



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Χρήση ισοτοπικών και υδροχημικών χαρακτηριστικών
υπόγειων νερών για τη διερεύνηση της υπόγειας υδρολογίας
του παράκτιου συστήματος του Μαραθώνα»**



Φλώρος Επαμεινώνδας

Επιβλέπων Καθηγητής : Α. Καλλιώρας, Επικ. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2016

Εξεταστική επιτροπή

Δρ. Καλλιώρας Ανδρέας

(Επιβλέπων)

Επίκουρος
Επιστημών

Καθηγητής Τομέα Γεωλογικών

Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων- Μεταλλουργών
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Δρ. Παπασιώπη Νυμφοδώρα

Αν. Καθηγήτρια Τομέα Μεταλλουργίας &
Τεχνολογίας Υλικών

Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων- Μεταλλουργών
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

**Δρ. Ροντογιάννη – Τσιαμπάου
Θεοδώρα**

Καθηγήτρια Τομέα Γεωλογικών Επιστημών

Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων- Μεταλλουργών
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ	5
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ	5
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	6
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	6
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΧΑΡΤΩΝ	7
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	8
1.1 Πρόλογος	8
1.2 Περίληψη	10
1.3 Abstract	11
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ.....	12
2.1 Υδρογεωλογία παράκτιων υδροφορέων	12
2.1.1 Εισαγωγικά	12
2.1.2 Διεπιφάνεια μεταξύ γλυκού - αλμυρού νερού	13
2.2 Θαλάσσια Διείσδυση	17
2.2.1 Εισαγωγή	17
2.2.2 Προσδιορισμός του μήκους διείσδυσης του αλμυρού νερού	18
2.2.3 Έλεγχος και προστασία κατά της διείσδυσης αλμυρού νερού	19
2.3 Εμπλουτισμός (φυσικός) από καρστικές μάζες - Ποιότητα Νερών.....	21
2.3.1 Μηχανισμός της καρστικής διεργασίας.....	21
2.3.2 Καρστικοί υδροφορείς.....	22
2.3.3 Χημική σύσταση καρστικών νερών	23
2.3.4 Στοιχεία του ελληνικού καρστ - γενικά χαρακτηριστικά των καρστ.....	23
2.4 Ισοτοπική Υδρολογία.....	25
2.4.1 Αρχές Ισοτοπικής Υδρολογίας.....	25
2.4.2 Φυσικά ισότοπα	26
2.4.3 Το τρίτιο	30
2.4.4 Τα ισότοπα του άνθρακα	32
3. ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	35
3.1 Περιοχή Έρευνας	35
3.2 Γεωγραφικά Στοιχεία	36
3.3 Δημογραφικά στοιχεία	38
3.4 Χρήσεις Γης – Εδαφοκάλυψη.....	38
4. ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	41
4. Στοιχεία Επιφανειακής Υδρολογίας	41

4.1 Εισαγωγή	41
5. ΓΕΩΛΟΓΙΑ – ΥΔΡΟΦΕΩΛΟΓΙΑ Β.Α ΑΤΤΙΚΗΣ.....	43
5.1 Γεωλογικές Συνθήκες	43
5.1.1 Επιστημονική Κοινότητα - Ιστορική Αναδρομή.....	43
5.1.2 Στρωματογραφία.....	47
5.1.3 Τεκτονική.....	50
5.2 Υδρογεωλογικές Συνθήκες	51
5.2.1 Υδρολιθική κατάταξη γεωλογικών σχηματισμών	52
5.2.2 Ανάπτυξη υπόγειας υδροφορίας	53
5.2.3 Πηγές.....	59
6. ΧΗΜΙΚΕΣ ΚΑΙ ΙΣΟΤΟΠΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ.....	67
6.1 Ποιότητα Υπόγειων Νερών.....	67
6.1.1 Γενικά Στοιχεία	67
6.1.2 Μεθοδολογία	67
6.1.3 Επι-τόπου μετρήσεις.....	67
6.1.4 Έρευνα Πεδίου - Επί τόπου μετρήσεις.....	74
6.1.5 Χημικές Αναλύσεις.....	80
6.1.6 Υδρογεωχημικά Διαγράμματα και Δείκτες.....	90
6.1.7 Ιοντικοί Λόγοι.....	100
6.2 Ισοτοπικές υπογραφές δειγμάτων Υ.Ν. & Ε.Ν.....	102
6.2.1 Εργαστηριακά στοιχεία ισοτοπικής υδρολογίας.....	102
7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	108
8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	110

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Τυπικός Καρστικός σχηματισμός.....	21
Εικόνα 2: Δειγματοσυλλέκτης	69
Εικόνα 3: Δοχείο φύλαξης δειγμάτων	70
Εικόνα 4: Σταθμήμετρο	71
Εικόνα 5: Πολυπαραμετρικό όργανο	72

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Εξέλιξη της περιεκτικότητας ιόντων Cl^- και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) κατά τη διάρκεια της άντλησης	60
Πίνακας 2: Μετρήσεις παροχών πηγής Κάτω Σουλίου-Σχινιά (Μακαρία πηγή)(σε m^3/h)...61	
Πίνακας 3: Επιτόπιες Μετρήσεις δειγμάτων καρστικού Υδροφορέα.....	74
Πίνακας 4: Επιτόπιες μετρήσεις δειγμάτων αλλουβιακού Υδροφορέα	75
Πίνακας 5: Αποτελέσματα Χημικών Αναλύσεων Καρστικού Υδροφορέα.....	80
Πίνακας 6: Αποτελέσματα Χημικών Αναλύσεων Αλλουβιακού Υδροφορέα	80
Πίνακας 7: Τιμές Νιτρικών Ιόντων Αλλουβιακού και Καρστικού Υδροφορέα	89
Πίνακας 8: Υδροχημικός τύπος δειγμάτων αλλουβιακού Υδροφορέα	90
Πίνακας 9: Υδροχημικός τύπος δειγμάτων καρστικού Υδροφορέα.....	90
Πίνακας 10: Κατηγοριοποίηση των υδάτων με βάση το δείκτη SAR	95
Πίνακας 11: Τιμές δείκτη SAR για τα δείγματα του αλλουβιακού και του καρστικού υδροφόρου	95
Πίνακας 12: Κατηγορίες υδάτων κατά Wilcox.....	96
Πίνακας 13: Κατηγοριοποίηση των υδάτων βάσει του λόγου Revelle	99
Πίνακας 14: Τιμές του λόγου Revelle για τα δείγματα του καρστικού και αλλουβιακού υδροφορέα.....	99
Πίνακας 15: Ιοντικοί λόγοι δειγμάτων αλλουβιακού και καρστικού υδροφορέα.....	101
Πίνακας 16: Ισοτροπικές υπογραφές δειγμάτων αλλουβιακού και καρστικού υδροφορέα στην πεδιάδα του Μαραθώνα	103

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Διείσδυση θαλασσινού νερού σε υπόγειο υδροφορέα, με χαρακτηριστικό τον σχηματισμό σφήνας	12
Σχήμα 2: Σχηματική απεικόνιση της παραδοχής Ghyben-Herzberg.....	13
Σχήμα 3: Πραγματική απεικόνιση διεπιφάνειας γλυκών-αλμυρών νερών.....	15
Σχήμα 4: Σχηματική αναπαράσταση περιορισμένου υδροφορέα.....	18
Σχήμα 5: Σχηματική αναπαράσταση ελεύθερου υδροφορέα	19
Σχήμα 6: Πηγάδι τεχνητού εμπλουτισμού προς απώθηση του κώνου του αλμυρού νερού	20
Σχήμα 7: Υποβιβασμός της πιεζομετρικής επιφάνειας διαντλήσεων αλμυρού νερού, με αποτέλεσμα τη σταθεροποίηση του κώνου διεισδύσεως	20
Σχήμα 8: Στρωματογραφική στήλη βορειοανατολικής Αττικής.....	44
Σχήμα 9:Γεωλογική τομή της περιοχής Καλέντζι Μαραθώνα.....	50

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1: Χαρακτηριστική καμπύλη της γεώτρησης ανάντη της πηγής	60
Διάγραμμα 2: Συσχέτιση ιόντων Cl ⁻ και ηλεκτρικής αγωγιμότητας για την πηγή της Μακαρίας	61
Διάγραμμα 3: Καμπύλη εξάντλησης αποθεμάτων Μακαρίας πηγής	64
Διάγραμμα 4: Διάγραμμα Dupon για τα δείγματα του αλλουβιακού υδροφορέα	91
Διάγραμμα 5: Διάγραμμα Dupon για τα δείγματα του καρστικού υδροφορέα	92
Διάγραμμα 6: Διάγραμμα Piper για τα δείγματα του αλλουβιακού υδροφορέα	93
Διάγραμμα 7: Διάγραμμα Piper για τα δείγματα του καρστικού υδροφορέα.....	94
Διάγραμμα 8: Διάγραμμα Wilcox για την κατανομή δειγμάτων του αλλουβιακού υδροφορέα.....	97
Διάγραμμα 9: Διάγραμμα Wilcox για την κατανομή των δειγμάτων του καρστικού υδροφορέα.....	98
Διάγραμμα 10: Γραφική απεικόνιση της Κατανομής των ισοτοπικών υπογραφών των δειγμάτων του αλλουβιακού και καρστικού υδροφορέα.....	107

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΧΑΡΤΩΝ

Χάρτης 1: Η δορυφορική απεικόνιση της περιοχής μελέτης. Στο κόκκινο πολύγωνο επισημαίνεται η κύρια περιοχή μελέτης.....	35
Χάρτης 2: Γεωλογικός χάρτης Αττικής, Περιοχή Μαραθώνα (Πηγή: ΙΓΜΕ).....	46
Χάρτης 3: Υδρογεωλογικός/Υδρολιθολογικός Χάρτης Μαραθώνα (Πηγή: ΙΓΜΕ).....	58
Χάρτης 4: Γενικός και δειγματοληπτικός Χάρτης της Περιοχής μελέτης.....	68
Χάρτης 5: Πιεζομετρικός Χάρτης.....	73
Χάρτης 6: Χάρτης Ειδικής Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας	77
Χάρτης 7: Χάρτης κατανομής pH υπόγειων νερών περιοχής έρευνας.....	78
Χάρτης 8: Καταγραφή της θερμοκρασίας στον προσχωματικό υδροφορέα	79
Χάρτης 9: Χάρτης Κατανομής Χλωριόντων στον αλλουβιακό υδροφορέα	82
Χάρτης 10: Κατανομή Όξινων Ανθρακικών Ιόντων στον Αλλουβιακό Υδροφορέα.....	83
Χάρτης 11: Χάρτης Χωρικής Κατανομής Κατιόντων Ασβεστίου στον αλλουβιακό Υδροφορέα	84
Χάρτης 12: Χάρτης Χωρικής Κατανομής Ιόντων Μαγνησίου στον αλλουβιακό υδροφορέα	85
Χάρτης 13: : Χωρικής Κατανομής Νιτρικών Ιόντων στον αλλουβιακό υδροφορέα της πεδιάδας του Μαραθώνα	86
Χάρτης 14: Χάρτης Συσχέτισης Πιεζομετρίας και Ιόντων Χλωρίου	87
Χάρτης 15: Κατανομή σταθερών ισοτόπων οξυγόνου-18 για τα Υ.Ν. της περιοχής έρευνας	105
Χάρτης 16: Κατανομή σταθερών ισοτόπων Δευτερίου για τα Υ.Ν. της περιοχής έρευνας	106

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του μαθήματος της Εφαρμοσμένης Υδρογεωλογίας της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Το θέμα που πραγματεύεται η παρούσα εργασία είναι η μελέτη του υδρολογικού και ισοτοπικού καθεστώτος των υπόγειων νερών της λεκάνης του Μαραθώνα, εστιάζοντας στα υδροχημικά χαρακτηριστικά του προσχωματικού παράκτιου υδροφορέα.

Για τη διεξαγωγή της διπλωματικής εργασίας, απαραίτητα βήματα αποτέλεσαν τα εξής:

- Βιβλιογραφική αναζήτηση, από την ελληνική και διεθνή βιβλιογραφία, σε θέματα που αφορούν τα γεωλογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά των παράκτιων αλλουβιακών υδροφορέων, το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης, την εκμάθηση πληροφοριακών πακέτων γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών και, τέλος, την εκμάθηση των βασικών αρχών της ισοτοπικής υδρολογίας και των ισοτοπικών ιχνηθετήσεων.
- Αναζήτηση στοιχείων σχετικά με τη γεωμορφολογία, γεωλογία και υδρογεωλογία της περιοχής, από παλαιότερες δημοσιεύσεις -μελέτες και διατριβές-.
- Την έρευνα πεδίου στην πεδιάδα του Μαραθώνα, με παράλληλη ανάπτυξη δικτύου παρακολούθησης του καρστικού και προσχωματικού υδροφορέα μέσω της λήψης δειγμάτων που υπεβλήθησαν σε επιτόπου μετρήσεις, χημικές και ισοτοπικές αναλύσεις.
- Τη χρήση πληροφοριακών πακέτων για την παρουσίαση και επεξεργασία των μετρήσεων και την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Η παρούσα διπλωματική εργασία είναι προϊόν συλλογικής υποστήριξης και προσωπικής προσπάθειας. Η συμβολή καθενός/καθεμιάς από τα πρόσωπα που συνέβαλλαν στην πραγματοποίησή της, έχει ιδιαίτερη συναισθηματική αξία, χωρίς ωστόσο να υστερεί σε ουσία έναντι των υπολοίπων. Γι' αυτό ευχαριστώ τους:

- Κύριο Ανδρέα Καλλιώρα, που με τίμησε με την εμπιστοσύνη του, αναθέτοντας μου το έργο της πραγματοποίησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας και με ενέπνευσε να ασχοληθώ με το αντικείμενο της Υδρογεωλογίας.
- Κυρία Μάρθα Περδικάκη, μεταπτυχιακής φοιτήτριας του Δ.Π.Μ.Σ. Επιστήμης και Τεχνολογίας Υδατικών Πόρων Ε.Μ.Π., που υπομονετικά επίλυε τις απορίες μου και με καθοδηγούσε σε κάθε βήμα της διαδικασίας συγγραφής και συλλογής δεδομένων.
- Κύριο Αναστάσιο Μητρόπαπα, υποψήφιου διδάκτορα της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών, για την παρουσία του και την ουσιαστική του συμβολή κατά την έρευνα πεδίου και τη δειγματοληψία.
- Κύριο Κωνσταντίνο Μαρκαντώνη, μέλος του Εργαστηριακού Διδακτικού Προσωπικού της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών Ε.Μ.Π., για τη συνεισφορά του κατά τη διεξαγωγή των εργαστηριακών χημικών αναλύσεων.
- Κυρίας Ελένης Βασιλείου, μέλος του Εργαστηριακού Διδακτικού Προσωπικού της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών Ε.Μ.Π., για την επίρρωση ζητημάτων υδρογεωλογικής φύσεως.
- Κύριο Χρήστο Πουλιάρη, υποψήφιο διδάκτορα του T.U Darmstadt, για την παροχή υλικής και τεχνικής υποστήριξης κατά την ανάλυση των ισοτοπικών υπογραφών των δειγμάτων.
- Κυρία Σοφία Φίλιππα – Ράπτη, μεταπτυχιακής φοιτήτριας του Δ.Π.Μ.Σ. Επιστήμης και Τεχνολογίας Υλικών, για την στήριξη που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Αξίζει ακόμα να αναφερθεί η καθοριστική συμβολή επιμέρους παραγόντων, εξίσου ζωτικών, που συντέλεσαν στην περάτωση της παρούσας εργασίας,

- Οι φίλοι μου και οι οικογένειές τους, που φρόντισαν να μειώσουν τις αποστάσεις και μου παρείχαν υλική στήριξη, καθιστώντας δυνατή τη φοίτησή μου.
- Ο θεσμός του Δημόσιου και Δωρεάν Πανεπιστημίου, που παρά τις αντιξοότητες, εν γένει διαφυλάσσει τη δυνατότητα φοίτησης για όλους/ες.
- Την οικογένειά μου, για τις μακροχρόνιες θυσίες στις οποίες υποβλήθηκε προκειμένου να φοιτήσω, αλλά και για τη διδαχή της αξίας του στοχασμού και της επιστήμης που θα με συντροφεύουν εφ' όρου ζωής.

1.2 Περίληψη

Οι παράκτιοι υδροφορείς αποτελούν υπόγειους ταμειυτήρες νερού, οι πόροι των οποίων χρησιμοποιούνται για άρδευση σημαντικών εκτάσεων. Παράλληλα, η υδραυλική επικοινωνία αυτών των υπόγειων υδροσυστημάτων με τη θάλασσα και η υπεράντλησή τους, τα καθιστούν ευάλωτα στη θαλάσσια διείσδυση, υποβαθμίζοντας τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά τους. Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της υπόγειας υδρολογίας παράκτιου υδροσυστήματος μέσω συλλογής και αξιοποίησης υδρογεωλογικών, υδραυλικών και ισοτοπικών δεδομένων υπόγειων νερών.

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στο βορειοανατολικό άκρο της Αττικής. Ο προσχωματικός σχηματισμός του Μαραθώνα αποτελεί ένα τυπικό Μεσογειακό υδροσύστημα. Η έρευνα που διεξήχθη αφορά στη μελέτη του υδρογεωλογικού καθεστώτος της περιοχής τόσο μέσω βιβλιογραφικής αναζήτησης ζητημάτων αναφορικά με τη θαλάσσια διείσδυση, τις γεωλογικές και κλιματικές συνθήκες και τη μελέτη της ισοτοπικής υδρολογίας όσο και από την απαιτούμενη έρευνα πεδίου με τη λήψη και επεξεργασία πρωτογενών δεδομένων από τα σημεία υδροληψίας της περιοχής. Επιπρόσθετα, πραγματοποιήθηκαν χημικές αναλύσεις των δειγμάτων, ως προς τα βασικά ιόντα, αλλά και ισοτοπικές μετρήσεις μέσω φασματογράφου μάζας. Τέλος, τα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν σε χάρτες, διαγράμματα και σχήματα χρησιμοποιώντας τα πακέτα πληροφοριακών δεδομένων QGIS 2.12.2 Lyon, ArcMap 10.1, Surfer 11 και Aquachem 4.0.

1.3 Abstract

Aquifer formations aquifers in coastal regions are considered significant water reservoirs that satisfy the irrigation needs for these areas. At the same time, the hydraulic connection of such groundwater systems with the sea and in combinations with the overexploitation of their resources, renders them vulnerable to seawater encroachment, that results in degradation of their qualitative and quantitative characteristics. The objective of this Thesis is the groundwater hydrology of a coastal aquifer system through the collection and interpretation of hydrogeological, hydraulic and isotopic data of groundwaters.

The study area is located in the northeastern part of Attica region. The alluvial formation of Marathon is a typical Mediterranean hydrosystem. The research focused on the hydrogeological regime of the region, through literature investigation as well as field work that was carried out for both the alluvial and karst aquifers of the study area. In addition, chemical analyses and isotopic measurements of groundwater samples were conducted, regarding major ions and isotopic signatures. Finally, the results were presented in maps, charts and figures using QGIS 2.12.2 Lyon, ArcMap 10.1, Surfer 11 and Aquachem 4.0.

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

2.1 Υδρογεωλογία παράκτιων υδροφορέων

2.1.1 Εισαγωγικά

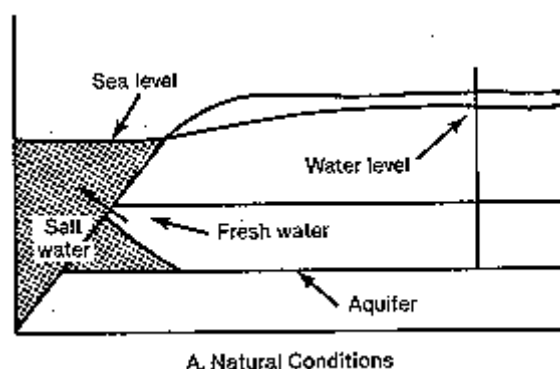
Το φαινόμενο της υπαλμύρισης ή γενικότερα αλμύρισης, περιγράφεται ως η διαδικασία κατά την οποία η συγκέντρωση των διαλυμένων στερεών (αλάτων) στο νερό και στο έδαφος, αυξάνει λόγω φυσικών αιτιών είτε λόγω ανθρωπογενών δραστηριοτήτων. Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που συντελούν στην αλμύριση των εδαφών είναι οι απώλειες νερού οι οποίες οφείλονται σε έναν ή συνδυασμό των παρακάτω κύριων μηχανισμών (Καλλιώρας, 2008):

- Εξάτμιση,
- Εξατμισοδιαπνοή,
- Υδρόλυση,
- Διήθηση μεταξύ υδροφόρων.

Ειδικότερα ο Καλλέργης (2001) αναφέρει ότι οι πιθανές αιτίες αλμύρισης είναι:

- Η παρουσία σαλαμούρας, ιδιαίτερα στα πεδία πετρελαίου,
- Η παρουσία γύψου ή ανυδρίτη ή ορυκτού αλατιού στον υδροφόρο,
- Η έντονη άρδευση (που συνεπάγεται και έντονη εξατμισοδιαπνοή),
- Η παρουσία συγγεντικού νερού σε μικρό βάθος.

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 υδατικό δυναμικό του παράκτιου υδροφόρου, και εφόσον λάβει χώρα διείσδυση αλμυρού νερού, η υποβάθμιση λαμβάνει επίσης ποιοτικό χαρακτήρα. Δεν είναι τυχαίο το γεγονός ότι πολλοί επιστήμονες σήμερα για να περιγράψουν τη διαδικασία της διείσδυσης της θάλασσας, προτιμούν το χαρακτηρισμό «καταστροφή» έναντι του φαινομένου. Η θαλάσσια διείσδυση αποτελεί ένα ευρύτερο περιβαλλοντικό πρόβλημα επηρεάζοντας πολλές ευρωπαϊκές και άλλες χώρες, παρατηρείται δε εντονότερα στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου, λόγω των ημίξηρων κλιματολογικών συνθηκών που επικρατούν. Ουσιαστικά η πλειονότητα των παράκτιων υδροφόρων της μεσογειακής ακτής υπόκεινται σε καθεστώς υπερεκμετάλλευσης του υδατικού δυναμικού τους με αποτέλεσμα την έξαρση του φαινομένου της θαλάσσιας διείσδυσης στις περιοχές αυτές.



Σχήμα 1: Διείσδυση θαλασσινού νερού σε υπόγειο υδροφόρα, με χαρακτηριστικό τον σχηματισμό σφήνας (Πηγή: <http://www.bvsde.ops-oms.org>)

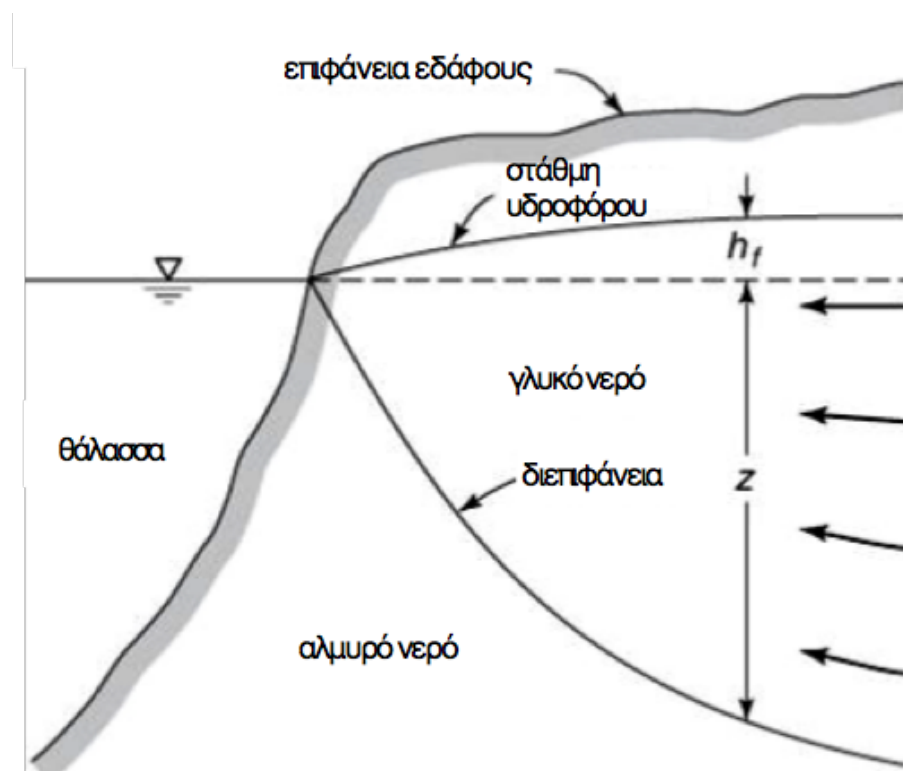
Στην επαφή γλυκού και αλμυρού νερού δημιουργείται μια ζώνη αναμίξεως, με υφάλμυρο νερό. Η ζώνη αυτή αποτελεί "διεπιφάνεια" δυναμικής ισορροπίας μεταξύ γλυκού και αλμυρού νερού, επομένως η θέση της στο χώρο δεν είναι σταθερή. Η μετατόπισή της εξαρτάται κατά κύριο λόγο από το υδραυλικό φορτίο του γλυκού νερού, δηλαδή από το πάχος της κορεσμένης ζώνης του που βρίσκεται ψηλότερα από τη στάθμη της θάλασσας. Ελαφρώς επηρεάζεται επίσης και από τις διακυμάνσεις της επιφάνειας της θάλασσας, δηλαδή από την παλίρροια.

2.1.2 Διεπιφάνεια μεταξύ γλυκού - αλμυρού νερού

Ιδιαίτερη σημασία αποκτά ο καθορισμός και η διερεύνηση των ιδιοτήτων της διεπιφάνειας γλυκών και αλμυρών νερών για την υδρογεωλογία των παράκτιων περιοχών. Η επίγνωση της παρουσίας της ζώνης υφαλμύρισης μας παρέχει πληροφορίες για την πρόοδο που έχει καταγραφεί σε ότι αφορά τη θαλάσσια διείσδυση, πράγμα χρήσιμο για την οργάνωση της γεωργικής παραγωγής, την κατάσταση των υπόγειων υδροφόρων και την ποιότητα του νερού.

2.1.2.1 Μελέτη Ροής Υπόγειων νερών προς τη θάλασσα

Για την απόκτηση και αξιοποίηση μεγάλου τμήματος της σύγχρονης γνώσης, ζωτικό ρόλο έπαιξαν οι μελέτες των Badon-Ghyben και Herzberg, οι οποίοι επιχείρησαν να περιγράψουν μαθηματικά την εμφάνιση της διεπιφάνειας μεταξύ ενός χέρσου υδροφόρου ορίζοντα και της θάλασσας.



Σχήμα 2: Μοντέλο της θεωρίας Ghyben-Herzberg για τη διεπιφάνεια γλυκού-αλμυρού νερού σε παράκτιο ελεύθερο υδροφόρο (Todd and Mays, 2005)

Η περιγραφή της εν λόγω σχέσης περιγράφεται εύκολα από τη σχεδίαση μιας οριζόντιας ευθείας από ένα σημείο A της διαχωριστικής επιφάνειας γλυκού και αλμυρού νερού προς σημείο B και προσδιορίζουμε την υδροστατική πίεση στα σημεία A και B.

Στο σημείο A η υδροστατική πίεση P_A ισούται με:

$$P_A = \rho_g H + \rho_g h_s$$

Όπου ρ : Η πυκνότητα του γλυκού νερού,

H το υψόμετρο της πιεζομετρικής επιφάνειας,

h_s το βάθος του σημείου A κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας και

g η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Στο σημείο B η υδροστατική πίεση P_B ισούται με:

$$P_B = \rho_s + g h_s$$

Όπου ρ_s η πυκνότητα του αλμυρού νερού και

h_s το βάθος του B κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας.

Σε κατάσταση ισορροπίας οι υδροστατικές πιέσεις, όπως προσδιορίστηκαν προηγουμένως, είναι ίσες, επομένως έχουμε:

$$\rho_s g h_s = \rho g H + \rho g h_s$$

Και λύνοντας ως προς το h_s προκύπτει:

$$\begin{aligned} \rho_s g h_s - \rho g h_s &= \rho g H \implies g h_s (\rho_s - \rho) = \rho g H \implies \\ h_s &= \frac{\rho}{\rho_s - \rho} H \end{aligned}$$

Η εξίσωση αυτή αποτελεί το νόμο Ghyben - Herzberg και αν θέσουμε $\rho=1 \text{ gr/cm}^3$ και $\rho_s=1,025 \text{ gr/cm}^3$, προκύπτει:

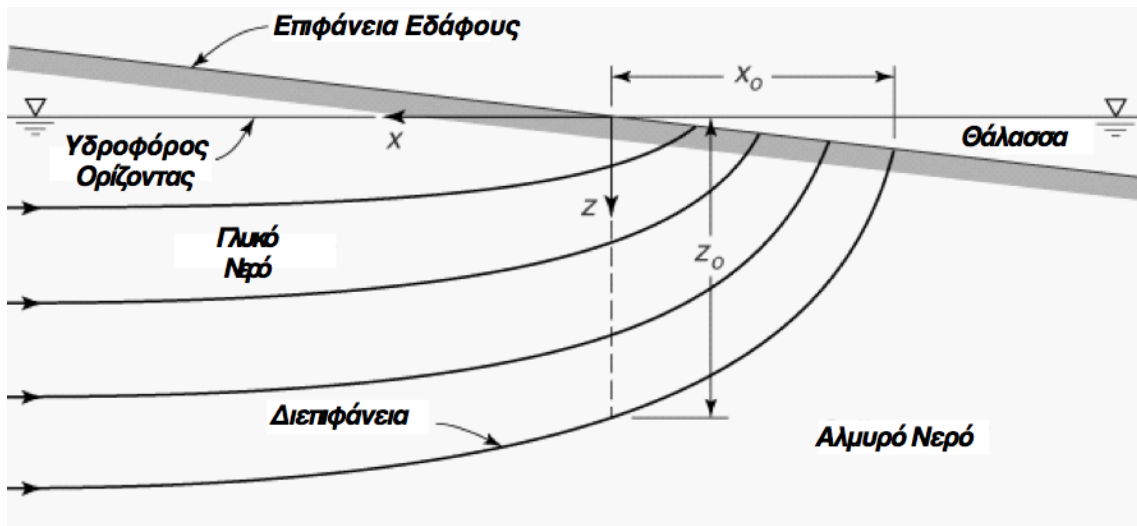
$$h_s = 40H$$

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι το βάθος της διεπιφάνειας γλυκού και αλμυρού νερού εξαρτάται από το υδραυλικό φορτίο και είναι περίπου 40 φορές μεγαλύτερό του. Αυτό σημαίνει ότι όταν σε μία θέση η πιεζομετρική επιφάνεια έχει υψόμετρο 1 μέτρο, για παράδειγμα, το γλυκό νερό απωθεί το μέτωπο υφαλμύρωσης σε βάθος 40 μέτρων κάτω του επιπέδου της επιφάνειας της θάλασσας και ότι ακόμη μια πτώση της στάθμης κατά 1μ εξαιτίας αντλήσεων, συνεπάγεται ανύψωση των αλμυρών νερών στο υπέδαφος της χέρσου κατά 40 μέτρα περίπου.

Ωστόσο η παραπάνω μαθηματική ανάλυση περιγράφει την εξίσωση των υδροστατικών πιέσεων, δηλαδή κατάσταση ισορροπίας που σημαίνει μη ροή των υπογείων νερών. Στη φύση όμως ροή υπάρχει και η παρατήρηση έχει αποδείξει ότι η διαχωριστική επιφάνεια γλυκού-αλμυρού νερού είναι κοίλη, τοποθετημένη βαθύτερα της θεωρητικής επίπεδης επιφάνειας που προβλέπει ο νόμος Ghyben - Herzberg.

