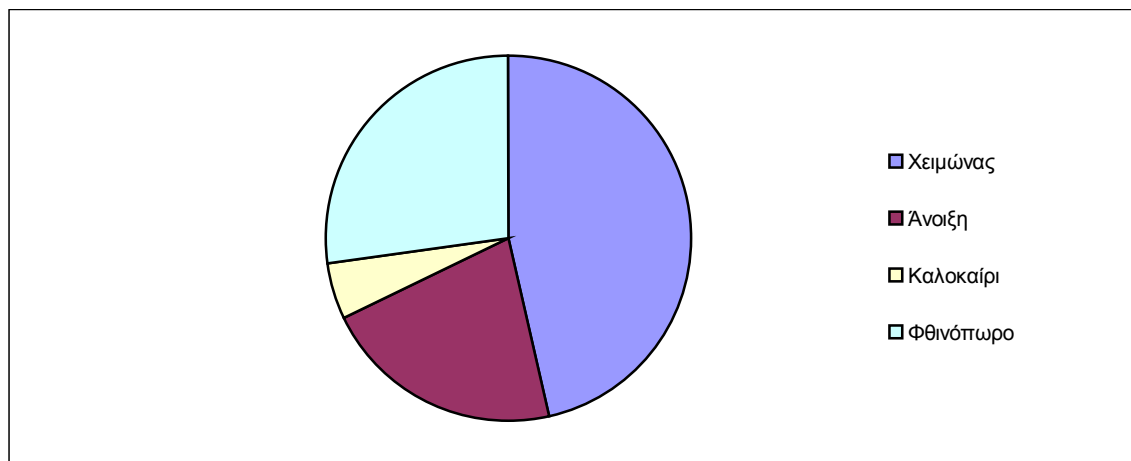
κλίμα της περιοχής με σχετικά λίγες βροχοπτώσεις και υψηλές θερμοκρασίες κατά την ξηρή περίοδο.

Πίνακας 3.2: Στοιχεία ατμοσφαιρικών κρημνισμάτων του μετεωρολογικού σταθμού Μαραθώνα από το 1932 - 2003.

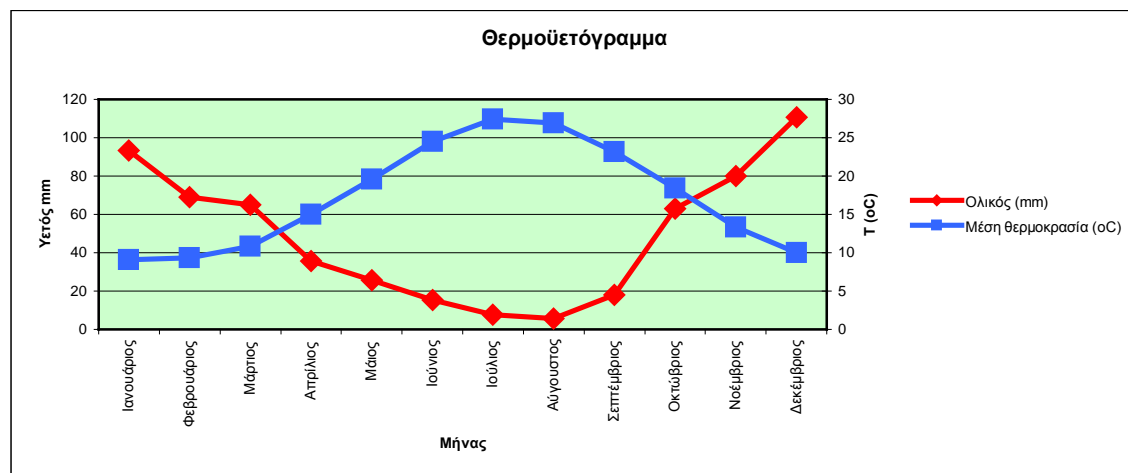
	Ολικός (mm)	Μέγιστος 24-ωρου (mm)
Ιανουάριος	93,4	70,1
Φεβρουάριος	69,1	82,1
Μάρτιος	64,9	55,8
Απρίλιος	35,6	49,7
Μάιος	25,7	44,9
Ιούνιος	15,2	10,7
Ιούλιος	7,6	22
Αύγουστος	5,8	6,3
Σεπτέμβριος	18,1	10,1
Οκτώβριος	62,9	75
Νοέμβριος	79,9	42,5
Δεκέμβριος	110,7	52,4
Σύνολο	588,9	



Σχήμα 3.6: Υετός (mm) ανά μήνα στο Μαραθώνα για την περίοδο 1932-2003.



Σχήμα 3.7: Ποσοστιαία αναλογία του ετήσιου υετού ανά εποχή.



Σχήμα 3.8: Θερμοϋετόγραμμα για την περιοχή Μαραθώνα.

3.2.3 Σχετική υγρασία

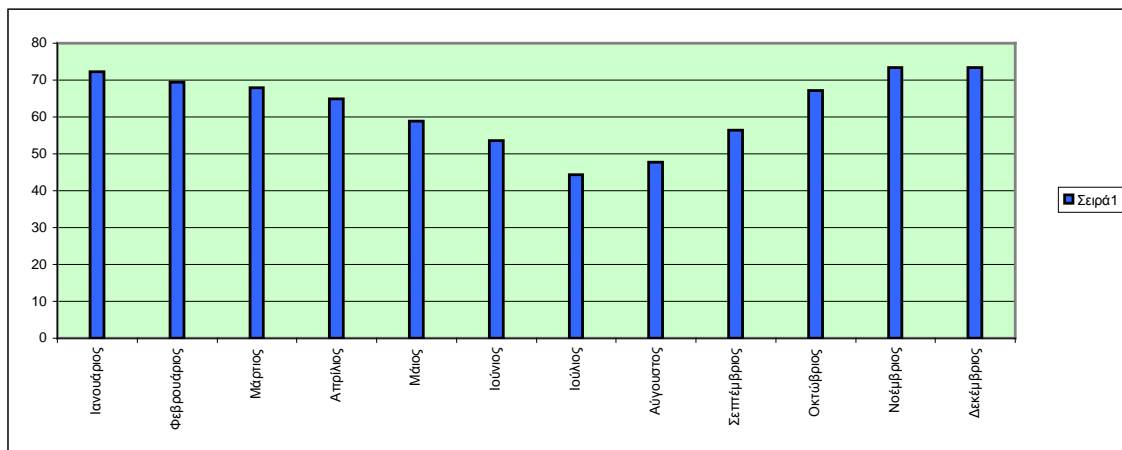
Η σχετική υγρασία RH του ατμοσφαιρικού αέρα ορίζεται ο λόγος της μάζας των υδρατμών που περιέχεται σε δεδομένο όγκο υγρού αέρα m_u , προς τη μάζα των υδρατμών m_{su} που θα περιείχε ο όγκος αυτός αν υπό τις ίδιες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας ήταν κορεσμένος με υδρατμούς (Φλόκας, 1994), δηλαδή:

$$RH = \frac{m_u}{m_{su}}$$

Η σχετική υγρασία δείχνει κατά πόσο η ατμόσφαιρα πλησιάζει το σημείο κορεσμού. Η σημασία της είναι σπουδαία διότι οι διάφοροι οργανισμοί επηρεάζονται απ' τη σχετική και όχι από την απόλυτη υγρασία (Φλόκας, 1994). Όπως φαίνεται στον πίνακα 3.3 η μέση σχετική υγρασία στην ευρύτερη περιοχή Μαραθώνα κυμαίνεται από 44,4 % τον Ιούλιο και φτάνει έως 73,4 % κατά τους μήνες Νοέμβριο και Δεκέμβριο. Στο σχήμα 3.9 φαίνεται η διακύμανση της σχετικής υγρασίας κατά τη διάρκεια του χρόνου.

Πίνακας 3.3: Στοιχεία σχετικής υγρασίας μετεωρολογικού σταθμού Μαραθώνα για τη χρονική περίοδο 1986 - 1997.

Μήνας	Μέση Σχετική Υγρασίας %
Ιανουάριος	72,2
Φεβρουάριος	69,5
Μάρτιος	68
Απρίλιος	64,9
Μάιος	58,9
Ιούνιος	53,6
Ιούλιος	44,4
Αύγουστος	47,7
Σεπτέμβριος	56,5
Οκτώβριος	67,2
Νοέμβριος	73,4
Δεκέμβριος	73,4



Σχήμα 3.9: Κατανομή της σχετικής υγρασίας ανά μήνα.

3.2.4 Σχέση υψομέτρου - θερμοκρασίας

Η θερμοκρασία, όπως προαναφέρθηκε, είναι πολύ σημαντική στη διαμόρφωση του υδρολογικού ισοζυγίου. Έτσι, είναι εξίσου σημαντικό να γίνει κατανοητή η σχέση υψομέτρου - θερμοκρασίας που ορίζεται με τη θερμοβαθμίδα. Θερμοβαθμίδα είναι ο ρυθμός ελάττωσης της θερμοκρασίας με την αύξηση του υψομέτρου και συνήθως είναι μια ευθεία της μορφής $y=ax+b$, όπου y η μέση ετήσια θερμοκρασία, a η μείωση της θερμοκρασίας ανά 100 m υψομετρικής διαφοράς, x το απόλυτο υψόμετρο των σταθμών και b η θερμοκρασία σε υψόμετρο 0.

3.2.5 Σχέση υψομέτρου - ύψους βροχής

Συνήθως, τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα αυξάνονται αναλογικά αυξανόμενου του υψομέτρου. Η μεταβολή του ύψους βροχής ανά μονάδα μεταβολής του υψομέτρου ονομάζεται βροχοβαθμίδα.

Για τον υπολογισμό της βροχοβαθμίδας απαιτούνται τα απόλυτα υψόμετρα των βροχομετρικών σταθμών και τα αντίστοιχα ύψη βροχών. Με αυτά κατασκευάζουμε την καμπύλη μεταβολής του ύψους βροχής συναρτήσεως του υψομέτρου των σταθμών, τοποθετώντας στον άξονα των τετμημένων το υψόμετρο των σταθμών και στον άξονα των τεταγμένων το ύψος βροχής. Η κλίση της καμπύλης μας δίνει την βροχοβαθμίδα a . Η μαθηματική έκφραση της καμπύλης είναι μια εξίσωση της μορφής $y=ax+\beta$ και παριστάνει μια ευθεία γραμμή όπου το y αντιπροσωπεύει το ύψος βροχής σε υψόμετρο x , το a τη βροχοβαθμίδα και το β το ύψος βροχής σε απόλυτο υψόμετρο μηδέν, δηλαδή στο υψόμετρο της επιφάνειας της θάλασσας.

4. Υδρογεωλογία

Η γνώση των υδρογεωλογικών συνθηκών μιας περιοχής, προσδιορίζεται από τα κύρια γεωλογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της. Τα σημαντικότερα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά των υδροφόρων σχηματισμών είναι η ιδιότητά τους να επιτρέπουν την κίνηση του νερού μέσα στη μάζα τους, καθώς και την δυνατότητά τους να αποθηκεύουν νερό στα πρωτογενή και δευτερογενή διάκενά τους. Τα δύο, αυτά, βασικά χαρακτηριστικά περιγράφονται στην υδρογεωλογία ως Υδραυλική αγωγιμότητα ή διαπερατότητα και πορώδες, αντίστοιχα.

Υδραυλική αγωγιμότητα ή διαπερατότητα ονομάζεται η ιδιότητα των εδαφών, των πετρωμάτων και των γεωλογικών σχηματισμών να επιτρέπουν την διείσδυση και κυκλοφορία του νερού μέσα στη μάζα τους. Κάποια πετρώματα έχουν αυξημένη την ικανότητα αυτή και ονομάζονται περατά ή υδροπερατά, άλλα την έχουν περιορισμένη και ονόμαζονται ημιπερατά και άλλα σχεδόν καθόλου ή καθόλου και ονομάζονται αδιαπέρατα ή υδατοστεγή. Στα κοκκώδη πετρώματα και σχηματισμούς η περατότητα οφείλεται στο πρωτογενές πορώδες, δηλαδή, στους κενούς χώρους που υπάρχουν μεταξύ των κόκκων των πετρωμάτων. Το πρωτογενές πορώδες ρυθμίζεται κυρίως από το σχήμα και την διάταξη των κόκκων. Στα συμπανή ή ρωγμώδη πετρώματα η περατότητα οφείλεται στο δευτερογενές πορώδες τους το οποίο είναι συνάρτηση της πυκνότητας και του μεγέθους των τεκτονικών και στρωματογραφικών ασυνεχειών τους (ρωγμές, διαρρήξεις, μεσοστρωματικά διάκενα, στρώσεις κ.ά.) καθώς και της πυκνότητας και μεγέθους των καρστικών εγκοίλων στα ανθρακικά πετρώματα.

Η υδραυλική αγωγιμότητα (hydraulic conductivity), διεθνώς στη βιβλιογραφία συμβολίζεται ως K και έχει μονάδες μέτρησης m/s . Εκφράζει την ποσότητα του νερού που διέρχεται ανά μονάδα επιφανείας του υδροφόρου ορίζοντα ανά μονάδα μεταβολής της υδραυλικής κλίσης. Εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του πορώδους μέσου και τις ιδιότητες του ρευστού. Οι υδροπερατοί σχηματισμοί παρουσιάζουν τιμές του συντελεστή υδροπερατότητας $K > 10^{-5} m/sec$. Οι υδροστεγανοί $K < 10^{-7} m/sec$ και οι ημιπερατοί σχηματισμοί (επιτρέπουν περιορισμένη κυκλοφορία του νερού δια μέσω αυτών) $10^{-7} < K < 10^{-5} m/sec$. Στον πίνακα 1, φαίνονται κάποιες τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας των πιο σημαντικών γεωλογικών υλικών.

Το πορώδες (n) είναι ένα μέτρο που δείχνει το ποσοστό των διάκενων σε ένα πέτρωμα και είναι ιδιαίτερος σημαντικό γιατί καθορίζει τη μέγιστη ποσότητα νερού που περιέχει ένας σχηματισμός όταν αυτός είναι κορεσμένος. Πιο συγκεκριμένα, ορίζεται ως ο λόγος των διάκενων προς τον συνολικό όγκο του πετρώματος και δίνεται από τη σχέση $n = V_v / V_t$. Το νερό που βρίσκεται μέσα σε ένα πορώδες μέσο, μπορεί να διακριθεί σε αυτό που μπορεί να κινηθεί κάτω από την επίδραση της βαρύτητας και αναφέρεται ως ενεργό πορώδες και σε εκείνο που συγκρατείται, με τη μορφή λεπτού υμενίου, στην επιφάνεια των κόκκων και τα τοιχώματα των πολύ μικρών ρωγμών και αναφέρεται ως ειδική κατακράτηση. Επομένως, είναι προφανές ότι το άθροισμα του ενεργού πορώδους και της ειδικής κατακράτησης έχει ως αποτέλεσμα το πορώδες του γεωλογικού σχηματισμού. Στον πίνακα 4.1 παρουσιάζονται κάποιες τιμές πορώδους των πιο σημαντικών γεωλογικών υλικών.

Πίνακας 4.1:Μερικές αντιπροσωπευτικές τιμές πορώδους και υδραυλικής αγωγιμότητας διαφορων γεωλογικών υλικών (Bowen, με τροποποίηση).

Υλικά	Τιμές ολικού πορώδους (%)	Τάξη μεγέθους υδραυλικής αγωγιμότητας x 5 (m/sec)
1) Χαλαρά		
Άργιλος	50 - 60	$10^{-12} - 10^{-10}$
Ιλύς	20 - 40	$10^{-10} - 10^{-6}$
Αλουβιακές άμμοι	30 - 40	$10^{-6} - 10^{-3}$
Αλουβιακά χαλίκια	25 - 35	$10^{-3} - 10^{-1}$
2) Συνεκτικά		
α) Ιζηματογενή		
Σχιστόλιθοι	5 - 15	$10^{-14} - 10^{-11}$
Ψαμμίτες	5 - 20	$10^{-12} - 10^{-8}$
Κροκαλοπαγή	5 - 25	$10^{-10} - 10^{-5}$
Ασβεστόλιθοι	0,1 - 10	$10^{-11} - 10^{-6}$
β) Πυριγενή και Μεταμορφωμένα		
Βασάλτες	0,001 - 50	$10^{-11} - 10^{-7}$
Αποσαθρωμένοι γρανίτες	0,001 - 10	$10^{-12} - 10^{-9}$
Υγιείς γρανίτες	0,0001 - 1	$10^{-14} - 10^{-11}$
Γραφικοί σχιστόλιθοι	0,001 - 1	$10^{-14} - 10^{-11}$
Μαρμαρυγιακοί σχιστόλιθοι	0,001 - 1	$10^{-13} - 10^{-10}$
Γνεύσιοι	0,0001 - 1	$10^{-14} - 10^{-11}$

4.1 Υδρολιθολογική κατάταξη γεωλογικών σχηματισμών

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που συμμετέχουν στην δομή της περιοχής, από την άποψη των υδρολιθολογικών χαρακτηριστικών τους, διακρίνονται σε καρστικούς σχηματισμούς από μέτριας έως υψηλής υδραυλικής αγωγιμότητας, προσχωματικούς σχηματισμούς υψηλού πορώδους με μικρή έως μέτρια υδραυλική αγωγιμότητα, μη προσχωματικούς σχηματισμούς υψηλού πορώδους με μικρή έως μέτρια υδραυλική αγωγιμότητα και τους σχεδόν αδιαπέρατους σχηματισμούς με μηδενική έως πολύ μικρή υδραυλική αγωγιμότητα. Πιο αναλυτικά:

Οι καρστικοί σχηματισμοί, επιτρέπουν την κυκλοφορία του νερού μέσω των ασυνεχειών που παρουσιάζουν (δευτερογενές πορώδες) και λόγω των υψηλών τιμών υδραυλικής αγωγιμότητας των σχηματισμών αυτών. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν οι ανθρακικοί σχηματισμοί των ενοτήτων Αλμυροπόταμου, Νεοελληνικού τεκτονικού καλύμματος και Μαυρηνόρας - Κατσιμιδίου που απαντώνται κυρίως στις περιοχές Μαραθώνα και Γραμματικού. Η κυκλοφορία του νερού στους σχηματισμούς αυτούς ελέγχεται από τις ενδιαστρώσεις πυριτόλιθων (και από τις παρεμβολές σχιστολίθων των ενοτήτων Νεοελληνικού τεκτονικού καλύμματος, Αφιδών - Τουρκοβουνίου και Μαυρηνόρας Κατσιμιδίου. Στους καρστικούς αυτούς σχηματισμούς αναπτύσσονται σημαντικές υπόγειες υδροφορίες που εκφορτίζονται από τις πηγές Μακαριάς και Οινόης που αποτελούν και την κύρια εκφόρτιση του καρστικού συστήματος. Τα νερά των σχηματισμών αυτών, παρουσιάζουν σημαντικά προβλήματα υφαλμύρισης.

Οι πορώδεις σχηματισμοί, παρουσιάζουν μικρότερη υδραυλική αγωγιμότητα από εκείνη των καρστικών σχηματισμών, όμως επιτρέπουν στην κίνηση του νερού κατά μήκος της μάζας τους. Η κυκλοφορία του νερού επιτυγχάνεται μέσω του πορώδους των κόκκων (πρωτογενές πορώδες). Ανάλογα με το είδος του σχηματισμού ταξινομούνται σε δύο διαφορετικές κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία, αναφέρεται στους κοκκώδεις προσχωματικούς σχηματισμούς μικρής έως μέτριας υδραυλικής αγωγιμότητας και κατατάσσονται σε αυτήν οι θίνες, οι σύγχρονες αποθέσεις πεδιάδων, τα παλαιά και σύγχρονα πλευρικά κορήματα και κώνοι κορημάτων καθώς και οι χερσαίες αποθέσεις του Πλειοπλειστοκαίνου. Αναπτύσσεται εδώ, στα αδρόκοκκα μέρη των ανωτέρω αποθέσεων, ασθενής υπόγεια υδροφορία, που παρουσιάζει σημαντικά προβλήματα υφαλμύρισης. Στη δεύτερη κατηγορία εντάσσονται οι κοκκώδεις μη προσχωματικές αποθέσεις μικρής έως μέτριας υδραυλικής αγωγιμότητας. Στην κατηγορία αυτήν ανήκουν οι ποταμοθαλάσσιοι σχηματισμοί, οι αδρομερείς ποταμολιμναίες αποθέσεις και οι λιμναίες αποθέσεις της περιοχής. Στους σχηματισμούς των νεογενών αναπτύσσονται ασθενείς, τοπικής μόνο σημασίας, υδροφορίες.

Οι αδιαπέρατοι ή οι σχηματισμοί με μικρή έως πολύ μικρή υδροπερατότητα είναι κυρίως οι σχιστολιθικοί σχηματισμοί της περιοχής. Μέσα στο σύστημα των σχιστολίθων περιεμβάλλονται συχνά ζώνες μαρμάρων, που έχουν τοπική υδρογεωλογική σημασία. Ασθενής υδροφορία αναπτύσσεται στον ελουβιακό μανδύα αποσάθρωσης των σχιστολίθων και στις ζώνες κερματισμού αυτών.

4.2 Υπόγεια υδροφορία

Στην περιοχή ενδιαφέροντος αναπτύσσονται δύο τύποι υδροφοριών, η καρστική και προσχωματική υπόγεια υδροφορία. Στους ανθρακικούς σχηματισμούς, η κίνηση του υπόγειου νερού γίνεται μέσω καρστικών αγωγών και ρωγμών και ελέγχεται πάντα από τις παρεμβολές αδιαπέρατων σχιστολιθικών εμφανίσεων στην όλη ανθρακική μάζα τους. Στις σύγχρονες αποθέσεις η κυκλοφορία του υπογείου νερού πραγματοποιείται μέσω του πορώδους των κόκκων εκεί όπου η στρωματογραφική δομή το επιτρέπει. Οι σχιστόλιθοι, κυρίως, και οι νεογενείς μαργαϊκές αποθέσεις είναι πρακτικά αδιαπέρατοι σχηματισμοί. Η παρουσία των σχιστολίθων ελέγχει την υπόγεια ροή στους ανθρακικούς σχηματισμούς και δημιουργεί έτσι είτε απομονωμένες μερικώς ή ολικώς ανθρακικές ενότητες είτε σε συνδυασμό με τα ρήγματα εκλεκτικές διόδους κίνησης του υπόγειου καρστικού νερού.

Η καρστική υδροφορία αναπτύσσεται στα μάρμαρα της ενότητας Αλμυροπόταμου και πιθανόν να συνδέεται με την υδροφορία του κατωτέρου μαρμάρου της Πεντέλης. Τα μάρμαρα αυτά παρουσιάζουν έντονη καρστικοποίηση. Η υπόγεια υδροφορία παρουσιάζει σε μεγάλη απόσταση από τη θάλασσα φαινόμενα υφαλμύρισης. Είναι πιθανόν εξαιτίας της παρεμβολής σχιστολιθικών ενδιαστρώσεων στα μάρμαρα να δημιουργούνται κάποιες επιμέρους επικρεμάμενες υδρογεωλογικές ενότητες που να υπερχειλίζουν όμως στην κύρια υδρογεωλογική λεκάνη των πηγών. Η κύρια εκροή του καρστικού συστήματος είναι η Μακάρια πηγή του Κάτω Σουλίου.

4.3 Πιεζομετρία

Η γνώση της πιεζομετρίας είναι σημαντική για την ερμηνεία των πιθανών τροφοδοσιών που προκύπτουν λόγω υδραυλικής επικοινωνίας των υδροφόρων και επιπλέον, βοηθούν στην ερμηνεία των χημικών αναλύσεων.

Στην περιοχή μελέτης, πραγματοποιήθηκαν σταθμημετρήσεις για τον προσδιορισμό της πιεζομετρίας. Στον πίνακα 4.2, φαίνονται τα σημεία των μετρήσεων, έχοντας συντεταγμένες στο προβολικό σύστημα του Ελληνικού Γεωδαιτικού Συστήματος Αναφοράς (ΕΓΣΑ 87), υψόμετρο που βρίσκεται η μετρηθείσα θέση, βάθος στάθμης και απόλυτο υψόμετρο στάθμης που προκύπτει από τη διαφορά του βάθους στάθμης από το υψόμετρο της μετρηθείσας θέσης. Οι μετρήσεις αφορούν γεωτρήσεις και πηγάδια, όπου ήταν εφικτή η μέτρησή τους.

Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζεται ο πιεζομετρικός χάρτης στην πεδινή περιοχή Μαραθώνα για την περίοδο Οκτωβρίου 2014. Στο ανατολικό μέρος του χάρτη εντοπίζεται η υδραυλική επικοινωνία του υδροφορέα με τη θάλασσα και όπως επιβεβαιώνεται και στη συνέχεια από τις υδροχημικές αναλύσεις η περιοχή βρίσκεται υπό καθεστώς θαλάσσιας διεύθυνσης. Το απόλυτο υψόμετρο στάθμης (ΑΥΖ) του παράκτιου υδροφορέα κυμαίνεται από -0,8 - 6,9 m. Στο Δυτικό τμήμα του χάρτη βρίσκονται τα ανθρακικά πετρώματα, που όπως φαίνεται από την πιεζομετρία, τροφοδοτούν τον προσχωματικό υδροφόρο. Αυτό συμβαίνει διότι οι πιεζομετρικές καμπύλες στο λοφώδες - ανθρακικό υπόβαθρο είναι πυκνές, η υδροστατική στάθμη στα μάρμαρα είναι υψηλότερη και από τις προκύπτουσες γραμμές ροής συμπεραίνεται η πλευρική τροφοδοσία των δύο υδροφόρων.

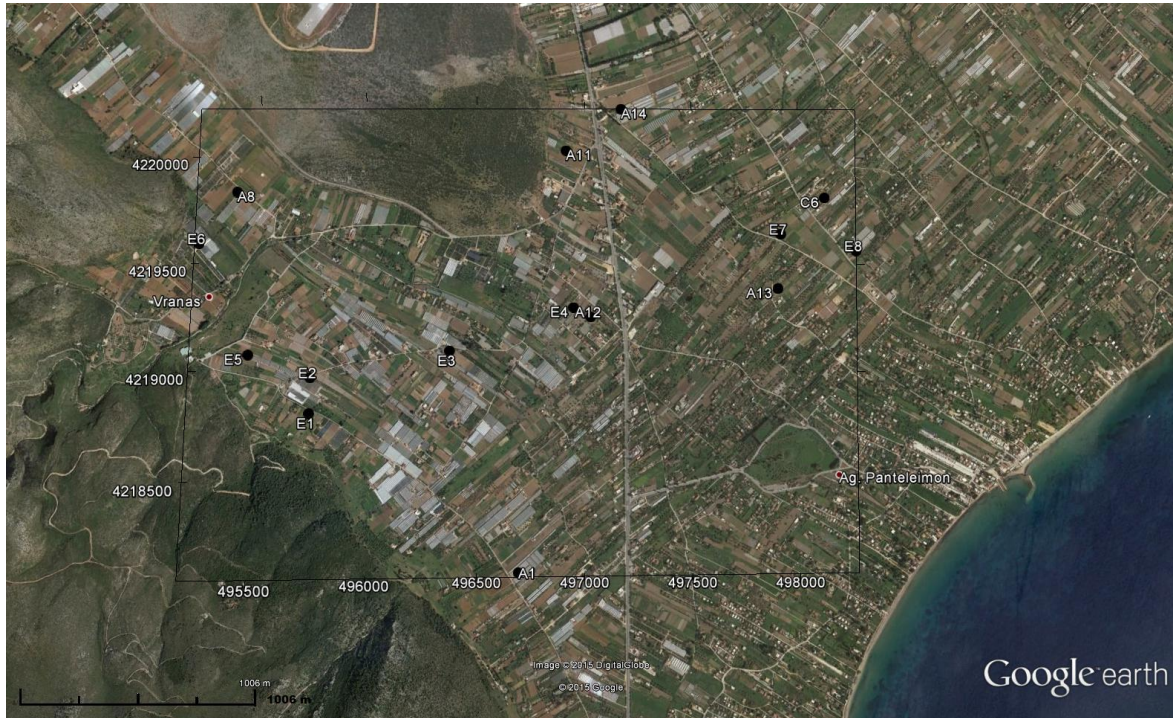
Πίνακας 4.2: Στοιχεία σταθμημετρήσεων στην πεδινή περιοχή Μαραθώνα.

ID	λ	φ	βαθος	Z*	ΑΥΖ	Είδος σημείου**	Υδροφόρος***
A1	496692	4218074	10,2	11,4	1,2	Γ	Π
A11	496911	4220034	12,55	13,6	1,05	Π	Π
A12	497027	4219253	12,8	14,3	1,5	Π	Π
A13	497904	4219386	7,5	8,4	0,9	Π	Π
A14	497170	4220230	11,8	14	2,2	Γ	Π
A8	495374	4219835	28,8	29,2	0,4	Γ	Κ
C6	498125	4219811	8,1	10,4	2,3	Γ	Π
E1	495719	4218805	28,3	35,2	6,9	Γ	Κ
E2	495723	4218970	26,5	30,2	3,7	Γ	Κ
E3	496369	4219095	17,9	17,1	-0,8	Π	Π
E4	496947	4219297	13,4	13,6	0,2	Γ	Π
E5	495435	4219075	34,1	34,8	0,7	Γ	Κ
E6	495201	4219592	36,7	38,3	1,6	Γ	Κ
E7	497919	4219640	8,3	9,7	1,4	Γ	Π
E8	498272	4219562	7,2	8,3	1,1	Γ	Π

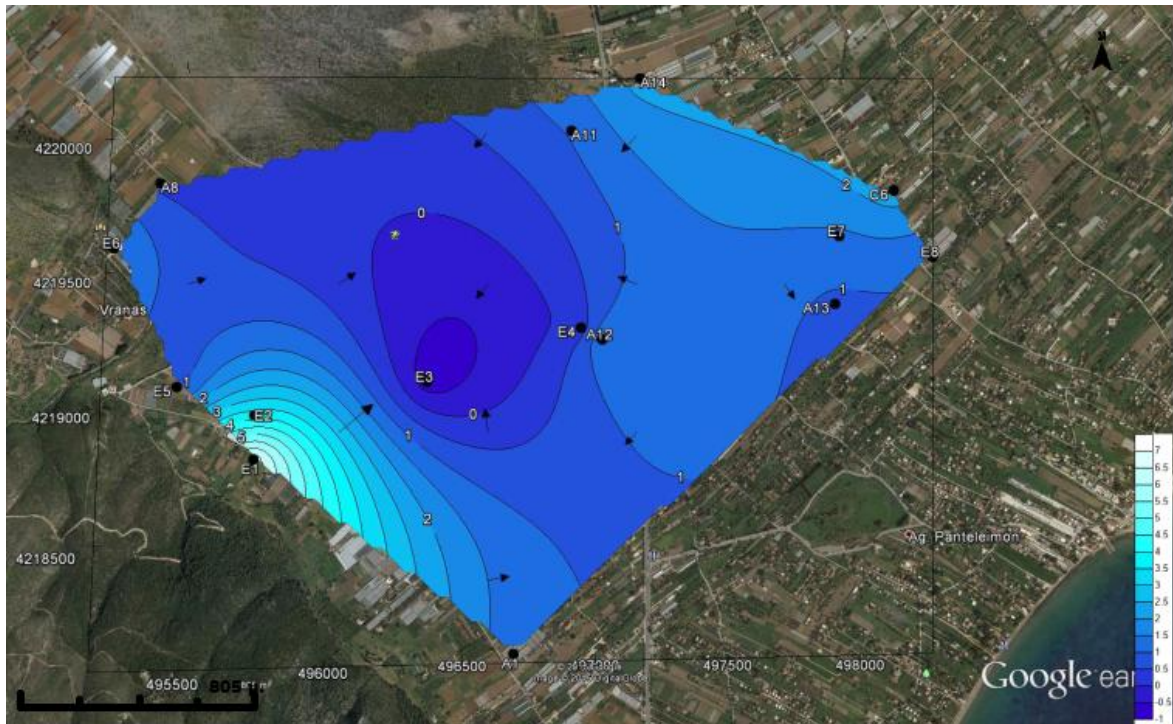
* Απόλυτο υψόμετρο (Z) που εκτιμήθηκε σε χάρτες κλίμακας 1:5000.