Στην πραγματικότητα η προσέγγιση Ghyben – Herzberg δεν απεικονίζει την πραγματική εικόνα της διεπιφάνειας δεδομένου ότι:

- Δεν ισχύει η παραδοχή της οριζόντιας ροής. Υπάρχουν σημαντικές κατακόρυφες συνιστώσες ταχυτήτων, ιδιαίτερα στην επιφάνεια διαστάλαξης του γλυκού νερού προς τη θάλασσα.
- Η προσέγγιση Ghyben – Herzberg δεν επιτρέπει τον υπολογισμό της επιφάνειας από την οποία πραγματοποιείται διέξοδος γλυκού νερού προς τη θάλασσα.
- Η διεπιφάνεια αλμυρού – γλυκού νερού συνήθως δεν είναι ακίνητη, αλλά κινείται προς το εσωτερικό του υδροφορέα ή αντίστροφα.
- Η προσέγγιση Ghyben – Herzberg δεν μπορεί να προβλέψει στην περίπτωση ελεύθερων υδροφορέων, την επιφάνεια διήθησης.



Σχήμα 3: Πρότυπο ροής γλυκού νερού σε ελεύθερο παράκτιο υδροφόρο (Todd and Mays, 2005)

Το 1940 η παραπάνω διαπίστωση οδήγησε τον Hubbert (1940) στην αναζήτηση μιας νέας μαθηματικής σχέσης που να ανταποκρίνεται στα νέα δεδομένα. Κατέληξε λοιπόν στο συμπέρασμα πως η γωνία α που σχηματίζει η πραγματική διαχωριστική επιφάνεια σε κάθε της σημείο με μια οριζόντια ευθεία, δίδεται από τη σχέση:

$$\sin\alpha = \frac{dz}{dx} = \left[\frac{1}{K} \frac{\rho}{\rho - \rho_s} V - \frac{1}{K} \frac{\rho_s}{\rho - \rho_s} V_s \right]$$

Όπου οι μεταβλητές με δείκτη s αφορούν την κίνηση του αλμυρού νερού και οι μεταβλητές άνευ δείκτη του γλυκού.

Αν υποθέσουμε ότι το αλμυρό νερό δεν μετακινείται και ότι πραγματοποιείται ροή μόνο του γλυκού νερού προς τη θάλασσα, τότε έχουμε $V_s=0$ και $V \neq 0$, από την προηγούμενη σχέση προκύπτει ότι το $\sin\alpha > 0$ επειδή $\rho < \rho_s$ και ότι η τιμή της γωνίας α αυξάνει με την αύξηση της ταχύτητας του γλυκού νερού V .

Δεδομένου ότι οι γραμμές ροής του γλυκού νερού συγκλίνουν προς τον πυθμένα της θάλασσας, ταχύτητα ροής αυξάνει προς την κατεύθυνση αυτή και επομένως η γωνία α μεγαλώνει με την προσέγγιση της επιφάνειας επαφής γλυκού-αλμυρού νερού στοθαλάσσιο πυθμένα. Συνέπεια τούτου είναι η επιφάνεια αυτή να κάμπτεται, με τα κοίλα της στραμμένα προς τα άνω και η τιμή της γωνίας α να πλησιάζει κοντά στον πυθμένα της θάλασσας την τιμή των 90° .

Υπ'αυτές τις συνθήκες η γωνία α δίδεται από τη σχέση:

$$\sin\alpha = \frac{\rho}{\rho_s - \rho} \frac{V}{K}$$

2.1.2.2 Στρώμα υφαλμύρισης

Η υφαλμύριση υπόγειων υδροφορέων αποτελεί ειδική περίπτωση υπόγειας ροής και παρατηρείται τόσο σε ελεύθερους όσο και σε υπό πίεση υδροφορείς. Το φαινόμενο της υφαλμύρισης παρατηρείται συνήθως κατά τη διείσδυση θαλάσσιου νερού στους παράκτιους υδροφορείς, λόγω φυσικών αιτιών:

- Συγκεκριμένες αλλαγές των κλιματικών συνθηκών

- Ανύψωση της στάθμης της θάλασσας
- Θαλασσινό νερό που διείσδυσε σε υδροφορείς κατά το παρελθόν
- Υπολείμματα εξάτμισης νερού σε παλιρροιακές λίμνες, κοιλάδες
- Νερό από αρδευόμενη έκταση που καταλήγει σε υδρορρεύματα

αλλά και ανθρωπογενών παρεμβάσεων όπως η υπεράντληση παράκτιων υδροφορέων.

Όταν ο ρυθμός άντλησης σε πηγάδια κοντά στη θάλασσα υπερβεί το ρυθμό φυσικής ή τεχνητής επαναφόρτισης του υδροφορέα τότε το θαλασσινό νερό εισρέει στους υδροφορείς καταστρέφοντάς τους από πηγή πόσιμου νερού. Η διερεύνηση του φαινομένου είναι εξαιρετικά σημαντική επειδή αποτελεί τη συνηθέστερη αιτία μόλυνσης του γλυκού νερού και ένα από τα σοβαρότερα περιβαλλοντικά προβλήματα σε πολλές παράκτιες περιοχές ανά τον κόσμο, ενώ αποτελεί και έναν εμφανή δείκτη της κακής διαχείρισης των φυσικών πόρων. Επίσης το φαινόμενο δεν μπορεί να θεωρηθεί γρήγορα αναστρέψιμο γι' αυτό και η αντιμετώπιση του συνδέεται πρακτικά με πρόβλεψη και ορθή διαχείριση.

Από μετρήσεις πεδίου προκύπτει ότι διεπιφάνεια της ζώνης υφαλμύρισης δεν ανταποκρίνεται στην μαθηματική έννοια της «διεπιφάνειας», αλλά πρόκειται για μία ζώνη μεταβλητού πάχους από υφάλμυρο νερό. Η ζώνη αυτή είναι αποτέλεσμα διάφορων εξωτερικών επιδράσεων όπως η φύση της φόρτισης και αναφόρτισης του γλυκού νερού, η παλιρροιακή δράση και ο τρόπος άντλησης. Οι επιδράσεις αυτές προκαλούν τη συνεχή μετατόπιση της διαχωριστικής επιφάνειας προς νέα θέση ισορροπίας. Η διάχυση που προκαλείται από κάθε κίνηση οδηγεί σε σχηματισμό μεταβατικής ζώνης βαθμιαίας ανάπτυξης και αλατότητας.

Η διάχυση εξαρτάται από το συντελεστή διάχυσης του υδροφόρου ορίζοντα και την απόσταση που διασχίζει το υπόγειο νερό. Το πάχος της μεταβατικής ζώνης ανάμιξης σε κάθε θέση εξαρτάται από το συντελεστή διάχυσης, από την κατάσταση ή μη ισορροπίας του γλυκού νερού, την περατότητα και την παλίρροια. Καθώς το αλατούχο νερό διαχέεται προς τα πάνω στη μεταβατική ζώνη ανάμιξης λόγω διακυμάνσεων, ένα μέρος κατευθύνεται προς τη θάλασσα λόγω της ροής του γλυκού νερού, πράγμα που δημιουργεί μικρές διαβαθμίσεις στην πυκνότητα και συνεπάγεται ένα αργό δίκτυο ροής προς την ξηρά του αλμυρού νερού. (Στεφανόπουλος Κυριάκος, Προσδιορισμός της Ζώνης Υφαλμύρωσης στην Περιοχή Χερσονήσου – Ηρακλείου Κρήτης με Χρήση Προσομοίωσης και Μετρήσεων Πεδίου, 2004)

2.1.2.3 Μέθοδοι ελέγχου υφαλμύρισης

Εξαιτίας της μεγάλης συγκέντρωσης αλάτων που υπάρχουν στο θαλασσινό νερό, ένα 2% αυτού αν αναμιχθεί με γλυκό νερό σε έναν υδροφορέα, τότε είναι δυνατόν τα νερά του να γίνουν υφάλμυρα. Εάν αρχίσει η διείσδυση του θαλασσινού νερού προς τον υδροφορέα τότε το φαινόμενο είναι δυνατόν να διαρκέσει αρκετά χρόνια και συνήθως το φαινόμενο είναι δύσκολα αναστρέψιμο. Για τον έλεγχο της υφαλμύρισης έχουν χρησιμοποιηθεί αρκετές μέθοδοι (Rail, 1989).

Ορισμένες από αυτές είναι:

- Έλεγχος της άντλησης. Εάν η άντληση από έναν παράκτιο υδροφορέα μειωθεί ή μετατοπιστεί η θέση του πηγαδιού, τότε η στάθμη του υδροφορέα είναι δυνατόν να αυξηθεί με αποτέλεσμα να μειωθεί η κίνηση του νερού προς τη θάλασσα και έτσι το φαινόμενο της υφαλμύρισης να περιοριστεί εν μέρει.
- Τεχνητός εμπλουτισμός. Η υφαλμύριση μπορεί να περιοριστεί με εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού από επιφανειακά ή επεξεργασμένα νερά ή μέσω πηγαδιών εμπλουτισμού. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνονται τα επίπεδα του υπόγειου υδροφορέα και ουσιαστικά λειτουργούν ως υδραυλικός φραγμός, εμποδίζοντας τη θαλάσσια εισχώρηση.
- Συντήρηση της επιμήκους ανύψωσης της πιεζομετρικής επιφάνειας του γλυκού νερού. Η συντήρηση της επιμήκους ανύψωσης του γλυκού νερού στα παράκτια

συστήματα είναι καθοριστικής σημασίας καθώς έτσι προλαμβάνεται η θαλάσσια διείσδυση. Η συντήρηση αυτή είναι δυνατόν να επιτευχθεί με την αποφυγή άντλησης του υδροφορέα κατά μήκος της ακτής.

- Κατασκευή υποθαλάσσιων φραγμών. Κατασκευάζοντας ένα αδιαπέρατο υποθαλάσσιο φράγμα κατά μήκος της ακτής είναι δυνατόν το φαινόμενο να προληφθεί ή ακόμη και να περιοριστεί. Ωστόσο με αυτή τη μέθοδο πρέπει να υπολογιστεί και τυχόν διαρροή που οφείλεται στη διαβρωτική επίδραση της θάλασσας.

- Κατασκευάζοντας πηγάδια με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να ελέγχουν την κίνηση του υπόγειου νερού σε συνδυασμό με επιφανειακές λεκάνες διήθησης.

- Άντληση θαλασσινού νερού από την περιοχή υφαλμύρισης έτσι ώστε να μειωθεί η εξάπλωση του φαινομένου.

- Η τεχνική της 'κρυσταλλοποίησης', είναι η δημιουργία κρυστάλλων μεγάλου μεγέθους μεταξύ των κόκκων των πορωδών όπου ουσιαστικά λειτουργούν ως "ασπίδα" για την υφαλμύριση αφού μειώνουν την υδροπερατότητα (μείωση του πορώδους) των υπόγειων υδροφόρων στρωμάτων (Rail, 1989).

Άξια αναφοράς είναι ακόμα και η θεώρηση διεπιφάνειας πεπερασμένου πάχους, λόγω υδροδυναμικής διασποράς (Pinder and Cooper, 1970). Γι' αυτήν ισχύει ο κανόνας αντιμετώπισης της διείσδυσης του αλμυρού νερού σε υπόγειους υδροφορείς σαν είδος ρύπανσης, περιβαλλοντικής προέλευσης. Σε αντίθεση με τη θεώρηση απότομης διεπιφάνειας, όπου επαρκώς αναλύθηκε παραπάνω και περιγράφεται από την προσέγγιση Ghyben - Herzberg, εδώ γίνεται η παραδοχή της ύπαρξης δύο αναμιγμένων υγρών (δύο συνιστώσες μιας φάσης) και το πρόβλημα αντιμετωπίζεται ως πρόβλημα υδροδυναμικής διασποράς με συγκέντρωση εξαρτώμενη από την πυκνότητα (για κορεσμένη ροή).

2.2 Θαλάσσια Διείσδυση

2.2.1 Εισαγωγή

Όπως αποτυπώθηκε σε προηγούμενη ενότητα, σε νησιωτικές ή παράκτιες περιοχές παρουσιάζεται η φυσική τάση εκφόρτισης των υπόγειων υδροφορέων στη θάλασσα. Εξαιτίας, όμως, του γεγονότος πως το θαλασσινό νερό έχει μεγαλύτερη πυκνότητα από αυτή του γλυκού νερού, παρατηρείται η εισβολή αυτού στους υπόγειους υδροφορείς, σχηματίζοντας μια αλατούχο σφήνα κάτω από το γλυκό νερό. Το φαινόμενο αυτό ορίζεται ως **θαλάσσια διείσδυση**.

2.2.1.1 Παράγοντες μεταβολής της θαλάσσιας διείσδυσης

Μέσα από την επιστημονική αλλά και εμπειρική παρατήρηση έχουν καταγραφεί μια σειρά παραγόντων που επηρεάζουν τη θαλάσσια διείσδυση. Βασικότερο στοιχείο όλων των παραγόντων που ακολουθούν είναι η επίπτωση που έχουν στο επίπεδο των νερών του υδροφορέα.

- Η υπεράντληση που συντελείται κυρίως για λόγους εξυπηρέτησης των αναγκών της γεωργικής και βιομηχανικής παραγωγής έχει ως αποτέλεσμα την πτώση της στάθμης του υδροφορέα. Ιδιαίτερα στον ελλαδικό χώρο όπου η άρδευση των καλλιεργειών παρουσιάζει υγκεκριμένη εποχικότητα, πολλές φορές παρατηρούνται φαινόμενα έλλειψης γλυκού νερού σε γεωργικές περιοχές. Αυτό συνιστά και θρυαλλίδα για τη δημιουργία ακόμα περισσότερων προβλημάτων όπως η αύξηση της αλατότητας των νερών του υδροφορέα ή ακόμα και μια επιπλέον οικονομική δαπάνη για τη διάνοιξη ακόμα βαθύτερων γεωτρήσεων.

- Διάφοροι κλιματικοί παράγοντες όπως τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, η θερμοκρασία και η επιφανειακή απορροή παίζουν σημαντικό ρόλο στη θαλάσσια διείσδυση. Έχει παρατηρηθεί πως οι υψηλές θερμοκρασίες σε συνδυασμό με μια

καταγραφή χαμηλών ετήσιων κατακρημνισμάτων ελαττώνει την ικανότητα ανανέωσης του νερού του υδροφορέα λόγω εξάτμισης του επιφανειακού νερού. (Priyantha, 2007)

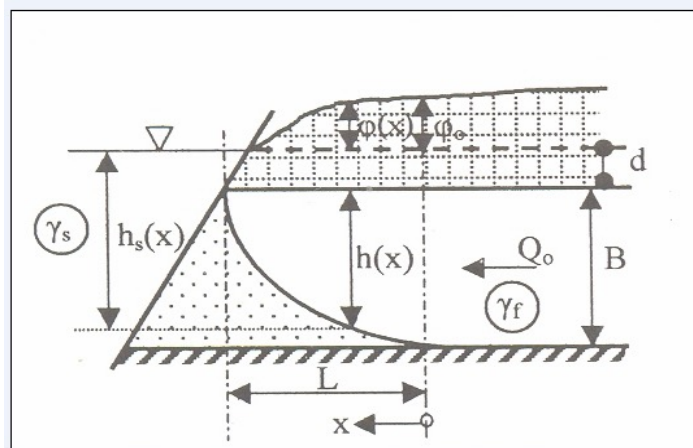
2.2.2 Προσδιορισμός του μήκους διείδυσης του αλμυρού νερού

2.2.2.1 Διάφορες περιπτώσεις υδροφορέων

Υπό-πίεση Υδροφορέας

Για τον υπό-πίεση υδροφορέα υδραυλικής αγωγιμότητας K , πάχους B , βάθους κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας d και λαμβάνοντας υπόψη το νόμο Darcy και την προσέγγιση Ghyben – Herzberg προκύπτουν οι σχέσεις μεταξύ του μήκους L της υφάλμυρης σφήνας, της παροχής γλυκού νερού προς τη θάλασσα Q_0 και του πιεζομετρικού φορτίου στην άκρη της διεπιφάνειας ϕ_0 . Επίπεδο αναφοράς θεωρείται η επιφάνεια της θάλασσας.

$$Q_0 L = \frac{K \phi_0}{2} (\delta \phi_0 - 2d) + \frac{K d^2}{2\delta} = \frac{K}{2\delta} B^2$$



Σχήμα 4: Σχηματική αναπαράσταση περιορισμένου υδροφορέα (Κουμαντάκης, Κεφάλαια Υδρογεωλογίας)

Ελεύθερος Υδροφορέας

Αντίστοιχα στους ελεύθερους υδροφορείς και λαμβάνοντας επιπλέον υπόψη την κατακόρυφη διήθηση $N = \text{σταθ.}$ ή $N = N(x)$ και με βάση το νόμο Darcy και την προσέγγιση Ghyben – Herzberg προκύπτει μετά από ολοκλήρωση η αντίστοιχη σχέση της διεπιφάνειας. Επίπεδο αναφοράς των h_f και h θεωρείται η επιφάνεια της θάλασσας.

$$\phi_0^2 = \frac{2Q_0 L + NL^2}{K(1 + \delta)}$$

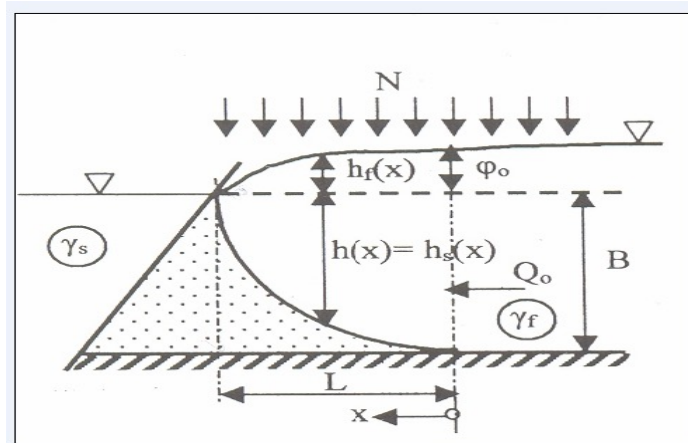
$$\text{ή } Q_0 = \frac{KB^2(1 + \delta)}{2L} \frac{1 + \delta}{\delta^2} - \frac{NL}{2}, \phi_0 = \frac{B}{\delta}$$

όπου Q_0 : Η παροχή νερού στην άκρη της διεπιφάνειας,

K : η υδραυλική αγωγιμότητα,

B : απόσταση της βάσης του υδροφορέα από την επιφάνεια της θάλασσας και

φ_0 : το πιεζομετρικό φορτίο στην άκρη του υδροφορέα



Σχήμα 5: Σχηματική αναπαράσταση ελεύθερου υδροφορέα (Κουμαντάκης, Κεφάλαια Υδρογεωλογίας)

2.2.3 Έλεγχος και προστασία κατά της διείσδυσης αλμυρού νερού

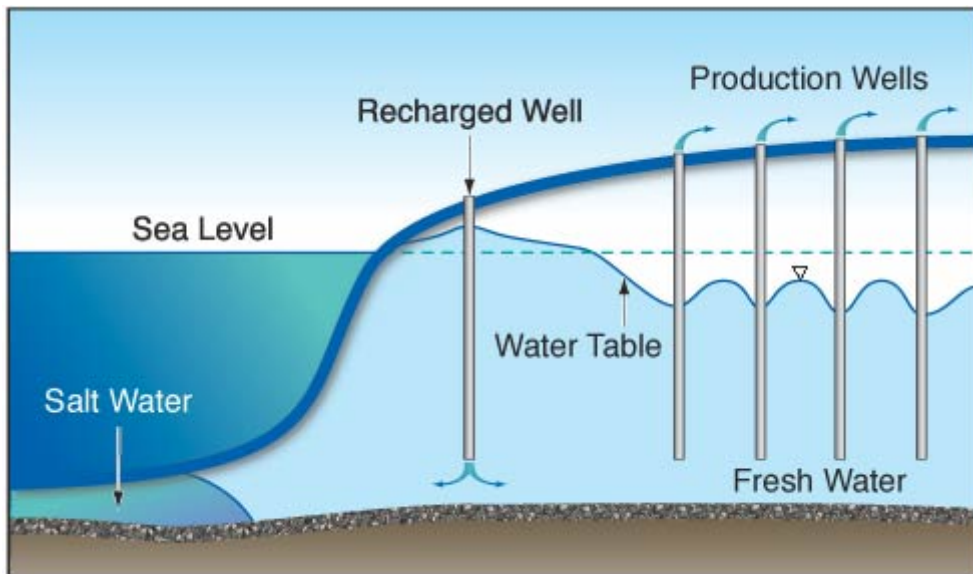
Η εκμετάλλευση των παράκτιων υπόγειων υδροφορέων απαιτεί συνεχή παρακολούθηση των διακυμάνσεων της πιεζομετρικής επιφάνειας, ώστε να γίνεται δυνατός ο προσδιορισμός της θέσης στο χώρο της διαχωριστικής επιφάνειας μεταξύ γλυκών και αλμυρών νερών. Με τον τρόπο αυτό θα μπορεί να αποφεύγεται η επικίνδυνη διείσδυση της θάλασσας στην ενδοχώρα, μέσω εφαρμογής διαφόρων μεθόδων προστασίας.

Οι κυριότερες μέθοδοι προστασίας κατά της διείσδυσης των αλμυρών νερών στις παράκτιες ζώνες είναι οι εξής:

- Ελάττωση των αντλήσεων
- Τεχνητός εμπλουτισμός
- Τεχνητό υπόγειο διάφραγμα στεγανοποίησης
- Υποβιβασμός της στάθμης σε μια ζώνη παραθαλάσσια παράλληλη με την ακτή.

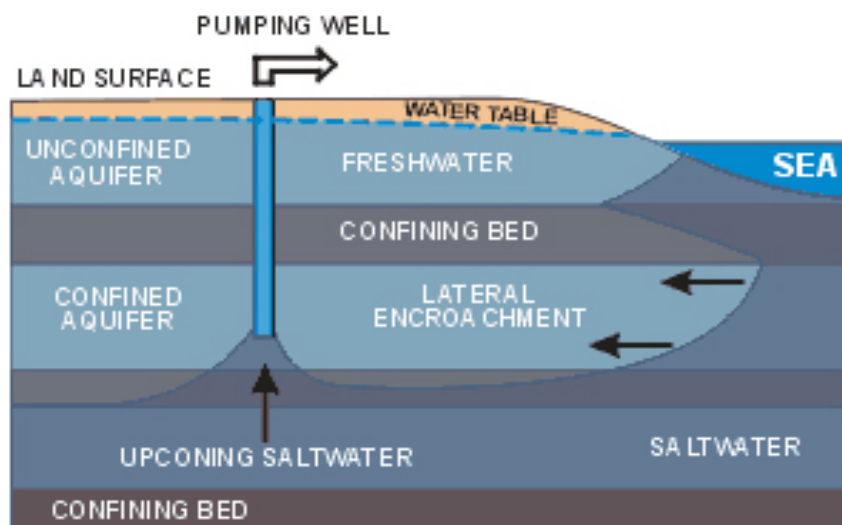
Η ελάττωση των αντλήσεων και ο τεχνητός εμπλουτισμός έχουν σαν αποτέλεσμα στην ανύψωση της πιεζομετρικής επιφάνειας, επομένως την αύξηση του υδραυλικού φορτίου και την απώθηση του μετώπου διεισδύσεως.

Μια μορφή τεχνητού εμπλουτισμού είναι η κατασκευή μιας σειράς γεωτρήσεων ή πηγαδιών σε γραμμή παράλληλη προς την ακτή και κοντά σε αυτήν και η διοχέτευση νερού δια μέσου αυτών στον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα. Ο πραγματοποιούμενος με τον τρόπο αυτό εμπλουτισμός συνεπάγεται την τοπική ανύψωση κοντά στην παραλιακή ζώνη της πιεζομετρικής επιφάνειας και την απώθηση του μετώπου διεισδύσεως του θαλασσινού νερού.



Σχήμα 6: Πηγάδι τεχνητού εμπλουτισμού προς απώθηση του κώνου του αλμυρού νερού (Πηγή: <http://www.solinst.com/resources/papers/101c4salt.php>)

Ένας άλλος τρόπος προστασίας είναι η σταθεροποίηση της θαλάσσιας σφήνας με αντλήσεις αλμυρού νερού από μία σειρά γεωτρήσεων παράλληλη προς την ακτή και κοντά σε αυτήν.



Σχήμα 7: Υποβιβασμός της πιεζομετρικής επιφάνειας διαντλήσεων αλμυρού νερού, με αποτέλεσμα τη σταθεροποίηση του κώνου διεισδύσεως (Πηγή: <http://www.hosessa.com/products/flexible-riser/boreline/applications/salt-water-barriers/>)

Οι αντλήσεις αυτές έχουν ως αποτέλεσμα τον υποβιβασμό της στάθμης κατά μήκος της παράκτιας ζώνης της αλλά παρεμποδίζουν την περεταίρω διείσδυση του θαλασσινού νερού στο εσωτερικό.

Μειονέκτημα της μεθόδου αυτής αποτελεί η ελάττωση του όγκου του γλυκού νερού και η προώθηση του αλμυρού νερού μέχρι την περιοχή των γεωτρήσεων αντλήσεως, αλλά έχει άμεσα αποτελέσματα γιατί σταθεροποιεί πολύ γρήγορα την έκταση της διείσδυσης (Κουμαντάκης, 1997).

2.3 Εμπλουτισμός (φυσικός) από καρστικές μάζες - Ποιότητα Νερών

2.3.1 Μηχανισμός της καρστικής διεργασίας

Η δημιουργία καρστικών φαινομένων συνδέεται πάντα με την παρουσία ορισμένων πετρωμάτων, τα οποία πρέπει να είναι ευδιάλυτα και να αφήνουν ελάχιστο υπόλειμμα, ώστε τα διάκενα να διευρύνονται με τη διεργασία της διάλυσης αλλά και να παραμένουν ανοικτά, για να είναι δυνατή η κίνηση του νερού μέσω αυτών στο υπέδαφος.

Τα πετρώματα αυτά λέγονται "καρσικά" και είναι:

- οι εβαπορίτες: γύψος, ανυδρίτης, ορυκτό αλάτι
- τα ανθρακικά: ασβεστόλιθοι, δολομίτες
- οι ηφαιστίτες (ηφαιστειακό καρστ)
- οι χαλαζίτες (μόνο κάτω από συνθήκες εξαιρετικά τροπικής υγρασίας)
- οι υπερβασίτες (μόνο κάτω από συνθήκες εξαιρετικά τροπικής υγρασίας)

Τα πυριτικά γενικά πετρώματα, κάτω από τροπικές κλιματικές συνθήκες, αποσυντίθενται και δημιουργούν μορφές παρόμοιες προς τις καρστικές, όμως το αδιάλυτο υπόλειμμα που δημιουργείται (άργιλος, χαλαζιακή άμμος) είναι τόσο πολύ, ώστε να μη δημιουργούνται καρστικοί αγωγοί. Οι καρστικές μορφές στους εβαπορίτες αναφέρονται συχνά ως "ψευδοκαρστικές", για να ξεχωρίζονται από αυτές των ανθρακικών πετρωμάτων.

Σε περιοχές αλμυρών λιμνών, σε ζεστά, ξηρά κλίματα, σε τροπικές και υποτροπικές συνθήκες, το θαλασσινό νερό εξατμίζεται και αποτίθενται διαδοχικά, ανάλογα με τη διαλυτότητα και τη σύνθεση των συστατικών του, τα εξής πετρώματα:

- ασβεστόλιθοι, γύψος, ανυδρίτης, κοινό αλάτι (NaCl), καλιούχο αλάτι (KCl).

Τα καρσικά πετρώματα, που έχουν μεγάλη υδρογεωλογική σημασία για το Μεσογειακό χώρο γενικότερα και τον ελλαδικό χώρο ειδικότερα, είναι οι ασβεστόλιθοι.



Εικόνα 1: Τυπικός Καρστικός σχηματισμός (Πηγή: <http://slideplayer.com/slide/6888662/>)

2.3.2 Καρστικοί υδροφορείς

(Κύρια βιβλιογραφική πηγή: Βουδούρης, 2013)

Το χαρακτηριστικό των καρστικών υδροφόρων είναι η μεγάλη εποχική διακύμανση της υδροστατικής επιφάνειάς τους, η οποία συχνά ξεπερνά τα 50 μέτρα, έχουν δε αναφερθεί και διακυμάνσεις εύρους 300 μέτρα. Τούτο οφείλεται στη μεγάλη τους διαβιβαστικότητα και μικρή αποθηκευτικότητα, η οποία οδηγεί σε μικρή ικανότητα ρύθμισης της υπόγειας ροής. Οι καρστικοί υδροφόροι δημιουργούνται πολύ γρήγορα, αλλά εξίσου εύκολα και γρήγορα στραγγίζονται. Κατά την υγρή περίοδο, οι καρστικοί υδροφόροι παρουσιάζουν μεγάλη κατακόρυφη μεταβολή της στάθμης τους. Κατά την ξηρά περίοδο, αντίθετα, παρουσιάζουν πολύ μικρές μεταβολές της στάθμης τους με μια συνεχή καθοδική πτώση σχετικά σταθερού ρυθμού (περίοδος εξάντλησης του υδροφόρου).

Οι πιο ψηλές στάθμες των καρστικών υδροφόρων, σε μερικές θέσεις, φτάνουν ή και ξεπερνούν την επιφάνεια του εδάφους ενώ σε άλλες θέσεις της ίδιας περιοχής μπορεί να βρίσκονται σε βάθη μεγαλύτερα από 200 μέτρα (τοπικά επίπεδα βάσης). Οι διακυμάνσεις της ζώνης των δυναμικών αποθεμάτων του καρστικού νερού, δηλαδή των αποθεμάτων νερού που περιέχονται ανάμεσα στην ανώτερη και κατώτερη στάθμη του ίδιου υδρολογικού χρόνου, μπορεί να κυμαίνονται από μερικά μέχρι και πάνω από 300 μέτρα. Συνήθως, οι διακυμάνσεις αυτές είναι της τάξης των 20 - 80 μέτρων.

Ο φυσικός εμπλουτισμός των καρστικών υδροφόρων είναι πιο εύκολος και πιο σημαντικός από τους παραδοσιακούς υδροφόρους. Η κατείσδυση είναι άμεση από το πρωτογενές και, κυρίως από το δευτερογενές πορώδες στην επιφάνεια. Άμεση κατείσδυση λαμβάνει χώρα από τις καταβόθρες, τις εσταβέλλες και από τη διάχυτη κίνηση το επιφανειακού νερού, των προσωρινών φυσικών τελμάτων και των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων προς το υπέδαφος.

Κατά την ξηρά περίοδο και όχι μόνο κατ' αυτήν, στο άδειο από νερό σύστημα καρστικών αγωγών κυκλοφορεί αέρας συχνά μέχρι βάθη που ξεπερνούν τα 200 μέτρα (500 μέτρα κατά την κατασκευή της σήραγγας του υδροηλεκτρικού έργου του Split). Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως "υπόγεια ρεύματα αέρα". Η κυκλοφορία του αέρα είναι αργή, όμως κατά τους θερινούς μήνες γίνεται αντιληπτή στις εισόδους των σπηλαίων ή φαρδιών αγωγών. Καμιά φορά, τα ρεύματα αυτά γίνονται πολύ έντονα. Κατά την υγρή περίοδο, η άνοδος της στάθμης του καρστικού υπόγειου νερού αναγκάζει τον αέρα να εξέρχεται από τους καρστικούς αγωγούς.

Επειδή η σχετική υγρασία του αέρα στους καρστικούς αγωγούς είναι σχεδόν πάντα 80%, τα ρεύματα αέρα δημιουργούν έλλειμμα υγρασίας στη ζώνη αερισμού. Κατά την ξηρά περίοδο, το μεγαλύτερο ποσοστό των λίγων ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων στο κάρστ καταναλίσκονται από τη λίγη έστω χλωρίδα που αναπτύσσεται στους πληρωμένους με ερυθρογή καρστικούς αγωγούς, στους οποίους το ριζικό σύστημα φτάνει συχνά μέχρι βάθος 15 μέτρα. Ο εμπλουτισμός των καρστικών υδροφόρων την περίοδο αυτή είναι ασήμαντος. Αντίθετα, κατά την υγρή περίοδο (Νοέμβρης - Μάρτης) ποσοστό 70 - 90% των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων εμπλουτίζει τους υδροφόρους.