** Γ= Γεώτρηση, Π=πηγάδι

***Π=προσχωματικός, Κ=Καρστικοί

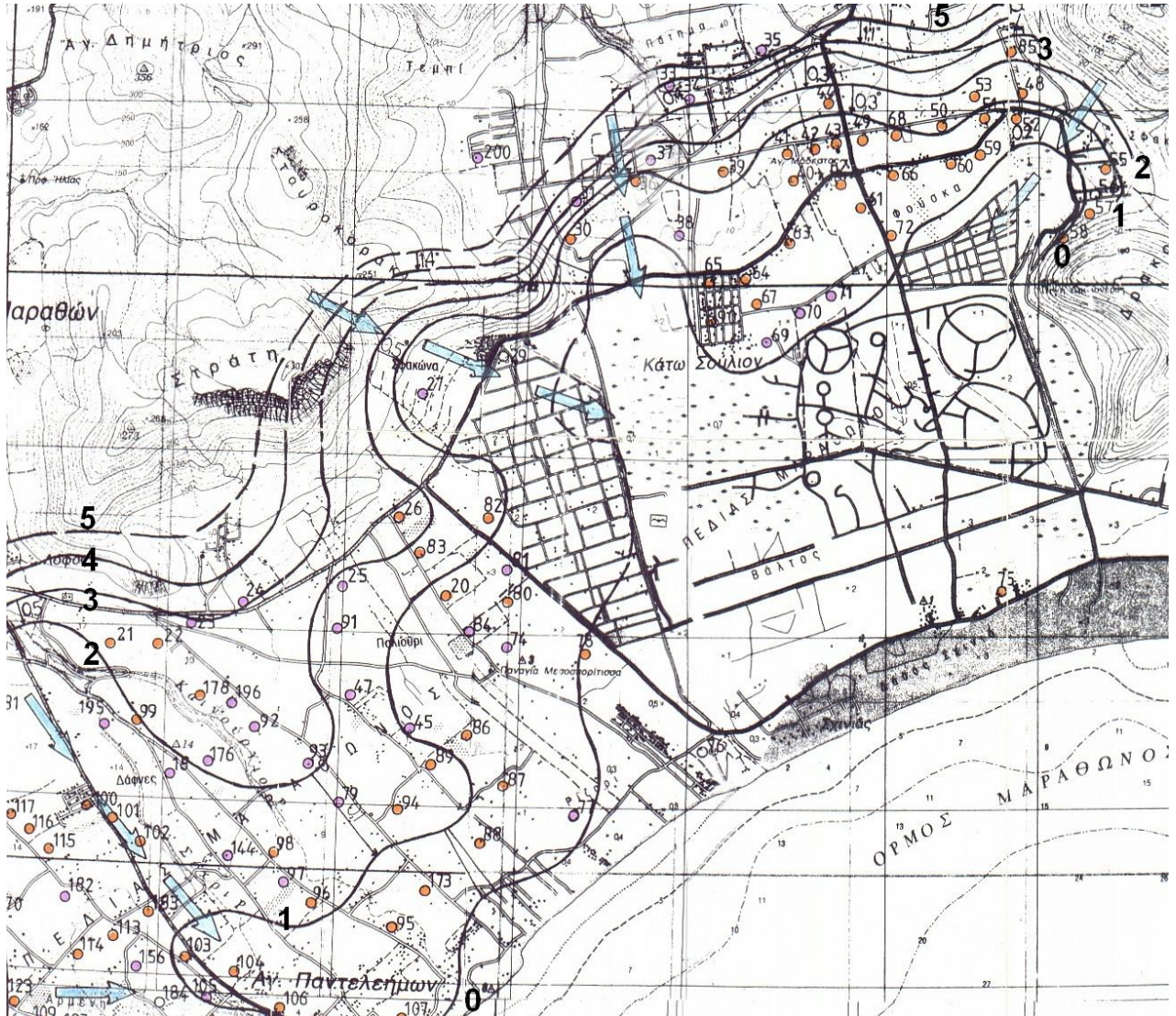


Σχήμα 4.1: Χάρτης σημείων πιεζομετρίας στην περιοχή μελέτης.

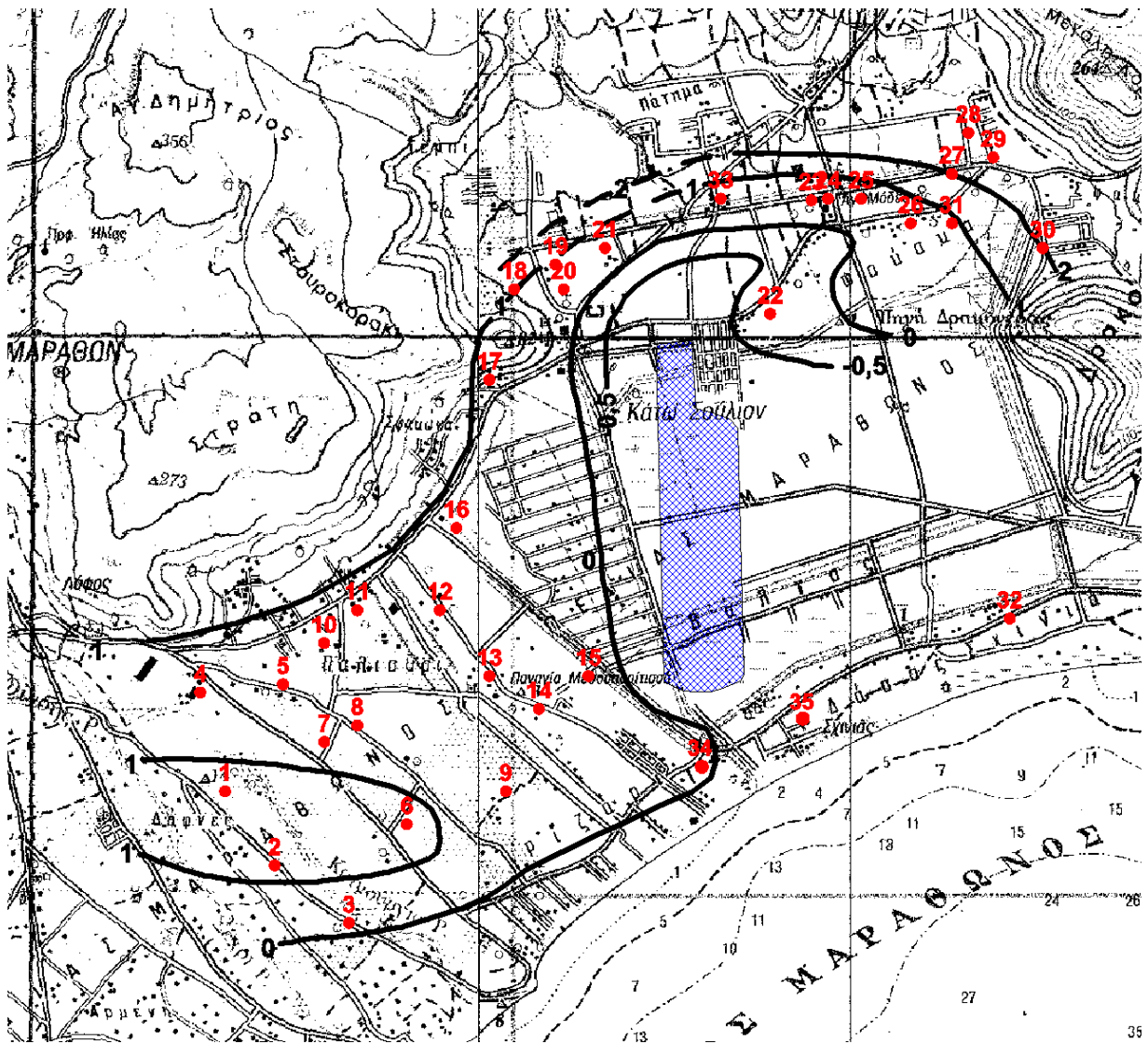


Σχήμα 4.2: Πιεζομετρικός χάρτης περιόδου Οκτωβρίου 2014.

Συγκριτικά με προγενέστερες μελέτες στην ίδια περιοχή μελέτης οι κουμαντάκης et al. (1993), Μελισσάρης και Σταυρόπουλος (1999) και Φωτόπουλος (2004) παρουσιάζουν μια υπερετήσια βαθμιαία μικρή πτώση στάθμης που εξηγεί το υπάρχον καθεστώς υπεράντλησης (Σχήμα 4.3,4.4) για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών. Το αρνητικό ισοζύγιο της υδροστατικής στάθμης αντικατοπτρίζει, αφενός την ξηρή περίοδο και την έλλειψη βροχοπτώσεων και αφετέρου την υπεράντληση. Παρ' όλα αυτά, η κατάσταση στην πεδιάδα του Μαραθώνα δεν έχει αλλάξει άρδην.



Σχήμα 4.3: Χάρτης πιεζομετρικών καμπυλών περιόδου χαμηλής στάθμης. Οκτώβριος 1998. (Μελισσάρης-Σταυρόπουλος, 1999).



Σχήμα 4.4: χάρτης πιεζομετρικών καμπυλών για την περίοδο χαμηλής στάθμης. Οκτώβριος 2003. (Φωτόπουλος, 2004).

4.4 Υδροχημεία

4.4.1 Γενικά

Το βασικό εργαλείο ελέγχου της ποιότητας των υδάτων είναι οι χημικές αναλύσεις. Η χημική σύσταση των υπόγειων νερών καθορίζεται κυρίως από τη σύσταση των πετρωμάτων μέσω των οποίων διακινείται στο υπέδαφος. Καθορίζεται επίσης από τη χρονική διάρκεια της επαφής του υπόγειου νερού με κάθε πέτρωμα, την ταχύτητα της κίνησης κλπ. Συνεπώς η χημική σύσταση των υπογείων νερών δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται χωροχρονικά. Δευτερογενώς, η χημική σύσταση των υπόγειων νερών επηρεάζεται σε μικρό ή μεγάλο βαθμό από παράγοντες ανθρωπογενούς προέλευσης όπως η ρύπανση από άμεση ή έμμεση απόρριψη ρύπων στο έδαφος ή στο υπέδαφος.

Η υδροχημική έρευνα αποτελεί ουσιαστικό παράγοντα και αναπόσπαστο μέρος μιας υδρογεωλογικής μελέτης μικρής ή μεγάλης κλίμακας και η συμβολή της είναι καθοριστική στην διερεύνηση θεμάτων όπως η προέλευση των υπόγειων νερών, οι συνθήκες εμπλουτισμού και ανανέωσης των νερών των υπόγειων υδροφορέων, ο χρόνος παραμονής τους στο υπέδαφος κλπ.

Μέσω της υδροχημικής έρευνας προσδιορίζεται και η καταλληλότητα των νερών για διάφορες χρήσεις, δεδομένου ότι η ποσοτική επάρκεια των υδατικών πόρων προϋποθέτει και καθορίζεται από την ποιοτική τους κατάσταση.

Το δίλημμα των τελευταίων δεκαετιών «περισσότερο νερό χειρότερης ποιότητας ή λιγότερο νερό καλύτερης ποιότητας» αποτελεί απόδειξη ότι η ποιότητα είναι εξίσου σημαντικός παράγοντας με την ποσότητα του νερού. Για το λόγο αυτό, η Ευρωπαϊκή Κοινότητα εξέδωσε την Οδηγία 2000/60/ΕΚ. Όπως χαρακτηριστικά τονίζεται στην Οδηγία αυτή, «το ύδωρ δεν είναι εμπορικό προϊόν, όπως όλα τα άλλα, αλλά αποτελεί κληρονομιά που πρέπει να προστατεύεται και να τυγχάνει της κατάλληλης μεταχείρισης». Οι διατάξεις και κανόνες που προβλέπονται στην παραπάνω Οδηγία αντιμετωπίζουν τους υδατικούς πόρους με την περιβαλλοντική τους διάσταση και δίνεται έμφαση όχι μόνο στην προστασία τους, αλλά και στην πρόληψη της ρύπανσης και στην αποκατάσταση των ρυπασμένων επιφανειακών και υπόγειων νερών.

Στον πίνακα 4.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων από τη δειγματοληψία 25 δειγμάτων κατά την περίοδο Οκτωβρίου 2014 και στον πίνακα 4.4 τα περιγραφικά τους στατιστικά. Πρόκειται για τις κυριότερες παραμέτρους που καθορίζουν την χημική σύσταση των υπόγειων νερών και που εξετάζονται στα πλαίσια της παρούσας υδροχημικής μελέτης. Περαιτέρω ανάλυση και συμπεράσματα προκύπτουν παρακάτω, όπου γίνεται στατιστική ερμηνεία και χωρική τοποθέτηση των δειγμάτων, όπου προκύπτουν συμπεράσματα για το υπάρχον υδρογεωλογικό καθεστώς. Στη συνέχεια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ακολουθούν αναλυτικά η μέθοδος δειγματοληψίας, οι *in situ* μετρήσεις, οι εργαστηριακές χημικές αναλύσεις, ο έλεγχος αξιοπιστίας των χημικών αναλύσεων, η λεπτομερής μεθοδολογία της στατιστικής επεξεργασίας που ακολουθήθηκε και τέλος η ανάλυση των φυσικοχημικών παραμέτρων που αναλύονται στον πίνακα 2, παραθέτοντας την ερμηνεία της καθεμίας για την κατάσταση της περιοχής.

Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα χημικών αναλύσεων στην πεδινή περιοχή Μαραθώνα.

ID	X (ΕΓΣΑ87)	Y (ΕΓΣΑ87)	EC ($\mu\text{S/cm}$)	pH	Ca ⁺² (mg/l)	Mg ⁺² (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ⁻² (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	NO ₂ ⁻ (mg/l)	TDS (mg/l)	TH (mg/l)
A3	496638	4218295	2660	7,13	291	42	3,2	121	330	195	105	0,016	1689,22	899,7
A4	496307	4218793	3039	6,65	382	64	2,1	113	410	248	175	0,016	2157,12	1217,4
A5	495901	4219628	1830	6,9	136	21	5	136	315	73	24	0,012	955,01	426,1
A6	494701	4220518	1280	6,97	118	15	2	74	190	41	16	0,012	707,01	356,5
A7	495201	4219960	1025	6,97	102	16	3,2	45	99	47	17	0,013	609,21	320,6
A14	497170	4220230	1868	6,77	120	20	7,6	174	320	74	7	0,015	1004,62	382
A15	496950	4221141	1990	6,909	112	22	9,1	193	380	73	4	0,016	1009,12	370,2
B2	496195	4218800	1700	6,96	194	26	2	48	160	88	75	0,017	1054,02	591,6
B3	496506	4218623	2370	6,905	266	39	2,2	78	265	196	116	0,016	1469,22	824,9
B4	495962	4218682	1130	7,24	120	11	2,2	38	75	59	31	0,013	653,21	345,1
B6	496043	4219102	1616	7,36	171	24	1,8	53	250	50	49	0,029	885,83	525,9
B7	495986	4219053	1675	7,17	136	19	3,7	113	355	55	17	0,015	826,72	417,9
B8	496278	4219180	1650	7,24	132	18	3,6	130	325	54	16	0,011	887,61	403,8
B9	496369	4219095	3340	7,24	362	69	3,9	144	545	155	144	0,037	2117,94	1187,9
B10	496759	4217462	1390	7,252	112	15	4,4	115	255	51	8	0,013	777,41	341,5
C1	498713	4218865	3900	6,26	273	63	10	414	1100	340	17	0,066	2217,07	940,8
C2	498263	4219050	3580	7,075	168	39	15	418	870	198	19	0,028	1794,03	579,9
C4	498287	4219097	4450	6,911	315	54	10	494	1040	270	48	0,022	2639,02	1008,9
C5	497919	4219640	2810	6,96	168	32	11	310	670	163	18	0,019	1506,02	551,2
C6	498125	4219811	2380	7,15	157	26	9,3	249	470	122	17	0,012	1355,31	499,1
C7	498041	4219542	2890	6,875	173	32	8,7	318	695	175	20	0,017	1533,72	563,7
C8	498366	4219289	3320	7,275	198	38	9,2	355	725	208	28	0,019	1784,22	650,8
C9	498360	4218650	3460	6,87	173	42	14	390	800	233	27	0,021	1778,02	604,7
C10	497633	4218822	3900	6,893	300	50	9,7	394	850	250	52	0,033	2334,73	955
C11	497719	4219017	4720	6,854	380	58	15	433	1220	240	54	0,021	2592,02	1187,8

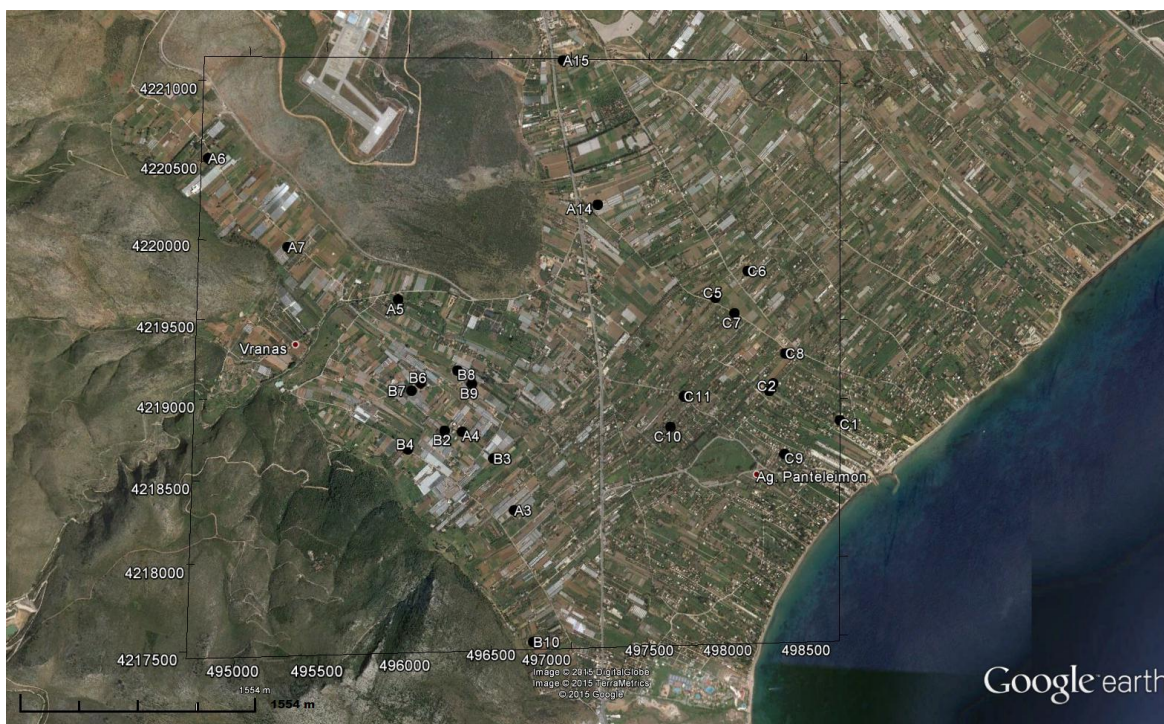
Πίνακας 4.4: Περιγραφικά στατιστικά.

	EC ($\mu\text{S/cm}$)	pH	T ($^{\circ}\text{C}$)	Ca (mg L^{-1})	Mg (mg L^{-1})	K (mg L^{-1})	Na (mg L^{-1})	HCO_3 (mg L^{-1})	Cl (mg L^{-1})	SO_4^{-2} (mg L^{-1})	NO_3 (mg L^{-1})	NO_2 (mg L^{-1})	TDS (mg L^{-1})	TH (mg L^{-1})
Μέση τιμή	2558,92	6,99	20,14	202,36	34,20	6,72	214,00	309,54	508,56	146,32	44,16	0,020	1453,50	646,12
Τυπική απόκλιση	1067,16	0,24	0,63	90,48	17,31	4,34	147,55	185,35	325,23	88,14	45,17	0,012	632,89	293,17
Μέγιστη τιμή	4720	7,36	20,9	382	69	15	494	763	1220	340	175	0,066	2639,02	1217,4
Ελάχιστη τιμή	1025,00	6,26	18,80	102,00	11,00	1,80	38,00	67,00	75,00	41,00	4,00	0,011	609,21	320,60
Εύρος	3695,00	1,10	2,10	280,00	58,00	13,20	456,00	696,00	1145,00	299,00	171,00	0,06	2029,81	896,80
Q ₁ *	1675,00	6,89	19,80	132,00	20,00	3,20	113,00	204,75	265,00	59,00	17,00	0,01	887,61	403,80
Διάμεσος	2380,00	6,96	20,20	171,00	32,00	5,00	144,00	265,50	380,00	155,00	24,00	0,02	1469,22	563,70
Q ₃ *	3340,00	7,17	20,60	273,00	42,00	9,70	355,00	413,25	725,00	208,00	52,00	0,02	1794,03	899,70
Ασυμμετρία	0,39	-1,04	-0,91	0,84	0,61	0,53	0,50	1,05	0,72	0,39	1,72	2,79	0,40	0,78
Κυρτότητα	2,11	5,51	3,04	2,37	2,20	2,06	1,71	3,56	2,49	1,99	5,30	12,47	1,93	2,29

*Q₁: First Quartile*Q₃: Third Quartile

4.4.2 Δειγματοληψία

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής, πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία υπόγειων νερών κατά την περίοδο Οκτωβρίου 2014. Πρόκειται για τον τελευταίο μήνα της ξηρής περιόδου, καθώς είναι η περίοδος αμέσως μετά το καλοκαίρι και τα νερά αναμένονται να βρίσκονται σε χαμηλά επίπεδα. Οι θέσεις δειγματοληψίας, επιλέχθηκαν με βάση τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες, στην πεδινή περιοχή του Μαραθώνα. Στη συνέχεια, παρατίθεται το σχήμα 4.5, που είναι ο χάρτης χωρικής κατανομής των δειγμάτων που μελετώνται στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.



Σχήμα 4.5: Χάρτης θέσεων συλλογής δειγμάτων για χημικές αναλύσεις.

4.4.3 Επιτόπιες μετρήσεις και εργαστηριακές αναλύσεις

Σε κάθε θέση δειγματοληψίας, λαμβάνονταν δύο δείγματα νερού. Το πρώτο, αφορούσε τις χημικές αναλύσεις των κύριων ανιόντων και κατιόντων. Το εν λόγω δείγμα, αποθηκευόταν σε φιαλίδιο πολυαιθυλενίου, το οποίο είχε αποπλυθεί αρχικώς με απιονισμένο νερό, και αφού αποπλενόταν αρκετές φορές με το νερό του δείγματος στη συνέχεια διατηρούνταν σε δροσερό και σκιερό μέρος, μέχρι τη μεταφορά τους στα εργαστήρια της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών για την εκτέλεση των χημικών αναλύσεων. Το δεύτερο δείγμα, σχετιζόταν με τις επιτόπιες μετρήσεις που αφορούν τις ασταθείς φυσικοχημικές παραμέτρους του νερού, δηλαδή μετρήσεις ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC), pH και θερμοκρασίας με τα φορητά όργανα του Εργαστηρίου Τεχνικής Γεωλογίας & Υδρογεωλογίας, της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η υπαίθρια συλλογή δειγμάτων

έγινε υπό αίθριες καιρικές συνθήκες τις ημερομηνίες 7/10/2014 , 15/10/2014 , 18/10/2014 και 25/10/2014 μέχρι να συμπληρωθεί ο αριθμός των 25 δειγμάτων. Επιπροσθέτως, έγιναν μετρήσεις με φορητό σταθμόμετρο για τον προσδιορισμό του βάθους του νερού για τη δημιουργία πιεζομετρικών χαρτών.



Σχήμα 4.6: A) Η γεώτρηση A1 και B) η εγκαταλελειμμένη γεώτρηση E2.

4.4.4 Επεξεργασία δεδομένων

Για την αριθμητική κατανόηση των μεγεθών του συνόλου των δειγμάτων και των τιμών των φυσικοχημικών παραμέτρων χρησιμοποιήθηκαν στατιστικά μεγέθη, τα οποία πρέπει να οριστούν:

- Μέση τιμή ή μέσος όρος ενός συνόλου n παρατηρήσεων αποτελεί το σπουδαιότερο και χρησιμότερο μέτρο της στατιστικής και είναι ένα μέτρο θέσης,

δηλαδή δείχνει σχετικά τις θέσεις των αριθμών στους οποίους αναφέρεται. Ορίζεται ως το άθροισμα των παρατηρήσεων δια του πλήθους αυτών. Συμβολίζεται με \bar{x} και ο μαθηματικός της τύπος είναι:

$$x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i$$

- Τυπική απόκλιση αποτελεί μέτρο της διασποράς των τιμών σε σχέση με την τιμή του μέσου όρου. Συμβολίζεται με το S και ο μαθηματικός της τύπος είναι:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x)^2}$$

- Μέγιστη τιμή είναι η μεγαλύτερη τιμή που μπορεί να βρεθεί σε ένα δειγματικό χώρο. Αποτελεί το ανώτατο όριο των δειγματικών τιμών.
- Ελάχιστη τιμή είναι η μικρότερη τιμή που μπορεί να βρεθεί σε ένα δειγματικό χώρο. Αποτελεί τη κατώτατο όριο των δειγματικών τιμών.
- Εύρος τιμών είναι η διαφορά της ελάχιστης τιμής από τη μέγιστη.
- Τεταρτημόρια (Quartiles) είναι οι τιμές της μεταβλητής που χωρίζουν το σύνολο των τιμών της σε 4 ισοπληθείς ομάδες. Το πρώτο τεταρτημόριο (Q1) αντιστοιχεί στο 25% των τιμών, το δεύτερο τεταρτημόριο αντιστοιχεί στο 50% των τιμών και ονομάζεται διάμεσος, το τρίτο τεταρτημόριο (Q3) αντιστοιχεί στο 75% των τιμών.
- Ασυμετρία είναι ένα μετρό που χαρακτηρίζει μια κατανομή γύρω από τη μέση τιμή της.
- Κυρτότητα είναι ένα μέτρο που αφορά το βαθμό συγκέντρωσης των δεδομένων γύρω από το μέσο και τα άκρα της κατανομής.
- Συντελεστής συσχέτισης, είναι ένας μέγεθος που μετρά τη συσχέτιση μεταξύ δύο μεταβλητών. Οι τιμές που παίρνει είναι μεταξύ του -1 και +1. Οι αρνητικές τιμές δηλώνουν αντίστροφη συσχέτιση. Καλή συσχέτιση δηλώνεται όταν οι τιμές του συντελεστή είναι $>|0,70|$

Η χωρική απεικόνιση των δεδομένων δίνεται από το πρόγραμμα Surfer 11 με τη χρήση της γεωστατιστικής μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής Kriging. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει κάποιες βέλτιστες, από στατιστική άποψη, ιδιότητες, οι οποίες είναι η αποφυγή της μεροληπτικής εκτιμήσεως στην περίπτωση συσσωρεύσεως σημείων με μετρήσεις σε ορισμένες θέσεις και η εκτίμηση σε κάθε σημείο, του μέτρου του σφάλματος ή της αβεβαιότητας για την επιφάνεια που υπολογίστηκε. Το Kriging λειτουργεί με τον υπολογισμό ενός βέλτιστου συνδυασμού σταθμικών συντελεστών (βαρών), με βάση την πληροφορία του ημιμεταβλητογράμματος. Εφόσον το ημιμεταβλητόγραμμα είναι συνάρτηση της απόστασης, οι σταθμικοί συντελεστές μεταβάλλονται σύμφωνα με τη γεωμετρική κατανομή των σημείων των μετρήσεων στο χώρο.

4.4.5 Φυσικοχημικές παράμετροι

4.4.5.1 Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα (E.C.) και τα συνολικά διαλυμένα στερεά (T.D.S.)

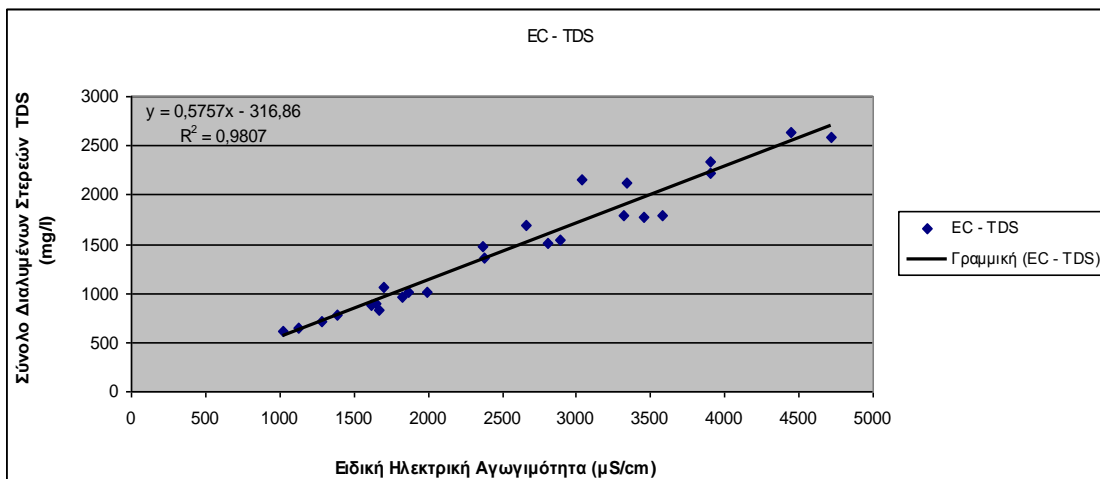
Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα ή electrical conductance (E.C.), είναι μια σημαντική υδροχημική παράμετρος από την τιμή της οποίας δίνεται η γενική εικόνα της ποιότητας του νερού. Εκφράζει την ικανότητα του νερού να μεταφέρει ηλεκτρικό ρεύμα, είναι δηλαδή το αντίστροφο της ηλεκτρικής αντίστασης και συνήθως βρίσκεται σε γραμμική αναλογία με το σύνολο της συγκέντρωσης των ιόντων των διαλυμένων ουσιών στο νερό. Η μέτρηση της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας γίνεται επί τόπου με τη χρήση φορητού αγωγιμόμετρου και μετριέται σε microsiemens / cm ($\mu\text{S}/\text{cm}$). Αυτή, πρέπει να πραγματοποιείται σε συγκεκριμένη θερμοκρασία, συνήθως 25 °C, γιατί όπως η ιοντική δραστηριότητα έτσι και η ηλεκτρική αγωγιμότητα αυξάνει με την αύξηση της θερμοκρασίας. Σύμφωνα με την οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης, το ενδεικτικό επίπεδο της EC για τα πόσιμα νερά είναι 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ στους 20°C. Έτσι, η EC εκφράζει κατά σχεδόν άμεσο τρόπο την συνολική συγκέντρωση των διαλυμένων αλάτων και έμμεσα τις συνθήκες κίνησης και τον χρόνο παραμονής των νερών στο υπέδαφος, τις συνθήκες τροφοδοσίας και ανανέωσης των υδροφόρων και το γενικό πλαίσιο της υποβάθμισης της φυσικής ποιότητας των υπόγειων νερών λόγω ρύπανσης, υφαλμύρισης κ.λ.π. Η EC συνήθως κυμαίνεται μεταξύ των 300 και 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ για τα γλυκά νερά, ενώ στις περιπτώσεις που ο υδροφόρος έχει υποστεί ρύπανση η τιμή αυτή συνήθως ξεπερνά τα 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, όπως συνήθως συμβαίνει στους παράκτιους υδροφορείς εξαιτίας της υφαλμύρισης.

Από τον πίνακα 4.4, που έχουν παρουσιαστεί τα περιγραφικά στατιστικά χαρακτηριστικά των συγκεντρώσεων των δειγμάτων για την περίοδο του Οκτωβρίου 2014, φαίνεται πως η E.C. έχει μέση τιμή 2558,92 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Οι μετρηθείσες τιμές κυμαίνονται από 1025 $\mu\text{S}/\text{cm}$ έως 4720 $\mu\text{S}/\text{cm}$, έχοντας δηλαδή εύρος 3695 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Το Quartile 1, η διάμεσος και το Quartile 3 παρουσιάζουν μια διακύμανση του δείγματος των τιμών, συγκριτικά με τη μέση τιμή. Η διάμεσος είναι μικρότερη της μέσης τιμής και αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η πλειονότητα των δειγματικών τιμών εμφανίζουν την τάση της συσσώρευσης προς τις ελάχιστες τιμές, γεγονός που επιβεβαιώνεται από την υπάρχουσα θετική ασυμμετρία. Τέλος, η κυρτότητα είναι μικρότερη του 3, επομένως η κατανομή των δειγμάτων έχει πλατύκυρτη μορφή. Ερμηνεύοντας τα νούμερα, οι τιμές είναι αρκετά υψηλές. Όλα τα δείγματα έχουν $EC > 1000 \mu\text{S}/\text{cm}$ που σημαίνει ότι στο σύνολο των δειγμάτων μας δε βρέθηκε καμία τιμή EC που να βρίσκεται στα όρια του γλυκού νερού και η ελάχιστη τιμή EC είναι υπερδιπλάσια της ενδεικτικής, σύμφωνα με την οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Η μέση τιμή είναι αρκετά μεγαλύτερη από την τιμή των 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, τόσο ώστε να προκύπτει, στατιστικά και μόνο, το τεράστιο πρόβλημα της περιοχής σχετικά με την EC, συνεπώς και με την υφαλμύριση.

Τα συνολικά διαλυμένα στερεά (T.D.S.) , αποτελούν σαφή δείκτη της μεταλλικότητας των υπογείων νερών και εκφράζουν την συνολική συγκέντρωση των διαλυμένων σε αυτά αλάτων. Βρίσκονται σε άμεση συσχέτιση με την EC (Mandel & Shiftan, 1981) και κατ' αντιστοιχία εκφράζουν έμμεσα τις συνθήκες τροφοδοσίας και ανανέωσης καθώς και τη γενική Σχήμα της υποβάθμισης της φυσικής ποιότητας των υπόγειων νερών.

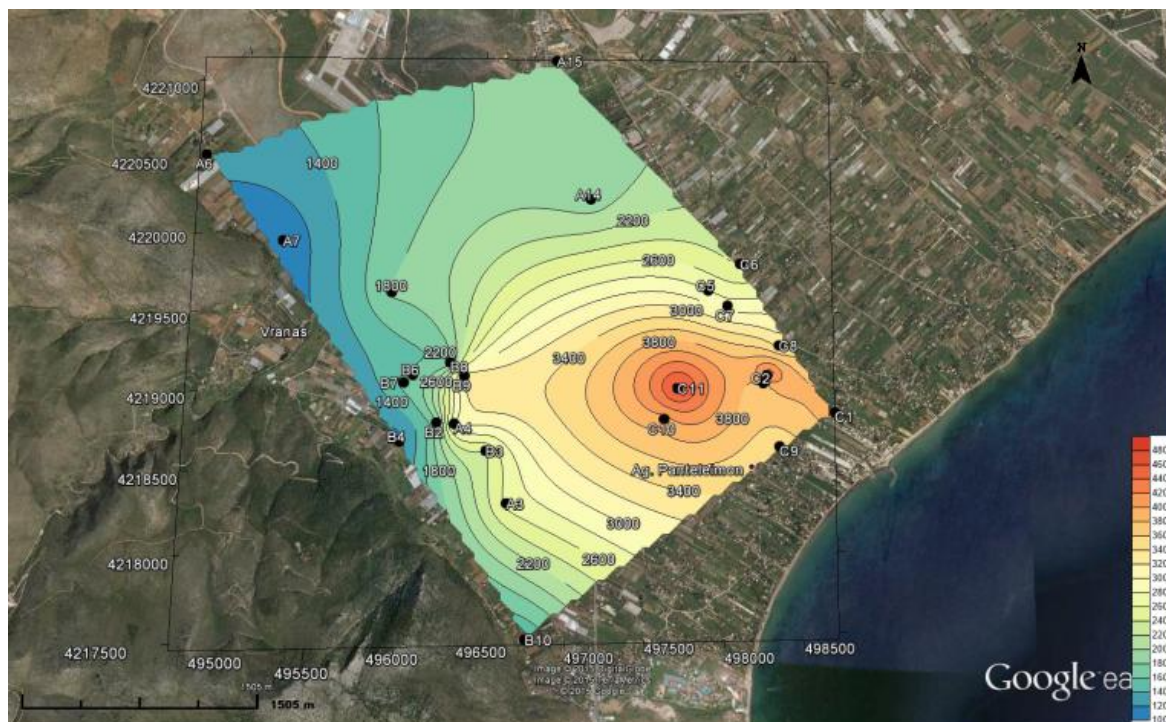
Από τον πίνακα 4.4, που έχουν παρουσιαστεί τα περιγραφικά στατιστικά χαρακτηριστικά των συλλεχθέντων δειγμάτων για την περίοδο του Οκτωβρίου 2014, φαίνεται πως τα T.D.S. έχουν μέση τιμή 1453,5 mg/l. Οι μετρηθείσες τιμές κυμαίνονται από 632,89 έως 2639,03 mg/l, έχοντας δηλαδή εύρος 2029,81 mg/l. Το Quartile 1, η διάμεσος και το Quartile 3 παρουσιάζουν μια διακύμανση του δείγματος των τιμών, συγκριτικά με τη μέση τιμή. Η διάμεσος είναι μεγαλύτερη της μέσης τιμής, όμως βρίσκονται πολύ κοντά. Η θετική ασυμμετρία δείχνει μια συσσώρευση τιμών προς τα ελάχιστα και η κυρτότητα είναι μικρότερη του 3, έχοντας πλατύκυρτη μορφή.

Η σχέση που συνδέει τα δύο αυτά μεγέθη είναι της μορφής $TDS = k \times E.C.$ όπου TDS εκφράζονται σε mg/l και η E.C. σε $\mu S/cm$ στους $25^{\circ}C$. Ο παράγοντας k είναι συντελεστής διόρθωσης και κυμαίνεται μεταξύ 0,55 και 0,90. Στην παρούσα εργασία, η μαθηματική σχέση που συνδέει το TDS με την ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα των υπόγειων νερών της περιοχής Μαραθώνα έχει τη μορφή $TDS = 0,5757 EC - 316,86$ ($R^2 = 0,9807$). Επομένως, το TDS συσχετίζεται πολύ ικανοποιητικά με την ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα, καθώς οι προκύπτουσες τιμές προσεγγίζουν τις αναμενόμενες της βιβλιογραφίας και αυτό υποδηλώνει την αξιοπιστία των χημικών αναλύσεων (Σχήμα 4.7).



Σχήμα 4.7: Διάγραμμα συσχέτισης TDS (mg/l) και ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας EC ($\mu S/cm$) των υπόγειων νερών της περιοχής Μαραθώνα.

Το Σχήμα 4.8 αποτελεί χάρτη χωρικής κατανομής της E.C. ($\mu S/cm$) όπως αυτή μετρήθηκε in situ με τη χρήση φορητού αγωγιμόμετρου κατά τον Οκτώβριο του 2014 στην πεδινή περιοχή του Μαραθώνα. Υπάρχει μια χρωματική διαβάθμιση της E.C. με τις υψηλότερες τιμές να απεικονίζονται με κόκκινο χρώμα, ενώ οι χαμηλότερες με μπλε. Η κατάσταση που παρουσιάζεται στην περιοχή είναι αναμενόμενη, αφού στο ανατολικό κομμάτι της υπάρχει θάλασσα και εκεί αναμένονται οι υψηλότερες τιμές εξαιτίας της θαλάσσιας διείσδυσης. Αντίθετα στο δυτικό κομμάτι, παρουσιάζονται οι μικρότερες τιμές, αφού είναι τα πιο απομακρυσμένα σημεία από τη θάλασσα και ταυτόχρονα το ανάγλυφο είναι εντονότερο, οι υπάρχοντες γεωλογικοί σχηματισμοί είναι ανθρακικά πετρώματα που συνεχώς τροφοδοτούν το πεδινό τμήμα του Μαραθώνα ανανεώνοντας συνεχώς τους υδροφορείς με νερό που είναι ανεπηρέαστο από τη θαλάσσια διείσδυση.

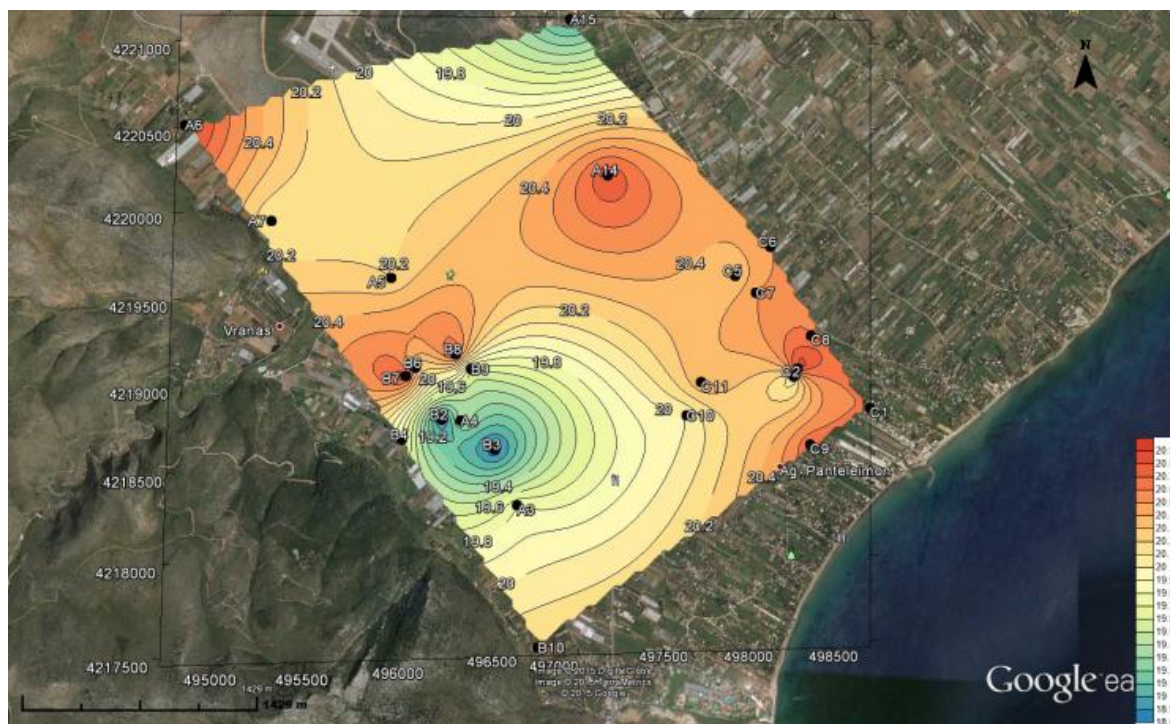


Σχήμα 4.8: Χωρική κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας ($\mu\text{S}/\text{cm}$) στην πεδινή περιοχή του Μαραθώνα.

4.4.5.2 Θερμοκρασία ($T^{\circ}\text{C}$)

Η θερμοκρασία ($T^{\circ}\text{C}$) του υπόγειου νερού είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος καθώς μας δίνει πληροφορίες για το είδος του γεωλογικού σχηματισμού και την προέλευση του ύδατος. Σύμφωνα με τον Fetter (2001), η θερμοκρασία του υπόγειου νερού παρουσιάζει διαφορετικές τιμές, σε διαφορετικούς γεωλογικούς σχηματισμούς. Η οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης θεωρεί ως ενδεικτική τιμή τους 12°C για τα πόσιμα νερά. Όταν αυξάνεται η θερμοκρασία του νερού εκδιώκονται τα διαλυμένα αέρια και το νερό γίνεται λιγότερο εύγευστο. Όταν η θερμοκρασία υπερβεί τους 15°C πολλαπλασιάζονται τα υπάρχοντα μικρόβια με αποτέλεσμα την εμφάνιση δυσάρεστων οσμών και γεύσεων (Παππα, 2001). Το μέγιστο επιτρεπτό όριο, σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Ένωση είναι 25°C .

Από τον πίνακα 4.4, που έχουν παρουσιαστεί τα περιγραφικά στατιστικά χαρακτηριστικά των συγκεντρώσεων των δειγμάτων για την περίοδο του Οκτωβρίου 2014, φαίνεται πως η T έχει μέση τιμή $20,14^{\circ}\text{C}$. Οι μετρηθείσες τιμές κυμαίνονται από $18,8^{\circ}\text{C}$ έως $20,9^{\circ}\text{C}$, έχοντας δηλαδή εύρος $2,1^{\circ}\text{C}$. Η ασυμμετρία των τιμών της T είναι αρνητική, επομένως οι δειγματικές τιμές εμφανίζουν μια συγκέντρωση προς τις υψηλές τιμές. Η κυρτότητα είναι πολύ κοντά στο 3, ομοιάζει στην κανονική κατανομή και χαρακτηρίζεται ως μεσόκυρτη. Στην Σχήμα 4.9 παρουσιάζεται η χωρική κατανομή της T στην πεδινή περιοχή Μαραθώνα. Η χρωματική διαβάθμιση περιλαμβάνει τις χαμηλότερες θερμοκρασίες με μπλε απόχρωση και τις υψηλότερες με κόκκινη. Η χαμηλότερες αυτές τιμές της θερμοκρασίας είναι πιθανό να οφείλονται σε πιθανές ζώνες τροφοδοσίας.



Σχήμα 4.9: Κατανομή της θερμοκρασίας (T°C) στην πεδινή περιοχή του Μαραθώνα.

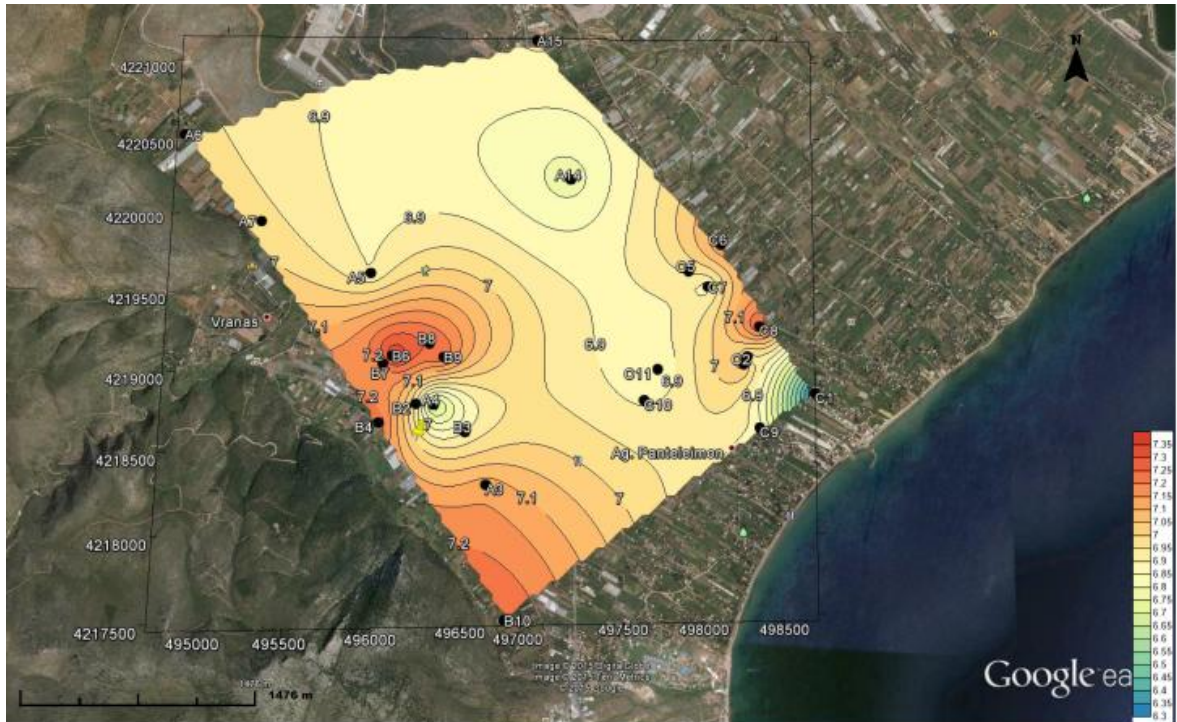
4.4.5.3 pH

Το pH είναι η παράμετρος από την οποία καθορίζεται η ποσότητα και ο τύπος των ορυκτών υλικών των πετρωμάτων που διαλύονται κατά την επαφή τους με το νερό. Ορίζεται ως ο αρνητικός λογάριθμος της συγκέντρωσης ιόντων H^+ αλλά, εκφράζει περισσότερο τη δραστικότητα του ιόντος του υδρογόνου (H^+) παρά την συγκέντρωσή του. Στο φυσικό νερό το pH εξαρτάται από μια σειρά αντιδράσεις όπως π.χ. η αντίδραση του διαλυμένου στο νερό CO_2 που είναι ιδιαίτερως ευαίσθητο σε αυτό. Οι τιμές που μπορεί να πάρει είναι 0-14. Όταν οι τιμές του pH είναι μικρές τότε το νερό προκαλεί διάλυση των ανθρακικών του εδάφους και των ασβεστόλιθων. Όταν οι τιμές του pH είναι 7,0 τότε τα νερά είναι ουδέτερα, για τιμές μικρότερες του 7,0 είναι όξινα και για μεγαλύτερες του 7,0 είναι βασικά. Σύμφωνα με τον Καλλέργη (2000), η μέτρηση του pH θα πρέπει να γίνεται στην ύπαιθρο και σε συνθήκες που να αποκλείουν την ανταλλαγή των αερίων του διαλύματος με τον ατμοσφαιρικό αέρα.

Το ενδεικτικό επίπεδο του pH για τα πόσιμα νερά, σύμφωνα με την οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης, κυμαίνεται μεταξύ 6,5 και 8,5, αλλά με επεξεργασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί και νερό με pH 5 έως 9. Για οποιοδήποτε άλλες τιμές pH, καθίσταται ανοικονομική η ουδετεροποίηση του νερού (Παππά, 2001).

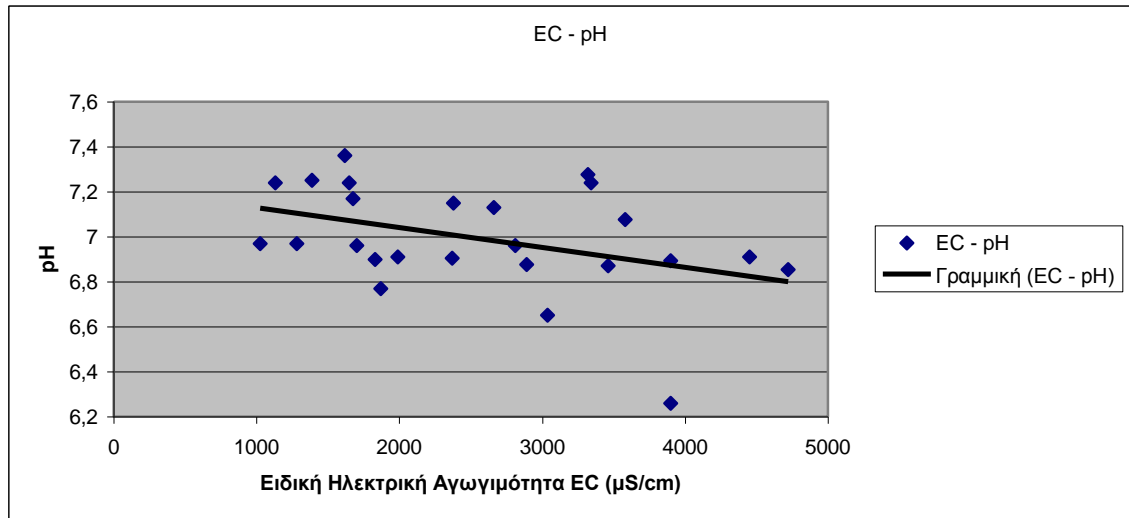
Κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας, έγιναν *in situ* μετρήσεις για τον προσδιορισμό του pH του κάθε δείγματος. Στον πίνακα 4.4, παρουσιάζονται τα περιγραφικά στατιστικά χαρακτηριστικά των συγκεντρώσεων των δειγμάτων για την περίοδο του Οκτωβρίου 2014. Η μέση τιμή του pH είναι 6,99. Οι τιμές του κυμαίνονται από 6,26 έως 7,36, έχοντας δηλαδή εύρος 1,10. Η αρνητική ασυμμετρία δείχνει τη συσσώρευση των τιμών προς τις

υψηλές τιμές και η σχετικά μεγάλη κυρτότητα $\alpha > 3$ υποδηλώνει την λεπτόκυρτη μορφή της. Στην Σχήμα 4.10 φαίνεται ο χάρτης χωρικής κατανομής του pH όπου στο ΝΔ τμήμα του και γενικότερα στο δυτικό τα νερά φαίνονται πιο αλκαλικά σε σχέση με το ανατολικό που είναι πιο όξινα. Αυτό είναι πιθανό να συμβαίνει γιατί τα νερά του δυτικού μέρους είναι μετεωρικό νερό το οποίο τροφοδοτεί τους υδροφόρους σχηματισμούς μικρότερης υδραυλικής κλίσης και είναι πιο αλκαλικό από το νερό που έχει συγκεντρώσει οργανικά υλικά και εκλύει CO_2 όταν αποσυντίθεται.



Σχήμα 4.10: Κατανομή του pH στην πεδινή περιοχή του Μαραθώνα.

Επιπροσθέτως, στην Σχήμα 4.11, φαίνεται πως η τιμή του pH επηρεάζεται κατά ένα βαθμό από την τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC), με αντιστρόφως ανάλογο τρόπο. Έτσι λοιπόν είναι αναμενόμενο η χωρική κατανομή του pH να είναι αντιστρόφως ανάλογη με τη χωρική κατανομή της EC και όπως φαίνεται από τις εικόνες 4.7, 4.8, 4.10 ακριβώς αυτό συμβαίνει.



Σχήμα 4.11: Συσχέτιση τιμών pH και ηλεκτρικής αγωγιμότητας E.C (μS/cm).

4.4.5.4 Σκληρότητα

Η ολική σκληρότητα (T.H.) οφείλεται στην παρουσία στο νερό δισθενών κατιόντων και κυρίως ιόντων ασβεστίου και μαγνησίου και δευτερευόντως σιδήρου, στροντίου και αργιλίου. Έχει καθοριστική σημασία διότι αποτελεί κριτήριο ακαταλληλότητας του νερού για πολλές χρήσεις. Διακρίνεται σε παροδική σκληρότητα και μόνιμη σκληρότητα και μετράται σε ισοδύναμο CaCO_3 σε mg/l.

Η παροδική σκληρότητα οφείλεται στην παρουσία στο νερό διαλυμένου CaCO_3 και MgCO_3 τα οποία είναι μικρής διαλυτότητας. Η τελευταία αυξάνει από την παρουσία ιόντων υδρογόνου στο νερό που οφείλεται στην παρουσία διοξειδίου του άνθρακα.

Η μόνιμη σκληρότητα οφείλεται κυρίως στην παρουσία στο νερό διαλυμένων θειικών και χλωριούχων αλάτων του ασβεστίου και μαγνησίου. Στις περιοχές που δεν υπάρχουν εβαπορίτες κύρια πηγή θειικών ιόντων είναι η οξειδωση του σιδηροπυρίτη ο οποίος συναντάται συνήθως διάσπαρτος στα αργιλικά πετρώματα αλλά απαντά σπάνια στα ανθρακικά πετρώματα. Η αντίδραση αυτή δίνει θειικά άλατα που μπορούν να οξειδωθούν προς υδροξείδιο του σιδήρου και H_2SO_4 . Παρουσία CaCO_3 και MgCO_3 το H_2SO_4 σχηματίζει CaSO_4 , MgSO_4 .

Η ολική σκληρότητα (TH) δίνεται από τη σχέση: $\text{TH} = 2,5\text{Ca} + 4,1\text{Mg}$ αν οι περιεκτικότητες των ιόντων είναι εκφρασμένες σε mg/L και $\text{TH} = 50 (\text{Ca} + \text{Mg})$ αν είναι εκφρασμένες σε meq/L. Ο Γαλλικός βαθμός ισοδυναμεί με 10 mg/L CaCO_3 και ο Γερμανικός βαθμός ισοδυναμεί με 17,86 mg/L $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$. Η περιοχή μεταξύ 15-20 γαλλικών βαθμών χαρακτηρίζουν πολύ καλό νερό από άποψη σκληρότητας. Η μηδενική σκληρότητα, η παντελής δηλ. έλλειψη ασβεστίου και μαγνησίου δεν είναι επιθυμητή. Η μεγάλη σκληρότητα μπορεί να προκαλέσει προβλήματα υγείας και φθορές σε υφάσματα και συσκευές. Τα νερά με βάση τη σκληρότητα ταξινομούνται όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.5.

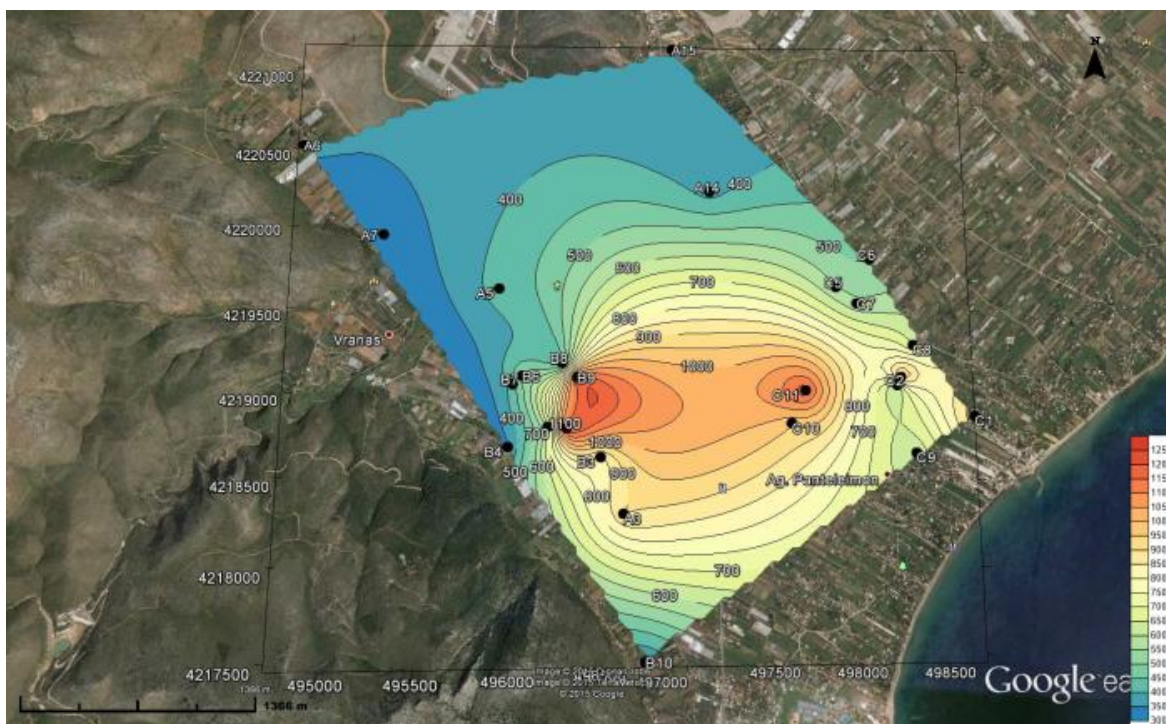
Πίνακας 4.5: Ταξινόμηση των νερών με βάση τη σκληρότητα.

Ισοδύναμο CaCO ₃ (mg/l)	Γαλλικοί βαθμοί	Χαρακτηρισμός του νερού
0 - 100	0 - 10	Μαλακό
101 - 200	10 - 20	Μέτρια σκληρό
201 - 300	20 - 30	Σκληρό
> 300	> 30	Πολύ σκληρό

Η αποσκλήρυνση του νερού (βλ. επεξεργασία νερού, παράγραφο 9.5) γίνεται με χημικές διαδικασίες (ιζηματοποίηση), με αντίστροφη όσμωση, ηλεκτροδιάλυση ή με περιορισμένη εξάτμιση, καθώς και με χρήση ιοντοανταλλακτών (ρητίνες ή ζεόλιθοι).

Από τον πίνακα 4.4, που έχουν παρουσιαστεί τα περιγραφικά στατιστικά χαρακτηριστικά των συγκεντρώσεων των δειγμάτων για την περίοδο του Οκτωβρίου 2014, φαίνεται πως η Τ.Η. έχει μέση τιμή 646,12 mg/l. Οι τιμές κυμαίνονται από 320,60 mg/l έως 1217 mg/l, έχοντας δηλαδή εύρος 896,80 mg/l. Το Quartile 1, η διάμεσος και το Quartile 3 παρουσιάζουν μια διακύμανση του δείγματος των τιμών, συγκριτικά με τη μέση τιμή. Η διάμεσος είναι μικρότερη της μέσης τιμής και αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η πλειονότητα των δειγματικών τιμών εμφανίζουν την τάση της συσσώρευσης προς τις ελάχιστες τιμές, γεγονός που επιβεβαιώνεται από την υπάρχουσα θετική ασυμμετρία. Τέλος, η κυρτότητα είναι μικρότερη του 3, επομένως η κατανομή των δειγμάτων έχει πλατύκυρτη μορφή.

Από τα παραπάνω στοιχεία, φαίνεται ότι το νερό χαρακτηρίζεται σκληρό και είναι **ακατάλληλο για ύδρευση, αλλά και οικιακές χρήσεις**. Όλες οι τιμές είναι αρκετά υψηλές. Στην πραγματικότητα, αυτό είναι αναμενόμενο, αφού πρόκειται για νερό γεωτρήσεων το οποίο έχει υποστεί ποιοτική υποβάθμιση. Στο Σχήμα 4.12, φαίνεται διαβαθμισμένα η Τ.Η. στην πεδινή περιοχή του Μαραθώνα. Το μπλε χρώμα αφορά τις σχετικά χαμηλές συγκεντρώσεις, ενώ το ερυθρό τις υψηλές. Είναι εμφανής μια εστία συγκέντρωσης των υψηλότερων τιμών και πρόκειται για τα πιο επιβαρυνμένα νερά της περιοχής μελέτης.



Σχήμα 4.12: Χωρική κατανομή της ολικής σκληρότητας (T.H) στην πεδινή περιοχή Μαραθώνα.

4.4.6 Χημική σύσταση του υπόγειου νερού

Ο υδροχημικός τύπος των υπογείων και των επιφανειακών νερών προσδιορίζεται κυρίως από τα κύρια συστατικά που συνήθως βρίσκονται σε μεγαλύτερη ποσότητα διαλυμένα. Αυτά είναι το ασβέστιο, μαγνήσιο, νάτριο, κάλιο, οξυανθρακικά, θειικά και χλώριο. Από τις συγκεντρώσεις των στοιχείων αυτών και με βάση την φθίνουσα περιεκτικότητα σε ανιόντα και κατιόντα καθορίζεται και ο υδροχημικός τύπος των νερών.

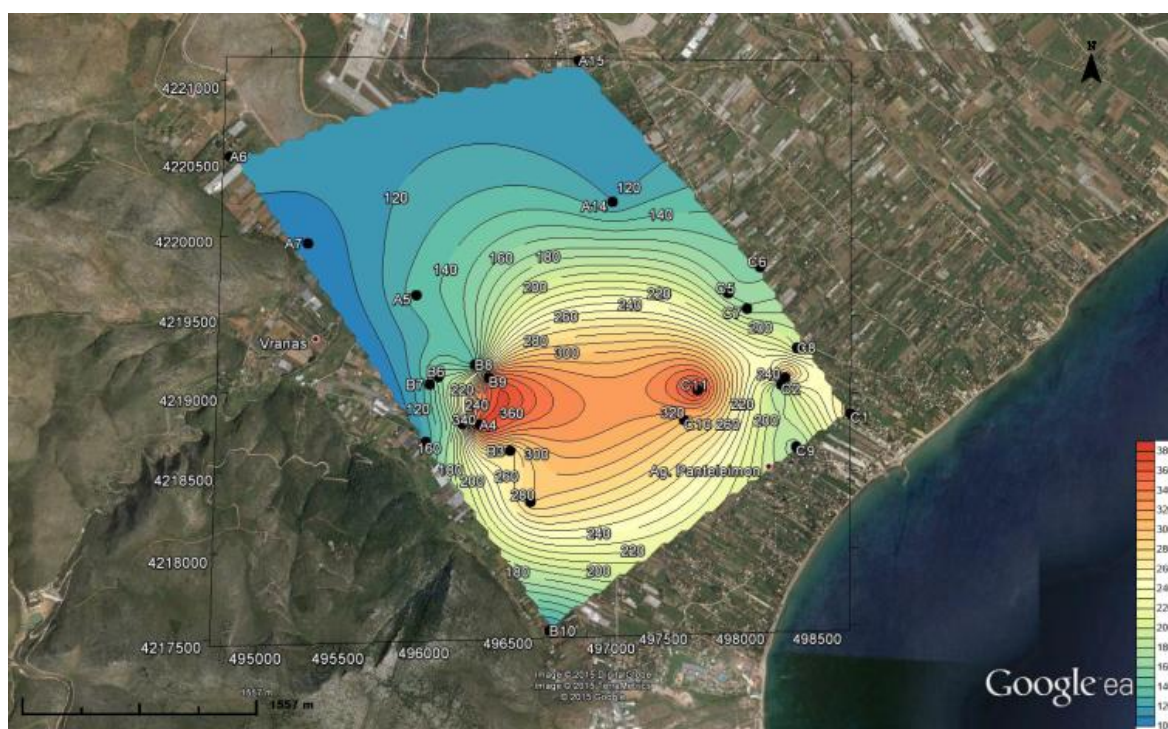
4.4.6.1 Ιόντα Ασβεστίου (Ca^{+2})

Το ασβέστιο (Ca^{+2}) είναι ένα από τα επικρατέστερα ιόντα των υπόγειων νερών ενώ το ασβέστιο ένα από τα βασικότερα συστατικά των πετρωμάτων που φέρουν στους πόρους τους νερό ή των ορυκτών που διαλύονται και είναι πλούσια σε Ca^{+2} . Συνήθη τέτοια πετρώματα είναι οι ασβεστόλιθοι, οι γυψούχοι σχιστόλιθοι οι ψαμμίτες, τα κροκαλοπαγή και οι μάργες, ενώ συνήθη ορυκτά είναι ο ασβεστίτης (CaCO_3), το επίδοτο ($\text{Ca}_2\text{Al}_2(\text{Fe}^{+3}, \text{Al})(\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)\text{O}(\text{OH})$), ο δολομίτης ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), το ολιγόκλαστο, γύψος ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), ο ανυδρίτης (CaSO_4), ο ανορθίτης ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), οι αμφίβολοι, οι πυρόξενιοι, οι αστριοι, οι αραγωνίτες και τα αργιλικά ορυκτά. Σε αυτού τους είδους τους υδροφόρους σχηματισμούς, τα ιόντα ασβεστίου είναι συνήθως περισσότερα από τα ιόντα χλωρίου. Γι' αυτό το λόγο, ο λόγος Ca/Cl αποτελεί έναν εξαιρετικό δείκτη για την εύρεση του αλμυρού νερού. Επίσης, η συγκέντρωση ιόντων ασβεστίου εξαρτάται από την τιμή του pH, τη μερική πίεση του CO_2 και την παρουσία των ανθρακικών ορυκτών και σχετίζεται με

τις διεργασίες καθίζησης, διάλυσης και ιοντικής ανταλλαγής. Οι συνήθεις συγκεντρώσεις του στα υπόγεια νερά είναι μεταξύ των 2-80 mg/l (Appelo & Postma, 1994)

Από τον πίνακα 4.4, που έχουν παρουσιαστεί τα περιγραφικά στατιστικά των συγκεντρώσεων των δειγμάτων για την περίοδο του Οκτωβρίου 2014, φαίνεται πως τα κατιόντα Ca^{2+} έχουν μέση τιμή συγκέντρωσης 202,36 mg/l. Οι μετρηθείσες τιμές κυμαίνονται από 102 mg/l έως 382 mg/l, έχοντας δηλαδή εύρος 280 mg/l. Το Quartile 1, η διάμεσος και το Quartile 3 παρουσιάζουν μια διακύμανση του δείγματος των τιμών, συγκριτικά με τη μέση τιμή. Η διάμεσος είναι μικρότερη της μέσης τιμής και αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η πλειονότητα των δειγματικών τιμών εμφανίζουν την τάση της συσσώρευσης προς τις ελάχιστες τιμές, γεγονός που επιβεβαιώνεται από την υπάρχουσα θετική ασυμμετρία. Τέλος, η κυρτότητα είναι μικρότερη του 3, επομένως η κατανομή των δειγμάτων έχει πλατύκυρτη μορφή.

Οι συγκεντρώσεις των δειγμάτων είναι υψηλότερες από αυτές που αναμένονται σε τυπικούς υπόγειους υδροφορείς. Αυτό, είναι απολύτως φυσιολογικό, αφού στην περιοχή οι κύριες υπόγειες υδροφορείς είναι αυτές του καρστικού και του προσχωματικού υδροφορέα. Εκτός όμως από τη σύστασή του υδροφορέα, η συγκέντρωση των ιόντων ασβεστίου καθορίζεται και από το σημείο ισορροπίας, που ανάλογα με τους δείκτες κορεσμού και σταθερότητας το νερό μπορεί να διαλύει ή να αποθέτει ανθρακικά άλατα. Σημαντικό ρόλο επίσης έχουν η μερική πίεση του CO_2 και το pH (Πατρικάκη, 2009). Στην Σχήμα 4.13, παρουσιάζεται η χωρική κατανομή των κατιόντων Ca^{+2} .



Σχήμα 4.13: Κατανομή των ιόντων Ca^{+2} στην πεδινή περιοχή του Μαραθώνα.