Κατά τον Milanovic τα κύρια χαρακτηριστικά των καρστικών συστημάτων είναι:

- i. Η άμεση αλληλεξάρτηση, πλευρική και κατακόρυφη, των συστημάτων στραγγίσισης, κάτι που οδηγεί σε συνεχή διακλάδωση των αγωγών ροής του νερού.
- ii. Η κίνηση του νερού στους καρστικούς αγωγούς μπορεί να είναι:

-τύπου κατείσδυσης (κυρίως στην ανώτερη ζώνη του υδροφόρου).

-υπό πίεση

-ελεύθερης κυκλοφορίας

-σύνθετης ροής (μερικά υπό πίεση και μερικά ελεύθερης κυκλοφορίας)

- iii. Τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, ελάχιστα συγκρατούνται στην επιφάνεια κι έτσι, οι καρστικές περιοχές χαρακτηρίζονται από μικρά μήκη, ή από απουσία, επιφανειακών υδρορευμάτων.
- iv. Η πλειονότητα των επιφανειακών υδρορευμάτων είναι διαλείπουσας μορφής.
- v. Οι παροχές των πηγών και των υδρορευμάτων παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις.
- vi. Στις κλειστές πόλγες δημιουργούνται προσωρινά τέλματα, τα οποία στραγγίζονται από ζώνες καταβοθρών.
- vii. Οι στάθμες των καρστικών υδροφόρων παρουσιάζουν εποχικές διακυμάνσεις.

2.3.3 Χημική σύσταση καρστικών νερών

Γενικά διακρίνονται δυο υδροχημικές κατηγορίες καρστικών νερών. Η πρώτη περιλαμβάνει νερά που τα υδροχημικά τους χαρακτηριστικά εξαρτώνται από τη λιθολογική σύσταση του καρστικού συστήματος. Η δεύτερη περιλαμβάνει νερά του παράκτιου καρστ, που βρίσκονται κάτω από την επίδραση της θάλασσας.

Τα νερά της πρώτης κατηγορίας παρουσιάζουν χαμηλή μεταλλικότητα, που κυμαίνεται από 250 -500 mg/l. Συνήθως είναι οξυανθρακικού τύπου με κυμαινόμενες, μικρές κατά κανόνα, ποσότητες θειικών και χλωριόντων. Οι τιμές του pH κυμαίνονται από 7,3 μέχρι και 7,9, η αλκαλικότητά τους είναι μικρή, το ελεύθερο CO₂ απαντά σε ποσότητες που συνήθως κυμαίνονται από 5 - 30 mg/l και που σπάνια ξεπερνούν τα 100 mg/l. Η περιεκτικότητα σε HCO₃ είναι της τάξης των 200 mg/l. Η περιεκτικότητα σε CO₂ και H₂CO₃ ελαττώνεται όταν αυξάνεται η παροχή (πηγή) ή η ταχύτητα ροής. Η περιεκτικότητα σε ιόντα Cl, CaO και MgO είναι αντίστοιχα της τάξης των 15 mg/l, 50 - 70 mg/l και 5 - 20 mg/l.

Το στερεό υπόλειμμα τους είναι περίπου 170 mg/l και η σκληρότητά τους κυμαίνεται από 17 - 29 γαλλικούς βαθμούς, δηλαδή πρόκειται για σκληρά μέχρι πολύ σκληρά νερά κατά την ταξινόμηση του Hem (1970). Η μεταλλικότητα των πηγών συνεχούς λειτουργίας είναι μεγαλύτερη από εκείνη των διαλείπουσων πηγών, και η μεταλλικότητα των νερών στα δολομιτικά καρστικά συστήματα (TDS μέχρι 1000 mg/l) είναι ψηλότερη από εκείνη των ασβεστολιθικών νερών (TDS μέχρι 500 mg/l).

Η δεύτερη κατηγορία, περιλαμβάνει τα νερά του παράκτιου καρστικού συστήματος. Η μεταλλικότητα τους εξαρτάται από το βαθμό ανάμιξής τους με το θαλασσινό νερό, ξαι μπορεί να φτάσει σε 20.000 mg/l. Η σκληρότητά τους είναι γενικά μόνιμη και φτάνει μέχρι τους 80 γαλλικούς βαθμούς. Μεγάλη είναι η περιεκτικότητα σε ιόντα Cl⁻, SO₄²⁻, Na και Mg.

Η διαβρωτικότητα των καρστικών νερών εκφράζεται σαν δράση απόπλυσης απόπλυσης (leaching action), όταν η οξυανθρακική αλκαλικότητα είναι μικρότερη του 2,0 (προκειμένου για τσιμέντο) ή 0,7 (ειδικοί τύποι τσιμέντων), ή σαν διαβρωτικότητα ανθρακικού οξέως, όταν η περιεκτικότητα σε ελεύθερο ανθρακικό οξύ είναι μεγαλύτερη από την τιμή που προκύπτει από τη σχέση: $a(\text{Ca}^{++}) + b + \kappa$, όπου a και b συντελεστές που εξαρτώνται από το pH, την αλκαλικότητα και την ιοντική συγκέντρωση Cl⁻ και SO₄²⁻ και κ ο συντελεστής που εξαρτάται από τις συνθήκες εισαγωγής του τσιμέντου στο καρστ.

Η θειική διάβρωση λαμβάνει χώρα όταν η περιεκτικότητα σε SO₄⁻ ξεπερνά τα 250 mg/l. Η διάβρωση Mg λαβαίνει χώρα όταν η περιεκτικότητα σε Mg⁺⁺ ξεπεράσει τα 1000mg/l. (Γ.Α Καλλέργη, 2001)

2.3.4 Στοιχεία του ελληνικού καρστ - γενικά χαρακτηριστικά των καρστ

Το καρστ θεωρείται υπόγειος υδροφορέας γιατί τον περισσότερο χρόνο περιέχει νερό, το οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί για την κάλυψη των τοπικών υδατικών αναγκών. Ο Milanovic (2000) θεωρεί τους καρστικούς υδροφορείς ως ετερογενείς υπόγειες αποθήκες νερού, όπου το νερό συγκεντρώνεται σε ένα δίκτυο επικοινωνούντων ρωγμών, αγωγών και σπηλαίων.

Τα ανθρακικά πετρώματα καλύπτουν το 35% της ελληνικής επικράτειας και τα νερά που φιλοξενούνται στους καρστικούς υδροφορείς που αναπτύσσονται σε αυτά αποτελούν σημαντικό υπόγειο υδατικό πόρο.

Το ελληνικό (και το δηναρικό) καρστ ανήκει στο γεωσυγκλινές καρστ, που αναπτύσσεται στα πτυχωμένα και έντονα τεκτονισμένα και διαρρηγμένα ανθρακικά πετρώματα, σε αντίθεση με το καρστ της Ρωσίας, ΗΠΑ, Βόρειας Αφρικής, που είναι καρστ πλατφόρμας (σχεδόν οριζόντια στρώματα, μη αμιγείς ασβεστόλιθοι, περιορισμένη καρστικοποίηση).

Τα έξι βασικά χαρακτηριστικά των καρστικών συστημάτων τα οποία παρουσιάζουν εξαιρετικό ενδιαφέρον σχετικά με τον φυσικό εμπλουτισμό των υδροφόρων είναι:

1. Τα καρστικά συστήματα εκφορτίζονται μέσω πηγών. Στο νεαρό ενδοκάρστ εμφανίζονται πολλές και μικρές πηγές εκφόρτισης, σε αντίθεση με το αναπτυγμένο (ώριμο) καρστ που οι πηγές είναι λίγες και μεγάλες. Η κυκλοφορία νερού στο καρστικό σύστημα ακολουθεί διάχυτη ή εκλεκτική πορεία που εξαρτάται από τις τοπικές γεωλογικές, γεωλογικές, μορφολογικές κ.ά. συνθήκες μιας περιοχής. Στο νεαρό κάρστ η ροή είναι διάχυτη, ενώ στο ώριμο καρστ η ροή είναι εκλεκτική.

2. Χαρακτηρίζονται από μικρό συντελεστή αποθηκευτικότητας (S) και μεταβιβαστικότητας (T). Οι μέσες τιμές της μεταβιβαστικότητας με βάση τα αποτελέσματα της επεξεργασίας αντλητικών δεδομένων από καρστικούς υδροφορείς της Ελλάδας κυμαίνονται μεταξύ 30 m²/h και 320 m²/h και οι τιμές του συντελεστή αποθηκευτικότητας μεταξύ 2% και 9%. Η αποθηκευτικότητα είναι μεγαλύτερη στο επικάρστ και μειώνεται με το βάθος, λόγω και της μείωσης του ενεργού πορώδους. Οι δοκιμαστικές αντλήσεις για τον προσδιορισμό των υδραυλικών παραμέτρων πρέπει να έχουν μεγάλη διάρκεια.

3. Ο φυσικός εμπλουτισμός στην ουσία είναι ένα δίκτυο επικοινωνούντων αγωγών, ρωγμών και σπηλαίων με ασυνεχή υδροστατική επιφάνεια, που χαρακτηρίζεται από μεγάλη εποχική διακύμανση, λόγω μικρού συντελεστή αποθηκευτικότητας (S) και μεγάλου συντελεστή μεταβιβαστικότητας (T). Οι παροχές των γεωτρήσεων που έχουν ανορυχθεί και εκμεταλλεύονται καρστικούς υδροφορείς έχουν μεγάλη διακύμανση.

4. Ο φυσικός εμπλουτισμός των καρστικών υδροφορέων γίνεται σχετικά πιο εύκολα από τους πορώδεις υδροφορείς, κυρίως από την άμεση κατείσδυση του νερού της βροχόπτωσης είτε μέσω δολινών ή καταβοθρών (σημειακός εμπλουτισμός), είτε μέσω σημείων θραύσης του επικαρστ όπως ρωγμές, διακλάσεις κ.λπ. (διάχυτη ροή). Σημειώνεται δε ότι ο συντελεστής κατείσδυσης κυμαίνεται μεταξύ 30 - 65% του ετήσιου ύψους βροχόπτωσης (μέση τιμή 45 - 55%), εξαρτώμενος από τον βαθμό καρστοποίησης και την παρουσία ή όχι εδαφικού καλύμματος. Έντονη καρστικοποίηση συνεπάγεται μεγάλο συντελεστή κατείσδυσης και η παρουσία μεγάλου πάχους εδαφικού καλύμματος μειώνει την κατείσδυση.

5. Οι καρστικοί υδροφορείς χαρακτηρίζονται από τη γρήγορη αντίδραση στα υδρολογικά φαινόμενα, όπως οι ισχυρές βροχοπτώσεις. Η στάθμη του καρστικού νερού μπορεί να ανυψωθεί μέσα σε λίγες ώρες πάνω από 100 μέτρα. Οι παροχές των συνδεδεμένων υδραυλικών πηγών μπορεί να αυξηθούν σημαντικά σε μικρό χρόνο. Επίσης, η ποιότητα του καρστικού νερού μπορεί να μεταβληθεί σημαντικά σε παραμέτρους όπως αιωρούμενα σωματίδια, οργανικό άνθρακα κ/λπ.

6. Τα καρστικά συστήματα θεωρούνται πολύ τρωτά στην εξωτερική ρύπανση. Αυτό επιβάλλει ιδιαίτερα μέτρα προστασίας, ειδικά όταν αξιοποιούνται για την κάλυψη υδρευτικών αναγκών.

2.4 Ισοτοπική Υδρολογία

(Κύρια βιβλιογραφική πηγή: Καλλέργης, 2001)

Ο αριθμός των νετρονίων στον πυρήνα ενός ατόμου είτε θα αντιστοιχεί στον αριθμό των πρωτονίων είτε θα είναι ελαφρώς μεγαλύτερος. Τα περισσότερα στοιχεία έχουν πληθώρα τύπων ατόμων που διαφέρουν στον αριθμό των νετρονίων που συνοδεύουν τα πρωτόνια, ο αριθμός επιτρεπτών τύπων ατόμων για κάθε στοιχείο είναι πεπερασμένος. Για παράδειγμα τα άτομα υδρογόνου (ένα πρωτόνιο) απαντώνται με κανένα, ένα ή και δυο νετρόνια στον πυρήνα τους. Οι παραλλαγές αυτές στον αριθμό των νετρονίων ενός στοιχείου αποκαλούνται ισότοπα (ελλ. *ίσος και τόπος*, κάνοντας αναφορά δηλαδή στη θέση που καταλαμβάνει στον περιοδικό πίνακα κάποιο στοιχείο) (Mazor, 2003).

2.4.1 Αρχές Ισοτοπικής Υδρολογίας

Τα άτομα των χημικών στοιχείων μπορούν να απεικονιστούν με τον πυρήνα τους, γύρω από τον οποίο περιφέρονται σε κυκλικές τροχιές τα ηλεκτρόνια. Οι χημικές ιδιότητες εξαρτώνται από τον αριθμό των ηλεκτρονίων. Τα ισότοπα ενός στοιχείου διαφέρουν κατά το ατομικό βάρος αλλά έχουν τον ίδιο αριθμό ηλεκτρονίων. Ένας μεγάλος αριθμός στοιχείων είναι μίγμα των διαφόρων ισοτοπικών ειδών. Κατά κανόνα ένα είδος αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος της μάζας του στοιχείου ενώ τα υπόλοιπα μόνο μερικές μονάδες ή κλάσματα επί τοις εκατό.

Ο μερικός διαχωρισμός των ισοτοπικών ειδών συνοδεύεται από διάφορες φυσικές διεργασίες, έτσι που ένα μέρος του περιβάλλοντος εμπλουτίζεται σε ένα συγκεκριμένο ισότοπο, καθώς ένα άλλο γίνεται φτωχότερο ως προς αυτό. Η χρήση των σταθερών (μη ραδιενεργών) ισότοπων στην υδρολογία βασίζεται ακριβώς σ' αυτές τις φυσικές διεργασίες. Οι πυρήνες ή τα ραδιενεργά ισότοπα τείνουν να διασπαστούν στιγμιαία, δημιουργώντας ένα ή περισσότερα θυγατρικά στοιχεία ή θυγατρικά ισότοπα. Η διεργασία της πυρηνικής διάσπασης (ραδιενεργή διάσπαση) συνοδεύεται από τη εκπομπή ασυνεχών ποσοστών ενέργειας, η οποία μετρείται με απαριθμητές. Υπάρχουν τρία είδη ακτινοβολίας:

- ακτινοβολία α: είναι πυρήνες ατόμων He που έχουν τέσσερα θετικά φορτία,
- ακτινοβολία β: είναι ηλεκτρόνια με ένα αρνητικό φορτίο,
- ακτινοβολία γ: είναι ηλεκτρομαγνητικά κύματα πολύ μικρού μήκους κύματος (Καλλέργης, 2001).

Η ενέργεια που ακτινοβολείται μετρείται συνήθως με εκατομμύρια volts ηλεκτρονίων (Me V). Κάθε ραδιενεργό στοιχείο εκπέμπει μια ή περισσότερες ακτινοβολίες. Η ένταση της ακτινοβολίας, δηλαδή ο αριθμός των quanta ακτινοβολίας στη μονάδα του χρόνου, είναι γνωστή σαν ενέργεια (activity). Σύμφωνα με το νόμο της ραδιενεργούς διάσπασης η ενέργεια είναι ανάλογη με τον αριθμό των ατόμων που διασπώνται. Ο συντελεστής αναλογίας είναι χαρακτηριστικός για κάθε ραδιενεργό ισότοπο. Η μαθηματική έκφραση του νόμου της ραδιενεργούς διάσπασης δίνεται από τις εξισώσεις (Καλλέργης, 2001):

$$C = C_0 \exp(-\lambda t) \text{ και } t = \left(1/\lambda\right) \ln C_0/C$$

Όπου C_0 και C η ενέργεια στην αρχή και στο τέλος αντίστοιχα ενός χρονικού διαστήματος t και λ η σταθερά διάσπασης (T^{-1}).

Ο χρόνος υποδιπλασιασμού $t_{1/2}$ είναι το χρονικό διάστημα που απαιτείται για να μειωθεί η συγκέντρωση ραδιενεργού ισότοπου στο μισό της αρχικής του συγκέντρωσης, με ραδιενεργή διάσπασή του (Καλλέργης, 2001):

$$t_{1/2} = \left(1/\lambda\right) \ln 2 \approx \left(1/\lambda\right) 0,693 \text{ οπότε: } \lambda = \ln 2 / t_{1/2} = 0,693 / t_{1/2}$$

Μονάδες μέτρησης της ραδιενέργειας είναι το B_q (Becquerel), που αντιστοιχεί σε μία διάσπαση ανά δευτερόλεπτο. Παλιότερα χρησιμοποιούνταν το C_i (Curie) που αντιστοιχεί σε 3,7 · 10¹⁰ διασπάσεις ανά δευτερόλεπτο, δηλαδή σε 3,7 · 10¹⁰ Bq ή σε 2,2 · 10¹² διασπάσεις ανά min (dpm). Δηλαδή 1 C_i ≈ ενέργεια 1 gr Ra.

Η ραδιενεργή ηλικία ενός δείγματος νερού *t* υπολογίζεται με την εξίσωση:

$$t = \left(1/\lambda\right) \ln C_0/C$$

Πρέπει να είναι γνωστή η ραδιενέργεια του δείγματος *C* και η αρχική ραδιενέργεια του φυσικού εμπλουτισμού του υδροφόρου *C₀*. Η μετρούμενη όμως ενέργεια του δείγματος επηρεάζεται, όχι μόνο από τη ραδιενεργό διάσπαση, αλλά και από τη διαδικασία ανάμιξης η οποία λαμβάνει χώρα στον υδροφόρο και κατά τη στιγμή της δειγματοληψίας. Έτσι, είναι απαραίτητη η σύνδεση ραδιενεργής ηλικίας και του χρόνου παραμονής (residence time) του νερού στον υδροφόρο, που είναι ένα χαρακτηριστικό του συστήματος.

Ο χρόνος παραμονής *t_r* δίνεται από τη σχέση: $t_r = \frac{V_g}{\bar{R}_g} = V_a \theta / \bar{R}_g$, όπου *V_a* και *V_g* οι όγκοι του κορεσμένου υδροφόρου και του νερού, αντίστοιχα, ανάντη του σημείου δειγματοληψίας, σε m³, \bar{R}_g η μέση ετήσια τροφοδοσία του υδροφόρου σε m³/yr, ανάντη του σημείου δειγματοληψίας και *θ* το ολικό πορώδες.

Το πρότυπο ροής τύπου εμβόλου (piston flow model), απαιτεί παντελή απουσία ανάμιξης νερών διάφορης προέλευσης. Κάθε ποσότητα νερού που εισέρχεται στον υδροφόρο προωθείται προς τα κατάντη με διαδοχικές ώσεις σαν να πρόκειται για ένα έμβολο. Κάτω από αυτές τις συνθήκες *t_r* = *t_a*, όπου *t_a* η ραδιενεργή ηλικία του δείγματος.

Στους ελεύθερους υδροφόρους η ροή προσεγγίζει μια κατακόρυφη ροή τύπου εμβόλου, προκαλώντας τη διάκριση της ηλικίας του νερού κατά στρώματα (age stratification). Στους αρτεσιανούς υδροφόρους, η ροή πλησιάζει την οριζόντια ροή τύπου εμβόλου, σε αποστάσεις όμως που βρίσκονται μακριά από την περιοχή τροφοδοσίας του υδροφόρου.

Το πρότυπο ροής πλήρους ανάμιξης (Complete mixing model) δέχεται ότι κάθε εισερχόμενη ποσότητα νερού, αναμιγνύεται πλήρως και στιγμιαία με όλο το νερό ανάντη του σημείου δειγματοληψίας, Η μαθηματική έκφραση αυτού του προτύπου δίνει (Mandel – Shiftan, 1981):

$$t_r = \left(1/\lambda\right) [\exp(\lambda t_a) - 1]$$

Ο χρόνος υποδιπλασιασμού *t_{1/2}* ενδεικτικά είναι: για *t_a* = *t_{1/2}* *t_r* ≈ 1,4 *t_{1/2}*, για *t_a* = 0,1 *t_{1/2}* *t_r* ≈ 0,1 *t_{1/2}*, για *t_a* > *t_{1/2}* *t_r* > > *t_{1/2}*.

Βέβαια, πλήρης και στιγμιαία ανάμιξη νερών δεν μπορούν να συμβούν στον υδροφόρο. Ια το λόγο αυτό, τα αντλούμενα, από ελεύθερο υδροφόρο δείγματα, με πλήρη γεώτρηση, προσεγγίζουν το πρότυπο της πλήρους ανάμιξης. (Καλλέργης, 2001)

2.4.2 Φυσικά ισότοπα

Η υδρολογία των φυσικών ισότοπων του περιβάλλοντος χρησιμοποιεί τη φυσική "ιχνηθέτηση" του νερού, που οφείλεται στις μεταβολές της ισοτοπικής σύνθεσής του. Οι μεταβολές αυτές λαμβάνουν χώρα στα διάφορα στάδια του υδρολογικού κύκλου. Αντίθετα, κατά τη χρησιμοποίηση των τεχνητών ισότοπων, εισάγεται σε κάποιο στάδιο του υδρολογικού κύκλου, π.χ. στην κίνηση του υπόγειου νερού σε ένα πεδίο ροής, ένα ισότοπο, οπότε η ισοτοπική σύσταση του νερού μεταβάλλεται τεχνητά. Στη συνέχεια παρακολουθείται πια η τεχνητή αυτή μεταβολή της ισοτοπικής σύστασης του νερού.

Τα σταθερά φυσικά ισότοπα, που κυρίως χρησιμοποιούνται για υδρολογικούς σκοπούς είναι:

- το Υδρογόνο -2 (δευτέριο)
- ο Άνθρακας -13
- το Οξυγόνο -18

Τα ραδιενεργά φυσικά ισότοπα, που κυρίως χρησιμοποιούνται για υδρογεωλογικούς σκοπούς είναι:

- το Υδρογόνο -3 (τρίτιο) και
- ο Άνθρακας -14

Που δημιουργούνται με τη δράση της κοσμικής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα και την πρόκληση, από τον άνθρωπο, θερμοπυρηνικών εκρήξεων.

Τα ισότοπα υδρογόνου και οξυγόνου περιέχονται στο μόριο του νερού, ενώ του άνθρακα στις διαλυμένες στο νερό ενώσεις, κυρίως στα HCO_3^- .

Η χρησιμοποίηση των ισότοπων στην υδρολογία, γενικά, άρχισε στη 10ετία του '50 και αναπτύχθηκε αλματωδώς την περίοδο 1960 - 1972 (Καλλέργης, 2001)

2.4.2.1 Οι μεταβολές των σταθερών ισότοπων ως γεωχημική παράμετρος

Οι μεταβολές της αναλογίας των διαφόρων ισοτοπικών μορφών του νερού στο μόριό του, που μετριοούνται με φασματογράφο μάζας, επηρεάζουν τις φυσικές του ιδιότητες.

Οι μεταβολές αυτές εκφράζονται σε μονάδες δ όπου:

$$\delta = \left[\left(\frac{R_\lambda - R_{\sigma\tau}}{R_{\sigma\tau}} \right) \right] 10^3$$

Δηλαδή το δ εκφράζεται επί τοις % ενώ R_λ = ο λόγος των ισότοπων (D/H ή $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) του δείγματος και $R_{\sigma\tau}$ = ο λόγος των ισότοπων (D/H ή $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) του σταθερού τύπου ή δείγματος αναφοράς.

Τα σταθερότυπο που συνηθέστερα χρησιμοποιείται είναι γενικά γνωστό σαν SMOW (Standard Mean Ocean Water) και πλησιάζει τη μέση ισοτοπική σύνθεση του νερού των ωκεανών. Η ακρίβεια των μετρήσεων του δ (δέλτα) είναι:

- για το $\delta^{18}\text{O}$, $\pm 0,1\%$
- για το δD , $\pm 1,0\%$

Συνηθισμένες τιμές στα νερά της χέρσου, είναι:

- 50 μέχρι -300‰ για το D
- και -5 μέχρι 050‰ για το ^{18}O

Όταν το νερό εξατμίζεται από την επιφάνεια των ωκεανών, οι υδρατμοί που προκύπτουν είναι φτωχότεροι σε βαρύτερα μόρια νερού (HD^{16}O , H_2^{18}O), γιατί τα ελαφρύτερα μόρια του (H_2^{16}O) είναι πιο πτητικά. Έτσι για τους υδρατμούς της ατμόσφαιρας πάνω από τους ωκεανούς έχουν αναφερθεί τιμές δ : $\delta^{18}\text{O}$, -12‰ δD , -85‰

Το μείον που εμφανίζεται στις πιο πάνω τιμές του δ , οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την εξάτμιση οι υδρατμοί είναι φτωχότεροι, όπως προαναφέρθηκε, σε D και ^{18}O , από το νερό των ωκεανών.

Καθώς όμως οι υδρατμοί ανεβαίνουν σε μεγαλύτερα υψόμετρα, ψύχονται λόγω αδιαβατικής διαστολής ($\sim 1^\circ\text{C}$ ανά 100m), μέχρι να φτάσουν το σημείο κορεσμού. Όταν συμβεί τούτο αρχίζει η συμπύκνωση των υδρατμών και τα σταγονίδια τους εμπλουτίζονται σε ^{18}O και D, σε σχέση με τον αρχικό υδρατμό. Αντίθετα, προς τη διαδικασία της

εξάτμισης, η οποία στη φύση δεν γίνεται σε ισοτοπική ισορροπία, η συμπύκνωση των ατών γίνεται σε ισοτοπική ισορροπία, γιατί η σχετική υγρασία είναι 100%.

Έστω δ_0 η ισοτοπική σύνθεση των υδρατμών ωκεάνιας προέλευσης που περιέχονται σε μία μάζα αέρα, οι οποίοι ψύχονται αδιαβατικά σε δροσμένη θερμοκρασία, και σχηματίζεται υγρό νερό. Αν α_1 είναι η κλασματική ισοτοπική σύνθεση του σχηματισθέντος υγρού και του υπόλοιπου υδρατμού, που συνυπάρχουν και f_1 το κλάσμα των ατμών που συμπυκνώθηκε, τότε η ισοτοπική σύσταση δ_v των υπολειπόμενων, μη συμπυκνωθέντων, υδρατμών και δ_L του νερού, που σχηματίσθηκε, συνδέονται με τη σχέση:

$$f_1\delta_L + (1 - f_1)\delta_v = \delta_0 \quad \text{και} \quad \alpha_1 = \frac{\delta_L + 1000}{\delta_v + 1000}$$

Αν η υγρή φάση αποχωριστεί από το σύστημα (βροχόπτωση) και η αέρια μάζα υποστεί παραπέρα αδιαβατική ψύξη, τότε τόσο το νέο συμπύκνωμα, όσο και ο υδρατμός που θα παραμείνει, γίνονται ακόμη φτωχότεροι σε D και ^{18}O . Έτσι οι διαδοχικές συμπυκνώσεις προκαλούν συνεχή μείωση της περιεκτικότητας των αέριων μαζών σε βαριά ισότοπα και των δύο φάσεων (υγρής και αέριας).

Η απόσταση λοιπόν ενός τόπου από τη θάλασσα, επηρεάζει επίσης την ισοτοπική σύσταση του μετεωρικού του νερού. Όσο η απόσταση αυτή αυξάνει, τόσο περισσότερες συμπυκνώσεις έχει υποστεί η αέρια μάζα που περιέχει τους υδρατμούς και κατά συνέπεια τόσο φτωχότερο σε βαριά ισότοπα είναι το μετεωρικό νερό. Αντίθετα στις παράκτιες περιοχές, επειδή το μετεωρικό νερό κατά κανόνα προέρχεται από τις πρώτες συμπυκνώσεις, έχει περίπου την ίδια ισοτοπική σύσταση με το νερό της θάλασσας. (Καλλέργης, 2001)

Επίσης, η σύνθεση του νερού της βροχής σε σταθερά ισότοπα εξαρτάται από τη θερμοκρασία σχηματισμού τους. Με άλλα λόγια υπάρχει εποχική μεταβολή της ισοτοπικής συγκέντρωσης (δηλαδή της συγκέντρωσης σε σταθερά ισότοπα) του νερού της βροχής. Τους ψυχρούς μήνες οι περιεκτικότητες σε ισότοπα είναι μικρότερες. Μικρότερες επίσης είναι οι περιεκτικότητες σε ισότοπα (βαριά) στο νερό της βροχής στα μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη.

Αλλά ο πιο σημαντικός από υδρολογική και υδρογεωλογική σκοπιά, παράγοντας που προκαλεί μεταβολή της ισοτοπικής σύνθεσης του μετεωρικού νερού είναι το υψόμετρο. Έτσι, το μετεωρικό νερό περιοχών με μεγαλύτερο υψόμετρο, περιέχει λιγότερα D και ^{18}O από το μετεωρικό νερό χαμηλότερων περιοχών. Η ακρίβεια μέτρησης των ισοτοπικών αναλογιών του οξυγόνου και του υδρογόνου είναι τέτοια, ώστε να επιτρέπει τη διάκριση νερών που προέρχονται από περιοχές που έχουν υψομετρική διαφορά μεγαλύτερη από 200 m περίπου, μια και ανά 100 μέτρα οι περιεκτικότητες σε ^{18}O και D ελαττώνονται αντίστοιχα κατά 0,3% και 2,5%.

Τα παραπάνω ισχύουν τόσο δια το D όσο και για το ^{18}O , δηλαδή και τα δύο συμπεριφέρονται με τον ίδιο τρόπο. Ο συσχετισμός τους έχει τη μορφή $\delta D = \alpha \delta^{18}\text{O} + d$ όπου για νερά που δεν έχουν υποστεί εξάτμιση, δηλαδή δεν πρόκειται για νερά σωμάτων επιφανειακού νερού (λίμνες - ποτάμια - έλη) $\alpha=8$ και d (πλεόνασμα δευτερίου) = 10. Αποκλίσεις από την τιμή του 10 έχουν παρατηρηθεί στην Ανατολική Μεσόγειο, όπου η τιμή του d είναι περίπου 22, Στα νερά που έχουν υποστεί εξάτμιση, οι τιμές α και d είναι αρκετά μικρότερες ($\alpha=4-6$ και το d παίρνει μέχρι και αρνητικές τιμές).

Γενικά όταν ένα σώμα επιφανειακού νερού υπόκειται σε εξάτμιση, τότε αυτό εμπλουτίζεται σε D και ^{18}O και τα μόρια του H_2^{16}O είναι πιο πτητικά από τα μόρια του νερού που περιέχουν βαριά ισότοπα και από την άλλη μεριά λαμβάνει χώρα ισοτοπική ανταλλαγή με τους μετεωρικούς υδρατμούς. Κατά τη διαδικασία της εξάτμισης τα δD και $\delta^{18}\text{O}$ συσχετίζονται γραμμικά (η εξίσωση $\delta D = \alpha \delta^{18}\text{O} + d$ περιγράφει μια ευθεία), αλλά με

κλίση μικρότερη του 8 (όπως προαναφέρθηκε $\alpha = 4 - 6$). Τούτο έχει σαν αποτέλεσμα να μικραίνει το d (η τομή της υποθετικής ευθείας με κλίση 8 με τον άξονα του δD). Ο λόγος για τον οποίο μικραίνει η κλίση της ευθείας είναι η έλλειψη ισοτοπικής ισορροπίας ανάμεσα στην υγρή και την αέρια φάση. (Καλλέργης, 2001)

Ο βαθμός εμπλουτισμού σε D και ^{18}O ενός σώματος επιφανειακού νερού εξαρτάται:

a. Από τη σχέση "εκροές/εισροές" στο σώμα. Όταν ο λόγος πλησιάζει τη μονάδα, ο εμπλουτισμός είναι ασήμαντος (η εξάτμιση στη συνολική διαδικασία είναι ασήμαντη). Όταν ο πιο πάνω λόγος πλησιάζει το μηδέν (κλειστές λεκάνες) τότε ο εμπλουτισμός σε D και ^{18}O παίρνει τις μέγιστες τιμές (οι μόνες απώλειες νερού προέρχονται από την εξάτμιση). Τα νερά των κλειστών λεκάνων δεν παρουσιάζουν τη γενική γραμμική συσχέτιση δD και $\delta^{18}O$ των νερών της βροχής.

b. Από την υγρασία της ατμόσφαιρας, η οποία επηρεάζει την εξάτμιση και τη μοριακή ανταλλαγή ανάμεσα στο επιφανειακό και το ατμοσφαιρικό νερό. Ο εμπλουτισμός σε D και ^{18}O είναι σημαντικός με χαμηλές τιμές υγρασίας.