Η χρωματική διαβάθμιση απεικονίζεται με μπλε απόχρωση για τις χαμηλές συγκεντρώσεις και με κόκκινο για τις υψηλές. όπως φαίνεται, οι τιμές είναι σχετικά υψηλές και στο

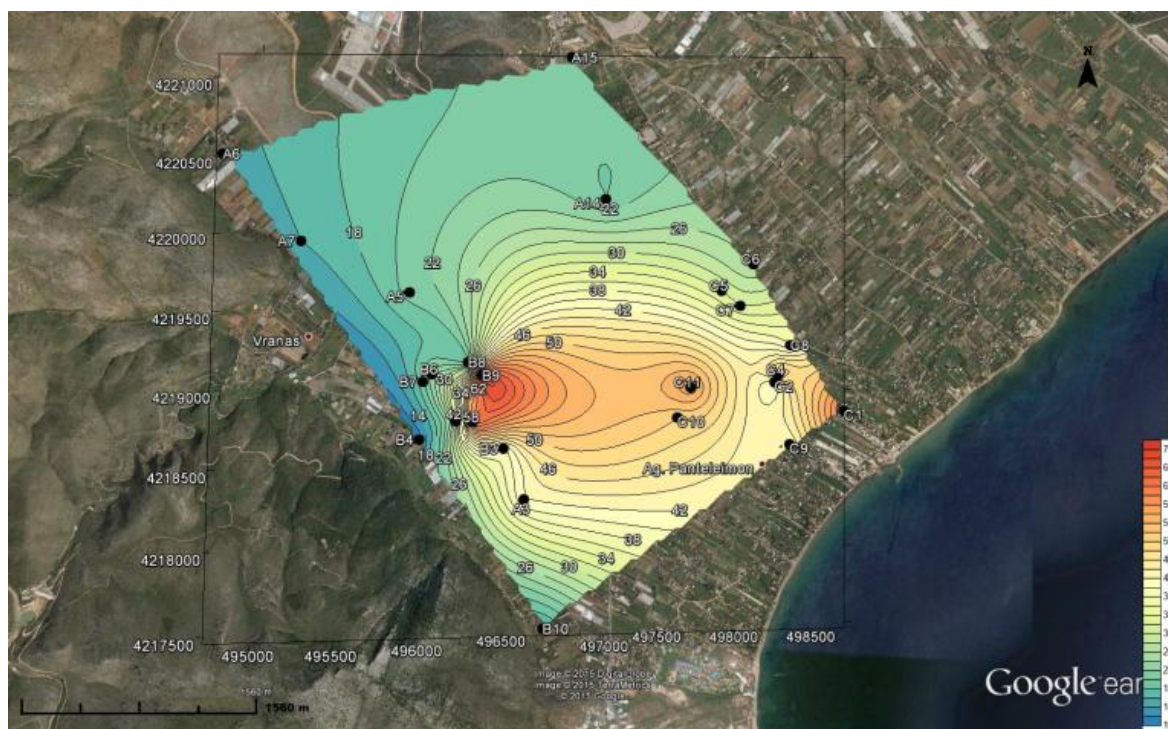
κεντρικό μέρος του χάρτη παρουσιάζεται μια εστία με τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις Ca^{+2} . Αυτή η τοπική αύξηση της συγκέντρωσης, είναι πιθανό να οφείλεται στην άντληση του νερού από μεγαλύτερα βάθη, όπου το νερό είναι πιο επιβαρυνόμενο και εκεί γίνεται συγκέντρωση του CaCO_3 . Η ελάττωση που υπάρχει στο ανατολικό μέρος του Σχήματος είναι πιθανό να οφείλεται στην ιοντονταλλαγή μεταξύ Na^+ και Ca^{2+} η οποία προκαλεί αύξηση του νατρίου με παράλληλη μείωση του ασβεστίου λόγω της προσέγγισης του υφάλμυρου μετώπου.

4.4.6.2 Ιόντα Μαγνησίου (Mg^{+2})

Το μαγνήσιο (Mg^{++}) στα υπόγεια νερά προέρχεται από τα υπάρχοντα πετρώματα όπως είναι οι ασβεστόλιθοι ή οι δολομίτες που ανάλογα από την περιεκτικότητά του σε Mg κατατάσσονται σε ασβεστόλιθους, δολομιτικούς ασβεστόλιθους, ασβεστολιθικούς δολομίτες και δολομίτες, οι δολομιτικοί ψαμίτες, οι δολομιτικές και μαγνησιούχες μάρμες. Επίσης το Mg προέρχεται από την διάλυση ανθρακικών πετρωμάτων που περιέχουν άφθονο μαγνησίτη (MgCO_3), δολομίτη ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$), ολιβίνη ($(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$), καρναλίτη ($\text{KMgCl}_3 \cdot 6(\text{H}_2\text{O})$), χλωρίτη ($(\text{Mg}, \text{Fe})_3(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}$) και από αργιλικά πετρώματα στα οποία απαντά υπό μορφή Mg^{++} προσροφημένων στο πλέγμα των αργιλικών ορυκτών. Οι φυσικές και χημικές διεργασίες που ελέγχουν και επηρεάζουν την ποσότητα του μαγνησίου στο υπόγειο νερό είναι πολλαπλές και πολύπλοκες, όπως η προσρόφηση, διασπορά, εκρόφηση, καθίζηση και διάλυση (Καλλιώρας, 2007). Οι συνθήκες συγκεντρώσεις του στα φυσικά υπόγεια νερά κυμαίνονται από 1,2 έως 48 mg/l (Appelo & Postma, 1994).

Από τον πίνακα 4.4, που έχουν παρουσιαστεί τα περιγραφικά στατιστικά χαρακτηριστικά των συγκεντρώσεων των δειγμάτων για την περίοδο του Οκτωβρίου 2014, φαίνεται πως τα κατιόντα Mg^{2+} έχουν μέση τιμή συγκέντρωσης 34,2 mg/l. Οι μετρηθείσες τιμές κυμαίνονται από 11 mg/l έως 69 mg/l, έχοντας δηλαδή εύρος 58 mg/l. Το Quartile 1, η διάμεσος και το Quartile 3 παρουσιάζουν μια διακύμανση του δείγματος των τιμών, συγκριτικά με τη μέση τιμή. Η διάμεσος είναι μικρότερη της μέσης τιμής και αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η πλειονότητα των δειγματικών τιμών εμφανίζουν την τάση της συσσώρευσης προς τις ελάχιστες τιμές, γεγονός που επιβεβαιώνεται από την υπάρχουσα θετική ασυμμετρία. Τέλος, η κυρτότητα είναι μικρότερη του 3, επομένως η κατανομή των δειγμάτων έχει πλατύκυρτη μορφή.

Οι περισσότερες συγκεντρώσεις των δειγμάτων βρίσκονται μέσα στις συνηθισμένες συγκεντρώσεις των φυσικών υπόγειων υδάτων. Ελάχιστες τιμές (2,4%) ξεπερνούν το όριο των 48 mg/l σε Mg^{+2} . Από το χάρτη χωρικής κατανομής των ιόντων Mg^{+2} (Σχήμα 4.14) παρατηρείται πως το ανατολικό του μέρος παρουσιάζει υψηλότερες τιμές, οι οποίες και ξεπερνούν τις συνηθισμένες τιμές που μπορούν να βρεθούν στη βιβλιογραφία. Η χρωματική διαβάθμιση απεικονίζεται με μπλε απόχρωση για τις χαμηλές συγκεντρώσεις και με κόκκινο για τις υψηλές. Η περιοχή βρίσκεται υπό συνθήκες εκμετάλλευσης του υπόγειου νερού, και όντας παράκτια περιοχή, υπάρχει θαλάσσια διείσδυση. Αυτό το γεγονός, αυξάνει τις ποσότητες κατιόντων μαγνησίου στον υπόγειο υδροφόρο. Επίσης, στην παραλιακή ζώνη, επικρατούν προσχώσεις που ο χαλαρός τους χαρακτήρας ενισχύει τη διαλυτοποίηση, άρα και τη συγκέντρωση κατιόντων μαγνησίου.



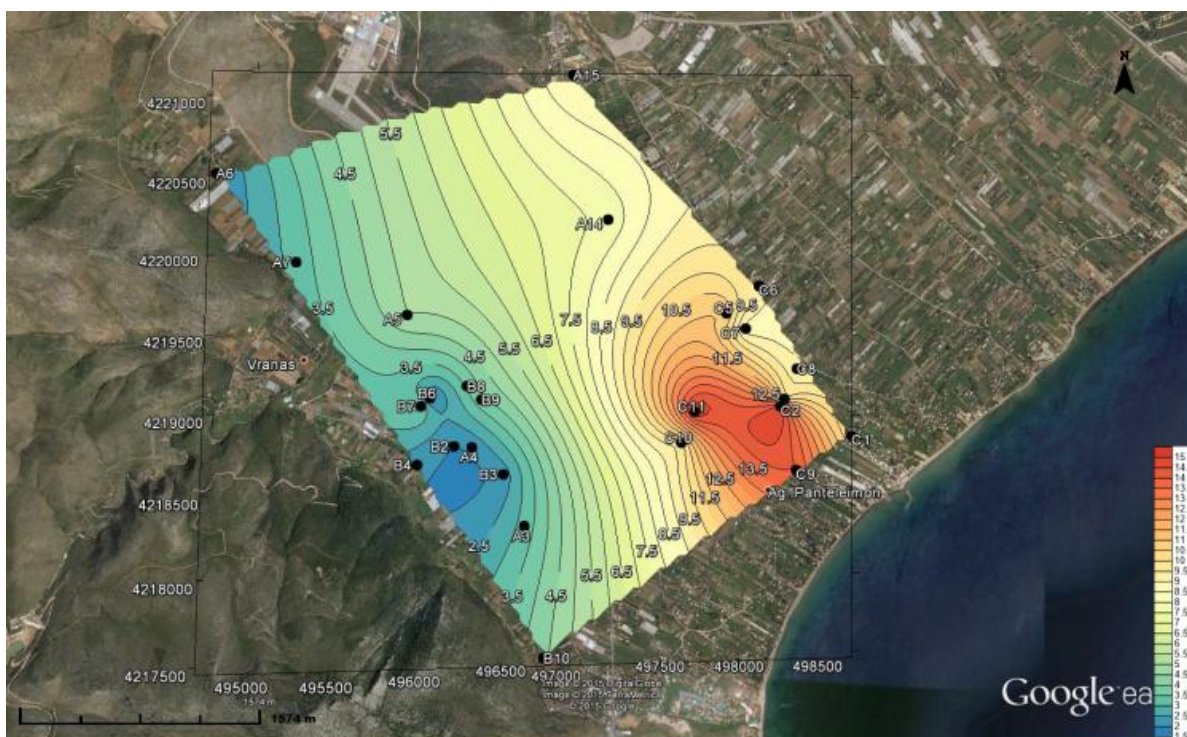
Σχήμα 4.14: Κατανομή των ιόντων Mg^{+2} στην πεδινή ζώνη Μαραθώνα.

4.4.6.3 Ιόντα Καλίου (K^+)

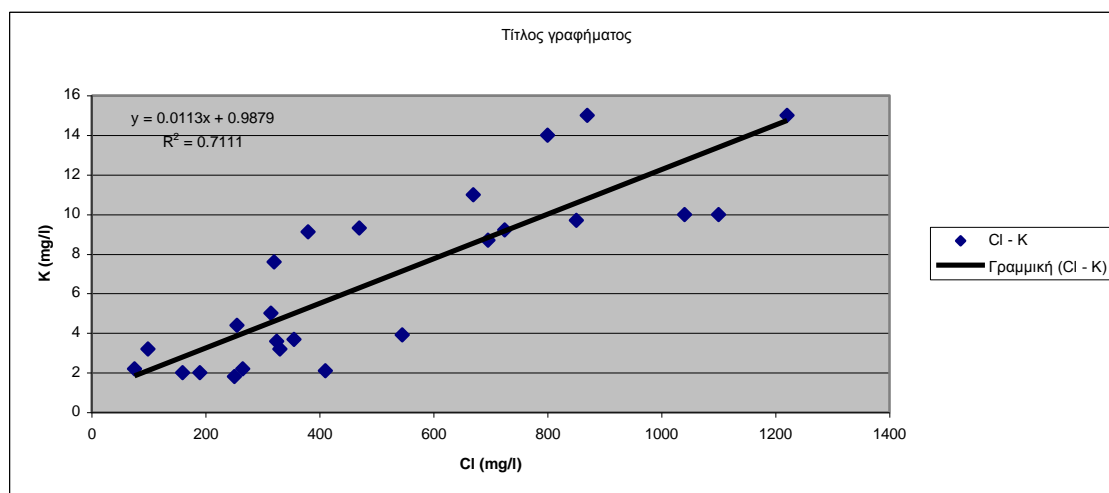
Το κάλιο προέρχεται κυρίως από την αποσάθρωση των καλιούχων αστρίων και είναι συνδεδεμένο με πετρώματα που περιέχουν ορυκτά πλούσια σε κάλιο ενώ συχνά βρίσκεται σε ιζηματογενείς σχιστόλιθους. Συνήθη ορυκτά πλούσια σε κάλιο είναι ο μοσχοβίτης $((Mg,Fe)_3(Si,Al)_4O_{10})$, το ορθόκλαστο $(KAlSi_3O_8)$, ο καρναλίτης $(KMgCl_3 \cdot 6(H_2O))$ και ο πολυαλίτης $(K_2Ca_2Mg(SO_4)_4 \cdot 2H_2O)$. Σύμφωνα με τους Richter and Kreitler (1993) υψηλές συγκεντρώσεις καλίου συναντώνται σε νερά μεταλλείων, σε νερά θερμών πηγών και σε αλμύρες που προκύπτουν από διάλυση συλβίνη (KCl). Οι συνήθεις συγκεντρώσεις στα φυσικά υπόγεια νερά κυμαίνονται μεταξύ των 0,19 έως 3,8 mg/l (Arpello & Postma, 1994) με ανώτατο όριο τα 12mg/l (Καλλέργης, 2000).

Από τον πίνακα 4.4, που έχουν παρουσιαστεί τα περιγραφικά στατιστικά χαρακτηριστικά των συγκεντρώσεων των δειγμάτων για την περίοδο του Οκτωβρίου 2014, φαίνεται πως τα κατιόντα K^+ έχουν μέση τιμή συγκέντρωσης 6,72 mg/l. Οι μετρηθείσες τιμές κυμαίνονται από 1,8 mg/l έως 15 mg/l, έχοντας δηλαδή εύρος 13,2 mg/l. Το Quartile 1, η διάμεσος και το Quartile 3 παρουσιάζουν μια διακύμανση του δείγματος των τιμών, συγκριτικά με τη μέση τιμή. Η διάμεσος είναι μικρότερη της μέσης τιμής και αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η πλειονότητα των δειγματικών τιμών των συγκεντρώσεων εμφανίζουν την τάση της συσσώρευσης προς τις ελάχιστες τιμές, γεγονός που επιβεβαιώνεται από την υπάρχουσα θετική ασυμμετρία. Τέλος, η κυρτότητα είναι μικρότερη του 3, επομένως η κατανομή των δειγμάτων έχει πλατύκυρτη μορφή.

Οι συγκεντρώσεις κατιόντων K^+ των δειγμάτων που συγκεντρώθηκαν κρίνονται από φυσιολογικές έως σχετικά υψηλές, καθώς είναι μεγαλύτερες από το ανώτερο αποδεκτό όριο της βιβλιογραφίας. Οι περισσότερες τιμές ξεπερνούν τις συνηθισμένες τιμές K^+ , είναι δηλαδή μεγαλύτερες των 3,8 mg/l. Από το χάρτη χωρικής κατανομής των κατιόντων καλίου (Σχήμα 4.15), προκύπτει πως οι υψηλότερες τιμές είναι προς το ανατολικό τμήμα του χάρτη. Η γεωχημική συμπεριφορά του καλίου παρομοιάζει αρκετά με αυτή του νατρίου, αλλά έχει σημαντικά μικρότερη κινητικότητα, αντικαθίσταται δύσκολα και βρίσκεται σταθερά συνδεδεμένα με τους ιλλίτες (Shoeller, 1967). Επομένως, το κάλιο θα μπορούσε να προέρχεται είτε από γεωργικά λιπάσματα, είτε να έχει γεωγενή προέλευση. Από τη συσχέτιση των τιμών Cl^- και K^+ (Σχήμα 4.16) είναι πιθανό να φαίνεται η προέλευση των λιπασμάτων (KCl).



Σχήμα 4.15: Κατανομή ανιόντων K^+ στην πεδινή περιοχή Μαραθώνα.



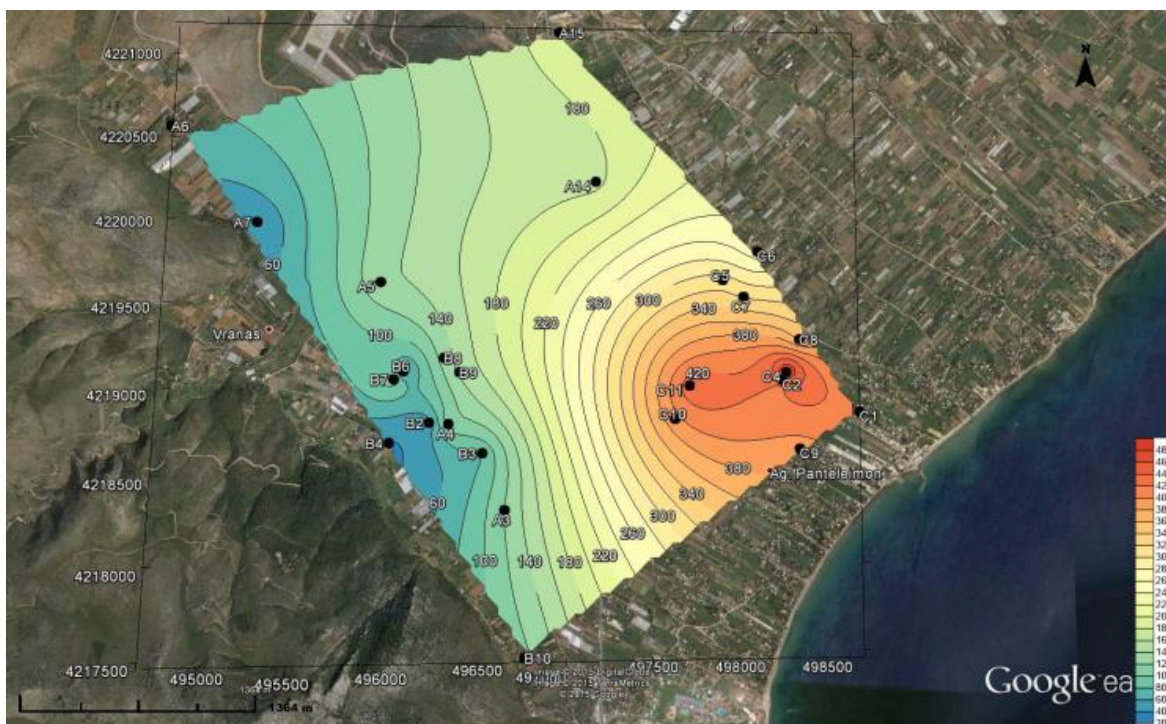
Σχήμα 4.26: Συσχέτιση τιμών Cl^- (mg/l) και K^+ (mg/l).

4.4.6.4 Ιόντα Νατρίου (Na^+)

Σύμφωνα με τους Richter and Kreitler (1993), η κύρια προέλευση των ιόντων νατρίου είναι από την αποσάθρωση των αστρίων ή αλάτων του νατρίου. Ο Καλλέργης, θεωρεί την κύρια πηγή ιόντων νατρίου τον αλβίτη, τα αργιλικά ορυκτά, εβαπορίτες και διάφορα βιομηχανικά απόβλητα. Στα ανθρακικά πετρώματα το νάτριο βρίσκεται συνήθως σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις. Σημαντική αύξηση των συγκεντρώσεων νατρίου καταγράφονται όταν τα υπόγεια νερά υποστούν δευτερογενή ρύπανση από τη διείσδυση θαλασσινού νερού. Οι συνήθεις συγκεντρώσεις στα φυσικά υπόγεια νερά είναι μικρότερες των 20 mg/l.

Από τον πίνακα 4.4, που έχουν παρουσιαστεί τα περιγραφικά στατιστικά των συγκεντρώσεων των συλλεχθέντων δειγμάτων για την περίοδο του Οκτωβρίου 2014, φαίνεται πως τα κατιόντα Na^{2+} έχουν μέση τιμή 214 mg/l. Οι μετρηθείσες τιμές κυμαίνονται από 38 mg/l έως 494 mg/l, έχοντας δηλαδή εύρος 456 mg/l. Το Quartile 1, η διάμεσος και το Quartile 3 παρουσιάζουν μια διακύμανση του δείγματος των τιμών, συγκριτικά με τη μέση τιμή. Η διάμεσος είναι μικρότερη της μέσης τιμής και αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η πλειονότητα των δειγματικών τιμών των συγκεντρώσεων εμφανίζουν την τάση της συσσώρευσης προς τις ελάχιστες τιμές, γεγονός που επιβεβαιώνεται από την υπάρχουσα θετική ασυμμετρία. Τέλος, η κυρτότητα είναι μικρότερη του 3, επομένως η κατανομή των δειγμάτων έχει πλατύκυρτη μορφή.

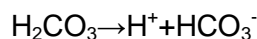
Οι συγκεντρώσεις κατιόντων Na^+ των δειγμάτων που συγκεντρώθηκαν κρίνονται πολύ υψηλές καθώς είναι αρκετά υψηλότερες από τις συνηθισμένες. Από το χάρτη χωρικής κατανομής των κατιόντων νατρίου (Σχήμα 4.16), προκύπτει πως οι υψηλότερες τιμές είναι στο ανατολικό τμήμα του χάρτη, ενώ οι χαμηλότερες στο δυτικό. Από τη βιβλιογραφία είναι γνωστό, ότι παράκτιες περιοχές που έχουν υποστεί θαλάσσια διείσδυση και γειτνιάζουν με τη θάλασσα, έχουν αυξημένες συγκεντρώσεις νατρίου. Αυτό, ακριβώς συμβαίνει και στην περίπτωση της παράκτιας περιοχής του Μαραθώνα, αφού οι υψηλές τιμές Na^+ γειτνιάζουν με τη θάλασσα.



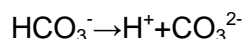
Σχήμα 4.17: Χωρική κατανομή Na^+ στην πεδινή περιοχή του Μαραθώνα.

4.4.6.5 Όξινα ανθρακικά ιόντα (HCO_3^-)

Τα οξυανθρακικά (HCO_3^-) αποτελούν δείκτη για την ύπαρξη οργανικών ουσιών στα νερά. Το H_2CO_3 , προέρχεται απ' την οργανική ύλη και διίσταται σε πρωτόνια και οξυανθρακικά σύμφωνα με την αντίδραση:



και τα οξυανθρακικά με τη σειρά τους διίστανται σε άτομα υδρογόνου και ανθρακική ρίζα:

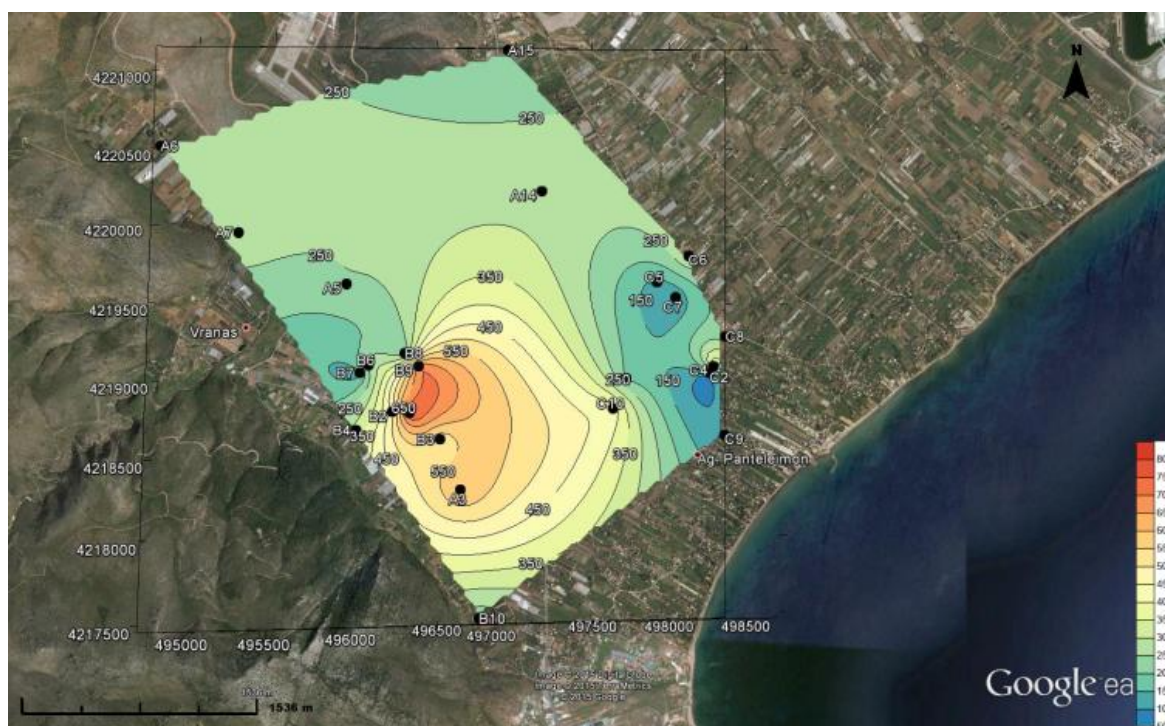


Τα πρωτόνια (H^+) που προέρχονται από τα H_2CO_3 και HCO_3^- παίζουν σημαντικό ρόλο στη διαδικασία αποσάθρωσης των ορυκτών. Η συγκέντρωση των οξυανθρακικών στα ύδατα μπορεί να οφείλεται και στη διάλυση του ασβεστίτη προς Ca^{2+} και HCO_3^- (Arpello & Postma, 1994, Καλλέργης 2000). Λόγω αυτού του γεγονότος το ιόν αυτό βρίσκεται σε αφθονία στα υπόγεια νερά της περιοχής μελέτης και αποτελεί το ένα από τα κύρια ιόντα που χαρακτηρίζουν το χημικό τύπο νερού της περιοχής.

Σε διαλύματα που το pH τους κυμαίνεται από 4,5 μέχρι 8,3 παρατηρείται μείωση του CO_2 και συγχρόνως αύξηση των ιόντων HCO_3^- , οπότε η αλκαλικότητα βασίζεται σχεδόν αποκλειστικά στα ιόντα αυτά και ονομάζεται αλκαλικότητα οξυανθρακικών (Lambrakis, 1991). Με βάση το παραπάνω αφού έγινε προσδιορισμός της αλκαλικότητας και του pH των δειγμάτων προσδιορίστηκε η συγκέντρωση των ιόντων HCO_3^- .

Από τον πίνακα 4.4, που έχουν παρουσιαστεί τα περιγραφικά στατιστικά των συγκεντρώσεων των δειγμάτων για την περίοδο του Οκτωβρίου 2014, φαίνεται πως τα ανιόντα HCO_3^- έχουν μέση τιμή συγκέντρωσης 309,54 mg/l. Οι μετρηθείσες τιμές κυμαίνονται από 67 mg/l έως 763 mg/l, έχοντας δηλαδή εύρος 696 mg/l. Το Quartile 1, η διάμεσος και το Quartile 3 παρουσιάζουν μια διακύμανση των συγκεντρώσεων, συγκριτικά με τη μέση τιμή. Η διάμεσος είναι μικρότερη της μέσης τιμής και αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η πλειονότητα των συγκεντρώσεων των δειγμάτων εμφανίζουν την τάση της συσσώρευσης προς τις ελάχιστες τιμές, γεγονός που επιβεβαιώνεται από την υπάρχουσα θετική ασυμμετρία. Τέλος, η κυρτότητα είναι μεγαλύτερη του 3, επομένως η κατανομή των δειγμάτων έχει λεπτόκυρτη μορφή.

Στην Σχήμα 4.18, παρουσιάζεται η χωρική κατανομή των ιόντων HCO_3^- στην περιοχή μελέτης. Η χρωματική διαβάθμιση απεικονίζεται με μπλε απόχρωση για τις χαμηλές συγκεντρώσεις και με κόκκινο για τις υψηλές. Η αυξημένη συγκέντρωσή τους αποδίδεται σε τροφοδοσία ανθρακικών σχηματισμών. Στο παράκτιο μέρος οι συγκεντρώσεις είναι χαμηλότερες.



Σχήμα 4.18: Χωρική κατανομή των ιόντων HCO_3^- στην πεδινή περιοχή του Μαραθώνα.

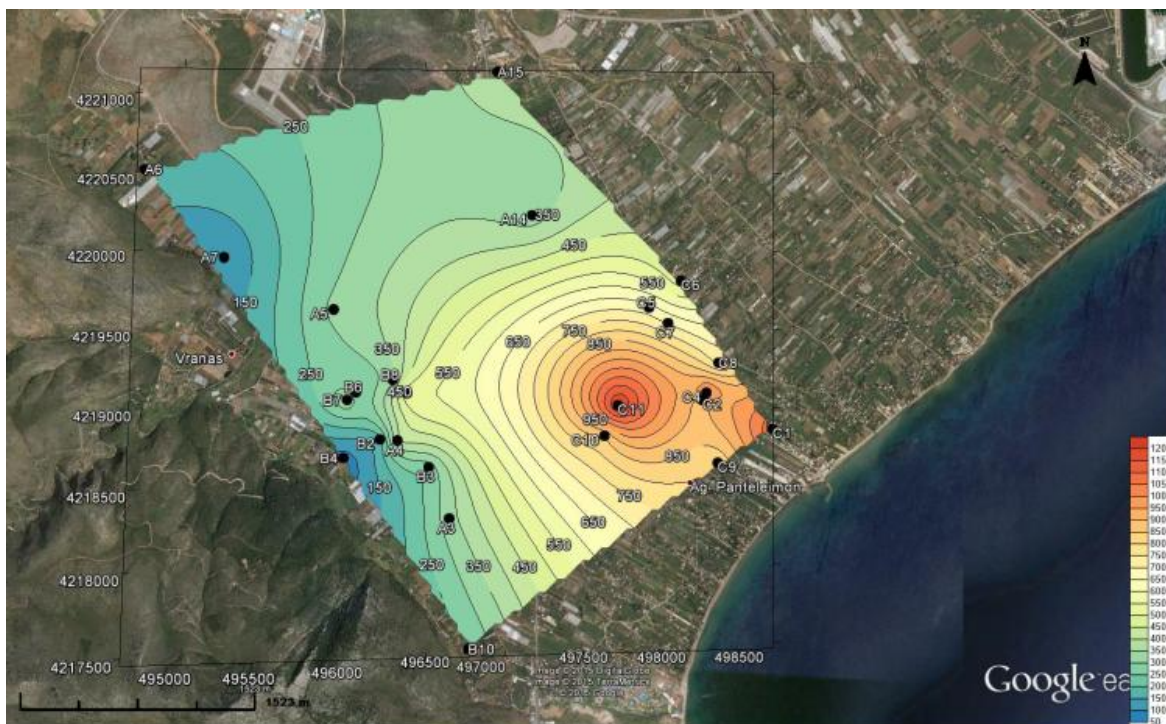
4.4.6.6 Ιόντα Χλωρίου (Cl^-)

Η ύπαρξη πολλών χλωριόντων φανερώνει συνήθως διείσδυση θαλασσινού νερού στον υδροφόρο και συνδέεται άμεσα με υψηλή αλατότητα και αγωγιμότητα. Η κύρια πρόελευση των ιόντων χλωρίου είναι η διάλυση των εβαποριτών - με πιο σύνηθες ορυκτό τον αλίτη (NaCl)-, η απόπλυση αλμυρών νερών εγκλωβισμένων σε λεπτόκοκκες

ιζηματογενείς αποθέσεις και η θαλάσσια διείσδυση. Επίσης, υπάρχουν και ανθρωπογενείς δραστηριότητες οι οποίες εντείνουν το φαινόμενο της υπαλμύρισης των υπόγειων νερών όπως τα άλατα των δρόμων για αποπαγωποίηση, τα βιομηχανικά, οικιακά και αγροχημικά απόβλητα, οι αντλήσεις. Σύμφωνα με τον Καλλέργη (2000), οι συνήθεις τιμές σε υγρές περιοχές είναι 10 mg/L, ενώ σε ξηρές περιοχές ξεπερνά τα 1000 mg/L.

Από τον πίνακα 4.4, που έχουν παρουσιαστεί τα περιγραφικά στατιστικά των συγκεντρώσεων των δειγμάτων για την περίοδο του Οκτωβρίου 2014, φαίνεται πως τα ανιόντα Cl⁻ έχουν μέση τιμή συγκέντρωσης 508,56 mg/l. Οι μετρηθείσες τιμές κυμαίνονται από 75 mg/l έως 1220 mg/l, έχοντας δηλαδή εύρος 1145 mg/l. Το Quartile 1, η διάμεσος και το Quartile 3 παρουσιάζουν μια διακύμανση των συγκεντρώσεων, συγκριτικά με τη μέση τιμή. Η διάμεσος είναι μικρότερη της μέσης τιμής και αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η πλειονότητα των συγκεντρώσεων των δειγμάτων εμφανίζουν την τάση της συσσώρευσης προς τις ελάχιστες τιμές, γεγονός που επιβεβαιώνεται από την υπάρχουσα θετική ασυμμετρία. Τέλος, η κυρτότητα είναι μικρότερη του 3, επομένως η κατανομή των δειγμάτων έχει πλατύκυρτη μορφή.

Οι συγκεντρώσεις των ανιόντων Cl⁻ είναι πολύ υψηλές, αρκετά μεγαλύτερες από αυτές τις βιβλιογραφίας και τα νερά κρίνονται αρκετά επιβαρυνμένα. Οι υψηλές τιμές ιόντων χλωρίου αποδίδονται στο καθεστώς θαλάσσιας διείσδυσης του υδροφόρου συστήματος. Στην Σχήμα 4.19, παρουσιάζεται η χωρική κατανομή των ανιόντων χλωρίου, έχοντας ιδιαίτερος υψηλές συγκεντρώσεις στα τμήματα που γειτνιάζουν με τη θάλασσα, γεγονός που υποδηλώνει την ποιοτική επιβάρυνση που έχει υποστεί το υδροσύστημα και τις συνεχείς αντλήσεις που γίνονται στην περιοχή, για αρδευτικούς κυρίως λόγους. Η χρωματική διαβάθμιση απεικονίζεται με μπλε απόχρωση για τις χαμηλές συγκεντρώσεις και με κόκκινο για τις υψηλές.