Είναι φανερό λοιπόν από τα παραπάνω ότι η ισοτοπική σύνθεση των επιφανειακών νερών είναι διαφορετική από εκείνη των υπόγειων νερών, λόγω της επίδρασης της εξάτμισης στα πρώτα, τα οποία τείνουν να διαμορφώσουν μια χαρακτηριστική ισοτοπική σύνθεση (σε σταθερά ισότοπα). Η ιδιότητα αυτή αποτελεί έναν χρήσιμο ιχνηθέτη για τη μελέτη ιδιαίτερα των προβλημάτων της σχέσης ανάμεσα στα υπόγεια και επιφανειακά νερά.

Η ισοτοπική σύνθεση του υπόγειου νερού, μπορεί να επηρεαστεί από την ανταλλαγή ιόντων με τα πετρώματα, στα οποία κυκλοφορεί το νερό. Η πιθανότητα ανταλλαγής του οξυγόνου είναι περιορισμένη, γιατί το στοιχείο αυτό αφθονεί στα πετρώματα, σε αντίθεση με το υδρογόνο. Η κινητική της ανταλλαγής είναι πολύ αργή και προκειμένου να αλλάξει σημαντικά η ισοτοπική σύνθεση του νερού απαιτείται υψηλή θερμοκρασία. Το φαινόμενο λοιπόν αυτό παρατηρείται μόνο στις γεωθερμικές περιοχές.

Κατά τη διαδικασία του εμπλουτισμού του υπόγειου νερού, οι βραχυχρόνιες μεταβολές στην περιεκτικότητά του σε σταθερά ισότοπα εξομαλύνονται, με αποτέλεσμα η ισοτοπική του σύνθεση να αντανakλά την ισοτοπική σύνθεση του νερού που εμπλουτίζει τον υδροφόρο. Από τον κανόνα αυτόν εξαιρούνται τα πεδία ροής, στα οποία οι ταχύτητες ροής είναι πολύ μεγάλες π.χ. στα ρωγματοωμένα και καρστικά πετρώματα.

Βέβαια, σε μια χρονική κλίμακα μερικών χιλιάδων χρόνων, παρατηρείται μεταβολή της περιεκτικότητας σε σταθερά ισότοπα, με την έννοια ότι τα παλαιότερα νερά είναι φτωχότερα σε D και ^{18}O . Τούτο πιθανά συμβαίνει λόγω του ψυχρότερου κλίματος που επικρατούσε την περίοδο που έλαβε χώρα ο εμπλουτισμός των παλιότερων νερών. Το στοιχείο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις μελέτες των αμοιβαίων σχέσεων μεταξύ διαφορετικών υδροφόρων, που οι περιοχές τροφοδοσίας τους βρίσκονται περίπου στο ίδιο υψόμετρο. Συχνά οι βαθύτεροι υδροφόροι περιέχουν πολύ παλιότερο νερό, κατά συνέπεια μικρότερες περιεκτικότητες σε σταθερά ισότοπα από τους ρηχότερους υδροφόρους.

Η ισοτοπική σύνθεση του υπόγειου νερού, συνήθως, είναι η ίδια περίπου ή παρόμοια με την ισοτοπική σύνθεση του νερού της βροχής. Η πραγματική ισοτοπική σύνθεση καθορίζεται από τη μέτρηση του ύψους της βροχής και τη δειγματοληψία της βροχόπτωσης εκείνης, που, μετά τις απώλειες λόγω εξάτμισης, συμβάλλει στην τροφοδοσία των υδροφόρων (ή των πηγών).

Η περιεκτικότητα του νερού σε σταθερά ισότοπα είναι μοναδική παράμετρος για την εκτίμηση της προέλευσής του. Το βασικό πλεονέκτημα των ισότοπων απέναντι στις παραδοσιακές γεωχημικές τεχνικές είναι η ιδιότητά τους να μην αλλοιώνονται, ποιοτικά και ποσοτικά, με πιθανή εξαίρεση τα νερά των γεωθερμικών περιοχών. Όμως, η ερμηνεία των αποτελεσμάτων των ισοτοπικών αναλύσεων είναι συχνά αδύνατη, χωρίς τις απαραίτητες υδρογεωλογικές πληροφορίες. (Καλλέργης, 2001)

2.4.2.2 Εφαρμογές σταθερών ισότοπων

Οι εφαρμογές των σταθερών ισότοπων στην υδρογεωλογία είναι πολύ εκτεταμένες, αναφέρονται δε, κατά κανόνα, σε συνδυασμό με τη χρήση του ραδιενεργού ισότοπου τρίτιου, στη μελέτη των πιο κάτω προβλημάτων:

- Υδραυλική επικοινωνία υδροφόρων και λιμνών.
- Υδραυλική επικοινωνία ανάμεσα σε υδροφόρους και ποτάμια.
- Μελέτη προβλημάτων προέλευσης του νερού και βαθμού ανάμιξης νερών διαφόρου προέλευσης.
- Μελέτη της σχέσης ανάμεσα σε ρηχούς και βαθείς υδροφόρους (σε συνδυασμό με χρονολόγηση με ^{14}C).
- Προέλευση της αλατότητας των νερών. Η αλατότητα του νερού μπορεί να οφείλεται:
 - i. Στην απόπλυση ή διάλυση αλάτων από το νερό κατά την κίνησή του στον υδροφορέα (εβαπορίτες, σταγόνες θαλασσινού νερού που περιέχουν NaCl και μεταφέρονται ως αερολύματα στην ενδοχώρα, προϊόντα εξαλλοίωσης πετρωμάτων και εδαφών).
 - ii. Στην ανάμιξη του γλυκού νερού με το θαλασσινό (διείσδυση θαλασσινού νερού σε παράκτιους υδροφόρους), νερό αλμυρών λιμνών, σαλαμούρες και συγγενετικό νερό.

Η αλατότητα τύπου (i) δεν συνοδεύεται από μεταβολή στην περιεκτικότητα των σταθερών ισότοπων του νερού που περιέχει τα αποπλυμένα άλατα. Δηλαδή, η αλμυρότητα απόπλυσης είναι ανεξάρτητη από την περιεκτικότητα του υφάλμυρου νερού σε σταθερά ισότοπα. Αντίθετα, η αλατότητα του τύπου (ii) είναι συνάρτηση της περιεκτικότητας του υφάλμυρου νερού σε σταθερά ισότοπα, μια και τα διάφορα νερά που αναμίχθηκαν είχαν διαφορετική μεταξύ του περιεκτικότητα σε σταθερά ισότοπα. Αποτέλεσμα αυτού είναι να υπάρχει γραμμική συσχέτιση των τιμών δD και ^{18}O , και των δύο μαζί αλλά και καθεμιάς χωρία, με την περιεκτικότητα του υφάλμυρου νερού σε ιόντα χλωρίου. Η γραμμική αυτή συσχέτιση δίνει ένα ευθύγραμμο τμήμα που το ένα άκρο του αποτελεί το γλυκό νερό της θάλασσας, της λίμνης ή της σαλαμούρας. Όταν η αλατότητα αυξάνεται λόγω εξάτμισης, η σχέση δD και $\delta^{18}\text{O}$ είναι η τυπική της διεργασίας της εξάτμισης. Οι τιμές δD και $\delta^{18}\text{O}$ συσχετίζονται επίσης με τη συγκέντρωση θειικών ιόντων στο υφάλμυρο νερό. (Καλλέργης, 2001)

2.4.3 Το τρίτιο

Παράγεται φυσικά μέσω της αντίδρασης της κοσμικής ακτινοβολίας με το N και το O, στα άνω στρώματα της ατμόσφαιρας, με ρυθμό $0,25$ άτομα / cm^2 / sec. Τεράστιες επίσης ποσότητες τεχνητού τρίτιου διοχετεύτηκαν στην ατμόσφαιρα με τις θερμοπυρηνικές εκρήξεις της περιόδου 1952 - 1963, ενώ μικρότερες ποσότητες εξακολουθούν να διοχετεύονται από τις διάφορες βιομηχανικές εγκαταστάσεις που πραγματοποιούν πυρηνικές δραστηριότητες. Η μονάδα μέτρησης της συγκέντρωσης τρίτιου στα φυσικά νερά, δίνεται σε μονάδες τρίτιου (T.U). Μια μονάδα τρίτιου έχει έναν ισοτοπικό λόγο T/H, 10^{-18} , δηλαδή 1 άτομο T αντιστοιχεί σε συγκέντρωση ατόμων ^1H ίση με 10^{18} . Αυτό είναι και το χαμηλότερο όριο ανίχνευσης του Τα στα περισσότερα ειδικά εργαστήρια.

Το περισσότερο T που παράγεται στην ατμόσφαιρα οξειδώνεται γρήγορα σε ΗΤΟ και ενσωματώνεται στον υδρολογικό κύκλο, όπου αποτελεί ένα δείκτη της παραμονής του νερού στην ατμόσφαιρα τα τελευταία 20 χρόνια.

Η συγκέντρωση φυσικού T στο νερό της βροχής, κυμαίνεται από 5-20 μονάδες τρίτιου, ανάλογα με τη γεωγραφική θέση. Οι θερμοπυρηνικές εκρήξεις της περιόδου 1952 - 1963 προκάλεσαν αύξηση της συγκέντρωσης Τα στο νερό της βροχής, μέχρι 10.000 T.U. Από το 1963, όταν σταμάτησαν οι θερμοπυρηνικές δοκιμές, η συγκέντρωση Τα στο νερό

άρχισε να πέφτει σταθερά μέχρι το 1968, οπότε σχεδόν σταμάτησε η μείωση της συγκέντρωσης T.

Η συγκέντρωση T_a σε δοσμένο τόπο, μεταβάλλεται εποχικά. Η μέγιστη τιμή της παρατηρείται στο τέλος της άνοιξης 0 αρχή του καλοκαιριού και η ελάχιστη το χειμώνα. Η συγκέντρωση θερμοπυρηνικού τριτίου ήταν μεγαλύτερη στο βόρειο από το νότιο ημισφαίριο, γιατί οι περισσότερες θερμοπυρηνικές εκρήξεις έγιναν στο βόρειο ημισφαίριο και γιατί η σχέση ξηράς / θάλασσας είναι μεγαλύτερη σ' αυτό. Υπάρχει επίσης η τάση ψηλότερη συγκέντρωσης T στα μεγαλύτερα υψόμετρα.

Λόγω ισοτοπικής ανταλλαγής ανάμεσα στους υδρατμούς της ατμόσφαιρας και στο νερό της θάλασσας, που έχει μεγάλη περιεκτικότητα σε T, το νερό της βροχής στους ωκεανούς και στις παράκτιες περιοχές έχει μικρότερη περιεκτικότητα T. Η συγκέντρωση T_a στο νερό της βροχής στο βόρειο ημισφαίριο είναι δεκαπλάσια εκείνης στο νότιο ημισφαίριο.

Για τη χρονολόγηση υπόγειου νερού με τη μέθοδο T_a , απαραίτητη προϋπόθεση είναι η γνώση της συγκέντρωσης του T_a στο νερό της βροχής του συγκεκριμένου τόπου. (Καλλέργης, 2001)

Η χρονολόγηση του νερού γίνεται με βάση την εξίσωση της διάσπασης:

$$C_t = C_0 e^{-\lambda t}$$

όπου: C_0 = η αρχική συγκέντρωση T μετά από χρόνο t και λ = η σταθερά διάσπασης.

Η πιο πάνω όμως εξίσωση προϋποθέτει σταθερό C_0 , κάτι που δεν συμβαίνει μετά το 1952.

Επίσης είναι απαραίτητη η χρήση ενός μαθηματικού ομοιώματος που να περιγράφει τη συμπεριφορά του συγκεκριμένου υδρολογικού συστήματος. Μερικά απλά μαθηματικά ομοιώματα, τα οποία δοκιμάστηκαν στην πράξη, σε πολλές περιπτώσεις, έχουν δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Θα πρέπει εκτός από τη συγκέντρωση του T στο νερό της βροχής, να λαμβάνεται υπόψη και η επίδραση της εξαμισοδιαπνοής και να επιφέρονται οι ανάλογες διορθώσεις.

Γενικά, οι διάφορες δυνατές ερμηνείες που μπορεί να δοθούν στα αποτελέσματα της μεθόδου T είναι:

A) Η συγκέντρωση T στο νερό είναι $T < 3 T.U.$

Το νερό είναι παλιότερο από 20 χρόνια (παλιότερο από την έναρξη των θερμοπυρηνικών δοκιμών) δηλαδή το νερό χρειάζεται πάνω από 45 χρόνια για να φτάσει από την περιοχή τροφοδοσίας του στο σημείο δειγματοληψίας. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι αρτεσιανοί υδροφόροι. Όταν ο υδροφόρος είναι ελεύθερος, η χαμηλή αυτή συγκέντρωση T μπορεί να αποδοθεί σε:

- πολύ μικρό ρυθμό εμπλουτισμού
- πολύ χαμηλή μεταβιβαστικότητα ή στο μεγάλο βάθος της υδροστατικής στάθμης, με αποτέλεσμα να χρειάζεται το νερό πολύ χρόνο να φτάσει στον υδροφόρο.
- ύπαρξη στρωμάτων νερού διαφορετικής ηλικίας, κάτω από την υδροστατική στάθμη.

B) Η συγκέντρωση T στο νερό είναι $3-20 T.U.$

Το νερό περιέχει μικρή ποσότητα θερμοπυρηνικού τριτίου, δηλαδή το νερό είναι της πρώτης περιόδου θερμοπυρηνικών δοκιμών 1954 - 1961.

C) Η συγκέντρωση T στο νερό είναι $20 - 200 T.U.$ χωρίς όμως διακυμάνσεις και με πολύ αργή μεταβολή. (Καλλέργης, 2001)

Τούτο είναι ένδειξη νέου νερού, που έχει αναμιχθεί καλά, στον υδροφόρο, με παλιότερο νερό. Το μέγεθος της υδρογεωλογικής λεκάνης είναι τέτοιο, ώστε να εξομαλύνει όλες τις διακυμάνσεις της τροφοδοσίας. Έτσι, μπορεί να υπολογιστεί ένας "μέσος χρόνος παραμονής" (mean residence time) του νερού στο πορώδες μέσον, ενώ το σύστημα μπορεί να θεωρηθεί σαν μία υπόγεια αποθήκη όπου λαμβάνει χώρα καλή ανάμιξη, με εκθετική παροχή.

Γενικότερα όταν η συγκέντρωση T είναι μεγάλη, δηλαδή ξεπερνά της 20 T.U., σημαίνει ότι το νερό είναι νέο (νεώτερο των θερμοπυρηνικών εκρήξεων), δηλαδή ο χρόνος που μεσολάβησε από την είσοδό του στην ακόρεστη ζώνη, μέχρι να φτάσει στον υδροφόρο κι από κει στο σημείο δειγματοληψίας, είναι μικρός. Ο "χρόνος αυτός παραμονής" του νερού στο σύστημα είναι κατά συνέπεια μικρός. Αν παρατηρούνται διακυμάνσεις σε έναν ετήσιο κύκλο, οι οποίες συνδέονται με διακυμάνσεις της βροχής στην περιοχή τροφοδοσίας, η ταχύτητα ροής του νερού στο σύστημα είναι μεγάλη και η μετακίνηση του νερού γίνεται χωρίς να ακολουθεί μονοπάτια με σημαντικές αποκλίσεις από το συντομότερο δρόμο. Ο χρόνος παραμονής μπορεί να υπολογισθεί από το χρόνο εμφάνισης του ετήσιου μέγιστου της συγκέντρωσης τρίτιου. Η μεταβολή μπορεί επίσης να οφείλεται στην εποχική μεταβολή της περιεκτικότητας σε T του νερού της βροχής, ή στο γεγονός ότι το νερό προέρχεται από ανάμιξη διαφορετικών νερών, π.χ. νερού, χωρίς καθόλου τρίτιο, βαθειάς κυκλοφορίας και νέου νερού ψηλής περιεκτικότητας σε T, επιφανειακής κυκλοφορίας.

Όλα τα παραπάνω προϋποθέτουν ελάχιστη επίδραση των φαινομένων διασποράς και ανάμιξης, πράγμα όμως σπάνιο στη φύση, με αποτέλεσμα τα μέγιστα και ελάχιστα της συγκέντρωσης T να εξομαλύνονται. Σημαντικές μεταβολές προκαλεί η ανάμιξη νερών διαφορετικής περιεκτικότητας T. Αν αναμιχθούν μικρές ποσότητες νερού, με χαμηλή συγκέντρωση T, με μεγαλύτερες ποσότητες νερού μεγάλης συγκέντρωσης T ή και αντίστροφα, είναι εξαιρετικά δύσκολος και συχνά αδύνατος ο υπολογισμός ενός αξιόπιστου μέσου χρόνου παραμονής. (Καλλέργης, 2001)

Οι εφαρμογές της μεθόδου αναφέρονται κυρίως στη μελέτη της καθόδου του νερού από την επιφάνεια του εδάφους στην ακόρεστη ζώνη, δηλαδή στη μελέτη του εμπλουτισμού των υδροφόρων.

Κατά κανόνα, η μέθοδος εφαρμόζεται σε συνδυασμό με τα σταθερά ισότοπα και έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία στις πιο κάτω περιπτώσεις:

- Στις μελέτες προέλευσης του νερού των υδροφόρων, προκειμένου να καθοριστεί η θέση και ο χρόνος εμπλουτισμού τους.
- Στον καθορισμό της φύσης της ανάμιξης νερών διάφορης προέλευσης και στον υπολογισμό του χρόνου παραμονής τους.
- Στον καθορισμό της υδρογεωλογικής λεκάνης πηγών ή υδροφόρων.
- Στην εκτίμηση του μεγέθους της υδρογεωλογικής λεκάνης των πηγών, από τον πολλαπλασιασμό του μέσου χρόνου παραμονής του νερού (μέση ηλικία) με την παροχή τους (σε ετήσια βάση).
- Στον καθορισμό του μηχανισμού και του ρυθμού εμπλουτισμού των υδροφόρων.

2.4.4 Τα ισότοπα του άνθρακα

Ο άνθρακας -14, όπως και το τρίτιο δημιουργούνται από:

I. Την επίδραση της κοσμικής ακτινοβολίας και πιο συγκεκριμένα των νετρονίων που προέρχονται από την κοσμική ακτινοβολία, πάνω σε άτομα ^{14}N . Ο ρυθμός παραγωγής ατόμων φυσικού ^{14}C σε ολόκληρη την ατμόσφαιρα είναι 2,5 άτομα $^{14}\text{C}/\text{cm}^2/\text{sec}$. Ο ^{14}C οξειδώνεται σε CO_2 της ατμόσφαιρας και στη συνέχεια μπαίνει στον υδρολογικό κύκλο. (Καλλέργης, 2001)

II. Τις θερμοπυρηνικές δοκιμές που έγιναν την περίοδο 1952 - 1963 (τεχνητός ^{14}C). Ο τεχνητός ^{14}C εισέρχεται στη συνέχεια στον υδρολογικό κύκλο, όπως και ο φυσικός. Η συγκέντρωση φυσικού ^{14}C μεταβάλλεται κατά τα τελευταία 7000 χρόνια, όπως έδειξαν μετρήσεις ^{14}C στο δέντρο *Sequoia gigantea*. Η συγκέντρωση ^{14}C εκφράζεται σαν % της συγκέντρωσης του σύγχρονου - πριν τις θερμοπυρηνικές εκρήξεις - ^{14}C των φυτών. Η συγκέντρωση ^{14}C στην ατμόσφαιρα στο βόρειο ημισφαίριο διπλασιάστηκε το 1963, λόγω της προσθήκης του ^{14}C των θερμοπυρηνικών εκρήξεων. (Καλλέργης, 2001)

Από το 1963 και μετά ο ^{14}C λιγοστεύει στην ατμόσφαιρα, εξακολουθεί όμως να παραμένει ακόμη και σήμερα, πάνω από τα επίπεδά της προς του 1952 περιόδου. Στο νότιο ημισφαίριο η αύξηση της συγκέντρωσης του ^{14}C στο 1963 ήταν της τάξης του 60%, σε σχέση με την πριν το 1952 συγκέντρωση. Οι πιο πάνω πάντως μεταβολές έχουν σημασία μόνο όταν μετριέται η περιεκτικότητα ^{14}C νέων νερών. (Καλλέργης, 2001)

Η είσοδος του ^{14}C στο υπόγειο νερό, γίνεται στην ακόρεστη ζώνη, όπου η μερική πίεση του CO_2 είναι, κανονικά, τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από την πίεση του ατμοσφαιρικού CO_2 . Το CO_2 στην εδαφική ζώνη, προέρχεται από το ριζικό σύστημα των φυτών και τα προϊόντα του θανάτου τους. Επειδή τα φυτά παραλαβαίνουν το CO_2 από την ατμόσφαιρα, στην οποία ο ^{14}C έχει οξειδωθεί σε $^{14}\text{CO}_2$, η εδαφική ζώνη θα περιέχει και $^{14}\text{CO}_2$ βιογενούς προέλευσης. Τούτο διαλύεται στο νερό που κατεισδύει και μεταφέρεται τη συνέχεια στον υδροφόρο. Μέρος του διαλυμένου, όμως στο νερό CO_2 , είναι ανόργανης προέλευσης και προέρχεται από τα ανθρακικά πετρώματα, στα οποία κυκλοφορεί το νερό. Αν τα πετρώματα αυτά είναι θαλάσσια ιζήματα - δηλαδή πολύ παλιά - τότε δεν περιέχουν ^{14}C . Έτσι στην περιοχή τροφοδοσίας του υδροφόρου, το νερό που μπαίνει στην κορεσμένη ζώνη θα περιέχει μόνο το σύγχρονο ^{14}C της εδαφικής ζώνης, δηλαδή ^{14}C που έχει αραιωθεί με μη βιογενή άνθρακα. (Καλλέργης, 2001)

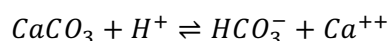
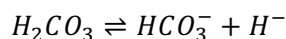
Το βασικό πρόβλημα στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων είναι η εκτίμηση της αρχικής ποσότητας ^{14}C , τη στιγμή που το νερό έφτασε στην κορεσμένη ζώνη, ώστε στη συνέχεια να υπολογιστεί η ελάττωσή του λόγω ραδιενεργούς διάσπασης. ο κλάσμα του αρχικού ^{14}C , που εξακολουθεί να υπάρχει στο νερό είναι ένα μέτρο του χρόνου που πέρασε από τότε που το νερό τον πήρε από την εδαφική ζώνη, δηλαδή του χρόνου που πέρασε από την κατείσδυση του νερού που τον περιέχει.

Η εξίσωση που εφαρμόζεται είναι:

$$t_r(\text{χρόνια}) = 8.270 \ln \frac{C_0}{C}$$

όπου t_r ο χρόνος παραμονής του νερού, 8.270 η μέση ζωή του ^{14}C σε χρόνια, C_0 η αρχική και C η συγκέντρωση ^{14}C στο δείγμα του νερού.

Ο ^{14}C μετριέται σε σχέση με τη συνολική περιεκτικότητα του δείγματος σε άνθρακα. Έτσι, θα πρέπει να είναι γνωστή η προέλευση, τόσο του ^{14}C όσο και του σταθερού C , στο δείγμα. Και τούτο, γιατί ολόκληρη η συγκέντρωση του σταθερού άνθρακα στο δείγμα του νερού, δεν έχει την ίδια προέλευση με τον ^{14}C , αλλά μέρος του πρώτου οφείλεται στη διάλυση, όπως προαναφέρθηκε ανθρακικών πετρωμάτων και ορυκτών.



Επειδή το CO_2 που προέρχεται από τη διάλυση των ασβεστόλιθων δε περιέχει ^{14}C , το νερό που φτάνει στον υδροφόρο περιέχει διαλυμένο άνθρακα - με τη χημική μορφή H_2CO_3 , HCO_3^- , CO_3^{--} - με περιεκτικότητα σε ^{14}C μικρότερη από εκείνη που υπάρχει στην εδαφική ζώνη στο βιογενές CO_2 .

Σύμφωνα με τις διάφορες επιστημονικές απόψεις που έχουν προταθεί για τον υπολογισμό της αρχικής περιεκτικότητας σε ^{14}C στο υπόγειο νερό οι πιο διαδεδομένες είναι:

- η κατά τον Vogel άποψη πως το $85 \pm 5\%$ είναι σύγχρονος ^{14}C

- κατά τον Pearson οι τιμές $\delta^{13}\text{C}$, στα ανθρακικά πετρώματα είναι της τάξης 0 - 2‰, όταν αυτά είναι θαλάσσια ιζήματα. Μετριέται, λοιπόν, ο ^{13}C του δείγματος του νερού, ο οποίος προέρχεται, κατά τον Pearson, από τα φυτά και μόνο. Υπόψη ότι ανάλογα με το φωτοσυνθετικό κύκλο, το $\delta^{13}\text{C}$ των φυτών στις θερμές περιοχές είναι - 25‰ και στις ξηρές περιοχές - 12‰. Με απλή λοιπόν αναλογία, γνωρίζοντας το $\delta^{13}\text{C}$ και ^{14}C του δείγματος και το αρχικό $\delta^{13}\text{C}$, υπολογίζεται το αρχικό ^{14}C . (Καλλέργης, 2001)

Τα βασικά μειονεκτήματα των διάφορων μεθόδων υπολογισμού της αρχικής συγκέντρωσης ^{14}C είναι:

- δεν λαμβάνεται υπόψη ο καθόλου χημισμός του συστήματος (η ισοτοπική κλασμάτωση ανάμεσα στα H_2CO_3 και HCO_3^- εξαρτιέται από το pH).

- αγνοείται η επίδραση των ιόντων Na, Mg κ.ά στην ισορροπία των ανθρακικών (ανταλλαγή ιόντων κ.λπ.)

- αγνοούνται οι κλιματικές μεταβολές που επηρεάζουν την ισοτοπική σύσταση του βιογενούς CO_2 της εδαφικής ζώνης.

- αγνοείται ο, έστω και μικρός, ρόλος της ιοντικής ανταλλαγής ανάμεσα στον ^{14}C το διαλυμένου στο νερό CO_2 και στον ^{13}C ή ^{12}C των ανθρακικών πετρωμάτων και ορυκτών.

Η μέθοδος του ^{14}C μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη χρονολόγηση νερών που η ηλικία τους είναι μικρότερη από 30.000 χρόνια. Γενικά, εφαρμόζεται στη μελέτη των αρτεσιανών υδροφόρων. Είναι δυνατός ο υπολογισμός της ταχύτητας ροής, με τον υπολογισμό της διαφοράς της ηλικίας του νερού ανάμεσα σε 2 σημεία δειγματοληψίας, που απέχουν γνωστή απόσταση, οπότε μπορεί να υπολογιστεί η μέση υδραυλική αγωγιμότητα του σχηματισμού. Μετρήσεις του ^{14}C δίνουν πληροφορίες για τη διαδικασία ανάμιξης νερών διαφορετικής ηλικίας, σε δοσμένο υδροφόρο.

Ειδικότερα μπορούν να μελετηθούν με τη χρήση της μεθόδου τα πιο κάτω προβλήματα:

- Επικοινωνία μεταξύ διαφορετικών υδροφόρων συστημάτων και ο ρυθμός της τροφοδοσίας του ενός από το άλλο, καθώς και ο καθορισμός της μορφής και του χώρου επικοινωνίας των συστημάτων.

- Υπολογισμός της ταχύτητας ροής του νερού σε ένα πεδίο ροής. Έχουν διαπιστωθεί ταχύτητες σε αρτεσιανούς υδροφόρους από 0,7 μέτρα/χρόνο μέχρι 2 μέτρα/χρόνο κάτι που συμφωνούσε, στις μελετηθείσες περιπτώσεις, με τις γενικότερες υδρογεωλογικές συνθήκες.

- Παρουσία απολιθωμένου νερού.

3. ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

3.1 Περιοχή Έρευνας

Η περιοχή μελέτης περιλαμβάνει τμήμα της πεδιάδας του Μαραθώνα - Κάτω Σουλίου και Αγ. Παντελεήμονα που βρίσκονται στο βορειοανατολικό τμήμα της Αττικής. Η έκταση αυτή, περίπου 40km² χαρακτηρίζεται από χαμηλό υψόμετρο ενώ παράλληλα διαβρέχεται από νότια και νοτιοανατολικά από τον όρμο του Μαραθώνα που αποτελεί και κομμάτι του Νότιου Ευβοϊκού Κόλπου.

Στο ανατολικό και κεντρικό τμήμα, συναντάται το μεγαλύτερο πλάτος της πεδινής έκτασης (περίπου 4 χλμ.) ενώ στο νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης βρίσκεται το δημόσιο πάρκο Ραπεντόζας. Παράλληλα στο βορινό τμήμα της περιοχής μελέτης βρίσκεται τμήμα του μεγάλου υδροβιότοπου του Εθνικού Πάρκου Σχοινιά Μαραθώνα. Το ανάπτυγμα της πεδινής ζώνης οριοθετείται ανατολικά από την ακτογραμμή του όρμου του Μαραθώνα, ενώ στη δυτική πλευρά της ακολουθεί σχεδόν την υψομετρική γραμμή των 50 μέτρων.



Χάρτης 1: Η δορυφορική απεικόνιση της περιοχής μελέτης. Στο κόκκινο πολύγωνο επισημαίνεται η κύρια περιοχή μελέτης.

Σε ό,τι αφορά την πεδινή έκταση μπορούν να γίνουν οι παρακάτω κατηγοριοποιήσεις:

- Η πόλη του Μαραθώνα (πεδινό τμήμα): Εξαπλώνεται παράλληλα με την κοίτη του χειμάρρου Οινόης και διακρίνεται σε δύο υποτμήματα. Το πρώτο έχει διεύθυνση ΝΝΑ - ΒΒΔ, μήκος 2 χλμ και πλάτος 0,6 χλμ περίπου και σε αυτό συμπεριλαμβάνεται η πόλη του Μαραθώνα. Στο δεύτερο παρατηρείται διεύθυνση Α - Δ, μήκος 1,2 χλμ και πλάτος 0,5 χλμ περίπου, με κυρίαρχο χαρακτηριστικό της περιοχής να είναι οι καλλιέργειες ανθοκομικών και κηπευτικών.
- Κάμπος Μαραθώνα: Με την περιοχή Καμίνια στο Νότο, τους πρόποδες των λόφων Αγριλίκι, Κοτρώνι και Στράτη στα δυτικά βορειοδυτικά, την αποστραγγιστική τάφρο των πηγών του Κάτω Σουλίου στα βορειοανατολικά κι από την παράκτια ζώνη του όρμου του Μαραθώνα στα ανατολικά, ορίζεται το κυρίως ανάπτυγμα του κάμπου του Μαραθώνα. Η διεύθυνση του κυρίως άξονα έχει διεύθυνση ΝΔ - ΒΑ με μέσο μήκος 6 χλμ και μέσο

πλάτος 3 χλμ. Στο κέντρο η πεδιάδα διατρέχεται από την κοίτη του χειμάρρου της Οινόης και ειδικότερα από το Καινούργιο Ρέμα, που αποτελεί τη σημερινή κοίτη του και το ρέμα Σέχρι, που είναι η παλιά και ανενεργή πλέον κοίτη του χειμάρρου. Η νέα κοίτη διανοίχθηκε από τον ίδιο το χειμάρρο όπου μετά την κατασκευή του φράγματος του Μαραθώνα η κοίτη του ρέματος Σέχρι καταπατήθηκε και μπαζώθηκε. Κατά το μέγιστο τμήμα της η πεδιάδα αναπτύσσεται σε υψόμετρα από 0,5 - 1 μέτρο έως και 15 - 18 μέτρα. Στις μέρες μας παρατηρείται υψηλή κατασκευαστική δραστηριότητα στην περιοχή με αποτέλεσμα υψηλά ποσοστά οικοπεδοποίησης και οικοδόμησης. Στην υπόλοιπη πεδιάδα παρατηρούνται συμβατικές ή με θερμοκήπια καλλιέργειες.