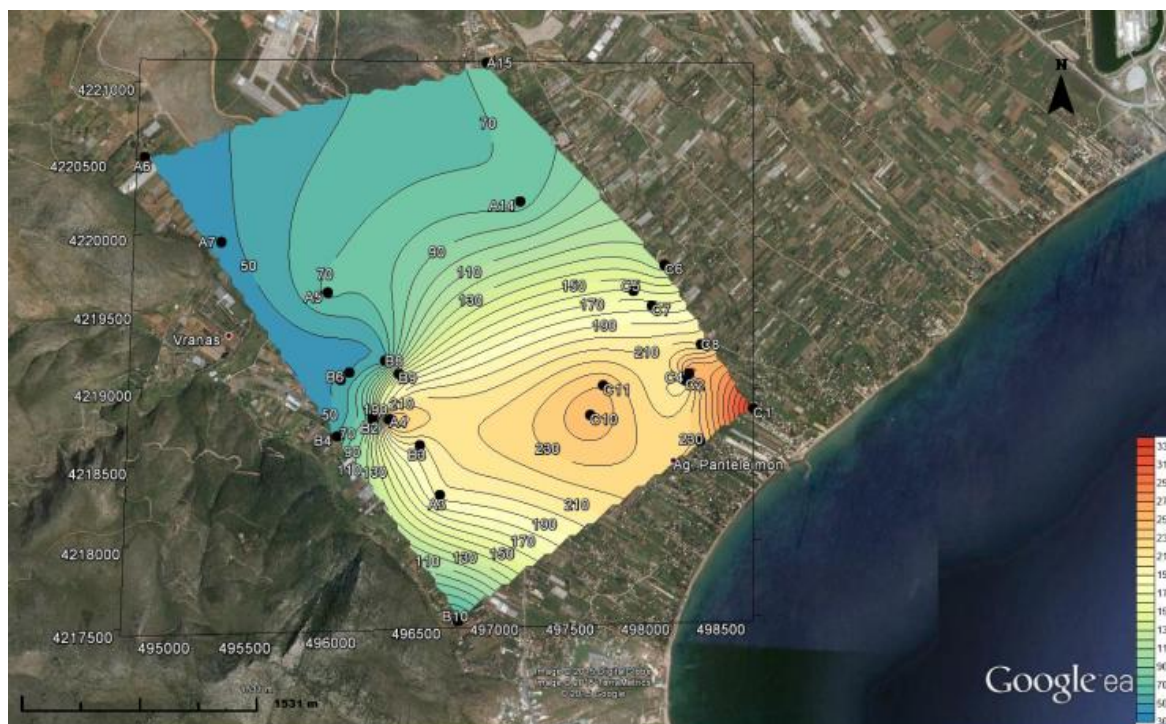
Σχήμα 4.19: Κατανομή των ανιόντων Cl⁻ στην πεδινή περιοχή Μαραθώνα.

4.4.6.7 Θειικά ιόντα (SO₄⁻²)

Τα θειικά (SO₄⁻²) προέρχονται συνήθως από την διάλυση ορυκτών όπως ο σιδηροπυρίτης (FeS₂), η γύψος (CaSO₄·2H₂O), ο ανυδρίτης (CaSO₄), καθώς και από την οξείδωση των πυριτών των αργιλικών πετρωμάτων. Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να παρουσιάζονται μειωμένα λόγω αναγωγής τους εξ αιτίας μικροβιολογικών αντιδράσεων. Αντίθετα, στην αύξηση των συγκεντρώσεων των θειικών συμβάλλουν ανθρωπογενείς παράγοντες όπως οι εκπομπές καυσαερίων, τα λιπάσματα, οι πυρκαγιές των δασών, τα ηφαίστεια. Στα φυσικά υπόγεια νερά οι συγκεντρώσεις τους είναι γενικά μικρότερες των 300 mg/l.

Από τον πίνακα 4.4, που έχουν παρουσιαστεί τα περιγραφικά στατιστικά των συγκεντρώσεων των δειγμάτων για την περίοδο του Οκτωβρίου 2014, φαίνεται πως τα ιόντα SO₄⁻² έχουν μέση τιμή συγκέντρωσης 146,32 mg/l. Οι μετρηθείσες τιμές κυμαίνονται από 41 mg/l έως 340 mg/l, έχοντας δηλαδή εύρος 299 mg/l. Η ασυμμετρία είναι θετική, επομένως υπάρχει συσσώρευση των περισσότερων συγκεντρώσεων προς τις μικρότερες τιμές. Τέλος, η κυρτότητα είναι μικρότερη του 3, επομένως η κατανομή των δειγμάτων έχει πλατύκυρτη μορφή.

Οι συγκεντρώσεις θειικών ιόντων δεν είναι ιδιαίτερα υψηλές. Μόνο τρεις τιμές ξεπερνούν το όριο ποσιμότητας των 250 mg/l. Στην Σχήμα 4.20, παρουσιάζεται ο χάρτης χωρικής κατανομής θειικών ιόντων στην περιοχή μελέτης. Διακρίνεται μια αύξησή τους προς το ανατολικό τμήμα του χάρτη. Αυτό είναι αναμενόμενο, αφού το μέτωπο της θαλάσσιας διείσδυσης αυξάνει τις συγκεντρώσεις των θειικών ιόντων.



Σχήμα 4.20: Κατανομή θειικών ιόντων στην πεδινή περιοχή Μαραθώνα.

4.4.6.8 Νιτρικά (NO_3^-) και Νιτρώδη (NO_2^-) ιόντα

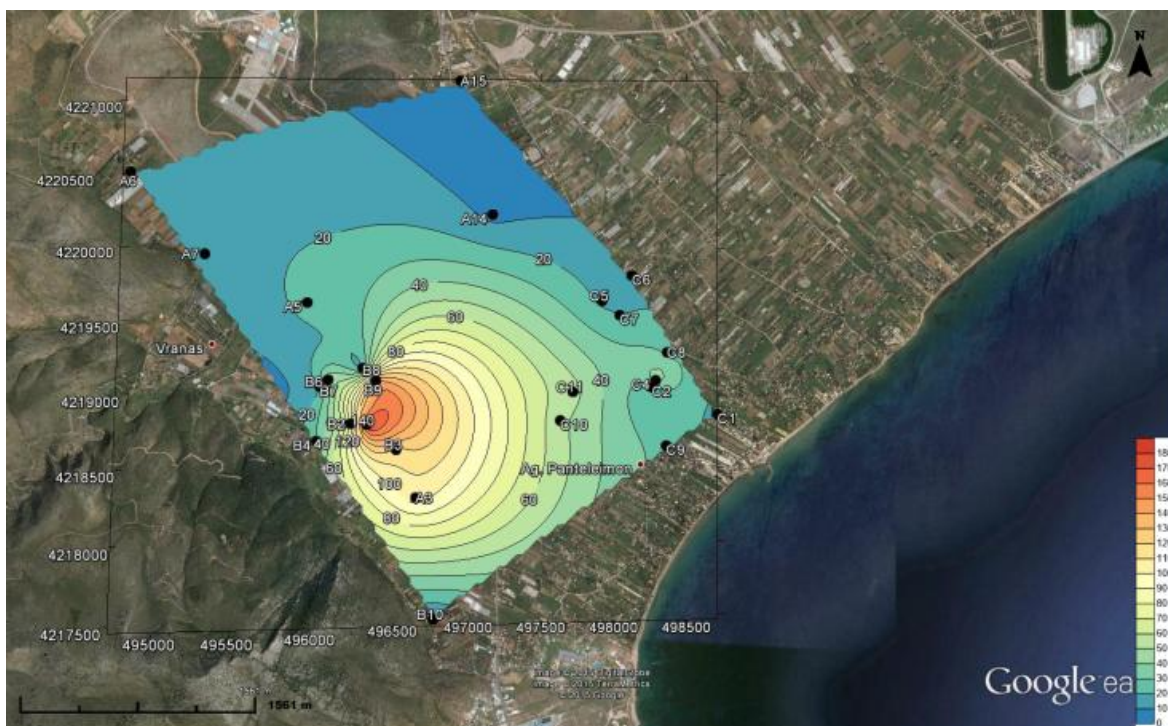
Οι ενώσεις του Αζώτου εμφανίζονται πολύ συχνά στη φύση, καθώς προέρχονται από τη φυσική αποσύνθεση οργανικών αζωτούχων ενώσεων φυτικής ή ζωικής πρωτεΐνης. Επίσης μπορεί να προέρχονται από ζωικά περιττώματα και γεωργικά λιπάσματα.

Τα νιτρικά (NO_3^-) προέρχονται από αζωτούχες ενώσεις μέσα από πολύπλοκες διαδικασίες όπως η αμμωνιοποίηση και η αζωτοποίηση. Οι διαδικασίες αυτές συντελούνται πάνω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα, στην εδαφική κυρίως ζώνη, όπου αφθονούν τα οργανικά υλικά και το οξυγόνο. Η νιτρική ρίζα είναι μία από τις μορφές διαλυμένου αζώτου που παρουσιάζει μεγάλη κινητικότητα στο υπόγειο νερό. Είναι ο πιο διαδεδομένος ρυπαντής και η μεγάλη διάδοσή τους οφείλεται σε γεωργικές δραστηριότητες όπως τα αζωτούχα και νιτρικά λιπάσματα καθώς και στην επιφανειακή και υπόγεια απόρριψη οικιακών λυμάτων. Οι συνήθεις συγκεντρώσεις τους στα φυσικά υπόγεια νερά είναι μικρότερες των 10 mg/l και σύμφωνα με τους Appello & Postma (1994) συνήθως κυμαίνονται από 0,031 έως 6,2 mg/l.

Από τον πίνακα 4.4, που έχουν παρουσιαστεί τα περιγραφικά στατιστικά των συγκεντρώσεων των δειγμάτων για την περίοδο του Οκτωβρίου 2014, φαίνεται πως τα ιόντα NO_3^- έχουν μέση τιμή συγκέντρωσης 44,16 mg/l. Οι μετρηθείσες τιμές κυμαίνονται από 4 mg/l έως 175 mg/l, έχοντας δηλαδή εύρος 171 mg/l. Το 36% ξεπερνούν το ανώτατο αποδεκτό όριο των 50 mg/l. Το Quartile 1, η διάμεσος και το Quartile 3 παρουσιάζουν μια διακύμανση των συγκεντρώσεων, συγκριτικά με τη μέση τιμή. Η διάμεσος είναι μικρότερη της μέσης τιμής και αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η πλειονότητα των συγκεντρώσεων των

δειγμάτων εμφανίζουν την τάση της συσσώρευσης προς τις ελάχιστες τιμές, γεγονός που επιβεβαιώνεται από την υπάρχουσα θετική ασυμμετρία. Τέλος, η κυρτότητα είναι μεγαλύτερη του 3, επομένως η κατανομή των δειγμάτων έχει λεπτόκυρτη μορφή.

Οι συγκεντρώσεις των νιτρικών ιόντων κρίνονται υψηλές, αφού ξεπερνούν κατά πολύ τις ενδεικτικές και τα επιτρεπτά όρια της βιβλιογραφίας. Είναι αναμενόμενος ο εντοπισμός τους, αφού στην περιοχή υπάρχουν γεωργικές καλλιέργειες. Στην Σχήμα 4.21, δίνεται μια αποτύπωση της χωρικής κατανομής των νιτρικών ιόντων παρουσιάζοντας μια συγκεκριμένη, μεγάλη εστία του προβλήματος, η οποία χωρικά αντιστοιχεί στις υπάρχουσες καλλιέργειες. Δυτικότερα από τη ρυπαρόνο εστία φαίνεται μια απότομη μεταβολή στην ποιότητα, όσον αφορά τα νιτρικά ιόντα, η οποία ερμηνεύεται από τη συνεχή τροφοδοσία νερού που δεν έχει ρυπανθεί. Στην παραλιακή ζώνη, στο ανατολικό μέρος του χάρτη, υπάρχουν νεογενείς σχηματισμοί, που περιέχουν οργανικό υλικό και εκτιμάται πως αυτό δρα ως αναγωγικό μέσο για τα νιτρικά ιόντα, συμβάλλοντας στην αναγωγή τους.



Σχήμα 4.21: Κατανομή νιτρικών ιόντων (NO_3^-) στην πεδινή περιοχή του Μαραθώνα.

Τα νιτρώδη ιόντα (NO_2^-) προέρχονται είτε από την αναγωγή των νιτρικών ιόντων (NO_3^-), είτε από την οξειδωση της αμμωνίας (NH_4^+) από μικροοργανισμούς. Η αναμενόμενη συγκέντρωσή τους στα υπόγεια νερά είναι πολύ μικρή. Είναι επικίνδυνα για τους οργανισμούς γιατί σε όξινο περιβάλλον (π.χ ανθρώπινο στομάχι), κάνουν αντιδράσεις σχηματίζοντας νιτροζαμίνες που έχουν καρκινογόνο δράση.

Από τον πίνακα 4.4, που έχουν παρουσιαστεί τα περιγραφικά στατιστικά των συγκεντρώσεων των δειγμάτων για την περίοδο του Οκτωβρίου 2014, φαίνεται πως τα ιόντα NO_2^- έχουν μέση τιμή συγκέντρωσης 0,02 mg/l. Οι μετρηθείσες τιμές κυμαίνονται από 0,011 mg/l έως 0,066 mg/l, έχοντας δηλαδή εύρος 0,055 mg/l. Οι συγκεντρώσεις NO_2^- έχουν θετική ασυμμετρία, ενώ η κυρτότητα είναι εμφανώς μεγαλύτερη του 3, με κατανομή συγκεντρώσεων με λεπτόκυρτη μορφή.

Οι συγκεντρώσεις των νιτρικών ιόντων είναι μέσα στα αναμενόμενα πλαίσια της βιβλιογραφίας. Στην Σχήμα 4.22, δίνεται μια αποτύπωση της χωρικής κατανομής των NO_2^- όπου φαίνεται μια σταδιακή αύξηση προς το ανατολικό τμήμα του χάρτη.



Σχήμα 4.22: Χωρική κατανομή των νιτρικών ιόντων (NO_2^-) στην πεδινή περιοχή Μαραθώνα.

4.5 Ιοντικοί λόγοι

Εκτός από τις ίδιες τις συγκεντρώσεις των κύριων συστατικών των υπόγειων νερών, χρήσιμα συμπεράσματα προκύπτουν επίσης από τους ιοντικούς λόγους, που αποτελούν ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για την προέλευση των υπόγειων υδάτων. Πιο συγκεκριμένα, είναι πιθανό να βρεθούν στοιχεία σχετικά με τον χημισμό των υπογείων νερών και τη λιθολογική σύσταση των πετρωμάτων μέσω των οποίων κινήθηκαν, καθώς και με τις συνθήκες τροφοδοσίας και ανανέωσης των υδροφόρων οριζόντων. Οι ιοντικοί λόγοι που υπολογίστηκαν για την διερεύνηση της προέλευσης και της διακριτοποίησης των υπόγειων νερών είναι οι Mg/Ca , Na/Cl , Na/K , $(\text{Ca}+\text{Mg})/(\text{Na}+\text{K})$, Cl/SO_4 , Cl/HCO_3 , BEX. Στη συνέχεια, ακολουθεί ο πίνακας 4.6, όπου έχουν υπολογιστεί οι τιμές των παραπάνω

ιοντικών λόγων και ο πίνακας 4.7 με τα περιγραφικά τους στατιστικά. Κάθε λόγος, για κάθε τιμή έχει μια διαφορετική ερμηνεία. Παρακάτω ακολουθούν επεξηγήσεις για τους προαναφερθέντες λόγους και χάρτες χωρικής κατανομής που δείχνουν ενδιαφέροντα αποτελέσματα για την περιοχή μελέτης.

Πίνακας 4.6: Ιοντικοί λόγοι (meq/l) υπολογισμένοι στις θέσεις των δειγμάτων.

ID	X	Y	Mg/Ca	Na/Cl	Na/K	(Ca+Mg)/(Na+K)	Cl/SO ₄ ⁻²	Cl/HCO ₃	BEX
A3	496638	4218295	0,24	0,57	64,33	3,36	2,29	0,94	-1,18
A4	496307	4218793	0,28	0,42	91,54	4,90	2,24	0,92	-2,16
A5	495901	4219628	0,25	0,67	46,27	1,41	5,85	2,21	-1,75
A6	494701	4220518	0,21	0,60	62,94	2,18	6,28	1,30	-1,24
A7	495201	4219960	0,26	0,70	23,92	3,14	2,85	0,61	0,36
A14	497170	4220230	0,27	0,84	38,95	0,98	5,86	1,95	-0,27
A15	496950	4221141	0,32	0,78	36,08	0,86	7,05	3,03	-1,05
B2	496195	4218800	0,22	0,46	40,83	5,53	2,46	0,60	-0,56
B3	496506	4218623	0,24	0,45	60,32	4,78	1,83	0,90	-1,35
B4	495962	4218682	0,15	0,78	29,38	4,03	1,72	0,41	0,35
B6	496043	4219102	0,23	0,33	50,09	4,47	6,77	1,50	-3,23
B7	495986	4219053	0,23	0,49	51,96	1,67	8,75	4,77	-4,16
B8	496278	4219180	0,22	0,62	61,43	1,40	8,15	2,68	-2,60
B9	496369	4219095	0,31	0,41	62,81	3,73	4,76	1,35	-4,44
B10	496759	4217462	0,22	0,70	44,46	1,33	6,77	2,02	-1,36
C1	498713	4218865	0,38	0,58	70,43	1,03	4,38		-9,81
C2	498263	4219050	0,38	0,74	47,41	0,62	5,95	22,35	-4,53
C4	498287	4219097	0,28	0,73	84,04	0,93	5,22	4,39	-5,25
C5	497919	4219640	0,31	0,71	47,94	0,80	5,57	8,61	-3,86
C6	498125	4219811	0,27	0,82	45,55	0,90	5,22	2,65	-1,00
C7	498041	4219542	0,30	0,71	62,18	0,80	5,38	10,68	-4,32
C8	498366	4219289	0,32	0,76	65,64	0,83	4,72	5,60	-3,11
C9	498360	4218650	0,40	0,75	47,39	0,70	4,65	13,91	-3,41
C10	497633	4218822	0,27	0,71	69,10	1,10	4,61	3,41	-4,20
C11	497719	4219017	0,25	0,55	49,11	1,23	6,89	10,94	-12,89

Πίνακας 4.7: Περιγραφικά στατιστικά των ιοντικών λόγων.

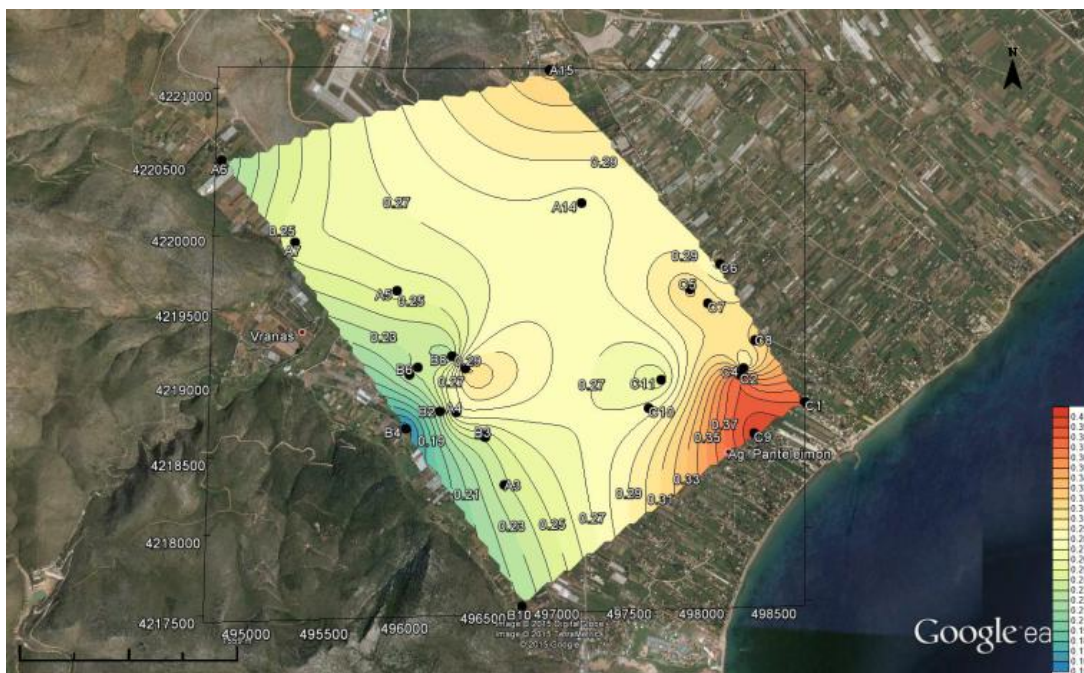
	Mg/Ca	Na/Cl	Na/K	(Ca+Mg)/(Na+K)	Cl/SO ₄	Cl/HCO ₃	BEX
Μεση τιμή	0,27	0,63	54,16	2,11	5,05	4,49	-3,08
Τυπική απόκλιση	0,06	0,14	15,80	1,59	1,94	5,31	3,01
Μέγιστη τιμή	0,40	0,84	91,54	5,53	8,75	22,35	0,36
Ελάχιστη τιμή	0,15	0,33	23,92	0,62	1,72	0,41	-12,89
Εύρος	0,25	0,51	67,62	4,90	7,02	21,94	13,25
Q ₁ *	0,23	0,55	45,55	0,90	4,38	1,21	-4,20
Διάμεσος	0,27	0,70	50,09	1,33	5,22	2,43	-2,60
Q ₃ *	0,31	0,74	62,94	3,36	6,28	4,98	-1,18
Ασυμμετρία	0,46	-0,59	0,39	0,95	-0,21	2,11	-1,84
Κυρτότητα	3,31	2,29	3,32	2,36	2,42	7,74	7,32

*Q₁: First Quartile*Q₃: Third Quartile

4.5.1 Ιοντικός λόγος Mg/Ca

Ο λόγος αυτός, ανάλογα με τις τιμές που παίρνει υποδηλώνει εάν τα νερά έχουν κινηθεί σε ανθρακικά πετρώματα και ειδικότερα εάν έχουν κινηθεί σε ασβεστολιθικά ή δολομιτικά πετρώματα. Για τιμές μικρότερες του 0,5-0,7 τα νερά έχουν κινηθεί σε ασβεστολιθικούς υδροφόρους, για τιμές που κυμαίνονται από 0,7-0,9 έχουν κινηθεί σε δολομιτικούς υδροφόρους και τιμές μεγαλύτερες του 0,9 σε πυριτικά πετρώματα και οφιολιθικούς υδροφόρους. Οι συγκεντρώσεις των ιόντων μαγνησίου, στα υπόγεια νερά, είναι συνήθως μικρότερες από αυτές του ασβεστίου. Το αντίθετο συμβαίνει στο θαλασσινό νερό όπου οι Goldberg et al (1971) αναφέρουν ότι τα ιόντα μαγνησίου είναι τριπλάσια των ιόντων ασβεστίου. Έτσι, ο λόγος Mg/Ca ενδέχεται να είναι ένας καλός τρόπος ανίχνευσης της θαλάσσιας διείσδυσης στον παράκτιο υδροφορέα, εφόσον η ιοντική ανταλλαγή, η διάλυση ή η καθίζηση δεν επηρεάζει κανένα από τα δυο ιόντα σε μεγάλο βαθμό. Σε αντίθεση με τα ιόντα χλωρίου, η χημική συμπεριφορά των ιόντων μαγνησίου θεωρείται ως μη συντηρητική και γι' αυτό οι Richter and Kreitler (1993) θεωρούν ότι ο λόγος Mg/X (όπου X: Ca,Na,K,SO₄,Cl) είναι ένας καλός δείκτης για τον εντοπισμό της θαλάσσιας διείσδυσης.

Από τον πίνακα 4.7, που έχουν παρουσιαστεί τα περιγραφικά στατιστικά χαρακτηριστικά των ιοντικών λόγων των δειγμάτων για την περίοδο του Οκτωβρίου 2014, φαίνεται πως ο λόγος Mg/Ca έχει μέση τιμή 0,27. Οι τιμές του κυμαίνονται από 0,15 έως 0,40, έχοντας δηλαδή εύρος 0,25. Η Σχήμα 4.23, αποτελεί ένα χάρτη χωρικής κατανομής, όπου παρουσιάζεται με χρωματική διαβάθμιση ο ιοντικός λόγος Mg/Ca στην πεδινή περιοχή του Μαραθώνα. Όπως φαίνεται, στο ανατολικό μέρος του χάρτη εμφανίζονται οι υψηλότερες τιμές, ενώ στο δυτικό οι χαμηλότερες. Σε όλα τα δείγματα η τιμή του λόγου είναι <0,5 επομένως η κίνηση του νερού γίνεται σε ασβεστολιθικούς υδροφόρους.

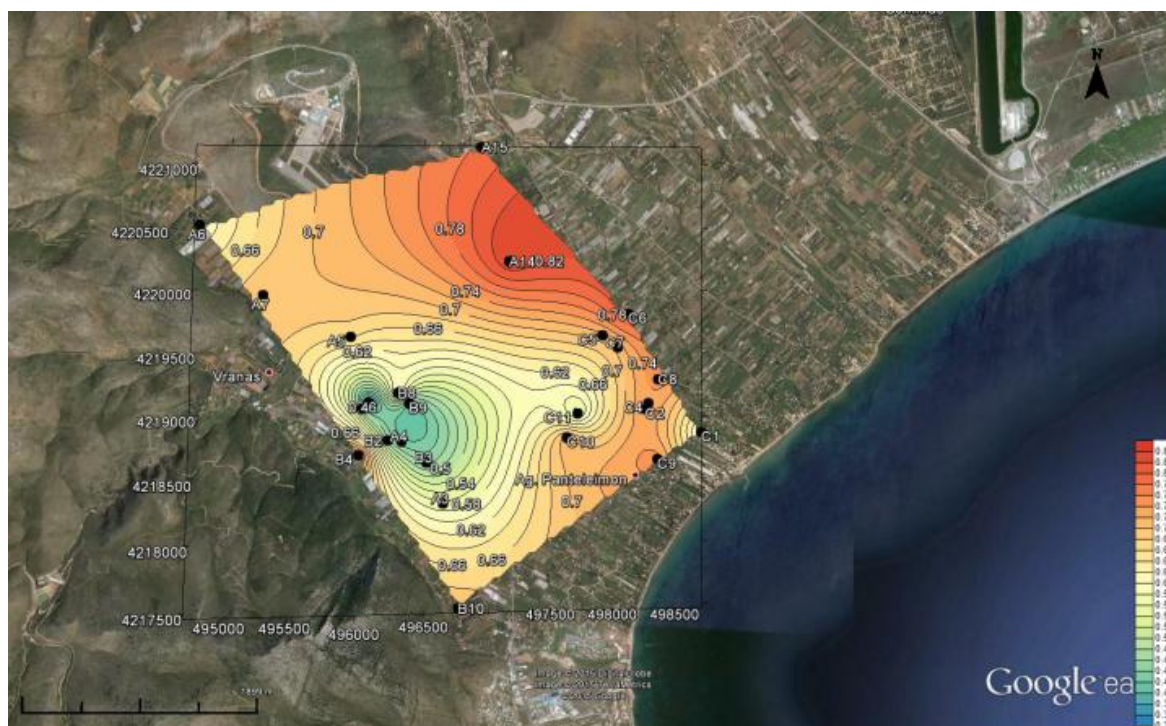


Σχήμα 4.23: Κατανομή του λόγου Mg/Ca στην πεδινή περιοχή Μαραθώνα.

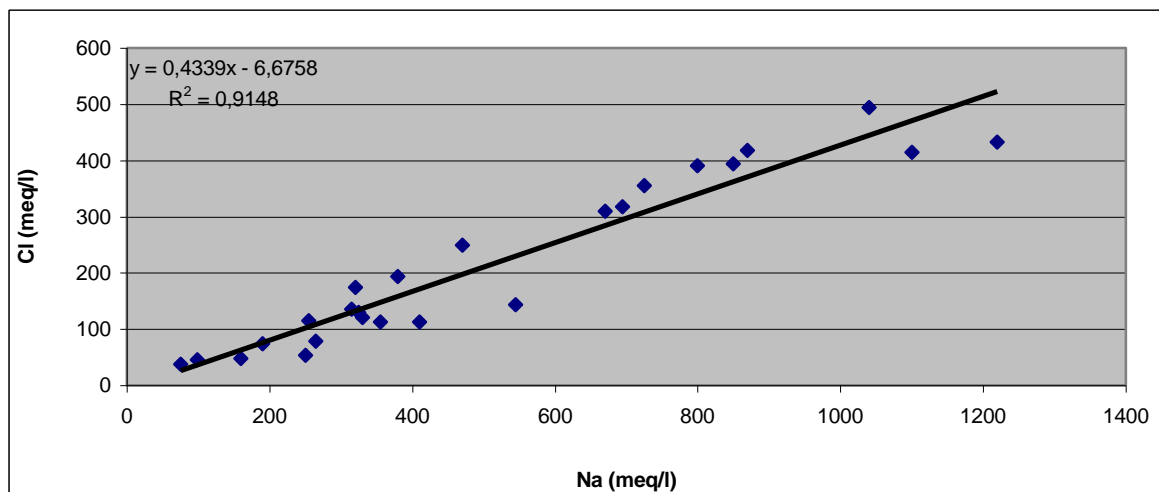
4.5.2 Ιοντικός λόγος Na/Cl

Ο λόγος αυτός, ανάλογα με τις τιμές που παίρνει, σχετίζεται με την υφαλμύρωση και τη διείδυση του θαλασσινού νερού. Για τιμές μεγαλύτερες του 1, τα νερά προέρχονται από υδροφόρους κυρίως αλκαλικών μαγματικών και μεταμορφωμένων πετρωμάτων (ιοντικές ανταλλαγές Ca και Mg με Na), για τιμές κοντά στο 0,876 πρόκειται για το σύνηθες υπόγειο νερό, ενώ τιμές αισθητά μικρότερες του 0,876 υπάρχει υφαλμύρωση του υδροφορέα. Σύμφωνα με πολλούς ερευνητές (Leonard and Ward 1962, Whittemore and Pollack 1979, Gogel 1981) η τιμή του ιοντικού λόγου Na/Cl γίνεται ίση με 0,65 στην περίπτωση της διάλυσης του αλίτη ενώ γίνεται 0,60 στην περίπτωση αλμυρών πετρελαικών πεδίων. Ο Custodio (1987) αναφέρει ότι όταν έχουμε αντικατάσταση θαλασσινού νερού από γλυκό η τιμή του ιοντικού λόγου αυξάνεται.

Από τον πίνακα 4.7, που έχουν παρουσιαστεί τα περιγραφικά στατιστικά χαρακτηριστικά των ιοντικών λόγων των δειγμάτων για την περίοδο του Οκτωβρίου 2014, φαίνεται πως ο λόγος Na/Cl έχει μέση τιμή 0,63. Οι τιμές του κυμαίνονται από 0,33 έως 0,84, έχοντας δηλαδή εύρος 0,51. Το Σχήμα 4.24, αποτελεί ένα χάρτη χωρικής κατανομής του ιοντικού λόγου Na/Cl. Όλες οι τιμές του λόγου είναι <0,876 επομένως υπάρχει υφαμύρωση στην πεδινή ζώνη του Μαραθώνα. Στο κεντρικό τμήμα του χάρτη φαίνεται μια επιβαρυσμένη ζώνη με λόγους <0,50. Στο Σχήμα 4.25, φαίνεται η πολύ καλή συσχέτιση Na-Cl.



Σχήμα 4.24: Κατανομή του ιοντικού λόγου Na/Cl στην πεδινή περιοχή Μαραθώνα.

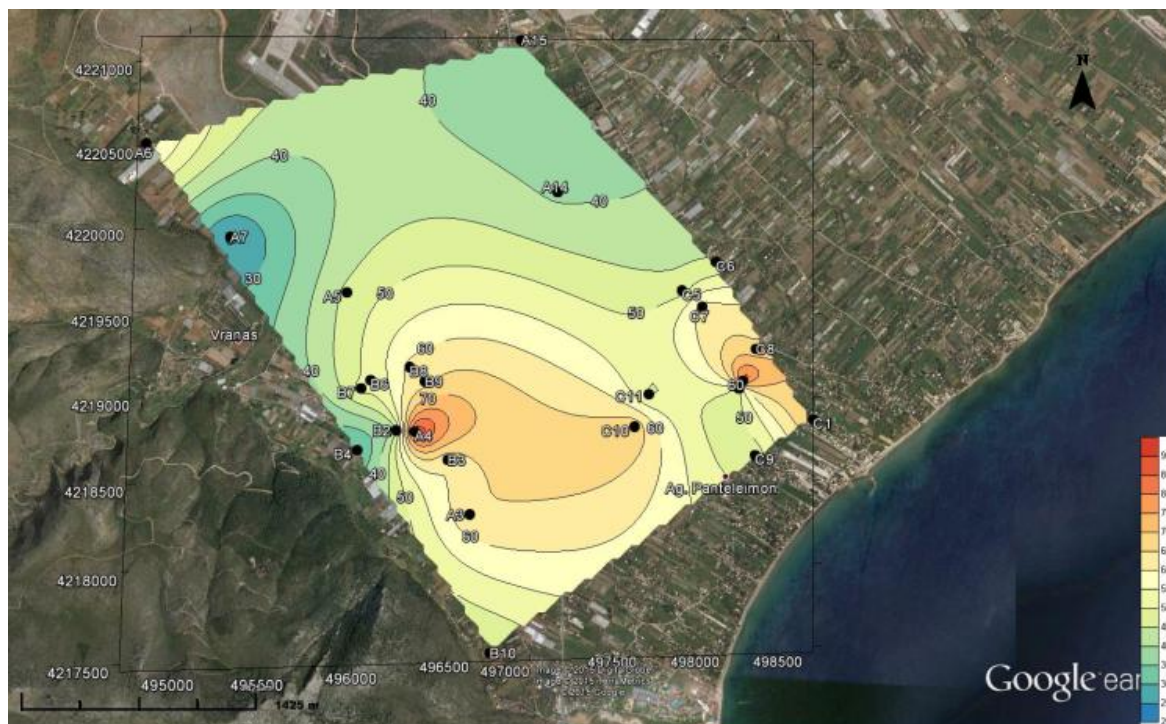


Σχήμα 4.35: Γραφική απεικόνιση του διαγράμματος διασποράς των τιμών ιοντικής σχέσης Na/Cl.