- Εθνικό Πάρκο Σχοινιά Μαραθώνα: Εκτείνεται στο ΒΑ τμήμα της πεδιάδας του Μαραθώνα. Ιδιαίτερα μορφολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής του έλους του Σχοινιά είναι τόσο η ύπαρξη της μικρής χερσονήσου της Κυνοσούρας ή του Μύτικα με τρεις μικρές κορυφές μεγίστου ύψους 92 m, στο ανατολικό όριο της πεδινής έκτασης, όσο και η ανάπτυξη, παράλληλα προς την ακτή, παράκτιων χαμηλών αμμολόφων μήκους περί τα 3 km και πλάτους περί τα 450 m, όπου και αναπτύσσεται το προστατευόμενο δάσος της κουκουναριάς και της Χαλέπιας πεύκης. Μεταξύ των αμμολόφων και του λόφου της Δρακονέρας συναντώνται αρνητικά υψόμετρα όπου και αναπτύσσεται περιοδικά η μικρή υφάλμυρη λίμνη Στόμι. Αρνητικά υψόμετρα συναντώνται επίσης και σε άλλες περιοχές του έλους (περιοχή Δρακονέρας, αποστραγγιστικοί τάφροι κλπ).

- Πεδινό τμήμα Κάτω Σούλι – Πάτημα: Αποτελεί το Β-ΒΑ άκρο της πεδιάδας του Μαραθώνα. Αναπτύσσεται με διεύθυνση Α-Δ και έχει μήκος 3,5 km περίπου και μέσο πλάτος 0,5 km. Οριοθετείται νότια από το δρόμο Μαραθώνα – Κάτω Σουλίου – Αγ. Μόδεστου και δυτικά, βόρεια και ανατολικά από τους λόφους Σταυροκοράκι, Λυγκοβούνη, Αγγιλιά και Μεγάλη Κορυφή. Υψομετρικά οριοθετείται από την ισοϋψή καμπύλη των 8m νότια και περικλείεται από την ισοϋψή γραμμή των 50m περίπου. Πρόκειται για την περιοχή, στην οποία τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί έντονα αγροτικές εκμεταλλεύσεις αποτελούμενες κυρίως από μικρές έως πολύ μεγάλες εγκαταστάσεις θερμοκηπίων, καλλιέργειας κηπευτικών και ανθοκομικών ειδών. Η πεδινή έκταση προς τα νοτιοδυτικά περιβάλλεται από το Πεντελικό όρος (κορυφή 1108m).

3.2 Γεωγραφικά Στοιχεία

Για τη λοφώδη - ημιορεινή περιοχή που εκτείνεται στο βορειοδυτικό τμήμα μπορούμε να κάνουμε τις ακόλουθες παρατηρήσεις. Αναπτύσσεται σε διεύθυνση Α-Δ και τα κυριότερα υψώματα που περιλαμβάνει είναι το Κοκκίνη (υψόμετρο 266m), Σπίθαρι (υψ. 232 m), Αγ. Δημήτριος (υψ. 332 m), Μεγάλη Κορυφή (υψ. 264 m) και Καρούμπαλο (υψ. 242 m). Τα πρηνή γενικά παρουσιάζουν μέτριες κλίσεις (13° – 19°), εκτός ορισμένων περιπτώσεων που είναι απότομα και βραχώδη, όπως στη νότια πλευρά του λόφου Στράτη.

Στην ευρύτερη περιοχή το κύριο ρέμα είναι αυτό του Μαραθώνα (Σέχρι ή Οινόης) που αποστραγγίζει την ευρύτερη έκταση. Μετά την κατασκευή του φράγματος Μαραθώνα το 1925, άλλαξε ριζικά το υδρολογικό καθεστώς της πεδινής περιοχής, που είχε ως αποτέλεσμα τον έντονο περιορισμό της τροφοδοσίας της προσχωματικής υδροφορίας από νερά της επιφανειακής απορροής.

Ο χειμάρρος Οινόης (Μαραθώνα) αποτελεί επέκταση προς τα κατάντη του χειμάρρου Χάραδρου, η κοίτη του οποίου διακόπηκε το 1925 λόγω κατασκευής του φράγματος της λίμνης του Μαραθώνα. Το κατάντη του φράγματος υδατόρευμα είναι ξηρό, αρχίζει από μηδενική λεκάνη και αποτελεί μία μικρή απόφυση μήκους 0,1 km σε ένα από τα κύρια υδατορεύματα της Οινόης, το Πετρόρεμα. Ο χειμάρρος Οινόης στη θέση της διασταυρώσεως λεωφόρου Μαραθώνα με την οδό Κάτω Σουλίου, έχει λεκάνη απορροής 64 km², ενώ μέχρι τη θάλασσα 71,3 km². Η εκβολή στη θάλασσα γίνεται από δύο

υδατορεύματα, το Σέχρι μήκους 2,8 km, που διασχίζει την πεδιάδα του Μαραθώνα και κατέληγε 500 m περίπου ΒΑ του Αγ. Παντελεήμονα και το Καινούριο Ρέμα, το οποίο είναι πλέον πρόσφατο και ακολουθεί κατεύθυνση σχεδόν παράλληλη προς την κοίτη του Σέχρι, εκβάλλει δε 700 m περίπου ΒΑ αυτού.

Το Καινούργιο Ρέμα διάνοιξε «πρόσφατα» την κοίτη του μέσα στο αλλουβιακό ριπίδιο του χειμάρρου. Στο 4^ο km από την εκβολή, ο χειμάρρος διέρχεται την οδό προς Κ. Σούλι και επί 1,7 km έχει ενιαία κοίτη παράλληλη προς την λεωφόρο Μαραθώνα. Στο 5,7 km από την εκβολή, συμβάλλει από βορρά ο χειμάρρος Γραμματικού με δύο κύριους κλάδους, το χειμάρρο Αγ. Τριάδας ανατολικά και το χειμάρρο Στραβαετού δυτικά. Ο χειμάρρος Γραμματικού έχει λεκάνη απορροής 49,5 km².

Το ρέμα του Μαραθώνα έχει συμβάλλει και αυτό κατά το παρελθόν στη δημιουργία της ελώδους περιοχής, χωρίς όμως σήμερα να έχει άμεση σχέση με αυτή.

Η ευρύτερη περιοχή του Σχοινιά πριν το 1923 ήταν ένα έλος που είχε δημιουργηθεί από την τροφοδοσία του με νερά κυρίως της Μακαρίας πηγής, που εμφανίζεται και σήμερα στο βορειοδυτικό πεδινό τμήμα και του ρέματος Μυρτιάς, σε συνδυασμό με τα πολύ μικρά υψόμετρα της πεδινής περιοχής και της ύπαρξης παράκτιου φραγμού από τις αμμοθίνες της παραλιακής ζώνης.

Στο χώρο ανάπτυξης των αμμοθινών παλιότερα γινόταν αμμοληψία για τις οικοδομικές ανάγκες των Αθηνών. Η αμμοληψία αυτή έχει περιορίσει τον όγκο των αμμοθινών και τοπικά έχει δημιουργήσει περιοχές με αρνητικά υψόμετρα (ανατολικό τμήμα δάσους), όπως και αποκάλυψη του κύριου ριζικού συστήματος των πεύκων και της κουκουναριάς.

Στο ανατολικό τμήμα η πηγή Δρακονέρας τροφοδοτούσε επίσης το έλος. Το 1923 με σκοπό την απόδοση καλλιεργήσιμων εκτάσεων σε ακτήμονες κατασκευάστηκε το κύριο αποχετευτικό – αποστραγγιστικό κανάλι που απάγει τα νερά της Μακαρίας πηγής προς την θάλασσα και ήταν η κύρια αιτία αποστράγγισης του έλους εξ αιτίας της διακοπής επιφανειακής σταθερής τροφοδοσίας με νερό.

Υπάρχει επίσης, στο βόρειο τμήμα του υδροβιότοπου, το ρέμα της Μυρτιάς μήκους περί τα 4 km που δεν καταλήγει στη θάλασσα αλλά εκβάλλει στην πεδινή έκταση του Σχοινιά και τροφοδοτούσε παλαιότερα το έλος με επιφανειακό νερό και θρεπτικά συστατικά. Οι απορροές του ρέματος Μυρτιάς μετά την κατασκευή αναχώματος στις αρχές του αιώνα στο βόρειο τμήμα της πεδινής έκτασης απάγονται περιμετρικά προς τη θάλασσα χωρίς να διοχετεύονται πλέον στο παλιό έλος.

Η περιοχή του έλους Σχοινιά, με βάση παλαιότερες και σύγχρονες μελέτες παλαιογεωγραφικής εξέλιξης, αποτελούσε τα τελευταία 5000 χρόνια ένα περιβάλλον αβαθούς λιμνοθάλασσας, που κατά περιόδους εναλλασσόταν με ελώδες – τεναγώδες περιβάλλον με θαλάσσια επίδραση (Παυλόπουλος κ.α. 2001, Baeteman 1985, από Περέρο, 2001α). Η θαλάσσια αυτή επίδραση παρουσιάζεται σήμερα κατά θέσεις εντός του έλους με χαρακτηριστικές υψηλές συγκεντρώσεις αλάτων.

Στη συνέχεια και μέχρι σήμερα η περιοχή δέχτηκε και δέχεται ισχυρές οικιστικές πιέσεις που έχουν διαμορφώσει τη σημερινή εικόνα (αεροδρόμιο, στρατιωτικές εγκαταστάσεις, οικισμοί κλπ). Στη θέση του αεροδρομίου έχει κατασκευαστεί το Ολυμπιακό Κέντρο κωπηλασίας ενώ οι στρατιωτικές εγκαταστάσεις έχουν ήδη απομακρυνθεί. Στο ίδιο ύψος με την Μακαρία πηγή, αλλά ανατολικότερα, στους δυτικούς πρόποδες της Δρακονέρας, υπάρχει η πηγή της Δρακονέρας και το μικρό έλος που μέσω καναλιού οδηγούσαν παλαιότερα τα νερά τους στη θάλασσα. Σήμερα η παροχετευτικότητά τους έχει μειωθεί σημαντικά. Ένα άλλο σημαντικό υδρολογικό χαρακτηριστικό της περιοχής είναι ότι αυτή φαίνεται να δέχεται υποεπιφανειακά σημαντικές ποσότητες θαλάσσιου νερού και σε θέσεις απομακρυσμένες από τη θάλασσα. Χαρακτηριστικό είναι ότι κατά την καλοκαιρινή περίοδο είναι εμφανής η αλάτωση των εδαφών της περιοχής. Αυτό μπορεί να οφείλεται στους εξής δύο λόγους: α) εξάτμιση του αρδευτικού νερού που προέρχεται από το υφάλμυρο νερό του υδροφόρου, β) εξάτμιση του υφάλμυρου νερού του υδροφορέα έπαιτα

από άνοδο στην επιφάνεια λόγω τριχοειδών δυνάμεων, σε περιοχές με πολύ μικρού πάχους ακόρεστη ζώνη, αποτελούμενη από λεπτόκοκκο υλικό.

Εκτιμάται ότι προ του 1923, ο βιότοπος τροφοδοτούνταν ετησίως με ποσότητα νερού της τάξης των $6-7 \times 10^6 \text{ m}^3$ τουλάχιστον (ENVECO, 2000). Στην ποσότητα αυτή θα πρέπει να προστεθεί μια επιπλέον (μικρή) ποσότητα πλημμυρικών απορροών που κατέληγαν στην περιοχή από την ανάντη ορεινή λεκάνη. Οι πλημμυρικές αυτές απορροές είχαν μεγάλη σημασία για την τροφοδοσία του υγροτόπου με οργανικά στοιχεία. Η σημερινή τροφοδοσία του υγροτόπου γίνεται κυρίως από την ποσότητα της βροχής η οποία προσπίπτει απευθείας στον βιότοπο. Η ποσότητα αυτή είναι της τάξης των $0,7 \times 10^6 \text{ m}^3$ ετησίως. Είναι επομένως προφανές ότι η υδραυλική λειτουργία του υγροτόπου είναι σαφώς διαταραγμένη σε σχέση με την αρχική φυσική του λειτουργία λόγω κυρίως των παλαιών αποστραγγιστικών έργων και έργων εκτροπής.

3.3 Δημογραφικά στοιχεία

Η ευρύτερη περιοχή του Μαραθώνα αριθμεί 33.423 κατοίκους σύμφωνα με την απογραφή του 2011 (ΕΛΣΤΑΤ, <http://www.statistics.gr/2011-census-pop-hous>). Από αυτούς, ο οικονομικά ενεργός πληθυσμός ανέρχεται στους 16.538 πολίτες. Παρατηρούμε πως είναι αρκετά υψηλός ο αριθμός των συνταξιούχων και των μικρών παιδιών και μαθητών, γεγονός που καθιστά έντονη την ανάγκη ύπαρξης κοινωνικών υποδομών. Επιπλέον, για τα δεδομένα της εποχής είναι εξαιρετικά μεγάλος ο αριθμός των ατόμων που ασχολούνται με οικιακές εργασίες και δεν συμμετέχουν ενεργά στην οικονομική ζωή.

ΔΗΜΟΣ ΜΑΡΑΘΩΝΑ	ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΠΛΗΘΥΣΜΟΣ	ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΕΝΕΡΓΟΙ	ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΜΗ ΕΝΕΡΓΟΙ
	33.423	16.538	16.885

Το ποσοστό των εργαζομένων ατόμων ανέρχεται στο 49,4% του συνολικού πληθυσμού. Οι περισσότεροι εργαζόμενοι απασχολούνται στον Τριτογενή Τομέα παραγωγής, με ποσοστό 47%, ωστόσο παρατηρείται μια αύξηση της ενασχόλησης με τον Πρωτογενή τομέα σε σχέση με την κατάσταση που επικρατούσε πριν 15 χρόνια. Αυτό μεταφράζεται σε μια αύξηση 2 ποσοστιαίων μονάδων του οικονομικώς ενεργού πληθυσμού που έχει ως ενασχόληση την αγροτική παραγωγή.

Στο σημείο αυτό, αξίζει να αναφερθεί πως εκτός των 7.412 μεταναστών, η καταγραφή πολλών ακόμα δεν ήταν δυνατή από την Ελληνική Στατιστική Αρχή, λόγω του καθεστώτος εργασίας και διαβίωσής τους. Η πλειοψηφία αυτών είναι επιφορτισμένοι με το έργο της αγροτικής παραγωγής, πράγμα που μας οδηγεί στην υπόθεση πως το εμφανιζόμενο μέγεθος της ενασχόλησης του τοπικού πληθυσμού με τη γεωργία είναι πλασματικό και συμπιεσμένο.

Ένα ακόμα αξιοπαρατήρητο γεγονός είναι η σταδιακή μετατροπή της παραλιακής ζώνης του Μαραθώνα από Β' κατοικίας σε Α', πράγμα που μας οδηγεί στο συμπέρασμα πως συντελείται μια μεταστροφή στις δραστηριότητες του τοπικού πληθυσμού από τον τουρισμό στις καλλιέργειες (ΕΛΣΤΑΤ, <http://www.statistics.gr/el/interactive-map>).

3.4 Χρήσεις Γης – Εδαφοκάλυψη

Η βλάστηση της περιοχής χαρακτηρίζεται ως ένα τυπικό μεσογειακό οικοσύστημα με θάμνους, φρύγανα και πόες. Επιπλέον αποτελεί χώρο εξάπλωσης της κουκουναριάς (*Pinus Pinea*), ενώ περιλαμβάνει και άτομα χαλεπίου πεύκης (*Pinus halepensis*), είδη αμμοθινών (*Ammophilia spp.*) και υποθαλάσσια λιβάδια (*Posidonia oceania*). Απαντάται

επίσης μεγάλη ποικιλία απειλούμενης ορνιθοπανίδας και απειλούμενα υδρόβια πουλιά, όπως τα είδη *Phoenicopterus ruber*, *Falco naumanni* και *Himantopus himantopus*.

Οι χρήσεις γης στο Μαραθώνα εμφάνισαν μια απότομη αλλαγή κατά το πρόσφατο παρελθόν. Η καλλιεργήσιμη έκταση εκτείνεται περίπου στο 30% της συνολικής έκτασης της περιοχής μελέτης.

Συγκεκριμένα, οι περισσότερες μελέτες κατηγοριοποιούν τη χρήση γης για την περιοχή του Μαραθώνα ως εξής:

- Κατοικία. Πρόκειται για διάσπαρτους οικισμούς στη συνολική έκταση της περιοχής. Νόμιμοι ή αυθαίρετοι, οι παραπάνω οικισμοί συγκεντρώνουν χρήσεις τόσο μόνιμης όσο και παραθεριστικής κατοικίας. Η παραθεριστική κατοικία κατέχει μεγάλο ποσοστό από το σύνολο της κατοικίας στην περιοχή του Μαραθώνα.

- Δασικές εκτάσεις. Εκτός από τον υγρότοπο και το πευκοδάσος του Σχοινιά, ο Μαραθώνας περιβάλλεται από εκτάσεις πρασίνου, καθώς και το Πεντελικό όρος, το οποίο αποτελεί σημαντικό πνεύμονα της περιοχής. Οι δασικοί όγκοι, αποτελούν τοπία εξαιρετικής ομορφιάς. Για την προστασία του φυσικού πλούτου της περιοχής έχουν θεσπιστεί ειδικές διατάξεις που απαγορεύουν κάθε εκμετάλλευση.

- Αγροτικές εκτάσεις. Ο Μαραθώνας αποτελούσε καθαρά γεωργικό πόλο μέχρι τη δεκαετία του '60. Παρά την κάμψη της αγροτικής παραγωγής κατά τα μετέπειτα χρόνια και τη στροφή της απασχόλησης του τοπικού πληθυσμού στον δευτερογενή και τριτογενή τομέα, σήμερα συντελείται μια αποκατάσταση αυτού του αγροτικού χαρακτήρα. Παράγοντες που την ενισχύουν είναι ο υδροφόρος ορίζοντας και η γεωμορφολογία της περιοχής. Παρόλα αυτά, μεγάλο κομμάτι των εκτάσεων προς γεωργική εκμετάλλευση χρησιμοποιείται σε άλλους τομείς και ιδιαίτερα στην ανοικοδόμηση.

- Αρχαιολογικοί χώροι και σημεία τοπικού και υπερτοπικού ενδιαφέροντος. Πρόκειται για μια περιοχή με πλούσιο πολιτιστικό και ιστορικό παρελθόν που φιλοξενεί σημαντικά αρχαιολογικά μνημεία. Επίσης, διαθέτει το κωπηλατοδρόμιο, μια από τις εγκαταστάσεις των Ολυμπιακών Αγώνων του 2004.

- Τουριστικές εγκαταστάσεις. Συγκεντρώνονται κατά μήκος της ακτογραμμής του Σχοινιά, που αποτελεί πόλο έλξης χιλιάδων λουόμενων τους θερινούς μήνες. Το επίπεδο των υποδομών είναι αρκετά χαμηλό.

Παρατηρείται ακόμα, μια σταδιακή υποβάθμιση των οικολογικών χαρακτηριστικών της περιοχής με χαρακτηριστικότερο παράδειγμα, τη συρρίκνωση και αλλοίωση του υγροτόπου στην περιοχή όπου κατασκευάστηκε το κωπηλατοδρόμιο του Σχοινιά, για τις ανάγκες των Ολυμπιακών Αγώνων του 2004.

Οι σημαντικότερες ανθρωπογενείς επεμβάσεις μέχρι και τις μέρες μας καταγράφονται ως εξής:

- Η κατασκευή του φράγματος του Μαραθώνα δημιούργησε έναν καινούριο υγρότοπο βορείως της περιοχής μελέτης ενώ η μερική αποξήρανση του παλαιού έλους έφερε περιορισμό των υγροτόπων.

- Τα αποστραγγιστικά έργα και η κατασκευή του κωπηλατοδρομείου, ανέτρεψαν το υπάρχον καθεστώς ανανέωσης των υδροφόρων, καθιστώντας πλέον το Καινούριο Ρέμα ως κύριο βραχίονα τροφοδότησης του αλλουβιακού υδροφόρου.

- Σημαντική πίεση έχει ασκήσει και η άναρχη δόμηση, που σε συνδυασμό με την καταπάτηση ημιδασικών και αγροτικών περιοχών, οδηγούν σε μια ανεξέλεγκτη χρήση του χώρου, η οποία εντείνεται ιδιαίτερα κατά το θέρος. Χαρακτηριστικό της κατάστασης αυτής είναι η συρρίκνωση του πευκοδάσους κατά 0,2 τετραγωνικά χιλιόμετρα (1,39 km² - 1,19km²) σε διάστημα μόλις 12 ετών (1988 - 2000).

- Η επιχειρούμενη αστικοποίηση στους λόφους, στο δάσος και στη γεωργική περιοχή με ανέγερση παράνομων κτισμάτων σε όλη την ευρύτερη περιοχή μελέτης. (Ξανθάκης & Ξανθόπουλος, 2007)

4. ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

4. Στοιχεία Επιφανειακής Υδρολογίας

4.1 Εισαγωγή

Σημαντικό κομμάτι της υδρογεωλογικής μελέτης του υδρολογικού συστήματος μιας περιοχής, είναι απαραίτητη η επίγνωση του ιστορικού που παρουσιάζει τόσο η ποσοτική, όσο και η ποιοτική κατάσταση των υπογείων και επιφανειακών υδάτων. Στην κατεύθυνση αυτή, ζωτικής σημασίας είναι η μελέτη των κλιματικών συνθηκών και της κατάστασης και κίνησης του υπόγειου νερού, για τον υπολογισμό του υδρολογικού ισοζυγίου.

Η πρώτη μέριμνα κατά τη διερεύνηση του υδατικού ισοζυγίου είναι η μέτρηση της ποσότητας των όμβριων υδάτων που καταλήγουν σε μια υδρολογική λεκάνη. Η δυνατότητα αυτή προκύπτει από την παρακολούθηση των βροχοπτώσεων τόσο στην περιοχή μελέτης, όσο και διερευνώντας την ευρύτερη συνορεύουσα περιοχή. Η συλλογή των δεδομένων γίνεται κυρίως από τους βροχομετρικούς σταθμούς κάθε περιοχής ή και των γειτονικών αυτής.

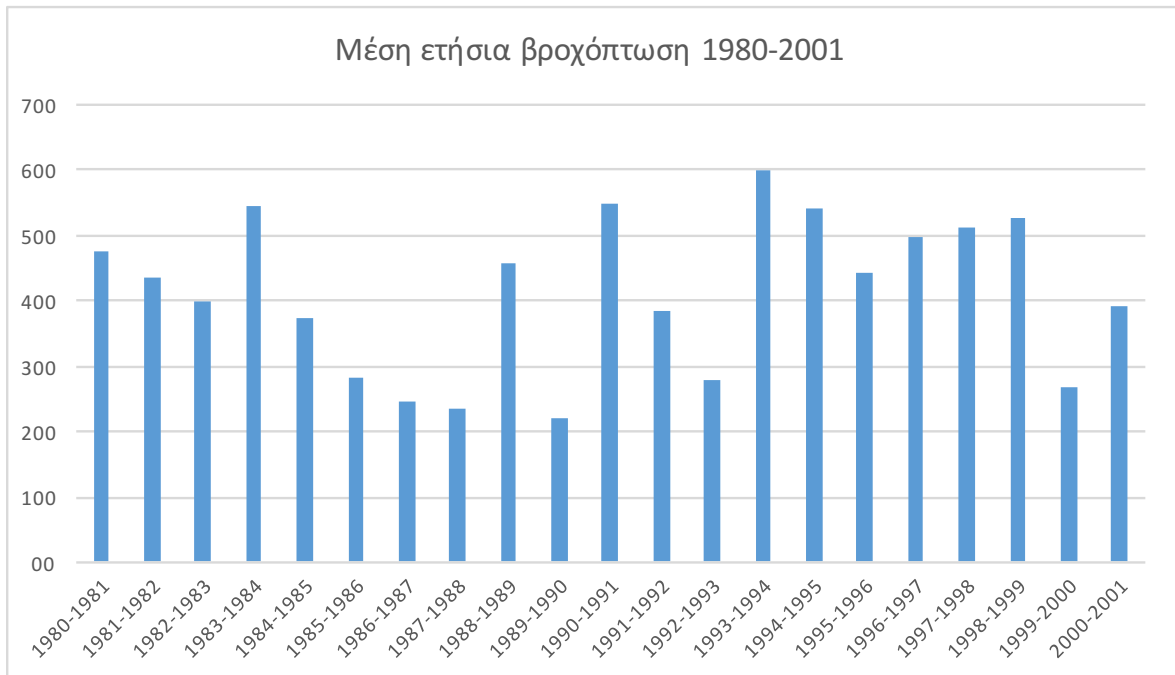
Ωστόσο, είναι πολύ συχνή η αντιμετώπιση προβλημάτων και αδυναμιών κατά τη διαδικασία αυτή. Τα συνηθέστερα είναι η έλλειψη στοιχείων για μεγάλες χρονικές περιόδους λόγω βλαβών και δυσλειτουργιών των μετεωρολογικών σταθμών. Η αντιμετώπιση τέτοιων ζητημάτων έχει επιτευχθεί μέσω της ανάπτυξης μεθόδων οι οποίες συντελούν στην ανάκτηση των τιμών βροχόπτωσης σε σημεία όπου δεν υπάρχουν μετεωρολογικοί ή βροχομετρικοί σταθμοί. Παρόλα αυτά, ενώ η στατιστική επιστήμη έχει γνωρίσει μεγάλη εξέλιξη, αρκετά σημεία στον υπολογισμό της μέσης βροχόπτωσης για μια περιοχή με μη επαρκές δίκτυο σταθμών, ή πεπαλαιωμένο - μη αξιόπιστο δίκτυο, εξακολουθούν να παραμένουν ασαφή και για το λόγο αυτό η έρευνα αξιοπιστίας της μέσης βροχόπτωσης με τις διάφορες μεθόδους να είναι μέχρι και σήμερα ένα ακμάζων επιστημονικό πεδίο.

Στο παρακάτω σχήμα, παρουσιάζεται η υπερετήσια διακύμανση της βροχόπτωσης για την περίοδο 1980-2001, σε σταθμό της Ε.Μ.Υ., ο οποίος βρίσκεται στην περιοχή έρευνας, σε υψόμετρο 3m.

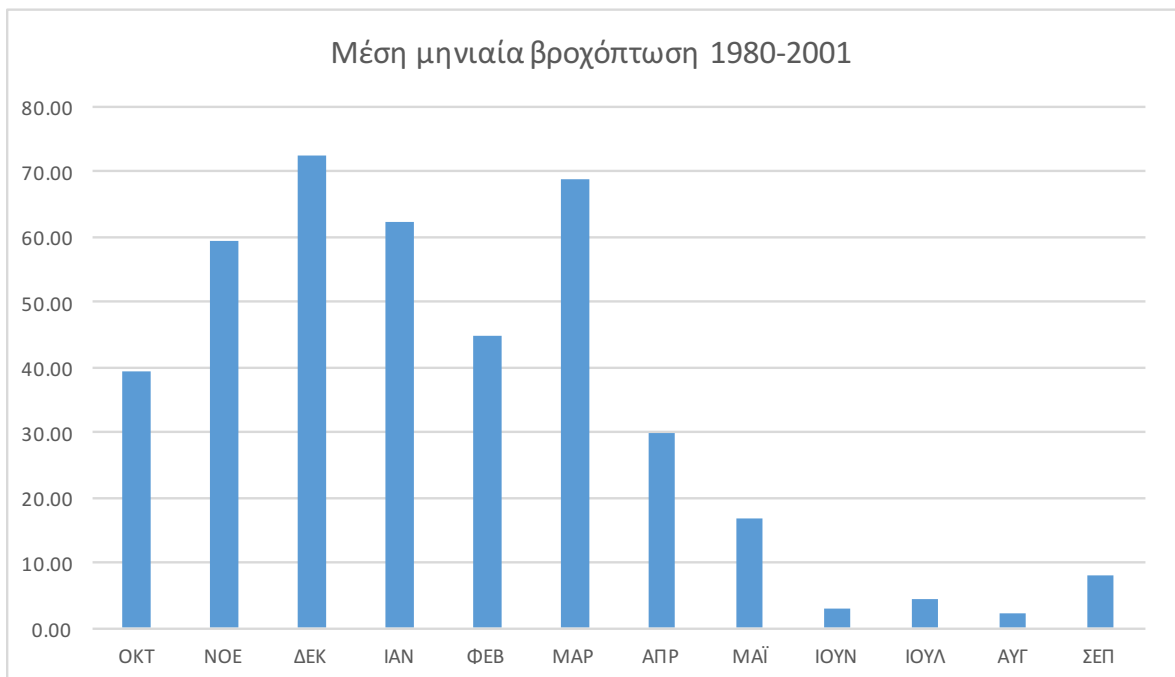
Η τιμή της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης για την περίοδο 1980-2001 ανέρχεται σε 412,1mm. Τα υδρολογικά έτη με τις ακραίες τιμές ελάχιστης και μέγιστης βροχόπτωσης σε ετήσια βάση, είναι τα 1989/1990 και 1993/1994 με ύψη 219,9 και 599,8 αντίστοιχα.

Κατά τη διάρκεια κάθε υδρολογικού έτους, την περίοδο 1980-2001, οι βροχοπτώσεις περιορίζονται στο διάστημα μεταξύ Οκτωβρίου και Μαΐου (υγρή περίοδος), ενώ κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών (ξηρή περίοδος), οι βροχοπτώσεις χαρακτηρίζονται ως αμελητέες. Ο Δεκέμβριος καταγράφεται ως ο υγρότερος μήνας, με μέσο ύψος βροχόπτωσης 72,52mm, ενώ ο ξηρότερος μήνας καταγράφεται ο Αύγουστος με μόλις 2,24mm.

Τα παραπάνω συνηγορούν στις ήδη αυξημένες χρήσεις νερού της περιοχής έρευνας, με σκοπό κυρίως την ικανοποίηση των αρδευτικών αναγκών για τις καλλιεργούμενες εκτάσεις του πεδινού τμήματος του Μαραθώνα.



Σχήμα 8: Υπερετήσια διακύμανση βροχόπτωσης για την περίοδο 1980-2001. (Πηγή: Πολεμικό Ναυτικό)



Σχήμα 9: Διακύμανση μέσης μηνιαίας βροχόπτωσης για την περίοδο 1980-2001. (Πηγή: Πολεμικό Ναυτικό)

5. ΓΕΩΛΟΓΙΑ – ΥΔΡΟΦΕΩΛΟΓΙΑ Β.Α ΑΤΤΙΚΗΣ

5.1 Γεωλογικές Συνθήκες

Για τη γεωλογική σύνθεση της ευρύτερης περιοχής της Ανατολικής Αττικής έχουν διατυπωθεί αρκετές απόψεις, οι οποίες σύμφωνα με τα μέσα παρατήρησης - επισκόπησης και με τις επιστημονικές τάσεις που επικρατούσαν ανά περίοδο στον κλάδο της γεωλογικής μελέτης, καταλήγουν πολλές φορές να βρίσκονται και σε ευθεία αντιπαράθεση μεταξύ τους. Επιχειρείται παρακάτω μια συνοπτική πλην όμως αντιπροσωπευτική επισήμανση των επιστημονικών απόψεων που επικράτησαν ανά περιόδους στην προσπάθεια κατανόησης της περιοχής μελέτης της Ανατολικής Αττικής.