4.5.3 Ιοντικός λόγος Na/K

Ο λόγος αυτός, ανάλογα με τις τιμές που παίρνει, υποδηλώνει για το αν πρόκειται για φυσικό υπόγειο νερό ($Na/K < 10$) ή για θαλασσινό νερό ($Na/K \approx 47$). Επίσης δίνει πληροφορίες για την περιοχή εμπλουτισμού των υδροφόρων όπου υδροφόρος με συνεχή τροφοδοσία έχει τιμή $Na/K = 15 - 25$ και το κατάντη τμήμα εμπλουτισμού (παλαιό νερό - προσρόφηση Na) έχει τιμή $Na/K = 50 - 70$.

Από τον πίνακα 4.7, που έχουν παρουσιαστεί τα περιγραφικά στατιστικά χαρακτηριστικά των ιοντικών λόγων των δειγμάτων για την περίοδο του Οκτωβρίου 2014, φαίνεται πως ο λόγος Na/K έχει μέση τιμή 54,16. Οι τιμές του κυμαίνονται από 23,92 έως 91,54, έχοντας δηλαδή εύρος 67,62. Η Σχήμα 4.26, αποτελεί ένα χάρτη χωρικής κατανομής του ιοντικού λόγου Na/K. Είναι φανερό πως το ανατολικό τμήμα της περιοχής εμπλουτίζεται από το θαλασσινό νερό, ενώ στο δυτικό μέρος, το οποίο βρίσκεται και αυτό υπό καθεστώς θαλάσσιας διείσδυσης, φαίνεται να διαφοροποιούνται οι συνθήκες με συνεχή τροφοδοσία από τους υπάρχοντες καρστικούς σχηματισμούς.



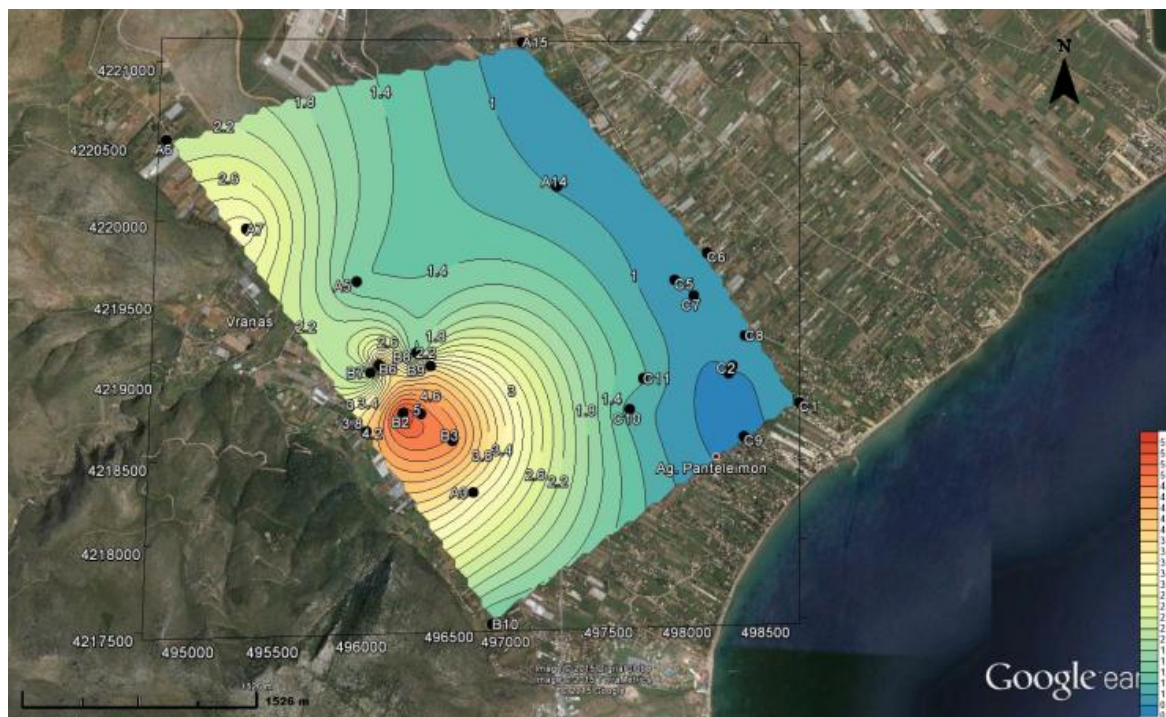
Σχήμα 4.46: Κατανομή του ιοντικού λόγου Na/K στην πεδινή περιοχή Μαραθώνα.

4.5.4 Ιοντικός λόγος $(Ca+Mg)/(Na+K)$

Ο λόγος αυτός, ανάλογα με τις τιμές που παίρνει, υποδηλώνει αν το υπάρχον νερό προέρχεται από συνεχή τροφοδοσία ή όχι. Με άλλα λόγια, αν το νερό είναι νέο ή παλιό, αντίστοιχα. Αν ο λόγος είναι μεγαλύτερος του 1, τότε υπάρχει υδροφόρο στρώμα με συνεχή τροφοδοσία, ενώ αν ο λόγος είναι μικρότερος του 1 τότε δεν υπάρχει συνεχή τροφοδοσία στα κατάντη τμήματα του υδροφορέα.

Από τον πίνακα 4.7, που έχουν παρουσιαστεί τα περιγραφικά στατιστικά χαρακτηριστικά των ιοντικών λόγων των δειγμάτων για την περίοδο του Οκτωβρίου 2014, φαίνεται πως ο λόγος $(Ca+Mg)/(Na+K)$ έχει μέση τιμή 2,11. Οι τιμές του κυμαίνονται από 0,62 έως 5,53, έχοντας δηλαδή εύρος 4,90. Η διάμεσος είναι αρκετά μικρότερη από την μέση τιμή και σε συνδυασμό με τη θετική ασυμμετρία υπάρχει μια σαφή τάση συγκέντρωσης των τιμών του λόγου προς τις ελάχιστες τιμές.

Η Σχήμα 4.27, αποτελεί ένα χάρτη χωρικής κατανομής του ιοντικού λόγου $(Ca+Mg)/(Na+K)$. Οι χαμηλότερες τιμές αποτυπώνονται με το μπλε χρώμα, ενώ οι υψηλότερες με το κόκκινο. Όπως είναι εμφανές, οι χαμηλότερες τιμές του λόγου είναι ανατολικό μέρος του χάρτη, το οποίο είναι αναμενόμενο εξαιτίας της θάλασσας αλλά και της απουσίας υδροφόρου στρώματος για πλευρική τροφοδοσία, ενώ οι υψηλότερες τιμές είναι στο δυτικό μέρος.



Σχήμα 4.57: Κατανομή του ιοντικού λόγου $(Ca+Mg)/(Na+K)$ στην πεδινή περιοχή Μαραθώνα.

4.5.5 Ιοντικός λόγος Cl/SO_4

Ο λόγος αυτός, δίνει ενδείξεις για την εξέλιξη της αλατότητας του εδάφους διότι η τιμή της αυξάνεται κατά την διεύθυνση μεταφοράς των αλάτων και κατά τη διεύθυνση ροής των υπόγειων νερών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι συγκεντρώσεις των SO_4^{-2} και Cl στις περιοχές τροφοδοσίας συνήθως είναι μικρές και αυξάνουν προς τα κατάντη με τις συγκεντρώσεις των χλωριόντων να αυξάνουν πιο γρήγορα από τα θειικά και να έχουν την τάση να γίνουν του ιόν που επικρατεί. Έτσι, η ταξινόμηση γίνεται ως εξής:

$rCl / rSO_4 = 10$: θαλασσινό νερό

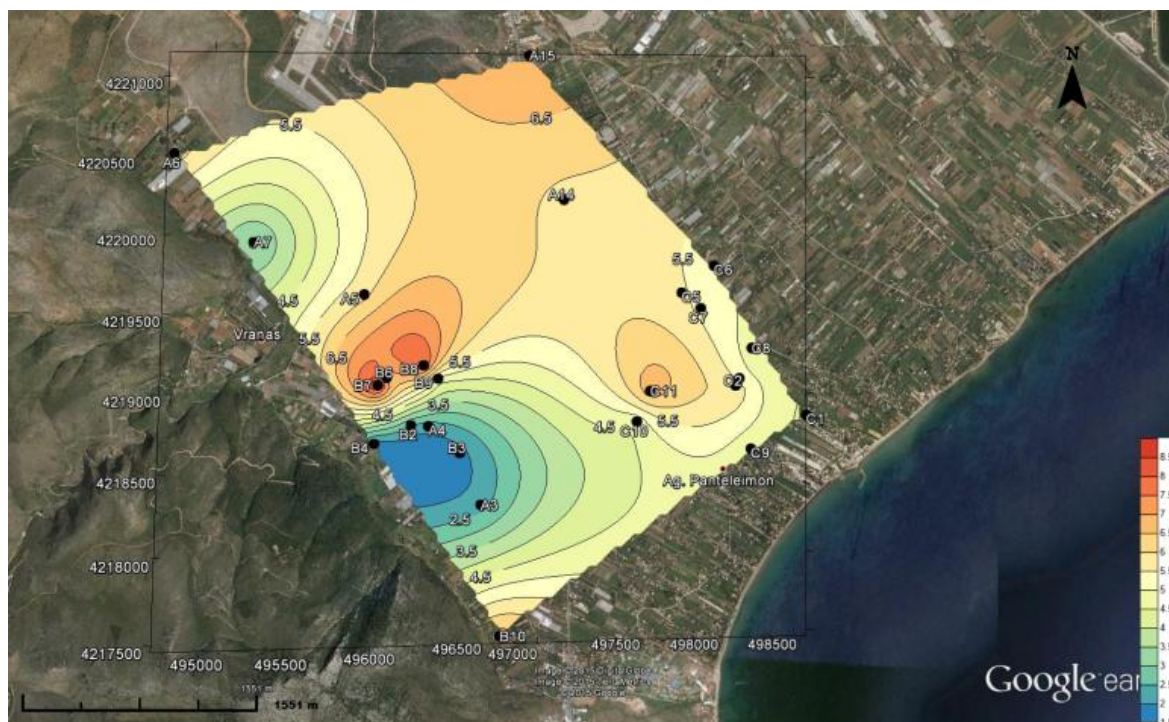
$rCl / rSO_4 > 5$: νερό χλωριούχο

rCl / rSO_4 από 1 μέχρι 5: νερό χλωριοθειικό

rCl / rSO_4 από 0,2 μέχρι 1: νερό θειοχλωριούχο

$rCl / rSO_4 < 0,2$: νερό θειικό

Από τον πίνακα 4.7, που έχουν παρουσιαστεί τα περιγραφικά στατιστικά χαρακτηριστικά των ιοντικών λόγων των δειγμάτων για την περίοδο του Οκτωβρίου 2014, φαίνεται πως ο λόγος Cl/SO_4 έχει μέση τιμή 5,04. Οι τιμές του κυμαίνονται από 1,72 έως 8,75, έχοντας δηλαδή εύρος 7,02. Το σχήμα 4.28, αποτελεί ένα χάρτη χωρικής κατανομής του ιοντικού λόγου Cl/SO_4 που όπως φαίνεται το νερό κυμαίνεται από θειοχλωριούχο έως χλωριούχο.



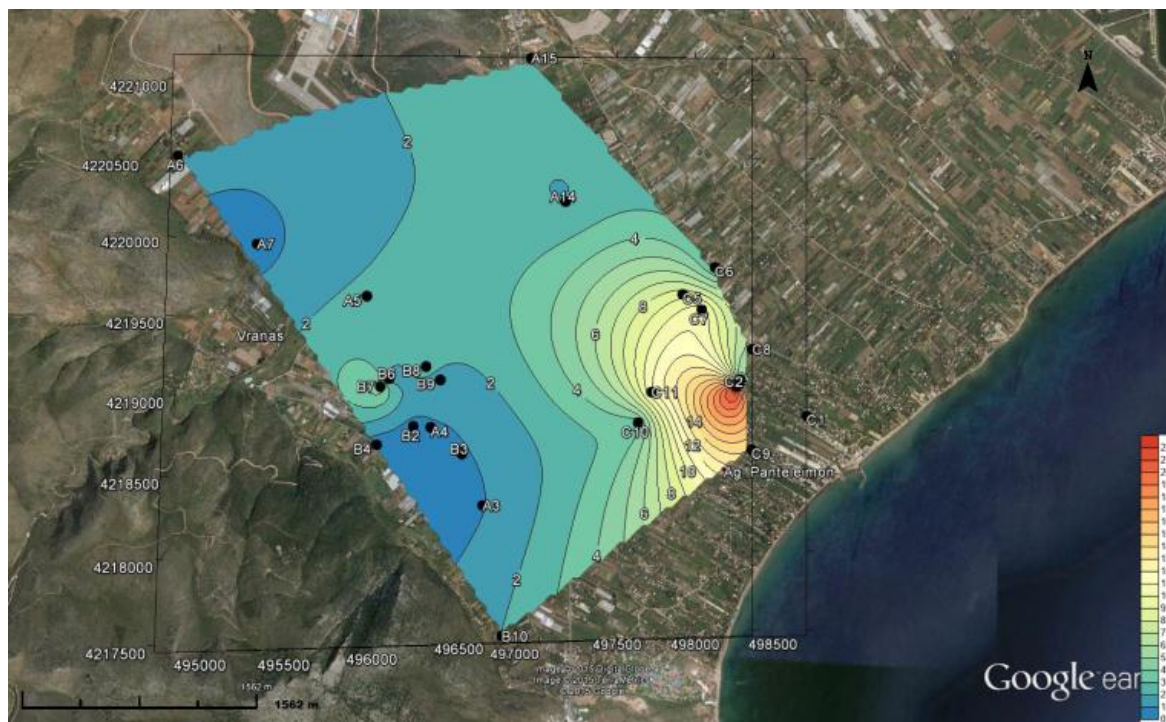
Σχήμα 4.68: Κατανομή του ιοντικού λόγου Cl/SO_4 της πεδινής περιοχής Μαραθώνα.

4.5.6 Ιοντικός λόγος Cl/HCO_3

Ο ιοντικός λόγος Cl/HCO_3 μας δίνει σημαντικές πληροφορίες για ενδεχόμενη θαλάσσια διείσδυση. Όταν ο λόγος είναι κοντά στη μονάδα υποδηλώνεται εμπλουτισμός από τη θάλασσα, ενώ τιμές μικρότερες του 1 παρουσιάζουν τα φυσικά φρέσκα υπόγεια νερά. Τιμές του λόγου μέχρι 2 υποδηλώνουν ελαφρά ρυπασμένο νερό, ενώ 2-6 μέτρια ρυπασμένο απ' την θάλασσα νερό (Βουδούρης, 2009).

Από τον πίνακα 4.7, που έχουν παρουσιαστεί τα περιγραφικά στατιστικά χαρακτηριστικά των ιοντικών λόγων των δειγμάτων για την περίοδο του Οκτωβρίου 2014, φαίνεται πως ο λόγος Cl/HCO_3 έχει μέση τιμή 4,49. Οι τιμές του κυμαίνονται από 0,41 έως 22,35, έχοντας δηλαδή εύρος 21,94. Η διάμεσος είναι αρκετά μικρότερη από την μέση τιμή και σε συνδυασμό με τη θετική ασυμμετρία υπάρχει μια σαφή τάση συγκέντρωσης των τιμών του λόγου προς τις ελάχιστες τιμές.

Στην Σχήμα 4.29, παρουσιάζεται η χωρική κατανομή του λόγου Cl/HCO_3 . Όπως φαίνεται και όπως επιβεβαιώνουν και οι υπολογισθείσες τιμές η περιοχή βρίσκεται υπό καθεστώς θαλάσσιας διείσδυσης.



Σχήμα 4.79: Χάρτης χωρικής κατανομής του ιοντικού λόγου Cl/HCO_3 .

4.5.7 Ιοντικός λόγος BEX

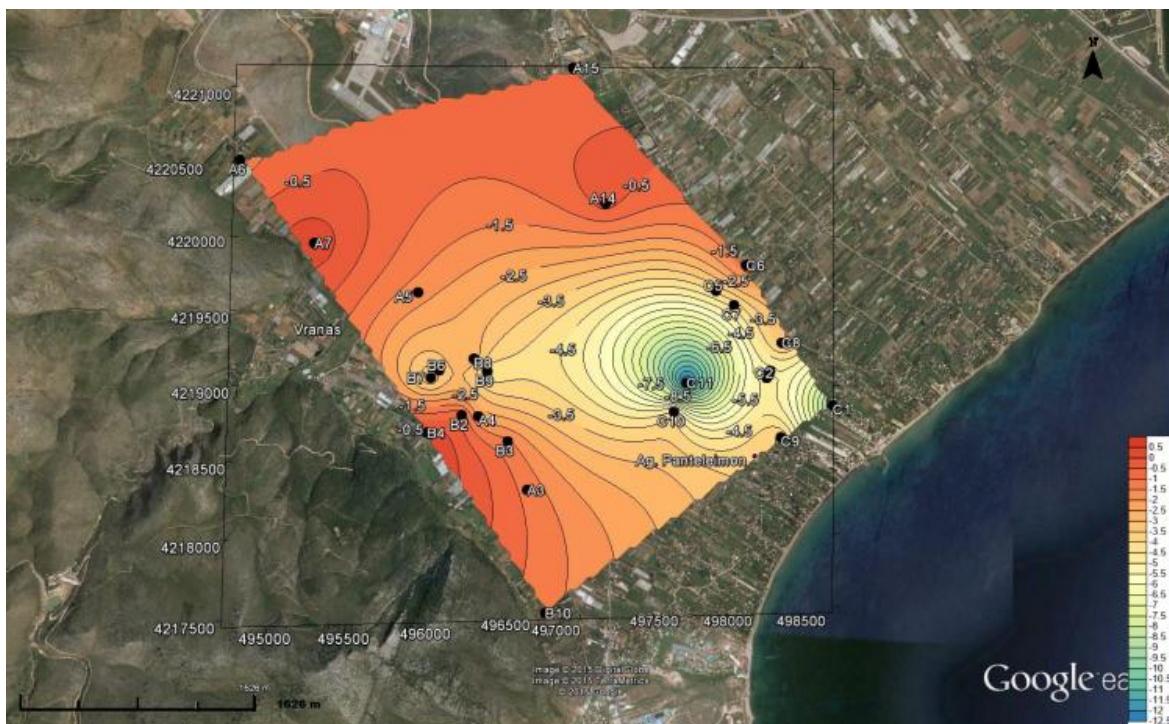
Ο λόγος BEX (Base Exchange Index) δημιουργήθηκε απ' τον Stuyfzand (1986) για την ένδειξη θαλάσσιας διείσδυσης και δίνεται απ' τον τύπο:

$$BEX = (Na^+ + K^+ + Mg^{2+}) - 1,0716 \times Cl^- \quad , \text{ meq/l.}$$

Όταν ο δείκτης είναι θετικός τότε υπάρχει ανανέωση του νερού. ενώ όταν είναι αρνητικός τότε υπάρχει υφαλμύρωση.

Από τον πίνακα 4.7, που έχουν παρουσιαστεί τα περιγραφικά στατιστικά χαρακτηριστικά των ιοντικών λόγων των δειγμάτων για την περίοδο του Οκτωβρίου 2014, φαίνεται πως ο ιοντικός λόγος BEX έχει μέση τιμή -3,08. Οι τιμές που παρουσιάζονται στην πεδινή περιοχή του Μαραθώνα κυμαίνονται από -12,89 έως 0,36, έχοντας δηλαδή εύρος 13,25.

Η Σχήμα 4.30, αποτελεί ένα χάρτη χωρικής κατανομής του ιοντικού λόγου BEX. Από τα 25 δείγματα, τα 23 έχουν αρνητικό ιοντικό λόγο BEX. Σε όλο το κομμάτι μελέτης παρατηρείται υφαλμύριση που στο ανατολικό μέρος - όπου βρίσκεται και η θάλασσα - είναι αρκετά εντονότερη. Η τιμή του λόγου σε αυτό το κομμάτι του χάρτη μειώνεται αισθητά σε σχέση με το δυτικό. Στη χρωματική διαβάθμιση του χάρτη, οι χαμηλές τιμές αποτυπώνουν την υφαλμύριση και σε αυτή τη περίπτωση αποτυπώνεται με τη μπλε απόχρωση. Παρόλα αυτά όλη η περιοχή βρίσκεται υπό αυτό το καθεστώς.



Σχήμα 4.30: Κατανομή του ιοντικού λόγου BEX στην πεδινή περιοχή Μαραθώνα.

4.6 Επεξεργασία αποτελεσμάτων χημικών αναλύσεων

4.6.1 Υδροχημικός τύπος νερών

Ο υδροχημικός τύπος του υπόγειου νερού είναι πολύ σημαντικός για την κατανόηση των υδρογεωχημικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στη περιοχή μελέτης και στην ερμηνεία της ποιότητας του. Όπως φαίνεται στον πίνακα 4.8, τα 10 από τα 25 δείγματα είναι νάτριο-ασβεστο-χλωριούχα, τα 7 από τα 25 δείγματα είναι ασβεστο-νατριο-χλωριο-όξινα ανθρακικά, τα 6 από τα 25 είναι ασβεστο-χλωριο-όξινα ανθρακικά και τέλος τα 2 από τα 25 είναι ασβεστο-χλωριο-όξινα ανθρακικά.

Πίνακας 4.8: Υδροχημικός τύπος υπόγειων νερών.

A/A	Sample ID	X	Y	Water Type
1	A3	496638	4218295	Ca-Na-HCO ₃ -Cl
2	A4	496307	4218793	Ca-HCO ₃ -Cl
3	A5	495901	4219628	Ca-Na-Cl-HCO ₃
4	A6	494701	4220518	Ca-Na-Cl-HCO ₃
5	A7	495201	4219960	Ca-Na-HCO ₃ -Cl
6	A14	497170	4220230	Na-Ca-Cl-HCO ₃
7	A15	496950	4221141	Na-Ca-Cl-HCO ₃
8	B2	496195	4218800	Ca-HCO ₃ -Cl
9	B3	496506	4218623	Ca-HCO ₃ -Cl
10	B4	495962	4218682	Ca-HCO ₃ -Cl
11	B6	496043	4219102	Ca-Cl-HCO ₃
12	B7	495986	4219053	Ca-Na-Cl
13	B8	496278	4219180	Ca-Na-Cl-HCO ₃
14	B9	496369	4219095	Ca-Cl-HCO ₃
15	B10	496759	4217462	Ca-Na-Cl-HCO ₃
16	C1	498713	4218865	Na-Ca-Cl
17	C2	498263	4219050	Na-Ca-Cl
18	C4	498287	4219097	Na-Ca-Cl
19	C5	497919	4219640	Na-Ca-Cl
20	C6	498125	4219811	Na-Ca-Cl-HCO ₃
21	C7	498041	4219542	Na-Ca-Cl
22	C8	498366	4219289	Na-Ca-Cl
23	C9	498360	4218650	Na-Ca-Cl
24	C10	497633	4218822	Na-Ca-Cl
25	C11	497719	4219017	Na-Ca-Cl

Ο νατριο-ασβεστο-χλωριούχος τύπος νερού εμφανίζεται κυρίως στα δείγματα που βρίσκονται στον ανατολικό τομέα του πεδινού τμήματος, δηλαδή κοντά στη θάλασσα και σχετίζεται άμεσα με τη διείσδυση της θάλασσας και την ανάμειξή της με τα υπόγεια νερά. Η παρουσία των χλωριούχων ιόντων φαίνεται σε όλα τα δείγματα αποτυπώνοντας την διαβαθμισμένη υφαλμύρωση που έχει υποστεί η περιοχή καθώς και τον συντηρητικό χαρακτήρα του Cl⁻ που δεν επιτρέπει την ιοντοανταλλαγή. Αντίθετα, η παρουσία Ca στους υδροχημικούς τύπους της περιοχής οφείλεται είτε στην παρουσία ανθρακικών πετρωμάτων, είτε στη τροφοδοσία της πεδινής ζώνης από τους ανθρακικούς όγκους, είτε εξαιτίας της κατιοντικής ανταλλαγής. Ο υδροχημικός τύπος Ca-HCO₃ προέρχεται από

ζώνες τροφοδοσίας μετεωρικού νερού που έρχονται σε επαφή με πετρώματα πλούσια σε Ca^{2+} . Το Na που υπάρχει στους περισσότερους υδροχημικούς τύπους και αυτό οφείλεται στη γεινίαση της περιοχής με τη θάλασσα και στη θαλάσσια διείσδυση. Στην Σχήμα 4.31 φαίνεται η χωρική κατανομή των υδροχημικών τύπων στην περιοχή μελέτης.



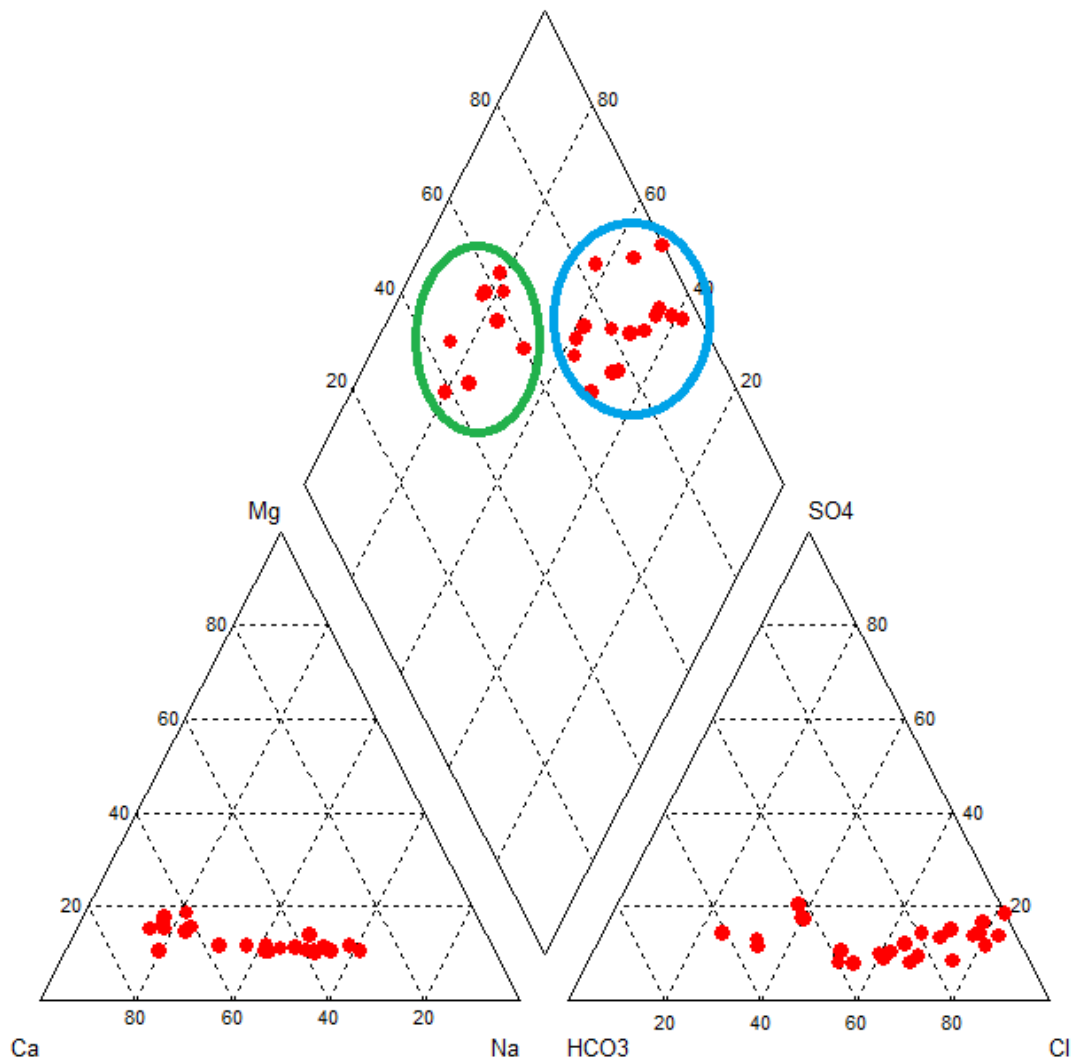
Σχήμα 4.31: Χωρική κατανομή του υδροχημικού τύπου στην πεδινή ζώνη Μαραθώνα.

4.6.2 Ταξινόμηση κατά Piper

Τα διαγράμματα Piper αποτελούν τα πιο διαδεδομένα υδροχημικά διαγράμματα. Την αρχή έκανε ο Piper (1944) και στη συνέχεια, συμπληρώθηκε από τους Back (19610), Hanshaw (1965), Davis S.- De Wiest R. (1967) και Fetter C.W. (1994). Τα διαγράμματα αυτά, περιλαμβάνουν τα κύρια ανιόντα και κατιόντα των υπόγειων υδάτων, όπου η προβολή τους - σε ανεξάρτητα τριγωνικά διαγράμματα - υποδεικνύει την ποσοστιαία συγκέντρωση κάθε ανιόντος ή κατιόντος. Στη συνέχεια κάθε σημείο από τα τριγωνικά διαγράμματα, προβάλλεται σε ρομβοειδή διαγράμματα προεκτείνοντας μια ευθεία γραμμή, ακολουθώντας παράλληλα τις προϋπάρχουσες βοηθητικές γραμμές. Το σημείο που τέμνεται η ευθεία του ανιόντος και του κατιόντος, αποτελεί την προβολή του δείγματος στο ρομβοειδές διάγραμμα. Οι συγκεντρώσεις των ιόντων για την κατασκευή διαγραμμάτων Piper είναι εκφρασμένη σε meq/lit.

Η μέθοδος αυτή είναι χρήσιμη διότι είναι εύκολος ο προσδιορισμός του υδροχημικού τύπου και των υδροχημικών σχέσεων του υπόγειου νερού όπως η ανάμιξη διαφορετικών τύπων νερού, η κατιοντική ανταλλαγή, οι αντιδράσεις καθίζησης και διάλυσης και η θειική αναγωγή (Custodio 1987).

Στο Σχήμα 4.32, φαίνεται το διάγραμμα Piper για τα δείγματα που συλλέχθηκαν και επεξεργάστηκαν για την παρούσα διπλωματική εργασία. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω τα δύο τρίγωνα, στο δεξιό και αριστερό μέρος από το ρομβοειδές διάγραμμα αποτελούν μια αρχική προβολή ανιόντων και κατιόντων αντίστοιχα. Στη συνέχεια, η κάθε προβολή ανιόντος και κατιόντος προβάλεται στο ρομβοειδές διάγραμμα και στην τομή των δυο αυτών προβολών τοποθετείται το αντίστοιχο δείγμα. Στα δείγματα της πεδινής ζώνης του Μαραθώνα παρατηρείται η συγκέντρωση των σημείων σε δυο ομάδες. Τα σημεία που εντάσσονται στην μπλέ ομάδα του σχήματος 4.32 ανήκουν από θειικά έως χλωροθειικά με τύπους από Ca-Na-Cl-HCO₃ έως Na-Ca-Cl, δηλαδή κυριαρχούν τα δείγματα που είναι έντονη η υφαλμύριση. Τα ανιόντα που κυριαρχούν είναι το Cl⁻, ενώ από κατιόντα το Na⁺. Τα σημεία που εντάσσονται στην πράσινη ομάδα του σχήματος ανήκουν στα φυσικά γαιοαλκαλικά νερά έχοντας όμως - σε ορισμένα δείγματα - υψηλό ποσοστό αλκαλίων. Πιο συγκεκριμένα τα νερά χαρακτηρίζονται οξυανθρακικά - θειικά με τύπο Ca-HCO₃-Cl. Τα ανιόντα που κυριαρχούν είναι τα HCO₃⁻, ενώ από κατιόντα το Ca²⁺.

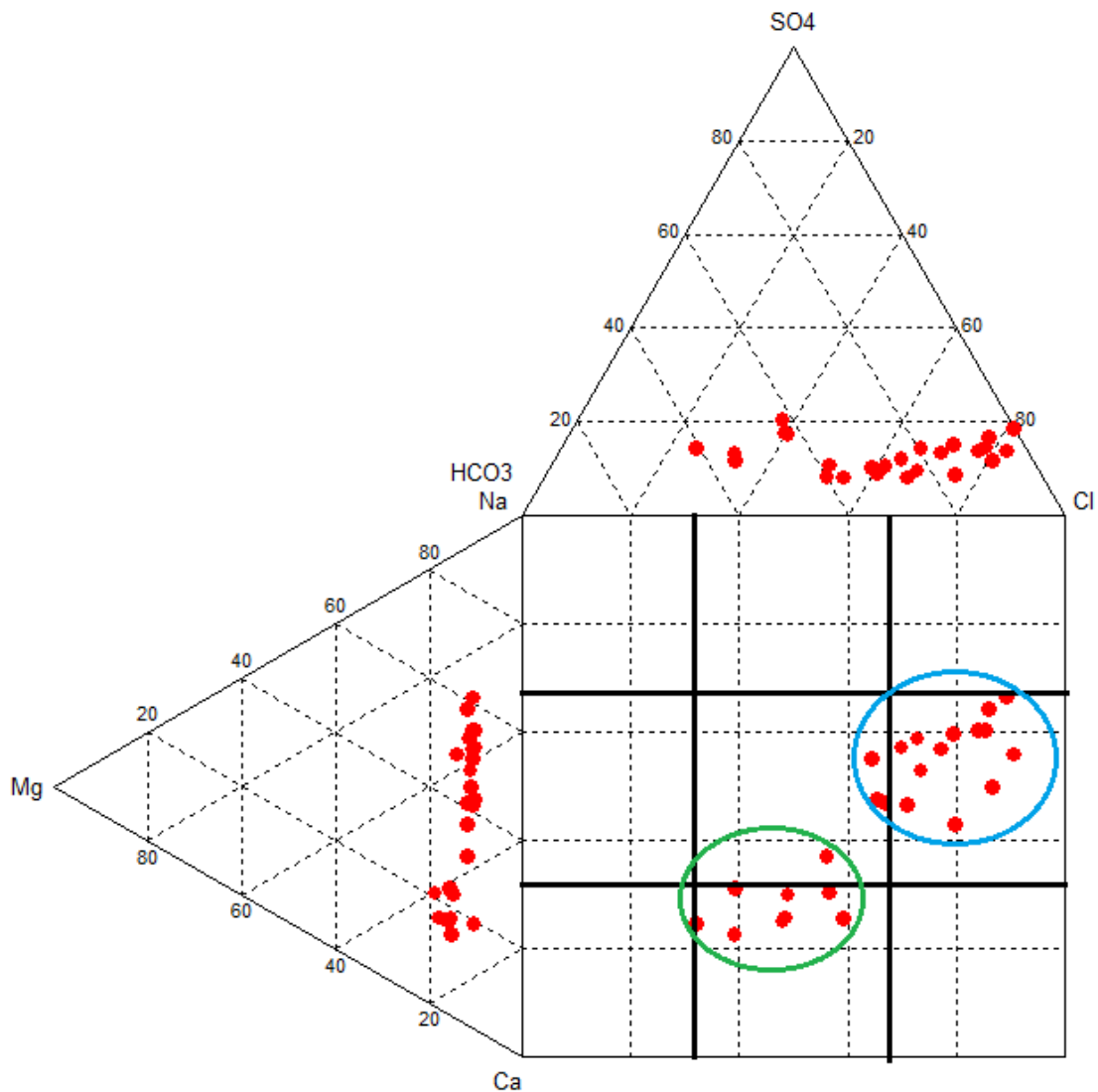


Σχήμα 4.32: Διάγραμμα Piper υπόγειων νερών κάμπου Μαραθώνα.