5.1.1 Επιστημονική Κοινότητα - Ιστορική Αναδρομή

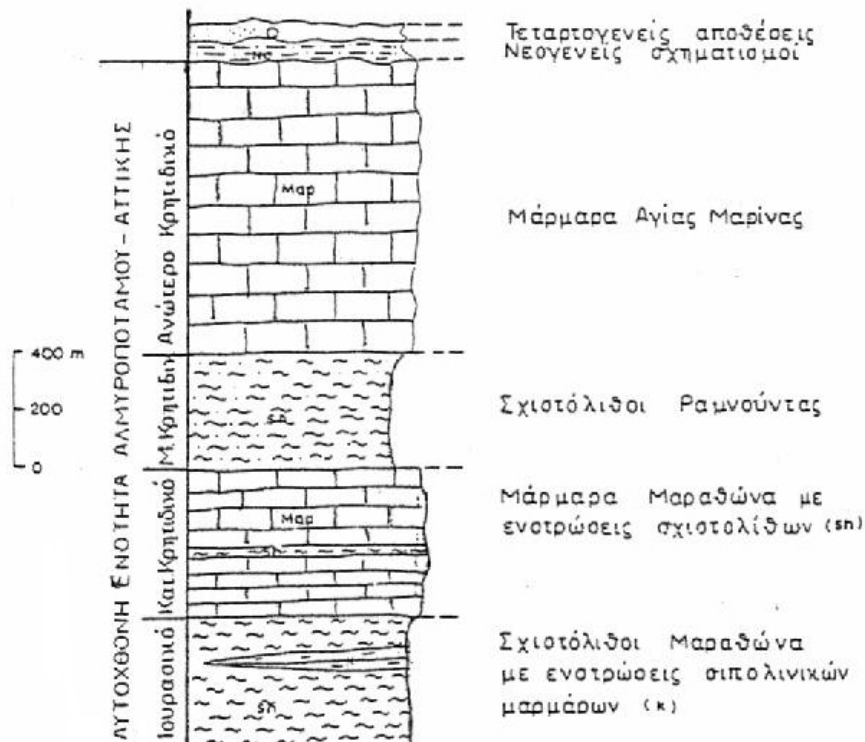
Βασικό στοιχείο της καταγραφής που επιχειρείται είναι η κατανόηση της γεωλογικής επιστήμης ως ζωντανού οργανισμού που παράγει συνεχώς νέα δεδομένα χάρις στην τεχνολογία και συνεπώς νέες θεωρήσεις.

- Στην αρχική θεώρηση του Κατσικάτσου (1971 - 1977) παρουσιάζονται οι απόψεις του για τη λιθοστρωματογραφική διάρθρωση της Αττικής - Ν. Εύβοιας, με την διατύπωση της άποψης πως στην περιοχή των μεταμορφωμένων της Αττικής εμφανίζονται 2 ζώνες τύπου "Εσωτερικών Ελληνίδων". Την πρώτη εξ αυτών, η οποία χαρακτηρίζεται σχετικά αυτόχθονη, την ονομάζει "Ζώνη Αττικής" και αποτελείται στη βάση από το "μεταμορφωμένο σύστημα Αττικής" τριαδικό - ιουρασικής ηλικίας με παραμόρφωση και μεταμόρφωση στο Ανατολικό Ιουρασικό. Το κομμάτι αυτό αντιστοιχεί στα κανονικά μεταμορφωμένα του Lepsius (πρόκειται για τον Richard Lepsius, γιο του Karl Richard Lepsius, πατέρα της Εγυπτιολογίας), δεχόμενος μάλιστα την ίδια με αυτόν στρωματογραφική διάρθρωση πάνω από το "μεταμορφωμένο σύστημα Αττικής" βρίσκεται το "Εολληνικό Κάλυμμα", το οποίο αποτελείται από φυλλίτες, σχιστόλιθους και χαλαζίτες με ενδιστρώσεις ηφαιστειακών πετρωμάτων, κρυσταλλικών ασβεστολίθων και σώματα σερπεντινιτών και αντιστοιχεί εν μέρει στην "Κατώτερη Ασβεστολιθική Βαθμίδα" και τους "Σχιστόλιθους των Αθηνών" του Lepsius. Τέλος, πάνω από το κάλυμμα αυτό βρίσκεται η Άνω Κρητιδική επίκλυση (Καμάριζα, Λαύριο, Πόρτο Ράφτη, Βραυρώνα, Δασκαλιό, λόφοι λεκανοπεδίου Αττικής) αντίστοιχη με την "Ανώτερη Ασβεστολιθική Βαθμίδα" του Lepsius. Τη δεύτερη ζώνη την ονομάζει "Ζώνη Αλμυροπόταμου" και την τοποθετεί σε Εύβοια και Βορειοανατολική Αττική, επωθημένη στην προηγούμενη σχετικά αυτόχθονη ζώνη και αποτελούμενη από εναλλαγές μαρμάρων και σχιστόλιθων με μετά - φλύσχη στην οροφή που επικάθεται σε Άνω - Τριαδικά μάρμαρα του Αγίου Γεωργίου Ευβοίας.

- Αργότερα, οι Κατσικάτσος κ.α (1986) ανασκευάζουν τις απόψεις που είχε διατυπώσει ο ίδιος μερικά χρόνια πριν και σε μια εργασία για τις "Εσωτερικές Ελληνίδες", υποστηρίζουν πλέον ότι οι παλαιότερα ορισθείσες ζώνες "Αττικής" και "Αλμυροπόταμου", συνιστούν πια ομόλογες ενότητες τύπου "Εξωτερικών Ελληνίδων". Αποτελούν την νότια απόληξη των ενοτήτων Ολύμπου - Όσσας και Κρανιάς - Ελασσόνας βορειότερα. 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 παλαιότερα υποστήριζε ο Κατσικάτσος.

- Στους γεωλογικούς χάρτες του Ι.Γ.Μ.Ε (φύλλα "Ραφήνα" και "Αλιβέρι") ο Κατσικάτσος και οι συνεργάτες του επανέρχονται μερικά χρόνια μετά (1990) και παρουσιάζοντας τη λιθοστρωματογραφική διάρθρωση της ΒΑ Αττικής - Ν Ευβοίας. Περιγράφοντας 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 Εύβοιας, εξελίσσονται στους αντίστοιχους σχηματισμούς του "Αλμυροπόταμου" με ηλικία από το Τριαδικό (μάρμαρα) μέχρι το Ηώκαινο (μετά -

φλύσσης). Την ενότητα αυτή ονομάζουν "αυτόχθονη ενότητα Αλμυροπόταμου - Αττικής" και στην οποία υπόκεινται τεκτονικά οι ενότητες των κυανοσχιστολίθων και των αμεταμόρφωτων της Πελαγονικής.



Σχήμα 10: Στρωματογραφική στήλη βορειοανατολικής Αττικής (Περιοχή βορειοδυτικού τμήματος του γεωλογικού φύλλου «Ραφήνα», κλίμακας 1:50.000, κατά Κατσικάτσου)

Σε αντίθεση με τις παρουσιασθείσες μελέτες, ο Clement στη διατριβή του (1983) για το χώρο της Αττικο-Βοιωτίας, μελετά 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".

Κατά σειρά για τις ενότητες αυτές αναφέρει:

- Η πρώτη ενότητα παρουσιάζει λιθοστρωματογραφική στήλη που αποτελείται από συχνές εναλλαγές μαρμάρων και σχιστολίθων με κύριες εμφανίσεις στο δυτικό και νότιο Πεντελικό και θεωρείται επωθημένη στη δεύτερη ενότητα.

- Η δεύτερη ενότητα αποτελείται από υποκείμενα μάρμαρα και υπερκείμενους σχιστόλιθους με ενδιαστρώσεις 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 χαρακτηριστικά αντίστοιχα με την Πελαγονική και εντάσσεται στις "Εσωτερικές Ελληνίδες".

Επανερχόμενος πάλι στα μεταμορφωμένα της Αττικής ο Παπανικολάου (1984,1986) τα διαχωρίζει σε τρεις γεωτεκτονικές ενότητες.

- Η ανώτερη είναι μεταμορφωμένη και αντιπροσωπεύεται από την ενότητα "Ολύμπου - Αλμυροπόταμου - Κερατέας" η οποία εμφανίζεται στη ΒΑ Αττική με ομόλογες εμφανίσεις σε Όλυμπο, Εύβοια και Σάμο και εντάσσεται στις "Εξωτερικές Ελληνίδες".

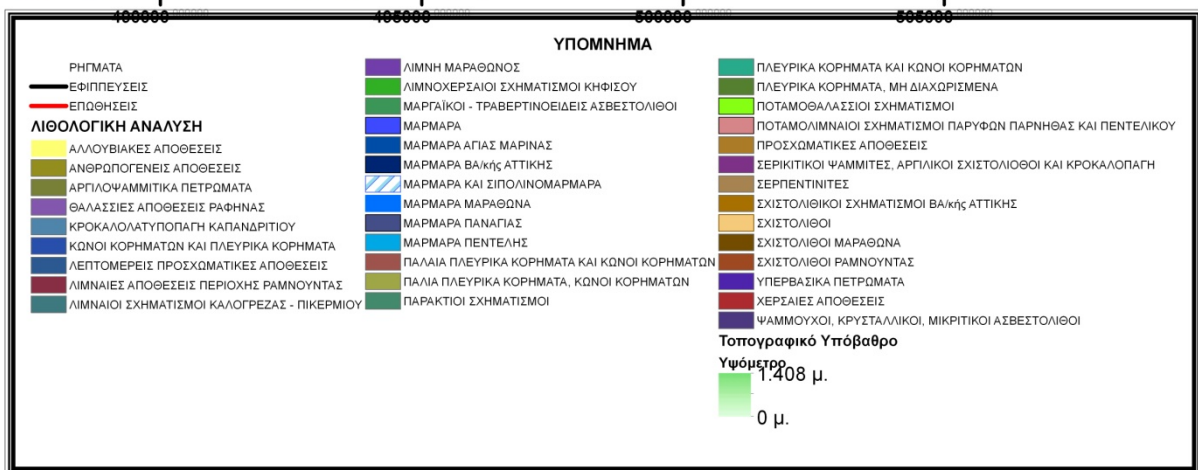
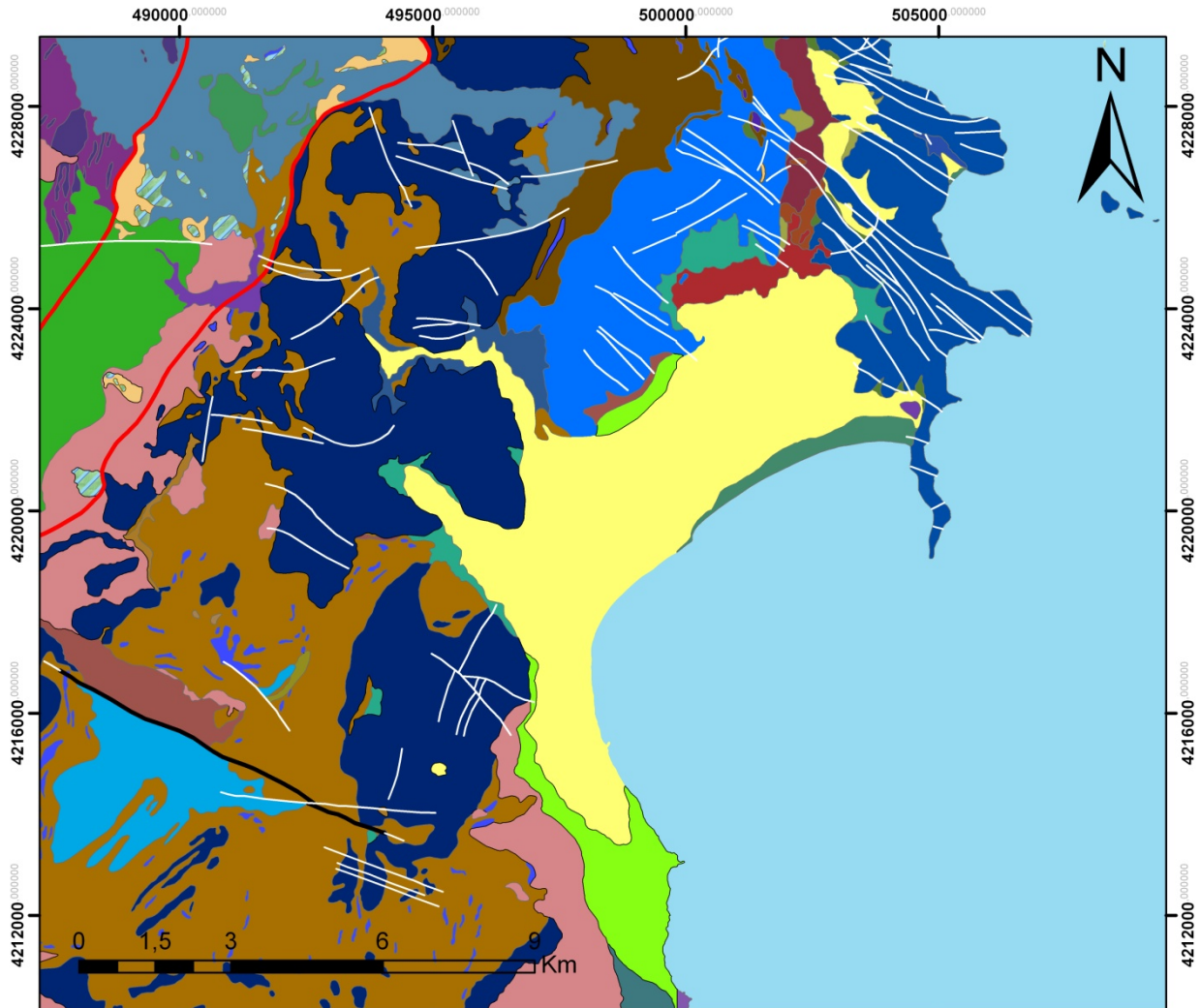
- Η "Ενότητα Αττικής" (σχετικά αυτόχθονο Πεντέλης - Υμηττού - Λαυρίου) παρουσιάζεται τεκτονικά υποκείμενη στην προηγούμενη και εντάσσεται στις "Εσωτερικές Ελληνίδες" αφού στρωματογραφικά δεν φαίνεται να υπερβαίνει το Κατώτερο Ιουρασικό.

- Η αλλόχθονη "Ενότητα Λαυρίου" υπέρκειται τεκτονικά της προηγούμενης και αποτελείται από το φυλλιτικό κάλυμμα λαυρίου και τους σχηματισμούς του λεκανοπεδίου Αθηνών. Στην ουσία συνιστά ένα τεκτονικό μίγμα (mélange) που περιλαμβάνει διαφορετικού βαθμού μεταμόρφωσης και ηλικίας πετρώματα, του οποίου υπέρκεινται Άνω Κρητιδικό ασβεστόλιθοι (ανθρακικά Λαυρίου και λόφοι λεκανοπεδίου Αττικής).

Οι εργασίες του Παπαδέα (1986, 1987, 1991), παρουσιάζουν τη στρωματογραφική διάρθρωση η οποία καλύπτει τόσο τη στενή όσο και την ευρύτερη περιοχή της Αττικής. Η συνθετική στρωματογραφική στήλη που παραθέτει χαρακτηρίζεται από συνεχείς εναλλαγές οριζόντων μαρμάρων και σχιστόλιθων - γνεύσιων, περιλαμβάνοντας μεταμορφωμένους σχηματισμούς με ηλικίες από το προ - Μέσο Λιθανθρακοφόρο μέχρι το Τριτογενές, που μεταβαίνουν πλευρικά στους μη μεταμορφωμένους σχηματισμούς της Πάρνηθας. Ακόμα αναφέρει τέσσερις κύριες ασυμφωνίες που σηματοδοτούν αντίστοιχα ορογενετικά γεγονότα του Βαρύσκιου και του Αλπικού κύκλου. Η πρώτη αναφέρεται στο Άνω - Μέσο Λιθανθρακοφόρο που εμφανίζεται στις περιοχές της λίμνης του Μαραθώνα, στα Β - ΒΑ της Πεντέλης καθώς και στο Λαύριο. Η τρίτη στο Τριαδικό - Ιουρασικό σε Λαύριο και Βάρη και η τέταρτη στο Άνω Κρητιδικό που εμφανίζεται στην Αγία Μαρίνα στη ΒΑ Αττική, στις δυτικές κλίσεις του Υμηττού αλλά και στο Λαύριο.

Τέλος, ο Λόζιος (1993) αναφέρει ότι στην περιοχή 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 υπέρκεινται τεκτονικά στην προηγούμενη. Στην ευρύτερη περιοχή εντοπίζεται και η ενότητα που αποτελείται από τους αμεταμόρφωτους σχηματισμούς της Πάρνηθας που είναι γνωστό ότι αντιπροσωπεύουν τμήματα της ενότητας της Ανατολικής Ελλάδας (Υποπελαγονική) και υπέρκεινται και αυτοί με τη σειρά τους στις δύο προηγούμενες μεταμορφωμένες ενότητες. Οι τρεις αυτές τεκτονικές ενότητες δομούν την περιοχή της ΒΑ Αττικής.

ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΧΑΡΤΗΣ



Χάρτης 2: Γεωλογικός χάρτης Αττικής, Περιοχή Μαραθώνα (Πηγή: ΙΓΜΕ)

5.1.2 Στρωματογραφία

Η περιγραφή της στρωματογραφίας της περιοχής μελέτης είναι ένα πολύτιμο δεδομένο στην κατανόηση της κίνησης των υπογείων υδάτων.

5.1.2.1 Μεταλτικοί Σχηματισμοί

Οι μεταλτικοί σχηματισμοί που εμφανίζονται στην ευρύτερη περιοχή μελέτης διακρίνονται στις αποθέσεις του Τεταρτογενούς και στα νεογενή ιζήματα (Φωτόπουλος Νίκος, 2004).

A. Τεταρτογενείς αποθέσεις

- Παράκτιοι σχηματισμοί που περιλαμβάνουν κυρίως θίνες, beach rocks και αποθέσεις από άμμους ή κροκάλες.

- Αλλουβιακές αποθέσεις με σημαντικό πολλές φορές πάχος, οι οποίες αποτελούνται από χαλαρά και ασύνδετα μεταξύ τους υλικά, τα οποία συνίστανται κυρίως από άμμους, κροκαλολατύπες, ερυθρογή, αργίλους, ιλύες και άλλα υλικά.

- Κώνοι κορημάτων και πλευρικά κορήματα, που αποτελούνται από ποικίλου μεγέθους λατύπες και κροκαλολατύπες με συνδετικό υλικό από ερυθρογή ή αμμούχες αργίλους. Στα ανώτερα τμήματα, τα οποία είναι πιο πρόσφατης ηλικίας, εμφανίζονται με τη μορφή χαλαρών αποθέσεων από ασύνδετες λατύπες. Οι κώνοι κορημάτων αναπτύσσονται στις θέσεις όπου καταγράφεται απότομη έξοδος χειμάρρων από τις ορεινές – ημιορεινές ζώνες από πεδινά τμήματα. Τα πλευρικά κορήματα αναπτύσσονται με τη μορφή διαδοχικών στρωμάτων, που αντιπροσωπεύουν διαδοχικές γενεές απόθεσης από συνεκτικούς σχηματισμούς παλαιότερης ηλικίας έως χαλαρούς σχηματισμούς νεότερης ηλικίας.

- Χερσαίες αποθέσεις που αποτελούνται κυρίως από ερυθρογή με περιορισμένες προσμίξεις από κροκάλες και κροκαλολατύπες ανθρακικής σύστασης και μικρού μεγέθους.

- Ποταμοθαλάσσιοι σχηματισμοί συνεκτικών κροκαλολατυποπαγών με παρεμβολές αργιλοαμμούχων υλικών (Πλειοπλειστόκαινο). (Φωτόπουλος, 2004)

B. Νεογενείς Αποθέσεις.

Σχηματισμός Καπανδριτίου (Κατώτερο - Ανώτερο Μειόκαινο, Κατώτερο Πλειόκαινο)

Συνίσταται κυρίως από ποικίλου μεγέθους χαλαρά κροκαλολατυποπαγή, με συμμετοχή μεγάλων τεμαχίων, παρουσιάζοντας ένα χαοτικό χαρακτήρα με έντονες μεταβολές των χαρακτηριστικών του από περιοχή σε περιοχή και από θέση σε θέση, με φάσεις που παρουσιάζουν απότομες μεταβάσεις, τόσο πλευρικά όσο και κατακόρυφα. Οι κροκάλες, που συνήθως παρουσιάζουν μεγάλο μέγεθος, αποτελούνται αποκλειστικά από μεταμορφωμένα πετρώματα, γεγονός που προϋποθέτει έντονη μεταφορική ικανότητα και έντονο ανάγλυφο από το περιθώριο των μεταμορφωμένων για την περίοδο του Αν. Μειόκαινου, οπότε και αποτέθηκαν. Αντίθετα, η σημερινή εικόνα του ανάγλυφου και οι συνθήκες είναι εντελώς διαφορετικές.

Εμφανίζεται επιφανειακά με μία διεύθυνση Β – Ν, από τη λίμνη του Μαραθώνα νότια, μέχρι την αναβαθμίδα, που αντιστοιχεί στα υψηλότερα σημεία της ΒΑ Αττικής, καλύπτοντας όλο το χώρο που παρεμβάλλεται ανάμεσα στην Πάρνηθα στα δυτικά και το μεταμορφωμένο υπόβαθρο. Στα ανατολικά εισχωρεί ακόμη βαθύτερα σε δύο ζώνες διεύθυνσης Α – Δ, μία στο ύψος του Γραμματικού και μία βόρεια από το Βαρνάβα, ή εμφανίζεται σε υπολειμματικές μορφές πάνω στο υπόβαθρο.

Σχηματισμός Λοιμικού (Κατώτερο - Ανώτερο Μειόκαινο)

Αποτελείται από κιτρινόφαιες ψαμμούχες μάργες, ψαμμίτες και κροκαλοπαγή, που εμφανίζονται με την μορφή μικρών ενδιαστρώσεων πάχους όχι μεγαλύτερο από 2-3 cm. Οι κροκάλες προέρχονται αποκλειστικά από μεταμορφωμένα πετρώματα και το μέγεθός τους δεν υπερβαίνει τα 5 cm. Το συνολικό πάχος του σχηματισμού δεν υπερβαίνει τα 50 cm και αντιπροσωπεύει λιμναίες αποθέσεις.

Εμφανίζεται στην ευρύτερη πεδινή έκταση, που περιλαμβάνεται ανάμεσα στην Ραμνούτα και το Κ. Σούλι και αναπτύσσεται κατά μήκος του ανατολικού περιθωρίου του μικρού ορεινού όγκου της Τεροκορυφής. Εξαπλώνεται γεωγραφικά μεταξύ των μαρμάρων της Αγ. Μαρίας και Μαραθώνα – Γραμματικού. (Φωτόπουλος, 2004)

5.1.2.2 Αλπικοί Σχηματισμοί

Μάρμαρα Αγ. Μαρίας (Ανώτερο Κρητιδικό)

Πρόκειται για μάρμαρα τεφρά, υπόλευκα έως λευκά, μεσοστρωματώδη έως παχυστρωματώδη. Στη βάση τους, κατά θέσεις, παρατηρούνται silex με ενίοτε σημαντικό πάχος, τα οποία συνοδεύονται και από παρεμβολές λατυποπαγών μαρμάρων. Προς τα βόρεια μεταβαίνουν σε κυανά ταινιωτά μάρμαρα έντονα σχιστοποιημένα. Είναι παχυστρωματώδη και ολοκρυσταλλικά έως μεσοκρυσταλλικά. Η διαφορά αυτή στην κρυσταλλικότητά τους δημιουργεί στα μάρμαρα χαρακτηριστικές αποχρώσεις. Στις διαβρωμένες επιφάνειές τους παρατηρούνται πολλά απολιθώματα, μεταξύ των οποίων και θραύσματα ρουδιστών.

Εμφανίζεται στο βόρειο τμήμα της περιοχής μελέτης, στην παραλιακή ζώνη της Αγ. Μαρίας και στο νότιο περιθώριο του Ευβοϊκού κόλπου και αποτελούν τα ανώτερα μέλη της αυτόχθονης σειράς μεταμορφωμένων σχηματισμών της βορειοανατολικής Αττικής. Το ορατό πάχος του σχηματισμού είναι περίπου 1000 m.

Σχιστόλιθοι Ραμνούτας (Μέσο Κρητιδικό)

Πρόκειται για μοσχοβιτικούς, χλωριτικούς, χαλαζιακούς και ασβεστιτικούς σχιστόλιθους με μερικές ενστρώσεις σιπολικών και κλασικών μαρμάρων. Εμφανίζονται με την μορφή συνεχούς παρεμβολής μεταξύ των μαρμάρων Αγ. Μαρίας και των μαρμάρων Μαραθώνα – Γραμματικού και καλύπτονται κατά το μεγαλύτερο μέρος τους από νεογενείς και τεταρτογενείς σχηματισμούς.

Μάρμαρα Μαραθώνα – Γραμματικού – ΒΑ Αττικής (Κατώτερο Κρητιδικό)

Πρόκειται για κυανά ή λευκά μικροκρυσταλλικά ή λεπτοστρωματώδη έως μεσοστρωματώδη μάρμαρα, τα οποία πολλές φορές μεταπίπτουν σε περισσότερο σκουρόχρωμα ταινιωτά ή έντονα σχιστοποιημένα λευκά με διάσπαρτα στίγματα οξειδίων του σιδήρου. Σε αρκετές περιπτώσεις και κυρίως κοντά στις επαφές με το σύστημα των σχιστόλιθων ή γενικά με τους κατώτερους στρωματογραφικούς ορίζοντες, εμφανίζονται μάρμαρα με silex, τα οποία κατά θέσεις αποκτούν σημαντικό πάχος, που πολλές φορές φτάνει μέχρι τα 100 m. Αυτό παρατηρείται στις περιοχές Στράτης, Τεροκορυφής, Αγριλιάς, με τα silex να σχηματίζουν ρυθμικές ενδιαστρώσεις από ερυθρωπούς ορίζοντες με μεταβαλλόμενη συχνότητα και πάχος που κυμαίνεται από λίγα mm έως 10 cm ή σπανιότερα και περισσότερα. Πολλές φορές εναλλάσσονται με τις υπόλοιπες φάσεις των μαρμάρων ενώ παρατηρούνται και πλευρικές μεταβάσεις από τον τύπο στον άλλο. Σε ελάχιστες περιπτώσεις παρατηρήθηκαν και οριζοντες λατυποπαγών μαρμάρων να εμπλέκονται κυρίως με τα ανώτερα τμήματα των μαρμάρων με silex. (Φωτόπουλος, 2004)

Σχιστόλιθοι Μαραθώνα (Ιουρασικό)

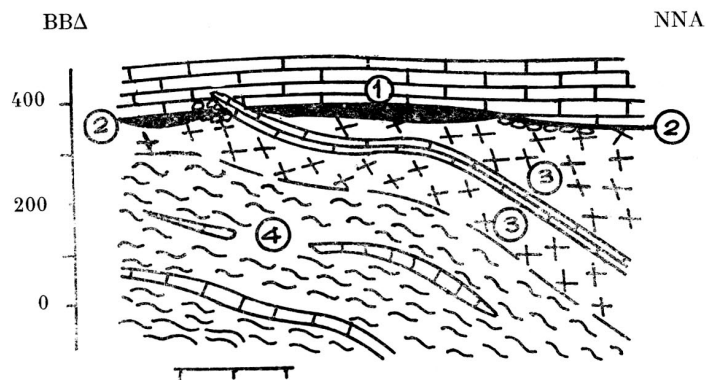
Το σύστημα από χλωριτικούς, μαρμαρυγιακούς, ασβεστιτικούς και επιδοτιτικούς σχιστόλιθους καθώς και από χαλαζιαστριούχα πετρώματα ποικίλης σύστασης και μεταβασίτες. Τα χαλαζιαστριούχα πετρώματα και οι μεταβασίτες δεν παρουσιάζουν καλή γεωμετρική ανάπτυξη, με αποτέλεσμα να εντοπίζονται σε συγκεκριμένες περιοχές, με κύρια ανάπτυξη στην βόρεια απόληξη του σχηματισμού προς την περιοχή της παραλίας του Βαρνάβα. Νοτιότερα απαντώνται πολύ μικρότερες εμφανίσεις, οι οποίες αναπτύσσονται κυρίως στο ανατολικό περιθώριο κοντά στην επαφή με τα «Μάρμαρα Μαραθώνα – Γραμματικού».

Η εμφάνιση του σχιστόλιθου καταλαμβάνει μία σημαντική έκταση από το κεντρικό και βόρειο τμήμα της περιοχής και εξαπλώνεται από την περιοχή του Μαραθώνα στα νότια, μέχρι το δρόμο που οδηγεί στην παραλία του Βαρνάβα στα βόρεια. Αποτελούν το υπόβαθρο των «Μαρμάρων Μαραθώνα – Γραμματικού».

Εντός των σχιστόλιθων αναπτύσσεται κατά θέσεις το λεγόμενο «Ενδιάμεσο Μάρμαρο» ιουρασικής ηλικίας. Αποτελείται κυρίως από λευκά ή κυανά, μη καθαρά μάρμαρα, που εξελίσσονται τις περισσότερες φορές σε σκουρόχρωμα σιπολινομάρμαρα ή σε μάρμαρα με λεπτές ενδιστρώσεις silic. Ο ίδιος ο ορίζοντας πολλές φορές δε διατηρεί το χαρακτήρα του ενιαίου σχηματισμού αλλά παρουσιάζει μεταβάσεις από διαδοχικές μικρές εναλλαγές μαρμάρων και ασβεστιτικών σχιστόλιθων.

Πρόκειται για πολυπτυχωμένο ορίζοντα, ο οποίος αναπτύσσεται κοντά στις επαφές των σχιστόλιθων με τις ανθρακικές ακολουθίες, σχηματίζοντας πολλές φορές διαδοχικές ενδιστρώσεις εξαιτίας των ισοκλινών πτυχών. Συνήθως αποτελεί τμήμα του ορίζοντα των σχηματισμών στους οποίους συναντάται, είτε αποτελεί μικρότερους ανεξάρτητους ορίζοντες. Σε κάθε περίπτωση, η παρουσία του συνδέεται άμεσα με την πολύπλοκη τεκτονική δομή και τα φαινόμενα που τη συνοδεύουν. Το σύννηθες πάχος του ορίζοντα είναι 2 – 5 m και σε ορισμένες περιπτώσεις υπερβαίνει τα 10 m.

Η κυριότερη επιφανειακή εμφάνιση του σχηματισμού και κατά μήκος του δρόμου Μαραθώνας – Άνω Σούλι, με διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ και επιμήκη ανάπτυξη. Πρόκειται για χαρακτηριστική αντικλινική μορφή, το ανώτερο τμήμα της οποίας έχει διαβρωθεί, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται δύο επιμήκεις, σχεδόν παράλληλες λωρίδες. Άλλες, σχετικά μεγάλες, επιφανειακές εμφανίσεις του σχηματισμού καταγράφονται ανατολικά – βόρεια του Γραμματικού και νότια της λίμνης του Μαραθώνα στις ζώνες εκατέρωθεν του Πετρορέματος. (Φωτόπουλος, 2004)



Σχήμα 11:Γεωλογική τομή της περιοχής Καλέντζι Μαραθώνα Υπόμνημα 1: Ανώτερο μάρμαρο Λαυρίου άνω λιθανθρακοφόρο 2.επαφή ασυμφωνίας (κροκαλοπαγή και μεταλλεύματα P,B,G) 3.Μετατόφφος με ενστρώσεις μαρμάρων: κάτω-μέσο λιθανθρακοφόρο 4. Τεφροκυάνοι σχιστόλιθοι; Κάτω-μέσο λιθανθρακοφόρο

5.1.3 Τεκτονική

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.

Τα γενικά χαρακτηριστικά της περιοχής είναι:

Οι μεγάλες ρηξιγενείς ζώνες έχουν διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ και διατάσσονται παράλληλα με τη γραμμή του νότιου Ευβοϊκού.