4.6.3 Ταξινόμηση κατά Durov

Το διάγραμμα Durov εισάχθηκε στην βιβλιογραφία από τον Durov S.A (1948) και στη συνέχεια τροποποιήθηκε από τους Zarogozec A. (1972), Hem J.D. (1970) και Lloyd J.- Heathcote J. (1985). Τα διαγράμματα αυτά, στην απλή τους μορφή αποτελούνται από δύο απλά τριγωνικά διαγράμματα, ιόντων και κατιόντων, που η τομή των προκτάσεων τους προβάλλεται σε ένα κεντρικό ορθογώνιο διάγραμμα. Στην ανεπτυγμένη μορφή του διαγράμματος Durov, αποτελείται από έναν συνδυασμό τριγωνικών και ρομβικών διαγραμμάτων των οποίων οι τιμές προβάλλονται και πάλι σ' ένα κεντρικό ορθογώνιο διάγραμμα. Οι συγκεντρώσεις των ιόντων για την κατασκευή διαγραμμάτων Durov είναι εκφρασμένη σε meq/l.

Στην Σχήμα 4.33, παρουσιάζεται το διάγραμμα Durov για τα δείγματα που συλλέχθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.



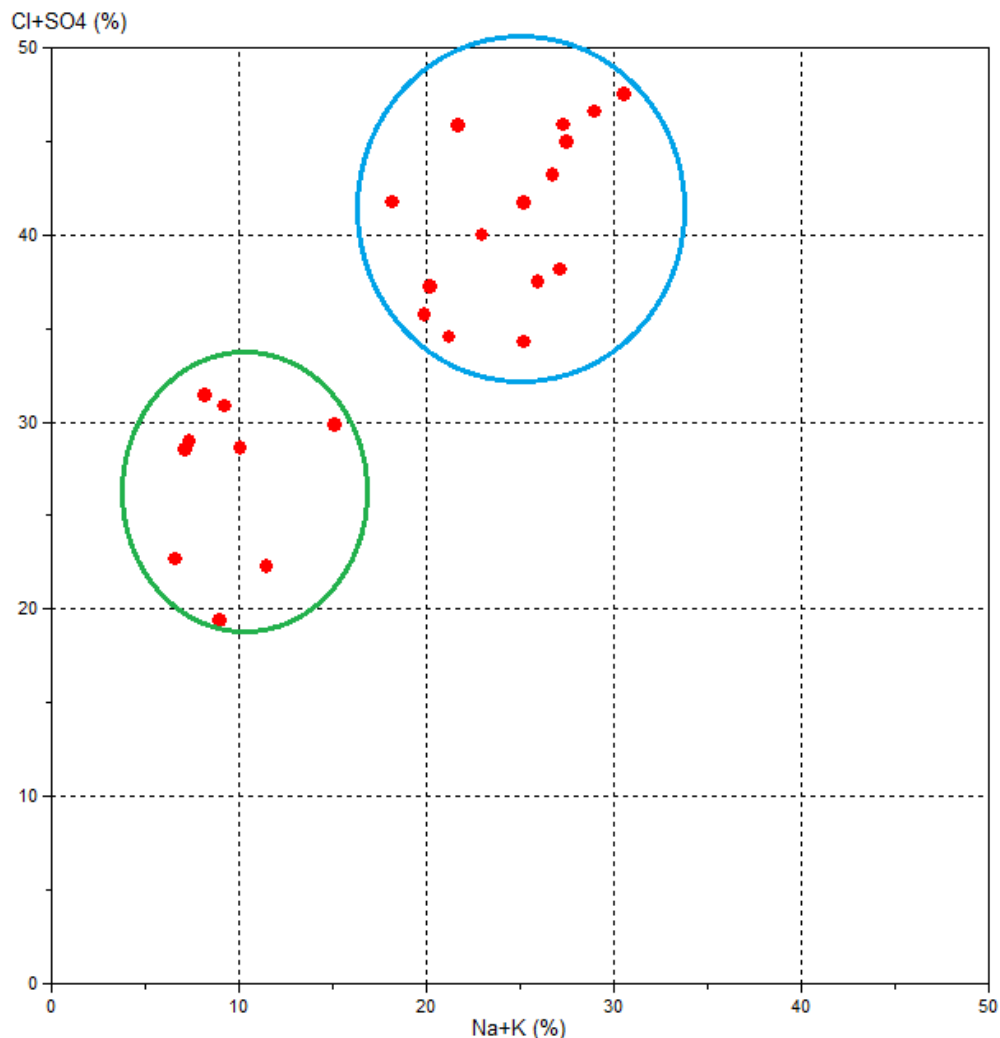
Σχήμα 4.33: Διάγραμμα Durov των υπόγειων νερών της πεδιάδας του Μαραθώνα.

Όπως και τα διαγράμματα Piper, έτσι και τα Durov ταξινομούνται σε 2 διαφορετικές ομάδες, τη μπλε και τη πράσινη. Η μπλε ομάδα χαρακτηρίζεται από τα ανιόντα Cl^- χωρίς κάποια ιδιαίτερη επικράτηση στα υπάρχοντα κατιόντα και το φαινόμενο της αντίστροφης κατιοανταλλαγής βρίσκεται σε πλήρη εξέλιξη. Τα δείγματα που ανήκουν στην ομάδα αυτή είναι αυτά με τις υψηλότερες συγκεντρώσεις Cl^- , με υδροχημικό τύπο Na-Ca-Cl και Ca-Na-Cl-HCO_3 που, χωρικά, βρίσκονται ανατολικότερα από τα υπόλοιπα, δηλαδή αυτά που βρίσκονται κοντά στη θάλασσα. Η πράσινη ομάδα χαρακτηρίζεται από την επικράτηση του κατιόντος Ca^{2+} και κανενός ανιόντος. Τα δείγματα της ομάδας αυτής, είναι τα σχετικά απομακρυσμένα από τη θάλασσα, με υδροχημικό τύπο $\text{Ca-HCO}_3\text{-Cl}$ και Ca-Na-Cl-HCO_3 και φανερώνουν τροφοδοσία μετεωρικού νερού.

4.6.4 Ταξινόμηση κατά Ludwig-Langelier

Το τετράγωνο διάγραμμα Ludwig-Langelier είναι παρόμοιο με την περιοχή προβολής των διαγραμμάτων Piper και Durov. Κατάλληλες ομάδες κατιόντων και ανιόντων επιλέγονται και απεικονίζονται ως ποσοστά των συγκεντρώσεων εκφρασμένων σε meq. Επομένως, το άθροισμα των επιλεγμένων κατιόντων απεικονίζονται στον άξονα y, και το άθροισμα των επιλεγμένων ανιόντων απεικονίζονται στο x-άξονα. Κάθε άξονας κυμαίνεται 0 έως 50 meq%. Όλα τα κυρίαρχα στοιχεία μπορεί να εμφανίζεται σε ένα διάγραμμα Ludwig-Langelier Ωστόσο, όπως και τα διαγράμματα Piper και Durov, εμφανίζει σχετικά ποσοστά συγκεντρώσεων ιόντων και όχι τις απόλυτες συγκεντρώσεις τους.

Στην Σχήμα 4.34, φαίνεται το διάγραμμα Ludwig-Langelier για τα δείγματα της περιοχής μελέτης. Ταξινομούνται σε 2 ομάδες, όπως και προηγουμένως, τη μπλε και τη πράσινη. Η μπλε ομάδα χαρακτηρίζεται από χλωριοθειικό υπόγειο νερού και αφορά κυρίως τα δείγματα με υψηλή συγκέντρωση Cl^- , υδροχημικό τύπο Na-Ca-Cl και Ca-Na-Cl-HCO_3 και χωρικά τοποθετούνται κοντά στη θάλασσα. Η πράσινη ομάδα παρουσιάζει υψηλή συγκέντρωση ασβεστίου με υδροχημικούς τύπους $\text{Ca-HCO}_3\text{-Cl}$ και Ca-Na-Cl-HCO_3 .

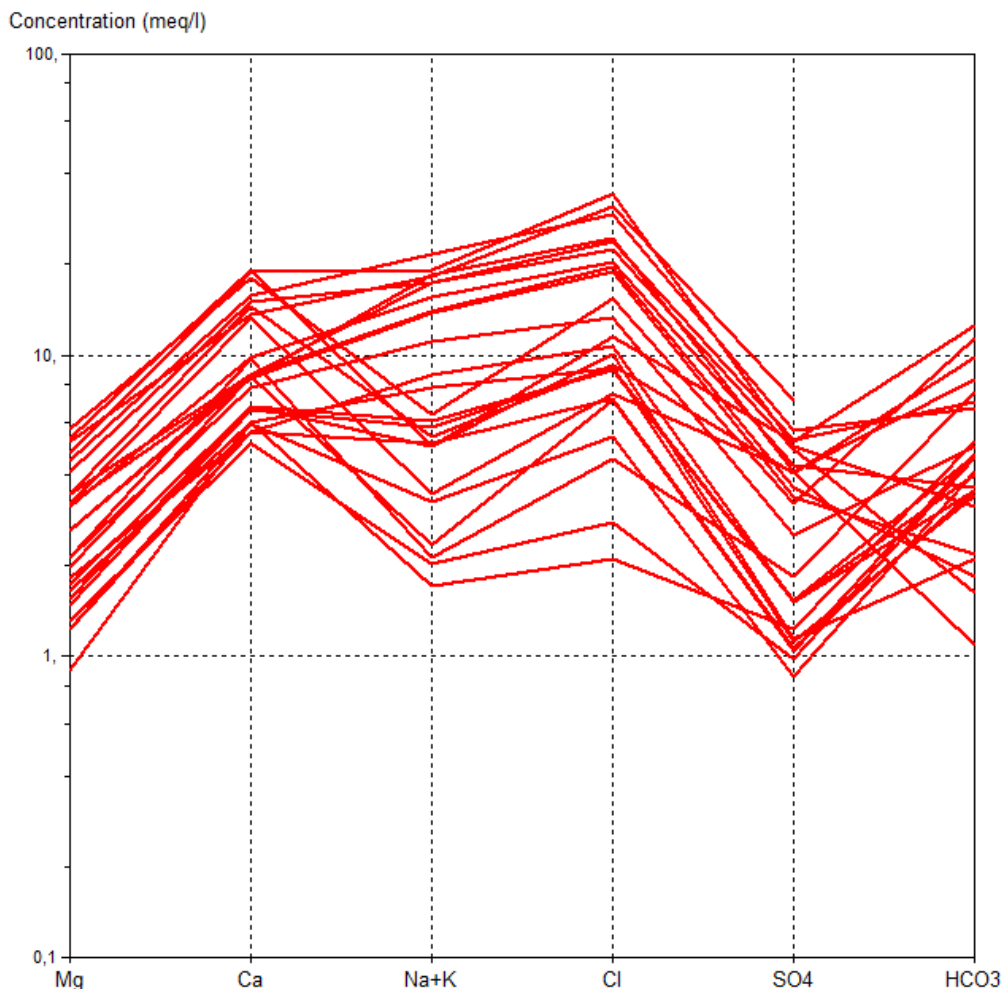


Σχήμα 4.34: Διάγραμμα Ludwig-Langellier.

4.6.5 Ταξινόμηση κατά Schoeller

Είναι λογαριθμικά διαγράμματα των κύριων ιόντων σε meq/l. Χρησιμοποιείται για τη μελέτη των συγκριτικών αλλαγών στις συγκεντρώσεις και τις αναλογίες των παραμέτρων ποιότητας του νερού για διαφορετικά δείγματα.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, το διάγραμμα Schoeller μπορεί να αποτελέσει ένα εξαιρετικό εργαλείο για την ανίχνευση της θαλάσσιας διείσδυσης. Πιο συγκεκριμένα, υψηλές συγκεντρώσεις ανιόντων Cl⁻ είναι αμέσως ορατές σε ένα τέτοιο διάγραμμα όπως φαίνεται και στην Σχήμα 4.35. Αυτή η απότομη αύξηση του Cl⁻ ακολουθείται από σχετική μείωση της συγκέντρωσης των θειικών ιόντων. Έτσι αυτή η μορφή του συγκεκριμένου διαγράμματος δίνει την εικόνα της υφαλμύρισης στην πεδινή και παράκτια ζώνη του Μαραθώνα.



Σχήμα 4.35: Διάγραμμα Schoeller.

4.6.6 Ταξινομήσεις Αρδευτικού νερού

4.6.6.1 Διάγραμμα Wilcox

Το διάγραμμα Wilcox είναι γνωστό και ως διάγραμμα του υπουργείου γεωργίας των Η.Π.Α (U.S Department of Agriculture diagram). Χρησιμοποιείται για αρδευτικούς σκοπούς και κυρίως για την ταξινόμηση του αρδευτικού νερού. Αποτελεί διάγραμμα διασποράς σημείων τα οποία προβάλλονται βάσει των τιμών της περιεκτικότητας Νατρίου (βαθμός αλκαλιώσης Na% ή ESP), στον κατακόρυφο άξονα, και βάσει των τιμών της Ειδικής Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας στον οριζόντιο άξονα. Στον οριζόντιο άξονα, οι τιμές της Ειδικής Ηλεκτρικής αντίστασης είναι σε λογαριθμική κλίμακα. Ο βαθμός αλκαλιώσης ESP υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση (Wilcox 1955):

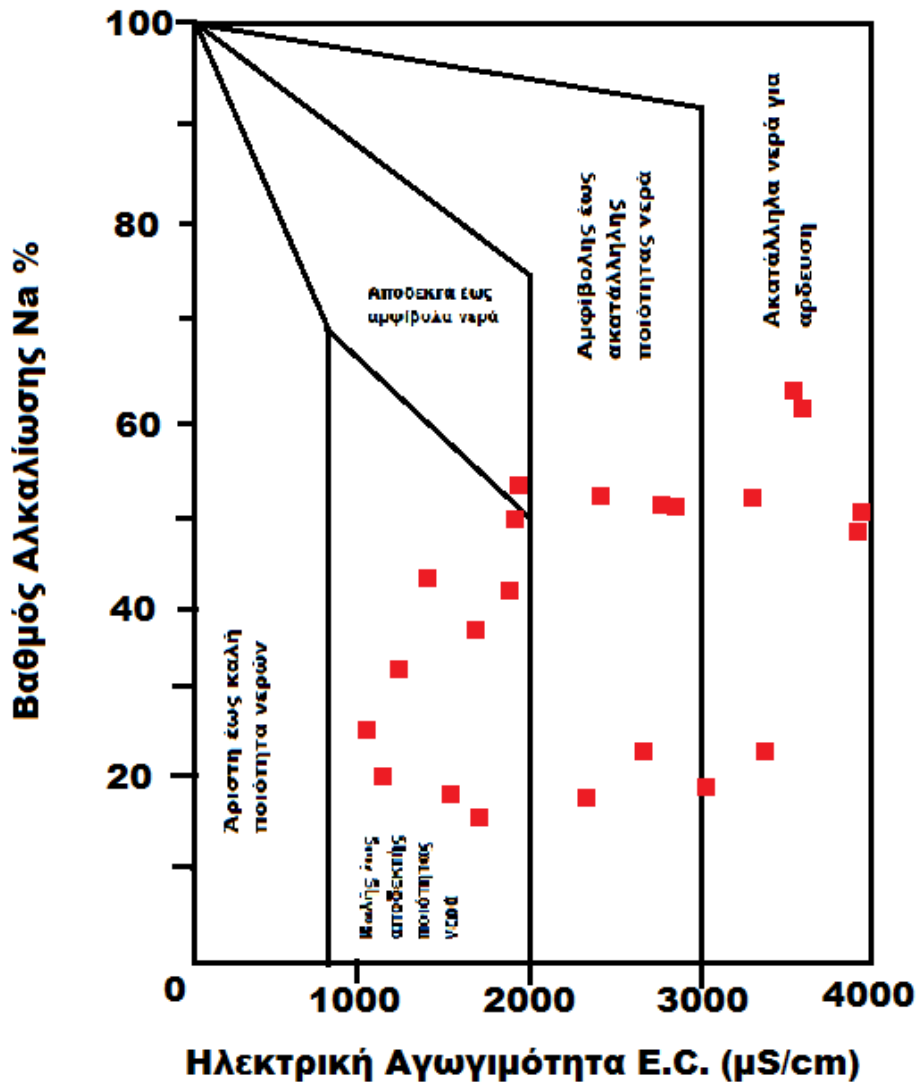
$$ESP = \frac{Na + K}{Ca + Mg + Na + K} 100, \text{ meq/l.}$$

και δείχνει την ποσότητα ανταλλάξιμων ιόντων νατρίου και υψηλό ESP είναι δείκτης αλκαλιωμένου εδάφους. Οι προβαλλόμενες τιμές του διαγράμματος Wilcox φαίνονται στον πίνακα 4.9.

Πίνακας 4.9: Τιμές βαθμού αλκαλίωσης και EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$) για προβολή τους στο διάγραμμα Wilcox. Οι συγκεντρώσεις Na, Mg, K και Ca είναι εκφρασμένες σε meq/l.

Sample ID	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Na (meq/l)	Mg (meq/l)	K (meq/l)	Ca (meq/l)	Na%
A3	2660	5,26	3,45	0,08	14,52	22,92
A4	3039	4,92	5,26	0,05	19,06	16,96
A5	1830	5,92	1,73	0,13	6,79	41,52
A6	1280	3,22	1,23	0,05	5,89	31,47
A7	1025	1,96	1,32	0,08	5,09	24,15
A14	1868	7,57	1,65	0,19	5,99	50,42
A15	1990	8,40	1,81	0,23	5,59	53,84
B2	1700	2,09	2,14	0,05	9,68	15,32
B3	2370	3,39	3,21	0,06	13,27	17,31
B4	1130	1,65	0,90	0,06	5,99	19,87
B6	1616	2,31	1,97	0,05	8,53	18,29
B7	1675	4,92	1,56	0,09	6,79	37,50
B8	1650	5,66	1,48	0,09	6,59	41,60
B9	3340	6,26	5,68	0,10	18,06	21,14
B10	1390	5,00	1,23	0,11	5,59	42,85
C1	3900	18,01	5,18	0,26	13,62	49,27
C2	3580	18,18	3,21	0,38	8,38	61,56
C4	4450	21,49	4,44	0,26	15,72	51,89
C5	2810	13,49	2,63	0,28	8,38	55,55
C6	2380	10,83	2,14	0,24	7,83	52,60
C7	2890	13,83	2,63	0,22	8,63	55,51
C8	3320	15,44	3,13	0,24	9,88	54,66
C9	3460	16,97	3,45	0,36	8,63	58,90
C10	3900	17,14	4,11	0,25	14,97	47,67
C11	4720	18,84	4,77	0,38	18,96	44,75

Από το προκυπτόμενο διάγραμμα Wilcox (Σχήμα 4.36), συμπεραίνεται πως τα 9 από τα 25 δείγματα, δηλαδή σε ποσοστό 36%, κρίνονται ακατάλληλα νερά για άρδευση. Πρόκειται για τα υπεραλατούχα δείγματα που βρίσκονται κοντά στη θάλασσα στο ανατολικό μέρος της περιοχής μελέτης. Τα 5 από τα 25 δείγματα, δηλαδή ποσοστό 20%, χαρακτηρίζονται από αμφίβολης έως ακατάλληλης ποιότητας ύδατα. Πρόκειται για όλα εκείνα τα δείγματα με $2000 < \text{E.C.} < 3000$. Επιπλέον, ένα και μοναδικό δείγμα κατατάσσεται στα αποδεκτά έως αμφίβολα δείγματα. Τέλος, σε 9 από τα 25 δείγματα, δηλαδή σε ποσοστό 36%, η ποιότητα των υδάτων χαρακτηρίζεται από καλή έως αποδεκτή. Όλα τα παραπάνω έχουν μεγάλη σημασία, γιατί η κύρια χρήση των υπόγειων νερών στην περιοχή είναι καθαρά αρδευτική.



Σχήμα 4.86: Διάγραμμα Wilcox για την πεδινή περιοχή του Μαραθώνα.

4.6.6.2 Διάγραμμα Richards

Ο συντελεστής προσρόφησης νατρίου (Sodium Absorption Ration ή S.A.R) υπολογίζεται από τη σχέση (Richards, 1954):

$$SAR = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}}, \text{meq/l.}$$

Η συγκέντρωση του νατρίου είναι σημαντική στην ταξινόμηση του αρδευτικού νερού, γιατί το νάτριο αντιδρά με το έδαφος και ελαττώνει την περατότητά του. Τα εδάφη που περιέχουν μεγάλη αναλογία σε Na_2CO_3 είναι αλκαλικά, και μαζί με χλωρικά ή θειικά

ιόντα σχηματίζουν αλμυρά εδάφη. Ο συντελεστής S.A.R παρουσιάζει πολύ καλή συσχέτιση με τον ESP, της τάξεως του 0,92.

Μια μέθοδος για να υπολογίσουμε τον κίνδυνο προσρόφησης είναι το διάγραμμα Richards, το οποίο προτάθηκε από το U.S. Salinity Laboratory. Σύμφωνα με αυτό, τοποθετούμε τα αποτελέσματα του SAR και τις αντίστοιχες EC στους 25°C (μS/cm) στο λογαριθμικό διάγραμμα και προκύπτει η ταξινόμηση των αρδευτικών υδάτων. Στον πίνακα 4.10 φαίνεται η κατηγοριοποίηση του κινδύνου ανάλογα με την EC και τον συντελεστή SAR, ενώ στον πίνακα 4.11 παρουσιάζονται οι τιμές τους για τα δείγματα στην περιοχή μελέτης.

Πίνακας 4.10: Κατηγορίες νερών του διαγράμματος Wilcox βάσει των τιμών της Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας και του Συντελεστή Προσρόφησης Νατρίου.

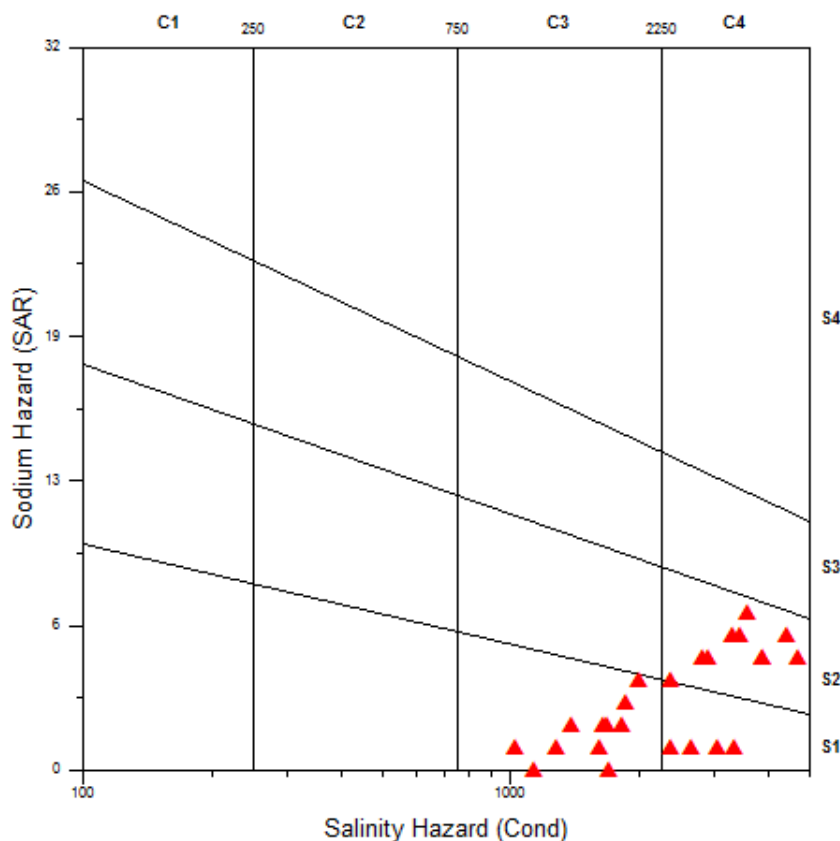
Ηλεκτρική Αγωγιμότητα, EC (μS/cm)	Συντελεστής Προσρόφησης Νατρίου, SAR
C1: Χαμηλός κίνδυνος (0-249)	S1: Χαμηλός κίνδυνος
C2: Μέτριος κίνδυνος (250-749)	S2: Μέτριος κίνδυνος
C3: Υψηλός κίνδυνος (750-2249)	S3: Υψηλός κίνδυνος
C4: Πολύ υψηλός κίνδυνος (2250-5000)	S4: Πολύ υψηλός κίνδυνος

Πίνακας 4.11: Τα δείγματα με τις τιμές EC και SAR.

ID	EC	SAR
A3	2660	1,76
A4	3039	1,41
A5	1830	2,87
A6	1280	1,71
A7	1025	1,09
A14	1868	3,87
A15	1990	4,37
B2	1700	0,86
B3	2370	1,18
B4	1130	0,89
B6	1616	1,01
B7	1675	2,41
B8	1650	2,82
B9	3340	1,82
B10	1390	2,71
C1	3900	5,87
C2	3580	7,55
C4	4450	6,77
C5	2810	5,75
C6	2380	4,85
C7	2890	5,83

C8	3320	6,06
C9	3460	6,90
C10	3900	5,55
C11	4720	5,47

Όπως φαίνεται στην Σχήμα 4.37, όλα τα δείγματα παρουσιάζουν αρκετά υψηλή E.C. με αποτέλεσμα να ταξινομούνται, με βάση αυτή την παράμετρο, στις κατηγορίες υψηλού κινδύνου και πολύ υψηλού κινδύνου. Αντίθετα, οι τιμές του συντελεστή S.A.R. χαρακτηρίζονται ως χαμηλού ή μέτριου κινδύνου. Πιο συγκεκριμένα, όλα τα δείγματα χωρίζονται στις κατηγορίες C3 - S1, C4 - S1, C4 - S2. Η πρώτη κατηγορία αφορά νερό μέσης ποιότητας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για άρδευση με περιορισμούς, η δεύτερη σχετίζεται με νερό μέσης προς κακής ποιότητας., που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για άρδευση ανθεκτικών σε άλατα φυτών και σε καλά στραγγιζόμενα εδάφη και τέλος η τρίτη κατηγορία αντιπροσωπεύει νερό κακής ποιότητας, το οποίο δεν συνίσταται η χρήση του για αρδευτικούς σκοπούς παρά μόνο με αυστηρούς περιορισμούς σε καλά στραγγιζόμενα εδάφη και φυτά ανθεκτικά στα άλατα. Στην περίπτωση αυτή είναι ιδιαιτέρως αυξημένος ο κίνδυνος αύξησης της αλατότητας του εδάφους και γι' αυτό συνίσταται η περιοδική έκπλυση των αλάτων.



Σχήμα 4.97: Το διάγραμμα USSL (1954) για την ταξινόμηση του αρδευτικού νερού.

4.6.7 Συντελεστής Revelle

Ο Revelle (1941) εισήγαγε την έννοια του κριτηρίου της διείσδυσης του θαλασσινού νερού που είναι γνωστό ως συντελεστής Revelle R. Αυτό έγινε για να αποφευχθεί η λαθεμένη εκτίμηση θαλάσσιας διείσδυσης εξαιτίας των αυξημένων TDS. Ο λόγος που υπολογίζει το συντελεστή Revelle R είναι:

$$R = \frac{Cl}{CO_3 + HCO_3}, \text{ σε meq/l.}$$

Ο Simpson (1946) και ο Καλλέργης (2000), πρότειναν τα όρια ρύπανσης της θαλάσσιας διείσδυσης, σύμφωνα με το συντελεστή Revelle και παρουσιάζονται στον πίνακα 4.12.

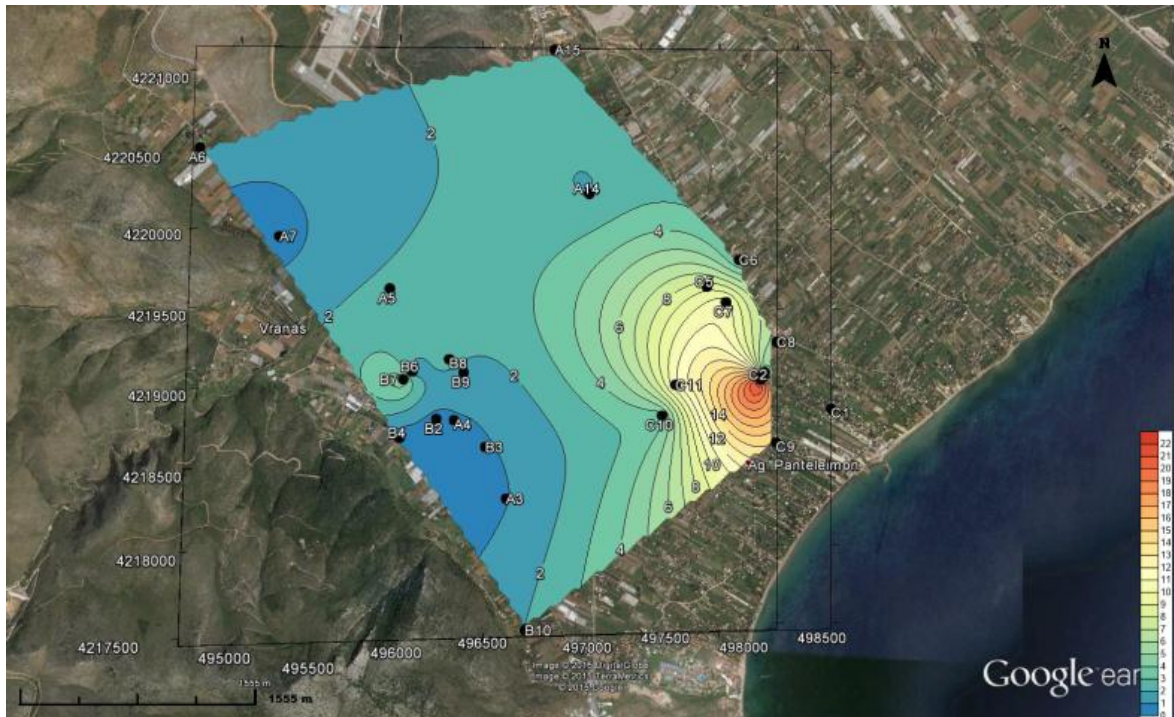
Πίνακας 4.12: Προτεινόμενα όρια του συντελεστή Revelle και ο αντίστοιχος χαρακτηρισμός του νερού της ρύπανσης από τη θάλασσα διείσδυση.

Προτεινόμενο όριο κατά Simpson	Προτεινόμενο όριο κατά Καλλέργη	Χαρακτηρισμός
0,5	<1	Καλό υπόγειο νερό χωρίς ρύπανση από τη θάλασσα
1,3	1-2	Ελαφρά ρυπασμένο νερό
2,8	2-6	Μέτρια ρυπασμένο νερό
6,6	6-10	Σοβαρά ρυπασμένο νερό
15,5	10-150	Επικίνδυνα ρυπασμένο νερό
200 +/-	>150	Θαλασσινό νερό

Από τον υπολογισμό του συντελεστή προκύπτουν πολλά δείγματα με μέτρια, σοβαρά και επικίνδυνα ρυπασμένο νερό. Στον πίνακα 4.13, παρουσιάζονται τα συλλεχθέντα δείγματα με την υπολογισθείσα τιμή του συντελεστή Revelle. Στην Σχήμα 4.38 φαίνεται ο χάρτης χωρικής κατανομής του ίδιου συντελεστή.

Πίνακας 4.13: Η τιμή του συντελεστή Revelle για τα δείγματα της περιοχής μελέτης.

ID	Συντελεστής Revelle
A3	0.94
A4	0.92
A5	2.21
A6	1.30
A7	0.61
A14	1.95
A15	3.03
B2	0.60
B3	0.90
B4	0.41
B6	1.50
B7	4.77
B8	2.68
B9	1.35
B10	2.02
C2	22.35
C4	4.39
C5	8.61
C6	2.65
C7	10.68
C8	5.60
C9	13.91
C10	3.41
C11	10.94



Σχήμα 4.108: Χάρτης χωρικής κατανομής του συντελεστή Revelle.

4.7 Συντελεστές συσχέτισης

Οι συντελεστές συσχέτισης είναι ένας τρόπος συσχετισμού δεδομένων πολλών στοιχείων φανερώνοντας τη μεταξύ τους συσχέτιση και αν αυτή γίνεται με τρόπο ανάλογο ή αντιστρόφως ανάλογο. Οι τιμές τους κυμαίνονται από -1 έως +1. Πολύ καλές πληροφορίες στοιχείων σύγκρισης δίνουν οι τιμές μεταξύ 0,75 και 1 και -0,75 έως -1. Για τις θετικές τιμές, το πρόσημο δείχνει αν η συσχέτιση είναι ανάλογη και για τις αρνητικές αν είναι αντιστρόφως ανάλογη.