Η κλίση των ρηξιγενών επιφανειών είναι ΒΑ δημιουργώντας μια σταδιακή κλιμακωτή καταβύθιση προς τα ΒΑ, δηλαδή προς την πλευρά του νότιου Ευβοϊκού κόλπου.

Μικρότερα ρήγματα, είτε της ίδιας διεύθυνσης, είτε ΒΑ-ΝΔ, αναπτύσσονται ανάμεσα στις μεγαλύτερες ζώνες τεμαχίζοντας την περιοχή σε ακόμη μικρότερα ρηξιτεμάχια.

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 κλιτύς προς την απότομη πλευρά του ανερχόμενου ρηξιτεμάχου, 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.

Στην περιοχή μελέτης η δυτική επαφή του συστήματος «Μάρμαρα Μαραθώνα» τα φέρνει υπερκείμενα του συστήματος των Σχιστόλιθων Μαραθώνα αντιπροσωπεύοντας το κανονικό σκέλος μιας μεγάλης αντικλινικής δομής. Η επαφή αυτή χαρακτηρίζεται από

μεταβατικά στρώματα τα οποία αποτελούνται από εναλλαγές μαρμαρυγιακών σχιστόλιθων, σιπολινών και μαρμάρων με silex. Η δυτική επαφή των Σχιστόλιθων με τα αντίστοιχα μάρμαρα παρουσιάζει μάρμαρα υποκείμενα των σχιστόλιθων (Σπιθάρι) εξαιτίας των πτυχώσεων.

Στο ύψος της Τεροκορυφής, κάτω από τα μάρμαρα και με τη μορφή γεωλογικού παραθύρου, παρατηρούνται δύο μικρές εμφανίσεις από το σύστημα Σχιστόλιθων μέσα στο οποίο εμπλέκονται και ορισμένες τεκτονικές σφήνες από σερπεντινίτες.

Στη ΝΑ πλευρά οι επαφές ανάμεσα στα μάρμαρα και το σύστημα των σχιστόλιθων καθορίζονται κυρίως από ρήγματα ενώ στην άλλη παρουσιάζουν τις περισσότερες φορές χαρακτήρα μετάβασης με σιπολινομάρμαρα κοντά στην επαφή.

Στα μάρμαρα Αγίας Μαρίνας παρατηρούνται ισοκλινείς μακροπτυχές, οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα να μην μπορεί να καθοριστεί η λιθοστρωματογραφική ακολουθία, εξαιτίας των πολλών επαναλήψεων.

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 (Αγριλίκι – Παλαιό Μοναστήρι), Α-Δ (Αγριλίκι – 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)

5.2 Υδρογεωλογικές Συνθήκες

Για τον καθορισμό των υδρογεωλογικών συνθηκών μιας περιοχής είναι απαραίτητη η επίγνωση του γεωλογικού υποβάθρου, καθώς τα χαρακτηριστικά των επιμέρους σχηματισμών καθορίζουν την υδρογεωλογική συμπεριφορά της. Οι διάφοροι υδρογεωλογικοί χαρακτήρες που παρουσιάζει μια περιοχή αποτελούν άμεση συνάρτηση μιας βασικής ιδιότητας που παρουσιάζουν τα πετρώματα που συναπαρτίζουν το γεωλογικό υπόβαθρο. Αυτή δεν είναι άλλη από την ικανότητα των πετρωμάτων να επιτρέπουν την κυκλοφορία και την αποθήκευση του νερού στα πρωτογενή ή δευτερογενή διάκενα που υπάρχουν στη μάζα τους. Η ιδιότητα αυτή εξαρτάται από δύο παραμέτρους, το πορώδες και την υδροπερατότητα.

Από υδρογεωλογικής άποψης, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το ενεργό πορώδες, καθώς από το ολικό πορώδες μόνο το νερό που κινείται στους ελεύθερους πόρους των πετρωμάτων μπορεί να αποληφθεί με άντληση.

Ενώ η υδροπερατότητα αφορά μια εγγενή ιδιότητα των πετρωμάτων και των γεωλογικών σχηματισμών σχετικά με τη διακίνηση του νερού δια μέσου αυτών. Έτσι στα κοκκώδη πετρώματα και σχηματισμούς η περατότητα οφείλεται στο πρωτογενές πορώδες, δηλαδή στα κενά που υπάρχουν μεταξύ των κόκκων των ίδιων των

πετρωμάτων. Άρα, γίνεται αντιληπτό πως το πρωτογενές πορώδες επηρεάζεται κυρίως από το σχήμα και τη διάταξη των κόκκων. Από την άλλη στα συμπαγή ή ρωγμώδη πετρώματα η περατότητα οφείλεται στο δευτερογενές πορώδες τους το οποίο είναι συνάρτηση της πυκνότητάς τους και του μεγέθους των τεκτονικών και στρωματογραφικών ασυνεχειών τους (ρωγμές, διαρρήξεις, μεσοστρωματικά διάκενα, στρώσεις κ.α) καθώς και της πυκνότητας και μεγέθους των καρστικών έγκοιλων στα ανθρακικά πετρώματα.

Η δυνατότητα του νερού να διηθηθεί, να διακινήθει και να αποθηκευθεί στα διάκενα των γεωλογικών σχηματισμών, τους κατατάσσει και σύμφωνα με το βαθμό υδροπερατότητάς τους. Έτσι, οι γεωλογικοί σχηματισμοί διακρίνονται σε υδροπερατούς, ημιπερατούς και υδροστεγανούς. Η κατάταξη αυτή αποκτά φυσικό και μαθηματικό νόημα γιατί για τους υδροπερατούς σχηματισμούς ο δείκτης υδροπερατότητας παίρνει τιμές $K > 10^{-5}$ m/sec, για τους υδροστεγανούς $K < 10^{-7}$ m/sec και $10^{-7} < K < 10^{-5}$ m/sec ημιπερατοί σχηματισμοί, που επιτρέπουν την περιορισμένη κυκλοφορία του νερού δια μέσω αυτών. (Φωτόπουλος, 2004)

5.2.1 Υδρολιθική κατάταξη γεωλογικών σχηματισμών

Η υδρολιθολογική κατάταξη των γεωλογικών σχηματισμών που συμμετέχουν στη δομή της περιοχής μελέτης γίνεται με βάση το πορώδες και την υδροπερατότητα τους.

Όσον αφορά το πορώδες μπορούν να διακριθούν τρεις βασικές κατηγορίες σχηματισμών ανάλογα με τον τρόπο κυκλοφορίας του νερού στη μάζα τους.

- Οι κοκκώδεις σχηματισμοί: Η κυκλοφορία του νερού στη μάζα τους γίνεται μέσω του πρωτογενούς πορώδους, δηλαδή στα διάκενα που δημιουργούνται μεταξύ των κόκκων των πετρωμάτων. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα πετρώματα που απαρτίζουν τις προσχώσεις του τεταρτογενούς και τις αποθέσεις του νεογενούς, ανεξαρτήτως του βαθμού υδροπερατότητας που παρουσιάζουν. Πρόκειται για τους παράκτιους σχηματισμούς, τις αλλουβιακές αποθέσεις, τα πλευρικά κορήματα και τους κώνους κορημάτων, τα τεκτονικά λατυποπαγή και το σχηματισμό του Λοιμικού. Δεν συμπεριλαμβάνονται τα πετρώματα τα οποία είναι αδιαπέρατα. Πρόκειται δηλαδή για τις αργίλους και τους αργιλοπηλούς σε αμιγή μορφή και τα κοκκινοχώματα.

- Ρωγμώδεις σχηματισμοί: Η κυκλοφορία του νερού στη μάζα τους γίνεται μέσω του δευτερογενούς πορώδους τους, δηλαδή μέσα απ το σύνολο των ασυνεχειών που παρουσιάζει η μάζα τους όπως ρήγματα, διακλάσεις, μεσοστρωματικά διάκενα κλπ. Για τα ανθρακικά πετρώματα το δευτερογενές πορώδες καθορίζεται κυρίως από το καρστικό δίκτυο που αναπτύσσεται στη μάζα τους. Στην κατηγορία αυτή ανήκει το σύνολο των ανθρακικών πετρωμάτων που εμφανίζεται στην περιοχή μελέτης, δηλαδή τα μάρμαρα Αγίας Μαρίνας, τα μάρμαρα Μαραθώνα, τα μάρμαρα Γραμματικού, τα μάρμαρα Διονύσου καθώς και το ενδιάμεσο μάρμαρο.

- Αδιαπέρατοι σχηματισμοί: Είναι οι σχηματισμοί των οποίων η δόμηση της μάζας τους δεν επιτρέπει τη κυκλοφορία του νερού και το ενεργό πορώδες τους πρακτικά θεωρείται μηδενικό. Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται από τους κοκκώδεις σχηματισμούς οι αμιγείς άργιλοι, αργιλοπηλοί και τα κοκκινοχώματα και από τους ρωγμώδεις σχηματισμούς το σύνολο των σχιστόλιθων (σε αμιγή μορφή) που εμφανίζονται στην περιοχή μελέτης.

Όσον αφορά την υδροπερατότητα, η οποία αποτελεί την πλέον βασική υδρογεωλογική ιδιότητα των πετρωμάτων, στην περιοχή μελέτης μπορούν να διακριθούν οι ακόλουθοι υδρολιθολογικοί τύποι:

Υδροπερατοί σχηματισμοί: Οι υδροπερατοί σχηματισμοί της περιοχής μελέτης μπορούν να διακριθούν σε δύο υποκατηγορίες, σε αυτούς που παρουσιάζουν υψηλή και σε αυτούς που παρουσιάζουν μέτρια έως χαμηλή υδροπερατότητα.

A) Σχηματισμοί υψηλής υδροπερατότητας: Στους σχηματισμούς αυτούς περιλαμβάνονται τα ανθρακικά πετρώματα που εμφανίζονται στην περιοχή μελέτης. Πρόκειται για τα μάρμαρα Αγίας Μαρίνας, τα μάρμαρα Μαραθώνα, τα μάρμαρα Γραμματικού και τα μάρμαρα Διονύσου. Επίσης στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνεται το ενδιάμεσο μάρμαρο αλλά μόνο στις περιπτώσεις που εμφανίζει σημαντική ανάπτυξη και ικανοποιητικό πάχος.

Η υψηλή υδροπερατότητα των καρστικών σχηματισμών αποδίδεται στην έντονη τεκτονική καταπόνηση και στην παρουσία ρωγματώσεων σε όλο το ανάπτυσμά τους, στον κατακερματισμό των πετρωμάτων από πυκνό δίκτυο ρωγμών και διακλάσεων διαφόρων διευθύνσεων και στην καρστική διεργασία που έχουν υποστεί με αποτέλεσμα τη δημιουργία καρστικών εγκοίλων και αγωγών.

Στην κατηγορία των σχηματισμών υψηλής υδροπερατότητας κατατάσσονται επίσης οι παράκτιοι σχηματισμοί (άμμοι, χαλίκια, θίνες) του τεταρτογενούς, χωρίς όμως να παρουσιάζουν ιδιαίτερο υδρογεωλογικό ενδιαφέρον.

B) Σχηματισμοί μέτριας έως χαμηλής υδροπερατότητας: Στους σχηματισμούς αυτούς περιλαμβάνονται οι αλλουβιακές αποθέσεις και τα κορήματα του τεταρτογενούς καθώς και τα τεκτονικά λατυποπαγή και ο νεογενής σχηματισμός του Λοιμικού. Η υδροπερατότητα των σχηματισμών αυτών οφείλεται στα πετρώματα από τα οποία απαρτίζονται όπως οι αμιγείς άμμοι και τα χαλίκια καθώς και οι ψαμμίτες και τα λατυποκροκαλοπαγή τα οποία είναι πετρώματα υδροπερατά έως λίαν υδροπερατά. Η συμμετοχή όμως στους σχηματισμούς αυτούς, συνήθως με τη μορφή προσμίξεων ή ενδιαστρώσεων και υδροστεγανών πετρωμάτων όπως άργιλοι, ιλύες και πηλοί περιορίζουν την υδροπερατότητα των σχηματισμών και τους καθιστούν μέτριας έως χαμηλής υδροπερατότητας.

Υδροστεγανοί σχηματισμοί: Στους σχηματισμούς αυτούς περιλαμβάνονται τα κοκκινοχώματα των τεταρτογενών αποθέσεων και οι σχιστόλιθοι Ραμνούνας, Μαραθώνα και Διονύσου. Η υδροπερατότητα των σχηματισμών αυτών είναι τόσο μικρή ώστε πρακτικά να κατατάσσονται στην κατηγορία των υδροστεγανών. Στους σχιστόλιθους είναι δυνατόν να υπάρχει περιορισμένης έκτασης κυκλοφορία νερού όχι όμως σε βαθμό που να επηρεάζει την υδρολιθολογική τους κατάταξη (Φωτόπουλος, 2004).

5.2.2 Ανάπτυξη υπόγειας υδροφορίας

Η ανάπτυξη της υπόγειας υδροφορίας στους γεωλογικούς σχηματισμούς αποδίδεται στην ιδιότητά τους να επιτρέπουν την αποθήκευση νερού στα πρωτογενή και δευτερογενή διάκενά τους.

Στην περιοχή μελέτης μπορούν να διακριθούν δύο διαφορετικοί τύποι υπόγειων υδροφόρων:

- Οι καρστικοί υδροφόροι που αναπτύσσονται στα ανθρακικά πετρώματα.
- Οι προσχωματικοί υδροφόροι που αναπτύσσονται στις τεταρτογενείς αποθέσεις και στους σχηματισμούς του νεογενούς.

Στη συνέχεια περιγράφονται οι συνθήκες διακίνησης του νερού στους επί μέρους τύπους υδροφόρων και αναλύονται τα χαρακτηριστικά τους καθώς και το υδρογεωλογικό ενδιαφέρον που παρουσιάζουν (Φωτόπουλος, 2004).

5.2.2.1 Καρστικοί Υδροφόροι

Οι καρστικοί υδροφόροι αναπτύσσονται στα ανθρακικά πετρώματα που εμφανίζονται στην περιοχή μελέτης, δηλαδή στα μάρμαρα Αγίας Μαρίνας, του Μαραθώνα, του Γραμματικού και στον σχηματισμό των ενδιάμεσων μαρμάρων τα οποία καταγράφονται ως ιδιαίτερη περίπτωση λόγω της μικρής έκτασης που καταλαμβάνουν (Φωτόπουλος, 2004).

Καρστικός σχηματισμός μαρμάρων Αγ. Μαρίνας

Ο σχηματισμός των μαρμάρων Αγ. Μαρίνας αναπτύσσεται στο ΒΑ άκρο της περιοχής μελέτης. Πρόκειται για μάρμαρα μεσοστρωματώδη έως παχυστρωματώδη στα οποία κατά θέσεις παρατηρούνται παρεμβολές λατυποπαγών μαρμάρων τα οποία προς τα βόρεια μεταβαίνουν σε ταινιωτά μάρμαρα συχνά έντονα σχιστοποιημένα.

Η τεκτονική δραστηριότητα είναι εντονότατη σε όλη την έκταση εμφάνισης του σχηματισμού. Πρόκειται για μια συστοιχία σχεδόν παράλληλων ρηγμάτων με διεύθυνση ΝΑ-ΒΔ τα οποία διατέμνονται από πολύ μικρότερο αριθμό ρηγμάτων με διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ. Η καρστικοποίηση του σχηματισμού είναι επίσης πολύ έντονη και καταγράφεται από την παρουσία εξωκαρστικών μορφών.

Πρόκειται για καρστικό σύστημα πλήρως ανοικτό προς τη θάλασσα. Η βόρεια, ανατολική και νότια πλευρά του αναπτύγματος των μαρμάρων είναι σε επαφή με τη θάλασσα του Ευβοϊκού κόλπου και του όρμου του Μαραθώνα. Η δυτική πλευρά είναι σε επαφή με ημιπερατούς σχηματισμούς των νεογενών και τεταρτογενών αποθέσεων καθώς και με τους υδροστεγανούς σχιστόλιθους της Ραμνούντας οι οποίοι αποτελούν και το στεγανό υπόβαθρό τους.

Η έκταση της επιφανειακής εμφάνισης των μαρμάρων της Αγ. Μαρίνας είναι 14 km². Σύμφωνα με υπολογισμούς ο όγκος των βροχοπτώσεων που δέχεται είναι 7,3 x 10⁶ m³/έτος. Από την ποσότητα αυτή ποσοστό 55% ή 4,1 x 10⁶ m³/έτος κατεισδύουν στον όγκο των μαρμάρων και εμπλουτίζουν τον καρστικό υδροφόρο ορίζοντα.

Η καρστική υδροφορία, λόγω της άμεσης και σε μεγάλη έκταση επικοινωνία του συστήματος με τη θάλασσα, έχει υποστεί έντονη υφαλμύριση. Η πλήρης υφαλμύριση του καρστικού σχηματισμού εκφράζεται άμεσα από τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των νερών που αναβλύζουν στο μέτωπο των πηγών της Δρακονέρας. (Φωτόπουλος, 2004)

Καρστικό σύστημα μαρμάρων Μαραθώνα

Ο σχηματισμός των μαρμάρων Μαραθώνα αναπτύσσεται στο βόρειο τμήμα της περιοχής μελέτης με επίμηκες σχήμα διεύθυνσης Β-Ν που αρχίζει από το βόρειο-βορειοδυτικό τμήμα του κάμπου του Μαραθώνα και φθάνει μέχρι την περιοχή Λιμνιώνας στον Ευβοϊκό κόλπο. Πρόκειται για μάρμαρα λεπτοστρωματώδη έως παχυστρωματώδη με μικρές διαστρώσεις πυριτόλιθων και ενστρώσεις δολομιτικών μαρμάρων και σχιστόλιθων.

Ο τεκτονισμός του σχηματισμού είναι έντονος και ιδιαίτερα στο βόρειο τμήμα του. Εκδηλώνεται με ρήγματα με διεύθυνση σχεδόν Α-Δ που διατέμνονται από μικρό αριθμό ρηγμάτων με διεύθυνση Β-Ν.

Η καρστικοποίηση του σχηματισμού είναι έντονη και εκφράζεται με εξωκαρστικές μορφές όπως γλυφές και μικρές καρστικές ταπεινώσεις.

Το σύστημα είναι κατά μικρό τμήμα του ανοικτό προς τη θάλασσα στο βόρειο άκρο της εμφάνισής του. Στην υπόλοιπη περίμετρο του περιβάλλεται κυρίως από υδροστεγανούς αλλά και ημιπερατούς σχηματισμούς. Όλη η δυτική πλευρά του και ένα μικρό τμήμα της βορειοανατολικής, είναι σε επαφή με τους υποκείμενους στρωματογραφικά υδροστεγανούς σχιστόλιθους της Ραμνούντας. Όλη η νότια πλευρά του καθώς και τμήμα της δυτικής είναι σε επαφή με σχηματισμούς ημιπερατούς έως μέτρια υδροπερατούς αποτελούμενους από τεταρτογενείς και νεογενείς αποθέσεις.

Η έκταση της επιφανειακής εμφάνισης του σχηματισμού είναι 20,5 km². Σύμφωνα με τους υπολογισμούς που έχουν γίνει (Μελλισάρης-Σταυρόπουλος, 1999) ο όγκος των βροχοπτώσεων που δέχεται είναι 11,3 x 10⁶ m³/έτος. Από την ποσότητα αυτή των βροχοπτώσεων στον όγκο των μαρμάρων εκτιμάται ότι κατεισδύουν 6,2 x 10⁶ m³/έτος και εμπλουτίζουν τον καρστικό υδροφόρο ορίζοντα.

Στο N-NA άκρο της εμφάνισης του σχηματισμού εκδηλώνεται το μέτωπο των αναβλύσεων των πηγών Κάτω Σουλίου. Σύμφωνα με υδρομετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της μελέτης των Μελισσάρη-Σταυρόπουλου (1999) η συνολική μέση ετήσια παροχή των πηγών είναι 13 560 000 m³/έτος. Πρόκειται για υφάλμυρες πηγές τα νερά των οποίων παρουσιάζουν συγκεντρώσεις χλωριόντων που κυμαίνονται από 728 ppm έως 1924 ppm.

Η ετήσια διακύμανση των παροχών των πηγών του Κάτω Σουλίου υποδηλώνουν ότι πρόκειται για καρστικό σύστημα που βρίσκεται στην ώριμη φάση του και στο οποίο έχουν ολοκληρωθεί οι κύριες διαδικασίες καρστικοποίησης. Η υψηλή περιεκτικότητα του νερού των πηγών σε χλωρίοντα υποδηλώνει ότι το καρστικό σύστημα υπόκειται στην διαδικασία υφαλμύρισης των νερών του.

Καρστικός σχηματισμός μαρμάρων Γραμματικού

Ο σχηματισμός των μαρμάρων του Γραμματικού καταλαμβάνει το δυτικό τμήμα της περιοχής μελέτης. Πρόκειται για μάρμαρα λεπτοστρωματώδη έως μεσοστρωματώδη, αδροκρυσταλλικά που κατά θέσεις μεταπίπτουν σε σιπολινομάρμαρα και ασβεστιτικούς σχιστόλιθους.

Ο τεκτονισμός του σχηματισμού είναι έντονος και εκφράζεται κυρίως από σειρά ρηγμάτων τα οποία δεν έχουν ένα συγκεκριμένο και επικρατούντα προσανατολισμό, αλλά παρουσιάζουν διευθύνσεις κυρίως NA-BΔ, A-Δ και ΝΔ-ΒΑ.

Η καρστικοποίηση του σχηματισμού είναι έντονα ανεπτυγμένη και εκφράζεται με εξωκαρστικές μορφές όπως ο γλυφές και καρστικές ταπεινώσεις και εσωκαρστικές μορφές όπως ο καρστικός αγωγός που καταγράφεται στις πηγές της Οινόης. Οι συγκεκριμένες πηγές είναι και οι μοναδικές μέσω των οποίων εκφορτίζεται η καρστική υδροφορία του συστήματος. Σύμφωνα με υδρομετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της μελέτης των Μελισσάρη-Σταυρόπουλου (1999) η συνολική μέση ετήσια παροχή των πηγών είναι 1 152 000 m³/έτος

Το σύστημα είναι κλειστό προς τη θάλασσα και δεν υπάρχουν ενδείξεις υφαλμύρισής του.

Σχηματισμός ενδιάμεσων μαρμάρων

Τα ενδιάμεσα μάρμαρα παρουσιάζονται με τη μορφή μικρών έως σημαντικών ενδιαστρώσεων σε όλες τις εμφανίσεις των σχιστόλιθων. Η εμφάνιση καρστικής υδροφορίας στο σχηματισμό τους εξαρτάται από την έκταση της εμφάνισής τους και κυρίως από τις συνθήκες εμπλουτισμού τους.

5.2.2.2 Υδροφόροι Προσχωματικών Αποθέσεων

Πρόκειται για τους υδροφόρους που αναπτύσσονται στους σχηματισμούς των τεταρτογενών και των νεογενών αποθέσεων. Οι σχηματισμοί αυτοί χαρακτηρίζονται στο σύνολό τους από ανομοιομορφία στην εναλλαγή λιθολογικών τύπων και στην στρωματογραφική επαλληλία. Συνήθως παρατηρούνται συχνές εναλλαγές στρωμάτων από αργίλους, άμμους, χάλικες, αμμούχες αργίλους, μάργες, κροκαλοπαγή και ψαμμίτες.

Η ανάπτυξη υδροφόρων οριζόντων καθορίζεται από το βαθμό επικράτησης των υδροπερατών ή ημιπερατών υλικών όπως οι άμμοι, χάλικες, κροκαλοπαγή και ψαμμίτες σε σχέση με τα υδροστεγανά πετρώματα όπως οι άργιλοι, μάργες κλπ.

Η διακίνηση του νερού στον όγκο τους οφείλεται στο πρωτογενές πορώδες τους, δηλαδή στα διάκενα μεταξύ των κόκκων των πετρωμάτων.

Υδροφορία τεταρτογενών αποθέσεων

Οι τεταρτογενείς αποθέσεις μπορούν να διακριθούν στις πρόσφατες όπως είναι οι αλλουβιακές αποθέσεις και οι παράκτιοι σχηματισμοί και στις παλαιότερες (πλειστοκαινικές αποθέσεις). Οι πρόσφατες αποθέσεις αναπτύσσονται επιφανειακά σε

όλη την έκταση της πεδινής περιοχής και καλύπτουν τις πλειστοκαινικές αποθέσεις οι οποίες υπόκεινται και η παρουσία τους διαπιστώνεται από λιθολογικές τομές υδροληπτικών έργων.

Οι τεταρτογενείς αποθέσεις στο σύνολό τους αποτελούνται από κλαστικά υλικά ποικίλης κοκκομετρικής σύστασης όπως κοκκινόχρωμα, άργιλος, αργιλοίλους, αργιλομιγής άμμος, άμμος, χαλίκια, κροκάλες, κροκαλολατύπες κ.ά. Το πάχος τους φθάνει 30-40 m για τις παλαιές και 5-10 m για τις νεότερες αποθέσεις (Μελισσάρης-Σταυρόπουλος, 1999). Στρωματογραφικά χαρακτηρίζονται από λιθολογική ανομοιομορφία και άτακτη κατανομή κατά την οριζόντιο και την κατακόρυφη έννοια. Συνήθως παρουσιάζονται με τη μορφή αποσφηνωμένων στρωμάτων και φακών διαφόρων διαστάσεων. Λόγω του πάχους τους επεκτείνονται σε βάθος κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας.

Η υδρογεωλογική συμπεριφορά τόσο των παλαιών όσο και των νεότερων ποικίλει από περιοχή σε περιοχή. Εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το πάχος τους, τη στρωματογραφική τους διάταξη και τη λιθολογική και κοκκομετρική τους σύσταση. Αποτέλεσμα των συνθηκών αυτών είναι ο σχηματισμός κατά θέσεις ελεύθερου ή μερικής υπό πίεση φρεάτιου ορίζοντα σχεδόν σε όλη την έκταση της ανάπτυξης τους.

Οι αποθέσεις σε ορισμένες περιοχές χαρακτηρίζονται από την επικράτηση των λεπτομερών αργιλικών, αργιλοπηλιτικών και αργιλοαμμωδών συστατικών και κατά συνέπεια παρουσιάζουν περιορισμένο υδρογεωλογικό ενδιαφέρον. Αντίθετα σε άλλες περιοχές επικρατούν τα αμμώδη, αμμοχαλικώδη και αργιλοαμμώδη συστατικά που δημιουργούν ευνοϊκότερες συνθήκες για την ανάπτυξη αξιοποιήσιμου φρεάτιου ορίζοντα.

Οι πρόσφατες αποθέσεις, που καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος της πεδινής περιοχής, χαρακτηρίζονται από έντονη λιθολογική και στρωματογραφική ανομοιομορφία. Η ανάπτυξη αξιοποιήσιμου φρεάτιου υδροφόρου ορίζοντα ποικίλει από θέση σε θέση ανάλογα με το πάχος τους και την επικράτηση των αδρομερών υδροπερατών πετρωμάτων ή των λεπτομερών ημιπερατών ή υδροστεγανών πετρωμάτων.

Η τροφοδοσία της υπόγειας υδροφορίας γίνεται τόσο από την άμεση, περιορισμένη πάντως, κατείσδυση των νερών της βροχής, τις διηθήσεις από τις κοίτες των υδατορευμάτων όσο και από πλευρικές μεταγίσεις καρστικού νερού προς τα ιζήματα της πεδινής έκτασης όπου η πιεζομετρία και το υδραυλικό φορτίο το επιτρέπει.

Η μεγάλη διαφορά στην υδροπερατότητα μεταξύ των καρστικών μαρμάρων και των προσχώσεων, που έχει ως αποτέλεσμα και την εμφάνιση καρστικών πηγών, τις περισσότερες φορές δεν επιτρέπει σημαντικές υπόγειες μεταγίσεις νερών.

Μια άλλη μικρή πηγή τροφοδοσίας στο χώρο του παλιού έλους είναι το κανάλι που διοχετεύει τα νερά της Μακαρίας πηγής προς τη θάλασσα. Τέλος, τροφοδοσία πραγματοποιείται από διηθήσεις στην περίμετρο του πεδίου όπου η περατότητα των προσχώσεων είναι λίγο μεγαλύτερη.

Λόγω της μικρής μέσης διαπερατότητας του υλικού θεωρούμε την υπόγεια προσχωματική υδροφορία ως ενιαία. Μια τοπική διαφοροποίηση μπορεί να γίνεται στην εντελώς παράκτια ζώνη λόγω της παρουσίας πιο περατού υλικού στην περιοχή των αμμοθινών.

Κατά τις δοκιμές διαπερατότητας Lefranc που πραγματοποιήθηκαν στις εδαφοτεχνικές γεωτρήσεις βρέθηκαν τιμές υδροπερατότητας (k) που κυμαίνονται από 10^{-5} έως 10^{-8} m/sec (Περλέρος, 2001^α).

Μετά την κατασκευή του κεντρικού αποστραγγιστικού καναλιού (1923) και άλλων μικρότερων στο χώρο του έλους, έγινε αποστράγγιση των κατακλυζόμενων εκτάσεων και συγχρόνως ταπείνωση της στάθμης του προσχωματικού υδροφόρου ορίζοντα. Αποτέλεσμα των έργων αυτών ήταν η περαιτέρω ποιοτική υποβάθμιση της υπόγειας υδροφορίας λόγω της αλατότητας.

Εξαιτίας της κατασκευής των αποστραγγιστικών καναλιών με δάπεδο σε αρνητικά υψόμετρα, παρατηρούνται, κατά θέσεις, αρνητικές στάθμες της ασθενούς υπόγειας υδροφορίας λόγω υπεραντλήσεων και περιορισμένης επανατροφοδοσίας.

Υδροφορία νεογενών αποθέσεων

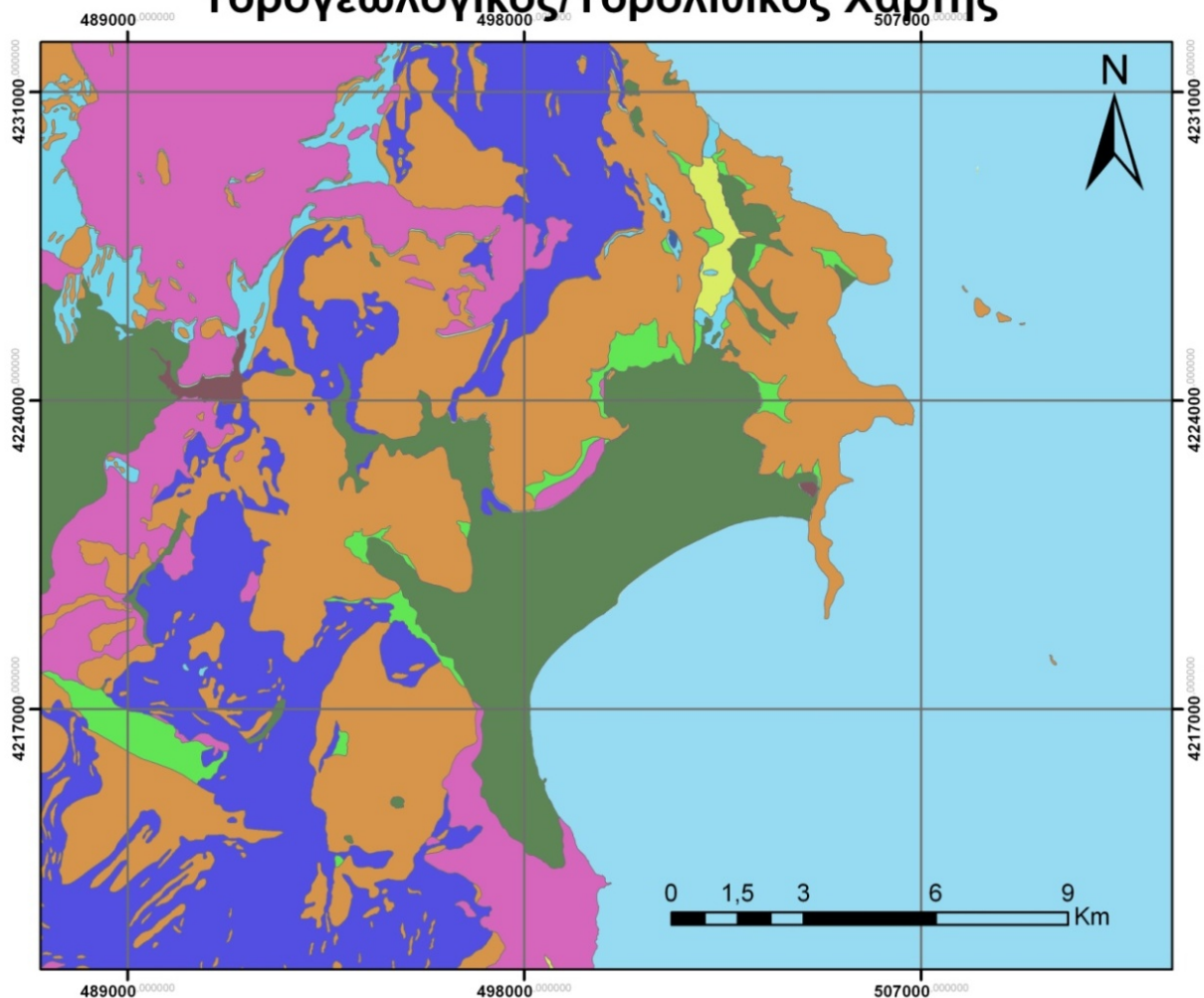
Από τις αποθέσεις του νεογενούς που εμφανίζονται στην περιοχή μελέτης, υδρογεωλογικό ενδιαφέρον παρουσιάζει ο σχηματισμός Λοιμικού. Τα τεκτονικά λατυποπαγή λόγω της μικρής έκτασης που καταλαμβάνουν δεν παρουσιάζουν αξιόλογο ενδιαφέρον.