Στον πίνακα 4.14, παρουσιάζονται όλοι οι συντελεστές συσχέτισης για τις φυσικοχημικές παραμέτρους που μετρήθηκαν για την πεδινή περιοχή του Μαραθώνα. Οι τιμές των συντελεστών υπολογίστηκαν άμεσα με τη βοήθεια του Microsoft Excel και πιο συγκεκριμένα με τη χρήση της σχετικής συνάρτησης (=Correl). Πολλοί συντελεστές συσχέτισης που βρέθηκαν μεγαλύτεροι του 0,75 στα υπόγεια νερά ήταν αναμενόμενοι.

Το Cl^- παρουσιάζει πολύ καλή συσχέτιση με το Na_+ , με την τιμή του συντελεστή 0,96 καθώς τα δύο αυτά ιόντα συνυπάρχουν στη φύση. Επίσης, καλή συσχέτιση υπάρχει μεταξύ Cl^- και K^+ , πιθανώς λόγω της προέλευσης των λιπασμάτων συλβίτη (Σχήμα 4.16).

Το Ca^{2+} και το Mg^{2+} έχουν γεωγενή συσχέτιση και γι' αυτό η τιμή του συντελεστή είναι 0,93 δηλαδή πολύ υψηλή.

Τα SO_4^{2-} συσχετίζονται καλά με το Na^+ , με το Cl^- , με το Ca^{2+} και με το Mg^{2+} με τιμές 0,76, 0,83, 0,76 και 0,87 αντίστοιχα.

Η συσχέτιση αλκαλίων Na^+ και K^+ παρουσιάζει υψηλό συντελεστή με τιμή 0,91 και είναι αναμενόμενο, καθώς η περιοχή βρίσκεται υπό καθεστώς θαλάσσιας διείσδυσης. Επιπροσθέτως, πιθανή παρουσία αστρίων και αμφιβόλων συνδέεται με την παρουσία των αλκαλίων αυτών.

Παρατηρείται αναλογική σχέση μεταξύ NO_3^- και Ca^{2+} με συντελεστή συσχέτισης 0,77 και αποδίδεται σε πιθανή προσθήκη λιπασμάτων και εδαφοβελτιωτικών, καθώς στη σύνθεση πολλών αζωτούχων λιπασμάτων υπάρχει και το ασβέστιο με διάφορες μορφές.

Η EC παρουσιάζει καλύτερη συσχέτιση με τα ιόντα που έχουν τις υψηλότερες συγκεντρώσεις στην περιοχή. Αυτά είναι το Ca^{2+} , το Mg^{2+} , το Na^+ , το Cl^- και το SO_4^{2-} με τιμές του συντελεστή 0,76, 0,87, 0,88, 0,94 και 0,91 αντίστοιχα.

Πίνακας 4.14: Συντελεστές συσχέτισης των φυσικοχημικών παραμέτρων και στοιχείων των υπόγειων νερών στην πεδινή περιοχή Μαραθώνα.

	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	NO ₃	NO ₂	EC	pH	T
Ca ²⁺	1										
Mg ²⁺	0,93	1									
K ⁺	0,15	0,37	1								
Na ⁺	0,36	0,56	0,91	1							
Cl ⁻	0,55	0,71	0,84	0,96	1						
SO ₄ ⁻²	0,76	0,87	0,56	0,76	0,83	1					
NO ₃	0,77	0,63	-0,37	-0,22	-0,05	0,35	1				
NO ₂	0,44	0,64	0,30	0,46	0,58	0,61	0,10	1			
EC	0,76	0,87	0,73	0,88	0,94	0,91	0,25	0,54	1		
pH	-0,32	-0,44	-0,31	-0,37	-0,43	-0,57	-0,06	-0,47	-0,40	1	
T	-0,22	-0,11	-0,57	0,41	0,35	0,03	-0,57	0,05	0,15	0	1

5. Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την υδρογεωλογική και υδροχημική έρευνα που πραγματοποιήθηκε στη λεκάνη του Μαραθώνα με έμφαση στην πεδινή του περιοχή συνοψίζονται και παρουσιάζονται παρακάτω:

- 1.** Η παράκτια πεδιάδα του Μαραθώνα βρίσκεται στην βορειοανατολική Αττική και χαρακτηρίζεται από έντονες γεωμορφολογικές αλλαγές και ανθρωπογενείς επεμβάσεις. Η ελάττωση της στερεοπαροχής του ποταμού, λόγω των πολυάριθμων ανθρωπογενών επεμβάσεων, όπως η κατασκευή του φράγματος του Μαραθώνα, η επέκταση του αρδευτικού δικτύου της πεδιάδας, οι εκτεταμένες αμμοληψίες έχουν αλλάξει άρδην τη φυσιογραφία της περιοχής.
- 2.** Οι αλπικές γεωλογικές ενότητες που συναντιόνται είναι η αυτόχθονη ενότητα Αλμυροπόταμου, η ενότητα του Νεοελληνικού τεκτονικού καλύμματος, η ενότητα Αφιδνών - Τουρκοβουνίου και τέλος η ενότητα Μαυρηνόρα - Κατσιμιδίου που αντιστοιχεί στην Πελαγονική ενότητα. Οι μεταλλικοί σχηματισμοί που καλύπτουν την περιοχή διακρίνονται σε Νεογενείς και Τεταρτογενείς.
- 3.** Υδρολιθολογικά αναπτύσσονται στην περιοχή δύο τύποι υδροφοριών, τους καρστικούς και την προσχωματική υπόγεια υδροφορία.
- 4.** Ο καρστικός σχηματισμός των μαρμάρων Αγ. Μαρίνας, είναι ανοικτός στη θάλασσα και - σύμφωνα με παλαιότερους ερευνητές- έχει υποστεί έντονη υφαλμύριση.
- 5.** Ο καρστικός υδροφορέας των μαρμάρων του Μαραθώνα, με πολύ μικρή έκταση της περιμέτρου του ανοικτή προς την θάλασσα. Η υφαλμύριση της καρστικής υδροφορίας αποδίδεται από προγενέστερους μελετητές κατά κύριο λόγο στην άμεση επαφή των με τη θάλασσα σε αρκετή απόσταση από την επιφανειακή εμφάνισή τους στον όρμο του Μαραθώνα και κατά δεύτερο λόγο στην υδραυλική επικοινωνία του σχηματισμού με τον έντονα υφάλμυρο σχηματισμό των μαρμάρων της Αγ. Μαρίνας.
- 6.** Στο διαχειριστικό πλαίσιο, της ευρύτερης περιοχής ανήκουν τα φράγματα Μαραθώνα και Ραπεντώσας. Αμφότερα, παρουσιάζουν προβλήματα τα οποία είναι αναγκαίο να εξετασθούν.
- 7.** Η μέση μηνιαία θερμοκρασία της περιοχής, σύμφωνα με τον μετεωρολογικό σταθμό της Ε.Υ.Δ.Α.Π είναι 17,3 °C και οι μέσες ετήσιες βροχοπτώσεις 588,9 mm.

- 8.** Ο πιεζομετρικός χάρτης της πεδινής περιοχής Μαραθώνα για την περίοδο Οκτωβρίου 2014, δείχνει ότι στην περιοχή υπάρχει τροφοδοσία από τους ορεινούς ανθρακικούς όγκους, ενώ η πεδιάδας αντλείται για αρδευτικούς λόγους.
- 9.** Συγκρινόμενη η σημερινή ποσοτική κατάσταση των υπόγειων υδάτων, με παλαιότερες μελέτες του 1985, 1998 και 2003 φαίνεται πως δεν έχει αλλάξει δραματικά. Η περιοχή βρίσκεται υπό αντλητικό καθεστώς εξαιτίας των αρδευτικών χρήσεων γης.
- 10.** Από τους χάρτες χωρικής κατανομής των τιμών της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και των συγκεντρώσεων Cl^- προκύπτει ότι η περιοχή βρίσκεται υπό καθεστώς θαλάσσιας διείσδυσης. Τα δείγματα που γεινιάζαν με τη θάλασσα είχαν αρκετά υψηλότερες τιμές, από τα πιο απομακρυσμένα.
- 11.** Παρατηρείται αύξηση των ιόντων Na^+ η οποία αποδίδεται στην απομάκρυνση των ιόντων Ca^{2+} λόγω της ανταλλαγής με τα ιόντα Na^+ .
- 12.** Η διακύμανση του ιοντικού λόγου Mg/Ca αντιπροσωπεύει τη σχετικά μικρή συγκέντρωση Mg^{2+} στην περιοχή.
- 13.** Η χωρική κατανομή των ιοντικών λόγων Na/Cl , Na/K , Cl/SO_4 , Cl/HCO_3 και BEX παρουσιάζει ακραίες τιμές προς το ανατολικό τμήμα των χαρτών επιβεβαιώνοντας την υφαλμύριση που έχει υποστεί η περιοχή μελέτης.
- 14.** Οι χάρτες χωρικής κατανομής της θερμοκρασίας (T °C) και του ιοντικού λόγου $(\text{Ca}+\text{Mg})/(\text{Na}+\text{K})$ δείχνουν μια ζώνη τροφοδοσίας όπου οι καρστικοί όγκοι τροφοδοτούν το πεδινό τμήμα της λεκάνης.
- 15.** Ο υδροχημικός τύπος των υδάτων που βρίσκονται κοντά στη θάλασσα είναι $\text{Na}-\text{Ca}-\text{Cl}$, ενώ εκεί που παρουσιάζεται εμπλουτισμός ο τύπος είναι $\text{Ca}-\text{Na}-\text{HCO}_3-\text{Cl}$.
- 16.** Τα διαγράμματα Durov, Piper και Ludwig - Langellier ταξινομούν 2 ομάδες δειγμάτων. Στην μια επικρατούν τα ιόντα Cl^- , όπου είναι έντονο το φαινόμενο της υφαλμύρισης, ενώ στην άλλη ομάδα επικρατούν τα ιόντα ασβεστίου, τα δείγματα της οποίας έχουν ελαφρώς υποστεί το φαινόμενο της υφαλμύρισης - καθώς η περιοχή μελέτης βρίσκεται υπό αυτό το καθεστώς - και ερμηνεύονται ως κάποια πιθανή τροφοδοσία μετεωρικού νερού. Ένα ακόμη στοιχείο που επιβεβαιώνει τη διείσδυση της θάλασσας είναι το διάγραμμα Schoeller.
- 17.** Ο υψηλός συντελεστής συσχέτισης K^+ και Cl^- είναι πιθανό να οφείλεται στην προέλευση των χρησιμοποιούμενων λιπασμάτων σύστασης συλβίτη (KCl).

6. Βιβλιογραφία

1. Αλεξίου Δ. (2013). Η εξέλιξη της λεκάνης του Μαραθώνα: Φυσικοί και ανθρωπογενείς παράγοντες. Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
2. Βαφειάδης, Π. και Πανώρας, Α. (1994). «Είναι καιρός ο τεχνητός εμπλουτισμός των υδροφόρων στρωμάτων να αρχίσει να εφαρμόζεται και στη χώρα μας». Περιοδικό «Γεωτεχνική Ενημέρωση», Τεύχος 59, Απρίλιος 1994, σελ. 44-45. 3.
3. Βαφειάδης, Π., 1995. «Τεχνητός Εμπλουτισμός των Υδροφόρων Στρωμάτων». Εκδ. Γιαχούδη-Γιαπούλη Ο.Ε., Θεσσαλονίκη.
4. Βουδούρης, Κ. (1996). Το πρόβλημα της υφαλμύρισης και δυνατότητες ορθολογικής διαχείρισης των παράκτιων υδροφόρων του νομού Κορινθίας. Πρακτικά Συμποσίου "Χημεία και Περιβάλλον". Λουτράκι, Ένωση Ελλήνων Χημικών.
5. Βουδούρης Κ. (2009). Υδρογεωλογία Περιβάλλοντος, Υπόγεια νερά και περιβάλλον, Εκδόσεις Τζιόλα, Αθήνα.
6. Βουδούρης, Κ., Καλλέργης, Γ. (2002). Μεταβολές στο βροχομετρικό καθεστώς της Νότιας Ελλάδας και διαχείριση των υδατικών πόρων. Πρακτικά 6ου Υδρογεωλογικού Συνεδρίου. 8-10 Νοεμβρίου 2002, Ξάνθη.
7. Βουδούρης, Κ., Νίκας, Κ., Αντωνάκος, Κ. (2004). Μελέτη της εξέλιξης του μετώπου υφαλμύρισης σε παράκτιους υδροφόρους ορίζοντες. Πρακτικά 10ου Διεθνούς Συνεδρίου της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας. Θεσσαλονίκη, Τόμος XXXVI/4, 1952-1961.
8. Δασκαλάκη, Π. (2002). Συμβολή στη γνώση του χημισμού και της ποιότητας των υπόγειων υδάτων στον Ελληνικό χώρο. Διδακτορική διατριβή. Τμήμα Γεωλογίας, Παν. Πατρών.
9. Διαμαντής, Ι. και Θ. Τζεβελέκης, (1992). Υδρογεωλογικές και υδροχημικές συνθήκες στις παράκτιες προσχώσεις της νήσου Θάσου. 1ο Πανελλήνιο Υδρογεωλογικό Συνέδριο, Λευκωσία Κύπρος, 1991. "Επιστημονικό Δελτίο του Συνδέσμου Γεωλόγων και Μεταλλειολόγων Κύπρου", Δελτίο 6. σελ. 131-148.
10. Ελληνική επιτροπή μεγάλων φραγμάτων (2013). Τα φράγματα της Ελλάδας
11. Ζυμής, Α., (1994). Τα υπόγεια νερά της Αργολίδας και ο τεχνητός εμπλουτισμός τους. "Γεωτεχνική Ενημέρωση", Νο 64, σελ. 70-71.
12. Θάνος Μ. (1994). Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα από πείραμα τεχνητού εμπλουτισμού υδροφόρων στο αργολικό πεδίο. "Πρακτικά 2ου

- Υδρογεωλογικού Συνεδρίου”, Τόμος Β, Πάτρα, 24-28 Νοεμβρίου 1993, σελ. 119-134.
13. Καλκάνη Ε. (1994): Υδραυλικές κατασκευές - φράγματα. Εκδ. Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων, ΕΜΠ, Αθήνα.
 14. Καλλέργης, Γ. (2000): Εφαρμοσμένη Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία. Τόμος Β' ΤΕΕ. Αθήνα.
 15. Καλλέργης, Γ.(2000). Εφαρμοσμένη υδρογεωλογία, τόμος Α (2η έκδοση), Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Αθήνα.
 16. Καλλέργης, Γ.(2000). Εφαρμοσμένη υδρογεωλογία, τόμος Β (2η έκδοση), Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Αθήνα.
 17. Καλλέργης, Γ., Λαμπράκης, Ν., Νόκας-Ζωγράφος, Η. (1997). Απαιτούμενος χρόνος για την απορρύπανση υφαλμυρισμένων υδροφόρων σε παράκτιες και νησιωτικές περιοχές. Πρακτικά 3^{ου} Συνεδρίου της Ε.Ε.Δ.Υ.Π, 225-229.
 18. Καλλιώρας Α. (2008). Διαχείριση υπόγειων υδατικών πόρων σε υδροφόρους που υπόκεινται σε καθεστώς θαλάσσιας διείσδυσης: η περίπτωση του δυτικού παράκτιου τμήματος του νομού ροδόπης, διδακτορική διατριβή, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης.
 19. Κατσικάτσος Γ. (1977) Γεωλογικός χάρτης Ραφήνας ΙΓΜΕ
 20. Κατσικάτσος Γ. (1994 –1997) Γεωλογικός χάρτης Κηφισιάς, ΙΓΜΕ
 21. Κατσικάτσος Γ., Primolivsilva 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.
 22. Κατσικάτσος Γ.,Kollmann H., Zapfe H., Brother P. (1990): Γεωλογικό χάρτης της Ελλάδας σε κλίμακα 1:50.000. Φύλλο "Ραφήνα". Εκδ. ΙΓΜΕ, Αθήνα.
 23. Κουμαντάκης Ι., Γεωργαλάς Λ., Μορφόπουλος Ζ. (1993). Ποιοτική υποβάθμιση υπόγειων νερών πεδιάδας Μαραθώνα και τάσεις διαφοροποίησής της. 2ο Υδρογεωλογικό συνέδριο, Πάτρα.
 24. Κουμαντάκης Ι., Κυρούσης Ι., Μιμίδης Θ. και Λαμπράκης Ν. (1986). Υδρογεωλογικές συνθήκες σε σχέση με τη ρύπανση των υπόγειων νερών στις περιοχές απόθεσης απορριμάτων της Αττικής και Ιεράπετρας. Δελτίο Ε.Γ.Ε.
 25. Κουμαντάκης Ι., Μιμίδης Θ. (1988). Υπεράλμυρα νερά σε εγκλωβισμένους ασβεστολίθους της Κεφαλλονιάς. 4ο συνέδριο της Ε.Γ.Ε
 26. Κτενάς Κ.(1930): Εκθεσις περί των κατά τα έτη 1928 και 1929 γενομένων γεωλογικών ερευνών. Πρ. Ακαδ. Αθηνών, 5, 92-107.

27. Λόζιος, Σ. (1993). Τεκτονική ανάλυση των μεταμορφωμένων σχηματισμών της Νοτιοανατολικής Αττικής. Διδακτορική Διατριβή. Πανεπιστήμιο Αθηνών.
28. Μαργώνη, Σ., Γ. Συριδης, Αρ. Ψιλοβίκος, Γ. Τρώντσιος, Γ. Σταϊνχάουερ, Κ. Βουβαλίδης, Γ. Μουζούρη, Η εξέλιξη του φυσικού περιβάλλοντος στην περιοχή του Σχοινιά Μαραθώνα από την αρχαιότητα μέχρι σήμερα. 60 Πανελλήνιο Γεωγραφικό Συνέδριο, 159-165, 2002.
29. Μαργώνη, Σ., Περιβαλλοντική εξέλιξη – συγκρότηση της περιοχής Σχοινιά της πεδιάδας του Μαραθώνα κατά το Ολόκαινο και ανθρωπογενείς επεμβάσεις για τη διαχείριση αυτής. Διατριβή Ειδίκευσης, 95 σελ., Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ. Θεσσαλονίκη, 2002.
30. Μελισσάρης Π. & Σταυρόπουλος Ξ., «Υδρογεωλογική Μελέτη Κάμπου Μαραθώνα Ν.Αττικής», Υπουργείο Γεωργίας, Γεν. Δ/ση Εγγ/κων Έργων & Γ.Δ., Αθήνα 1999.
31. Μουτάφης Ν., Αστοχίες και Ατυχή Συμβάντα Ελληνικών Φραγμάτων, 1ο Πανελλήνιο συνέδριο μεγάλων φραγμάτων, 2008.
32. Ξανθάκης Μ. (2011): Η μελέτη της εδαφικής διάβρωσης σε ορεινές λεκάνες απορροής με σύγχρονα τεχνολογικά εργαλεία, Διδακτορική Διατριβή, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο Αθηνών.
33. Παπαδέας Γ. (1987). Γεωλογική - Τεκτονική εξέλιξη στην Αττική και η βαρίσκιος μεταλλοφορία μικτών θειούχων και άλλων ορυκτών στην Ελλάδα. Πρακτ.Ακαδ.Αθηνών.
34. Παπαδέας Γ. (1991): Νεότερα πορίσματα στη γεωλογική – τεκτονική εξέλιξη των μεταμορφωμένων πετρωμάτων της Αττικής και στη βαρίσκια μεταλλοφορία, Πρακτ. Ακαδ. Αθηνών, τομ. 66, Αθήνα
35. Παπανικολάου Δ., Σίδερης Χ. (2005). Γεωλογία: η επιστήμη της Γης. Εκδόσεις Πατάκη, Αθήνα.
36. Παππά Γ. (2001). Υγειονομική σημασία των χημικών παραμέτρων στο πόσιμο νερό.
37. Πατρικάκη Ο. (2009). Υδρογεωλογική Έρευνα Λεκάνης Απορροής Ρέματος Ποταμια, Νομός Κοζάνης, Δυτική Μακεδονία. Διδακτορική διατριβή. Θεσσαλονίκη.
38. Παυλόπουλος Κ., Καρύμπαλης Ε. & Μαρουκιάν Χ. 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, 2002.

39. Περγαλιώτης, Π. Παπαδάκου, Σ. (1998). Τα υφάλμυρα νερά και οι γενεσιουργές αιτίες τους, Πρακτικά ημερίδας "Υφαλμύριση Υπόγειων Υδάτων". ΤΕΕ, Αθήνα.
40. Πεταλάς Χ., Πλιάκας Φ., Διαμαντής Ι., Το πρόβλημα της διείσδυσης της Θάλασσας σε παράκτιους υδροφορείς της Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης και μέθοδοι αντιμετώπισης του. Τεχν. Χρον. Επιστ. Έκδ. ΤΕΕ, τόμος 1-2, 2002.
41. Πεταλάς Χ., Φ. Πλιάκας, και Διαμαντής Ι. (2002). "Η αντιμετώπιση της θαλάσσιας διείσδυσης σε παράκτια υπόγεια υδροφόρα συστήματα στο διεθνή χώρο και στην Ελλάδα". ΥΔΡΟΤΕΧΝΙΚΑ, Επιστημονικό περιοδικό της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης (Ε.Υ.Ε.). Τόμος 12, Δεκέμβριος 2002, σελ. 65-81
42. Πεταλάς, Χ., (1997). Ανάλυση υδροφόρων συστημάτων στο ετερογενές και παράκτιο πεδίο Ν. Ροδόπης. Διδακτορική διατριβή που υποβλήθηκε στο τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης, Ξάνθη, Ιούλιος 1997, 288 σελ.
43. Σαμπατάκης, Π., Ζόραπας, Β. (2001). Φαινόμενα υφαλμύρισης-Επιπτώσεις στο περιβάλλον-Δυνατότητες αποτροπής των. Πρακτικά ημερίδας "Υδρογεωλογία και περιβάλλον". Ελληνική επιτροπή υδρογεωλογίας, Αθήνα 2001 (επιμέλεια Γ. Σούλιος).
44. Σενή Α., Καψιμάλης Β., Παυλόπουλος Κ., Προσδιορισμός των πρόσφατων μεταβολών στην παράκτια πεδιάδα του Μαραθώνα Αττικής, με χρήση συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών, 2010.
45. Σούλιος, Γ. (2004). Γενική Υδρογεωλογία, Τόμος Γ', Εκδ. Κυριακίδη, Θεσσαλονίκη.
46. Στουρνάρας Γ.(2007). Νερό, εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.
47. Στουρνάρας Γ., Υδάτινοι πόροι υπόγεια νερά και περιβάλλον.
48. Φιλίντας Αγ., Πολύζος Σ., Ντιούδης Π., (2008) Αγροοικολογικός σχεδιασμός για προστασία εδαφικών και υδατικών πόρων."Φυσικοί πόροι, Περιβάλλον και Ανάπτυξη" εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.
49. Φλόκας Α. (1994). Μαθήματα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, σελ 465
50. Φωτόπουλος Φ. (2004), Υδρογεωλογικό καθεστώς πεδιάδας Μαραθώνα και επιδράσεις από τα ολυμπιακά έργα. Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

51. Χαμπίδη Π. (2012). Φυσικές και ανθρωπογενείς επιπτώσεις στην ποιότητα των νερών και εδαφών της Ανατολικής Αττικής, Διδακτορική διατριβή. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα.
52. Acreman, M., (1998). Principles of Water Management for People and the Environment. In "Water and Population Dynamics: Case Studies and Policy Implications". Edited by A. De Sherbinin and V. Dompka, American Association of the Advancement of Science, Washington.
53. Appelo C., Postma D. (1994). Geochemistry, groundwater and pollution. A.A Balkema Rotterdam/ Brookfield.
54. Appelo C., Postma D. (2005). Geochemistry, groundwater and pollution. 2nd edition A.A Balkema Publishers.
55. Arnell, N.W. (1999). The effect of climate change on hydrological regimes in Europe: a continental perspective. Global Environmental Change.
56. ASCE, 1987, Ground Water Management. Manuals and Reports on Engineering Practice No.40.
57. Back W., (1961), Techniques for mapping of hydrochemical facies, United States geological survey water supply paper 424–D.
58. Boetechtel, J. and Papadeas, G (1968). Tectonic aerial interpretation in the Mediterranean Region exemplified by the metamorphic series at Eastern Greece, near Marathon.
59. Bowen, R. M., "Compressible porous media models by use of the theory of mixtures," International Journal of Engineering Science, vol. 20, pp. 697-735, 1982.
60. Chartzoulakis, K.S., Paranychianakis, N.V., Angelakis, A.N. (2001). Water resources management in the island of Crete, Greece, with emphasis on the agricultural use. Water Policy 3
61. 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.
62. CMRI. Geo-hydrological studies for Kovaya Limestone Mine of Ulltratech Cement. A Technical Report. Australia (2007): Central Mining Research Institute (CMRI); Ref. No GC/MT/N/18/05–06.
63. Committee on Valuing Ground water, (1997). Groundwater-Valuation. I. National Research Council (U.S.A.). HD1691.V35, 1997.

64. Croke, B., Cleridou, N., Kolovos, A., Vardavas, I., Papamastorakis, J. (2000). Water resources in the desertification-threatened Messara valley Crete: estimation of the annual water budget using a rainfall-runoff model. *Environmental Modelling and Software* 15.
65. Custodio E. (1987). Hydrogeochemistry and tracers, in Custodio E., *Groundwater problems in coastal areas: Studies and reports in hydrology no. 45*, UNESCO.
66. Davis S and De Wiest R. (1966). *Hydrogeology*, John Willey & Sons, New York.
67. Durov, S.A. (1948). Natural waters and graphic representation of their compositions.
68. Dynesiud M., Nilsson C. (1994). *Fragmentation and Flow Regulation of River Systems in the Northern Third of the World*, Science, Vol 266.
69. El-Baruni, S.S. (1995). Deterioration of quality of groundwater from Suani wellfield, Tripoli, Libya. *Hydrogeology Journal* 3(2): 58-64
70. FAO (1986). *Yield response to Water, Irrigation and Drainage paper No33*, in www.fao.org
71. Fetter C. (1994). *Applied hydrogeology*, Macmillan College Publishing Company inc.
72. Fetter C., (2001). *Applied Hydrogeology, Fourth Edition*, Prentice-Hall, Inc., New Jersey.
73. Fetter C. (1994), "Applied Hydrogeology", Prentice Hall, Inc., Upper Saddle River, New Jersey.
74. Glover, R. E. (1964) "Ground-water movement". U. S. Bureau of Reclamation Eng. Mon. 31
75. Gogel T. (1981). Discharge of salt water from Permian rocks to major stream-aquifer systems in Central Kansas: Kansas Geological Survey, The University of Kansas at Lawrence, Chemical Quality Series 9.
76. Goldberh E., Broecker W., Gross M., Turekian K. (1971). *Marine Chemistry, in Radioactivity in the Marine Environment: Eashigton D.C, National Academy of Sciences*.
77. Hanshaw, B.B., (1965), *Chemical geohydrology in: Advances in hydroscience*, Academic Press, New York.
78. Hem, J.D. (1970). *Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water*. 2nd Ed. Geological Survey Water-Supply Paper 1473. United

- States Department of the Interior. United States Government Printing Office, Washington, D.C.
79. Hubbert, M. K. (1940), "The theory of ground-water motion". *Journal of Geology* 48, no. 8: 785 – 944.
 80. International Conference on Water and the Environment, (1992). "The Dublin Statement and Record of the Conference". Geneva: World Meteorological Organization.
 81. Izbicki, J.A., (1991). Chloride sources in a California coastal aquifer, in Peters, Helen, ed., *Ground water in the Pacific Rim Countries: "American Society of Civil Engineers, IR Div./ASCE, Proceedings"*, pp. 71-77.
 82. Karastathis, V., Karmis, P., Drakatos, G. and G. Stavrakakis. (2001). Examination of the Marathon Dam by the use of Geophysical methods. 63rd EAGE Conference and Technical Exhibition., Amsterdam, The Netherlands.
 83. Katsikatsos G. (1971). Les formations triasiques de l'Eubee centrale. *An. Geol.Pays Hellen.*
 84. Katsikatsos G. (1977). La structure tectonique d'Attique et de l'île d'Eubee. *Reun.extr.des.Soc.Geol de France et de Grece, 1976, Bull.Soc.Geol.France, 19, 75-80.*
 85. Katsikatsos G., Migiros G., Triantaphyllis M. (1983): The tectonic window of krania-Elassona area.
 86. Katsikatsos, G. (1976). La structure tectonique de l' Attique et de l' ille de Eubee. *Bull. Soc. Geol. France, 19: 75-80.*
 87. Katsikatsos, G., Migiros, G., Triantaphyllis and M. Mettos, A. (1986). Geological structure of internal Hellenides. (E. Thessaly, SW. Macedonia, Euboea-Attica-Northern Cyclades islands and Lesvos.). *Geol. & Geoph. Res. Special issue: 191-212.*
 88. Kondolf G.M., (1997). *Hungry Water: Effects of Dams and Gravel Mining on River Channels. Environmental Management.*
 89. Lambrakis N. (1991). Elavoration of the hydrochemical data by PC, *Mineral Wealth Vol74.*
 90. Lambrakis, N., Voudouris, K., Tiniakis, L., Kallergis, G. (1997). Impacts of drought and overpumping on the Quaternary aquifers of the Glafkos basin (Patras region, W. Greece). *Environmental Geology, 29 (3/4) February 1997, 209-216.*

91. Leonard A. and Ward P. (1962). Use of Na/Cl ratios to distinguish oil-oil field from salt spring brines in Western Oklahoma: U.S. Geological Survey Professional Paper 450-B.
92. Lepsius R. (1893): Geologie von Attika, Berlin
93. Lloyd J. and Heathcote J. (1985). Natural inorganic hydrochemistry in relation to groundwater. An introduction, Oxford. Clarendon Press.
94. Maimone, M., (1998). Groundwater and salt water modeling of water supply wells in coastal areas. Technical Paper, Prepared for: "American Water Works Association, Annual Conference & Exposition", Dallas, Texas, June 21-25, 1988.
95. Mandel S., Shiftan Z. (1981). Groundwater resources, investigation and development, Academic Press, N.Y., London.
96. Moore, W., (1996). Large groundwater inputs to coastal waters revealed by ²²⁶Ra enrichments. "Nature", 380, pp. 612-614.
97. Papanikolaou D. (1984). The three metamorphic belts of the Hellenides: a review and a kinematic interpretation. Spec. Publ. Geol. Soc. London.
98. Papanikolaou D. (1986). The Medial Tectonometamorphic Belt of the Hellenides. 3rd Congress, Geol. Soc. Greece. May 1986. Bull. Geol. Soc. Greece.
99. Papanikolaou D., Papanikolaou I., (2007). Geological, geomorphological and tectonic structure of the NE Attica and seismic hazard implications for the Northern edge of the Athens plain. Bul. Of the Geol. Society of Greece vol XXXX, Proc. Of the 11th Int. Congress, Athens.
100. Papanikolaou D., Lekkas E., Sideris C., Fountoulis I., Danamos G., Kranis C., Lozios S., Antoniou I., Vassilakis E., Vasilopoulou S., Nomikou P., Papanikolaou I., Skourtsos E. Soukis K. (1999). Geology and tectonics of Western Attica in relation to the 07-09-1999 earthquake, Newsletter of E.C.P.F.E., Council of Europe, Issue 3.
101. Piper A. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses, American Geophysical Union, Transactions, v. 25.
102. Revelle, R. (1941). Criteria for recognition of the sea water in groundwaters. Transactions, American Geophysical Union 22.
103. Richards, L. A, Diagnosis and improvement of Saline and Alkali Soils. Agricultural Handbook 60, USDA and IBH Publishing Co. Ltd. New Delhi, India, 1954, 98-99.

104. Richter B and Kreitler C. (1993). Geochemical techniques for identifying sources of ground-water salinization, Library of Congress, Cataloging-in-Publication data, CRC Press,.
105. Schoeller H. (1967). Hydrodynamique dans le karst. Chronique d'Hydrogeol., BRGM, vol. 10.
106. Soni AK, Pujari PR. Ground water vis- a- vis sea water intrusion analysis for a part of limestone tract of Gujarat Coast, India. J Water Resour Prot 2010; 2: 462-8.
107. Stuyfzand P. (1986). Base Exchange Indices as Indicators of Salinization or Freshening of (Coastal) Aquifers, 20th Salt Water Intrusion Meeting.
108. Todd, D.K., 1980, Ground-water hydrology (Second Edition): John Wiley and Sons, New York.
109. Tzanis A., Chailas S., Kranis Ch., Sotiropoulos P., Karmis P. (2008). Geophysical investigation of hydrogeological conditions and salination processes at the Marathon-Kato Souli basin (NE Attica, Greece). 8th Hydrogeological Congress of Greece, I:399-410, Athens
110. Van Dam, J.C., 1999). Exploitation, restoration and management. In:(Bear et al., eds.) Seawater intrusion in coastal aquifers. Concepts, methods and practices. Kluwer Academic Publishers.
111. Ventura County Public Works Agency, (1995). Annual Report - Fox Canyon Groundwater Management Agency, Ventura, CA.
112. Voudouris, K., Mandilaras, D., Antonakos, A. (2004). Methods to define the seawater intusion: examples from South Greece. Groudwater and saline intrusion. Selected pappers from the 18th Salt Water Intrusion Meeting. Cartagena, Spain, 465-480.
113. USSL Staff. (1954). Diagnosis and improvement of saline and alkali soils, USDA Handbook No.60, U.S., GPO, Washington, D.C.
114. Whittermore D. and Pollack L. (1979). Determination of salinity sources in water resources of Kansas by minor alkali metal and halide chemistry: Kansas Water Resources Istitute, Consultant's report to Office of Water Research and Technology, U.S. Department of the Interior, Washington, D.C.
115. Wilcox L. (1955). "Classification and Use of Irrigation Water," US Department of Agriculture, Circ. 696, Washington DC.
116. Zaprozec A. (1972). Groundwater zoning in water resources management, Water resources bulletin vol. 8, no.6.