Ο σχηματισμός Λοιμικού αναπτύσσεται στο B-BA τμήμα της περιοχής μελέτης με επίμηκες σχήμα της επιφανειακής του ανάπτυξης με διεύθυνση B-N. αποτελείται κυρίως από ψαμμούχες μάργες, άμμους, πηλούς και κροκαλοπαγή. Περιβάλλεται ανατολικά από τα μάρμαρα Αγίας Μαρίνας, δυτικά από τα μάρμαρα Γραμματικού και βόρεια-νότια από μικρές εμφανίσεις των σχιστόλιθων Ραμνούνας.

Η έκταση της επιφανειακής εμφάνισης του σχηματισμού είναι 4,9 km². Σύμφωνα με τους υπολογισμούς που έχουν γίνει (Μελλισάρης-Σταυρόπουλος, 1999) ο μέσος όγκος των βροχοπτώσεων που δέχεται είναι $2,5 \times 10^6$ m³/έτος. Από την ποσότητα αυτή των βροχοπτώσεων στον όγκο του σχηματισμού εκτιμάται ότι κατεισδύουν $0,3 \times 10^6$ m³/έτος και εμπλουτίζουν τον υδροφόρο.

Όπως προέκυψε από την ίδια μελέτη οι συγκεντρώσεις των χλωριόντων στα νερά του υδροφόρου ορίζοντα κυμαίνονται από 300 mg/l έως 1500 mg/l. Πρόκειται δηλαδή για υπόγεια νερά που έχουν υποστεί μέτρια έως πολύ μεγάλη υφαλμύριση. Η υφαλμύριση αυτή, σύμφωνα με τους μελετητές, αποδίδεται στην άμεση επικοινωνία των υδροπερατών πετρωμάτων του σχηματισμού και ιδιαίτερα των κροκαλοπαγών με τα μάρμαρα της Αγ. Μαρίνας που αναπτύσσονται ανατολικά τους και των οποίων η καρστική υδροφορία υπόκειται σε εντονότατη υφαλμύριση λόγω διείσδυσης του θαλασσινού νερού στον όγκο τους.

Υδρογεωλογικός/Υδρολιθικός Χάρτης



ΥΠΟΜΝΗΜΑ

Περατότητα Σχηματισμών

- ΗΜΙΠΕΡΑΤΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ – ΠΟΛΥ ΧΑΜΗΛΗΣ ΥΔΡΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ($K=10^{-5}$ ως 10^{-7} m/sec)
- ΗΜΙΠΕΡΑΤΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ – ΧΑΜΗΛΗΣ ΥΔΡΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ($K=10^{-5}$ ως 10^{-7} m/sec)
- ΥΔΡΟΠΕΡΑΤΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ – ΜΕΤΡΙΑΣ ΕΩΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΥΔΡΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ($K=10^{-4}$ ως 10^{-6} m/sec)
- ΥΔΡΟΠΕΡΑΤΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ – ΜΕΤΡΙΑΣ ΕΩΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΥΔΡΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ($K=10^{-4}$ ως 10^{-6} m/sec)
- ΥΔΡΟΣΤΕΓΑΝΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ – ΠΟΛΥ ΧΑΜΗΛΗΣ ΥΔΡΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ($K < 10^{-7}$ m/sec)
- ΥΔΡΟΣΤΕΓΑΝΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ – ΠΟΛΥ ΧΑΜΗΛΗΣ ΥΔΡΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ($K=10^{-6}$ ως 10^{-8} m/sec)
- ΥΔΡΟΣΤΕΓΑΝΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ – ΠΟΛΥ ΧΑΜΗΛΗΣ ΥΔΡΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ($K < 10^{-7}$ m/sec)
- ΥΨΗΛΗΣ ΥΔΡΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ($K=10^{-1}$ ως 10^{-3} m/sec)

Τοπογραφικό Υπόβαθρο

- Υψόμετρο**
- 1.408 μ.
 - 0 μ.

Χάρτης 3: Υδρογεωλογικός/Υδρολιθολογικός Χάρτης Μαραθώνα (Πηγή: ΙΓΜΕ)

5.2.3 Πηγές

5.2.3.1 Μακαρία πηγή

Η κυριότερη πηγή τροφοδοσίας στην περιοχή του Μαραθώνα είναι η Μακαρία. Αυτή εκδηλώνεται στη διεπαφή των μαρμάρων του Μαραθώνα με τις σύγχρονες αργιλοαμμώδεις αποθέσεις της ελώδους περιοχής του Σχινιά, σε υψόμετρο 2,5 μέτρα.

Βασικά στοιχεία προκύπτουν από τη μελέτη Μελισάρη - Σταυρόπουλου κατά τη διάρκεια των ετών 1997 - 1998, για λογαριασμό του Υπουργείου Γεωργίας στα πλαίσια της Υδρολογικής Μελέτης Κάμπου Μαραθώνα. Σύμφωνα με τα στοιχεία αυτά για τα έτη που προαναφέρθηκαν η μέση εκφόρτιση ανέρχεται σε $1547 \text{ m}^3/\text{h}$ δηλαδή $13,5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{έτος}$. Στη μελέτη αυτή εκτιμάται τροφοδοσία της πηγής από τα μάρμαρα του Μαραθώνα συνολικού όγκου $6,2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{έτος}$ (με μέση ετήσια βροχόπτωση 582 mm και κατείσδυση 55%). Κατά συνέπεια, για μια ποσότητα νερού $7,3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{έτος}$ που προέρχεται από την εκφόρτιση της πηγής δεν διευκρινίζεται η ζώνη τροφοδοσίας.

Κατά την περίοδο 1974 - 1982 όπου η ΕΥΔΑΠ διατηρούσε αντλιοστάσιο στην περιοχή, προκύπτουν επιπλέον στοιχεία επί του δυναμικού των πηγαίων εκφορτίσεων. Σε μια σύντομη περιγραφή της τηρουμένης μεθοδολογίας αναφέρεται πως πραγματοποιούνταν αντλήσεις από το χώρο των πηγών μέσης παροχής $830 \text{ m}^3/\text{h}$ ($500 \text{ m}^3/\text{h}$ κατά την ξηρή και $1660 \text{ m}^3/\text{h}$ κατά την υγρή περίοδο). Από εκεί συμπεραίνεται πως για την ίδια περίοδο από το χώρο των πηγών γινόταν απόληψη ετησίως περί τα $7 \times 10^6 \text{ m}^3$.

Το ΙΓΜΕ παρουσιάζει στοιχεία για μέση ετήσια εκφόρτιση της πηγής $7,3 \times 10^6 \text{ m}^3$ με 26 km^2 λεκάνη τροφοδοσίας και κατείσδυση 50% .

Ωστόσο, όπως γίνεται κατανοητό οι ανωτέρω προσεγγίσεις βασίζονται σε λίγα δεδομένα μετρήσεων παροχής της Μακαρίας πηγής και σε διαφορετικά ποσοστά κατείσδυσης. Ακόμα, δεν είναι σαφής η υδρογεωλογική λεκάνη τροφοδοσίας των πηγών.

Παρόλα αυτά, καθίσταται σαφές πως οι παραπάνω προσεγγίσεις δίνουν μια εκτίμηση της μέσης ετήσιας εκφόρτισης των πηγών, που ανάλογα με τις βροχοπτώσεις κυμαίνεται από $7 - 13 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{έτος}$.

Η ΕΥΔΑΠ χρησιμοποιούσε την Μακαρία πηγή για την ενίσχυση της ύδρευσης της Αθήνας. Η περιεκτικότητα, σε χλωριόντα με βάση τα στοιχεία που διατηρούσε η ΕΥΔΑΠ κυμαινόταν από $500 - 1200 \text{ ppm Cl}^-$.

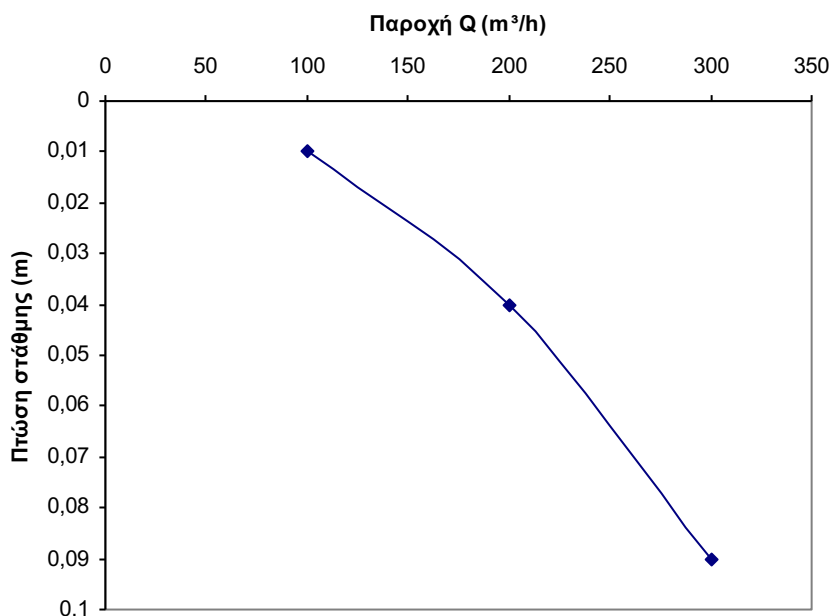
Αργότερα, για την περίοδο 1997 - 1998 οι συγκεντρώσεις χλωριόντων σε μετρήσεις του Υπουργείου Γεωργίας κυμαίνονται μεταξύ $728 - 1775 \text{ ppm Cl}^-$. Αυτό συνεπάγεται μια αύξηση των ιόντων χλωρίου στα νερά της πηγής της τάξης του 50% .

Ενώ για τις μελέτες που αφορούν το πρόγραμμα "Αθήνα 2004", κατά την περίοδο Μαρτίου - Ιουνίου 2001, στις γεωτρήσεις που κατασκευάστηκαν ανάντη της πηγής και έχουν διατηρήσει την καρστική υδροφορία, παρουσιάζουν τιμές χλωριόντων, 150 ppm Cl^- στο βόρειο τμήμα της περιοχής Πάτημα ενώ σε όσες έχουν διανοιχτεί δυτικά της πηγής οι τιμές της περιεκτικότητας σε ανιόντα χλωρίου κυμαίνονται από $350 - 1950 \text{ ppm Cl}^-$.

Οι ενδείξεις δείχνουν πως οι γεωτρήσεις ανάντη του σημείου εκφόρτισης της Μακαρίας πηγής, αναρρυθμίζουν τον υδροφορέα που την τροφοδοτεί. Η αναρρύθμιση αυτή μπορεί να χαρακτηριστεί ως "τυχαία" δεδομένου ότι δεν υπάρχει κάποια μελέτη και προγραμματισμένα έργα που να έχουν ως σκοπό την αναρρύθμιση.

Πέρα από τα προαναφερθέντα στοιχεία αντλήσεων, διακυμάνσεων στάθμης και ποιότητας δεν καταγράφονται άλλα τα οποία θα οδηγήσουν σε καλύτερη γνώση του καθεστώτος λειτουργίας του καρστικού συστήματος και δει της πηγής. Μοναδική παραμένει υδρογεώτρηση που κατασκευάστηκε ανάντη της πηγής σε χώρο και σε απόσταση περί τα 150 m από το δυτικό άκρο εκφόρτισής της. Η γέωτρηση χαρακτηρίζεται από βάθος 55 m και διέρχεται εκ των μαρμάρων του Μαραθώνα τα οποία και διασχίζει σε

όλο το μήκος της. Από τη γεώτρηση αυτή πραγματοποιήθηκε δοκιμαστική άντληση σε δύο φάσεις. Κατά την πρώτη φάση έγινε άντληση κατά βαθμίδες με παροχές 100, 200 και 300 m³/h και η αντίστοιχη πτώση στάθμης κατά τα πρώτα 3 min όπου διαπιστώθηκε σταθεροποίηση αυτής ήταν 0,01, 0,04 και 0,09 m (σχ.5.3). Κατά τη δεύτερη φάση πραγματοποιήθηκε άντληση σταθερής παροχής 280 m³/h και διάρκειας 72 ωρών με συνολική πτώση στάθμης 0,07 m που επιτεύχθηκε μετά τα πρώτα 4 λεπτά της άντλησης. Στο σχήμα 5.3 δίνεται η χαρακτηριστική καμπύλη της γεώτρησης και προσδιορίζεται η κρίσιμη παροχή άντλησης ίση με Q_{κρ} = 300 m³/h.



Διάγραμμα 1: Χαρακτηριστική καμπύλη της γεώτρησης ανάντη της πηγής

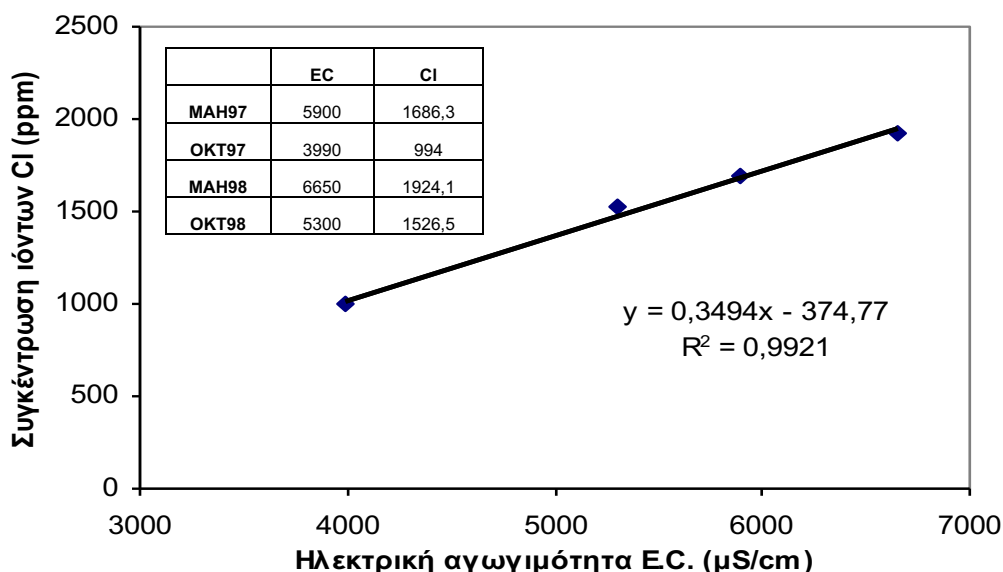
Πίνακας 1: Εξέλιξη της περιεκτικότητας ιόντων Cl⁻ και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) κατά τη διάρκεια της άντλησης

Δείγμα	Ημερομηνία	Ώρα	EC (μmohs)	Cl ⁻ (ppm)
A´	8/8	13:00	5390	1650
B´	10/8	13:30	6150	1950
Γ´	10/8	19:30	6170	1900
Δ´	11/8	7:30	6000	1950
Ε´	11/8	10:30	6030	1900
ΣΤ´	11/8	19:30	6090	1950

Κατά τη διάρκεια της άντλησης ελήφθησαν 6 δείγματα νερού και τα αποτελέσματα των αναλύσεων φαίνονται στον πίνακα 5.1. Διαπιστώνεται επομένως αύξηση των χλωριόντων συναρτήσει του χρόνου άντλησης κατά 18% και βέβαια επέκταση της υφαλμύρισης στο εσωτερικό του υδροφόρου που τροφοδοτεί τη Μακαρία πηγή, για την οποία έχει διαπιστωθεί αύξηση της αλατότητας σχεδόν 50% από το 1982 έως το 1998. Επίσης, είναι

πιστοποιημένη η μεγάλη διακύμανση της παροχής της πηγής. Κατά την περίοδο 1997 – 98 η παροχή κυμάνθηκε από 162 m³/h (Οκτ. 1997) έως 3621,6 m³/h (Απρ. 1998). Οι μετρημένες παροχές δίνονται στον πίνακα 5.2.

Η εκτίμηση της σχέσης των ιόντων Cl⁻ και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του νερού της πηγής προσδιορίζεται παρακάτω. Το στατιστικό δείγμα είναι πολύ μικρό για τέτοιου είδους συσχετίσεις. Παρόλα αυτά, η εκτίμηση αυτή δεν υπόκειται σε μεγάλο στατιστικό λάθος καθώς α) οι δύο παράμετροι έχουν, ούτως ή άλλως, ισχυρή συσχέτιση και β) οι τιμές είναι αντιπροσωπευτικές καθώς πρόκειται για τιμές δειγμάτων περιόδων υψηλής και χαμηλής στάθμης. Η σχέση των δύο παραμέτρων δίνεται από την ευθεία $Cl = 0,3494 \times EC - 374,77$ που παρουσιάζεται στο διάγραμμα του σχήματος 5.4 και ο συντελεστής συσχέτισης είναι $r = 0,99$.



Διάγραμμα 2: Συσχέτιση ιόντων Cl⁻ και ηλεκτρικής αγωγιμότητας για την πηγή της Μακαρίας

Πίνακας 2: Μετρήσεις παροχών πηγής Κάτω Σουλίου-Σχινιά (Μακαρία πηγή)(σε m³/h).

Ημερομηνία Μέτρησης	Υπ.Γεωργίας Π.Μελισσάρης - Ξ.Σταυρόπουλος, 1999. Υδρογεωλογική Μελέτη Κάμπου Μαραθώνα	Υπ.Γεωργίας, 2001 (Εκβολή)	Μελέτη Οργανισμού Αθήνας, 2001
30/01/97	2736.0		
21/02/97	2628.0		
06/03/97	1882.8		
24/03/97	1800.0		
07/04/97	1972.0		
24/05/97	1483.2		
29/06/97	1332.0		
29/07/97	878.4		
17/08/97	356.4		
07/09/97	313.2		
07/10/97	162.0		
20/11/97	500.4		

Ημερομηνία Μέτρησης	Υπ.Γεωργίας Π.Μελισσάρης - Ξ.Σταυρόπουλος, 1999. Υδρογεωλογική Μελέτη Κάμπου Μαραθώνα	Υπ.Γεωργίας, 2001 (Εκβολή)	Μελέτη Οργανισμού Αθήνας, 2001
05/12/97	1159.2		
07/01/98	2052.0		
09/02/98	2185.2		
11/03/98	2628.0		
02/04/98	3092.4		
23/04/98	3621.6		
13/05/98	3247.2		
12/06/98	2077.2		
04/07/98	1130.4		
26/07/98	471.6		
19/08/98	327.6		
04/09/98	280.8		
23/09/98	280.8		
06/10/98	532.8		
16/10/98	518.4		
30/10/98	586.8		
06/11/98	601.2		
16/11/98	813.2		
26/11/98	1191.6		
23/11/00		180.0	
07/12/00		320.0	
23/12/00		377.0	
16/01/01		720.0	
27/01/01			974
08/02/01		1230.0	
10/02/01			1226
08/03/01		871.0	
15/03/01			732
22/03/01		628.0	
05/04/01		670.0	
09/04/01			643
18/05/01			380
23/05/01		370.0	
06/06/01			180

Ημερομηνία Μέτρησης	Υπ.Γεωργίας Π.Μελισσάρης - Ξ.Σταυρόπουλος, 1999. Υδρογεωλογική Μελέτη Κάμπου Μαραθώνα	Υπ.Γεωργίας, 2001 (Εκβολή)	Μελέτη Οργανισμού Αθήνας, 2001
12/06/01		84.0	

Καμπύλη εξάντλησης αποθεμάτων

Για την εκτίμηση των όγκων των υπόγειων νερών που αποθηκεύονται ετησίως στον υδροφόρο που εκτονώνεται από την πηγή της Μακαρίας, έγινε χρήση της μεθόδου Maillet.

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, μετά το πέρας των εποχιακών βροχοπτώσεων, η καμπύλη πτώσης των παροχών συναρτήσεϊ του χρόνου, εκφράζεται από τη σχέση:

$$Q_t = Q_0 e^{-at}$$

όπου Q_t είναι η παροχή σε m^3 / sec σε μια χρονική στιγμή t ,

Q_0 είναι η παροχή στην αρχή της εξαντλήσεως ($t=0$) σε m^3 / sec ,

e είναι η βάση των νεπέριων λογαρίθμων ($e=2,718$)

a είναι ο συντελεστής εξάντλησης, ο οποίος ισούται με $1/T$, όπου T είναι ο χρόνος που απαιτείται για την ελάττωση της αρχικής παροχής από 1 σε $1/e$ της αρχικής τιμής της.

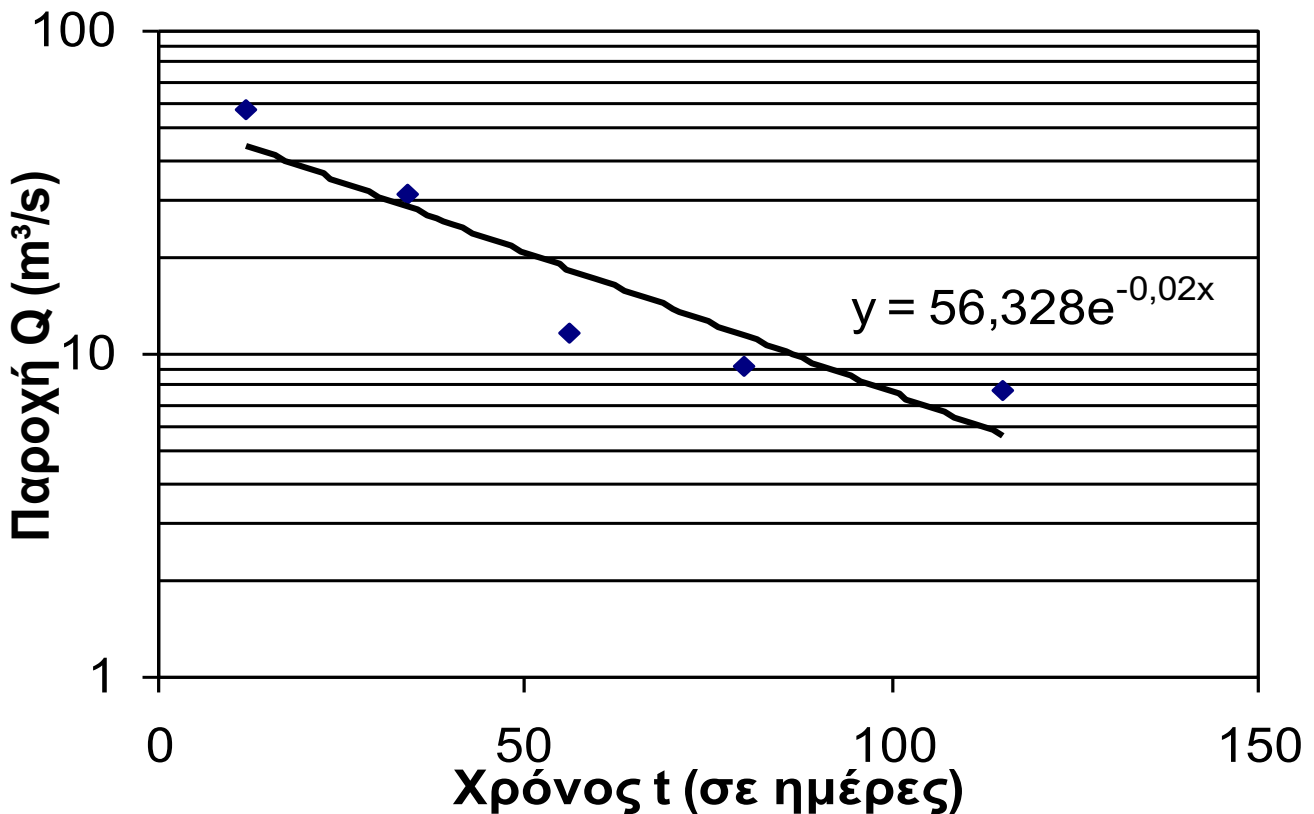
Με τη βοήθεια των υδρομετρήσεων για το υδρολογικό έτος 1997-98 κατασκευάστηκε το διάγραμμα $Q-t$ (σχήμα 5.5), χαράχτηκε η καμπύλη εξάντλησης και προσδιορίστηκε η εξίσωση καθώς και ο συντελεστής εξάντλησης που έχουν ως εξής:

$$Q = 56,328 e^{-0,02t}, \quad a=0,02$$

Αυτή η τιμή του συντελεστή εξάντλησης a υποδηλώνει ροή μέσω ενός καλώς αναπτυγμένου δικτύου καρστικών αγωγών. Η ολοκλήρωση της παραπάνω εξίσωσης σε χρόνο $t=0$ δίνει τα ρυθμιστικά αποθέματα V . Από την ολοκλήρωση προκύπτει $V = Q_0 / a$. Επειδή όμως το a στην εξίσωση εξάντλησης έχει υπολογιστεί σε μέρες, η παραπάνω εξίσωση παίρνει την μορφή:

$$V = (86400 \times Q_0) / a \quad (\text{επειδή } 1 \text{ μέρα} = 86400 \text{ sec})$$

Εφαρμόζοντας τον τύπο αυτό για το υδρολογικό έτος '97 – '98 προκύπτει ότι τα ρυθμιστικά αποθέματα είναι $2.433.369 m^3$.



Διάγραμμα 3: Καμπύλη εξάντλησης αποθεμάτων Μακαρίας πηγής

Λεκάνη τροφοδοσίας της Μακαρίας πηγής

Στη μελέτη τους οι Μελισσάρης - Σταυρόπουλος διατυπώνουν την υπόθεση πως το βόρειο τμήμα της ανάπτυξης των μαρμάρων του Μαραθώνα, έκτασης 5 km², πρέπει να εκφορτίζεται απ' ευθείας στον Ευβοϊκό κόλπο μέσω υποθαλάσσιων πηγών. Η έκταση που καλύπτουν τα μάρμαρα του Μαραθώνα ξεκινώντας ανάντη των πηγών μέχρι τον Ευβοϊκό κόλπο είναι περίπου 20 km². Άρα είναι λογική η υπόθεση πως η βόρεια έκταση αποκόπτεται υδρογεωλογικά από την κύρια καρστική ενότητα των μαρμάρων εξ αιτίας της αναθόλωσης του αδιαπέρατου σχιστολιθικού υποβάθρου.

Προκύπτει από την παραπάνω υπόθεση, λοιπόν, πως οι παροχές της πηγής τροφοδοτούνται από μια έκταση μαρμάρων περί τα 15 km². Ένα τμήμα της έκτασης αυτής είναι εκτός της υδρολογικής λεκάνης που απορρέει στην περιοχή του έλους. Έτσι, η υδρογεωλογική λεκάνη της Μακαρίας πηγής πρέπει να επεκτείνεται με βάση τις εκφορτίσεις της και πέρα των μαρμάρων του Μαραθώνα. Κάτι τέτοιο δεν είναι εμφανές επιφανειακά γιατί τα μάρμαρα του Μαραθώνα είναι απομονωμένα πλευρικά από αδιαπέρατους ή μικρής διαπερατότητας σχηματισμούς.

Οι Μελισσάρης - Σταυρόπουλος διατυπώνουν τις εξής τρεις θεωρήσεις, για την προέλευση της υφαλμύρισης της πηγής:

- Από τον Ευβοϊκό κόλπο μέσω των μαρμάρων του Μαραθώνα από το μέτωπο της περιοχής Λιμνιώνας. Σύμφωνα με τους μελετητές αμέσως νοτιότερα από το βόρειο άκρο της εμφάνισης των μαρμάρων από όπου γίνεται η υπόθεση ότι συντελείται η αλμύριση του συστήματος, παρατηρείται μια σημαντική έκταση παρεμβολής σχιστόλιθων στο σχηματισμό των μαρμάρων με διεύθυνση ΝΑ-ΒΔ. Η εμφάνιση αυτής της ζώνης και η πιθανή αναθόλωση που δημιουργούν κάτω από τα μάρμαρα που εμφανίζονται κατά

μήκος της ζώνης αυτής, θεωρείται ότι δημιουργεί έναν «υδροστεγανό φραγμό» για την «μετανάστευση» των υφάλμυρων νερών προς τα νότια όπου βρίσκεται το κύριο ανάπτυγμα του καρστικού σχηματισμού και όπου εκδηλώνονται οι πηγές του Κάτω Σουλίου. Άρα απορρίπτουν την υπόθεση αυτή.

- Από τα μάρμαρα της Αγ. Μαρίνας ανατολικά. Με βάση γεωηλεκτρικές διασκοπήσεις οι μελετητές τεκμηριώνουν την υδραυλική επικοινωνία του καρστικού συστήματος των μαρμάρων του Μαραθώνα και του υφάλμυρου καρστικού υδροφόρου της Αγίας Μαρίνας.

- Υπόγεια κάτω από τις σύγχρονες αποθέσεις του Σχινιά – Μαραθώνα από τον όρμο Μαραθώνα. Η υπόθεση αυτή τεκμηριώνεται κυρίως από γεωηλεκτρικές διασκοπήσεις όπου φαίνεται ότι τα μάρμαρα βυθίζονται κάτω από τις προσχώσεις και παρουσιάζουν έντονες ενδείξεις κυκλοφορίας νερού. Επιπρόσθετα, υπάρχουν υψηλές συγκεντρώσεις χλωριόντων στις προσχώσεις μεταξύ των μαρμάρων του Μαραθώνα και τις θάλασσας ενώ στην περιοχή αυτή δεν γίνονται σημαντικές αντλήσεις από τον προσχωματικό υδροφόρο.

Σύμφωνα με τους μελετητές η πλέον ισχυρή είναι η δεύτερη υπόθεση και ακολουθεί η τρίτη χωρίς να αποκλείεται η ταυτόχρονη ισχύς και των δύο υποθέσεων. Ωστόσο, στην απόρριψη της δεύτερης υπόθεσης συνηγορεί τόσο η στρωματογραφική όσο και η γεωγραφική ύπαρξη των σχιστόλιθων Ραμνούνας μεταξύ των μαρμάρων Αγ. Μαρίνας και Μαραθώνα. Όσον αφορά την τρίτη υπόθεση, και σε αυτή τη περίπτωση η πιεζομετρία δεν συνηγορεί υπέρ της καθώς το πιεζομετρικό φορτίο του καρστικού σχηματισμού βρίσκονται υψηλότερα από αυτό του προσχωματικού υδροφόρου.

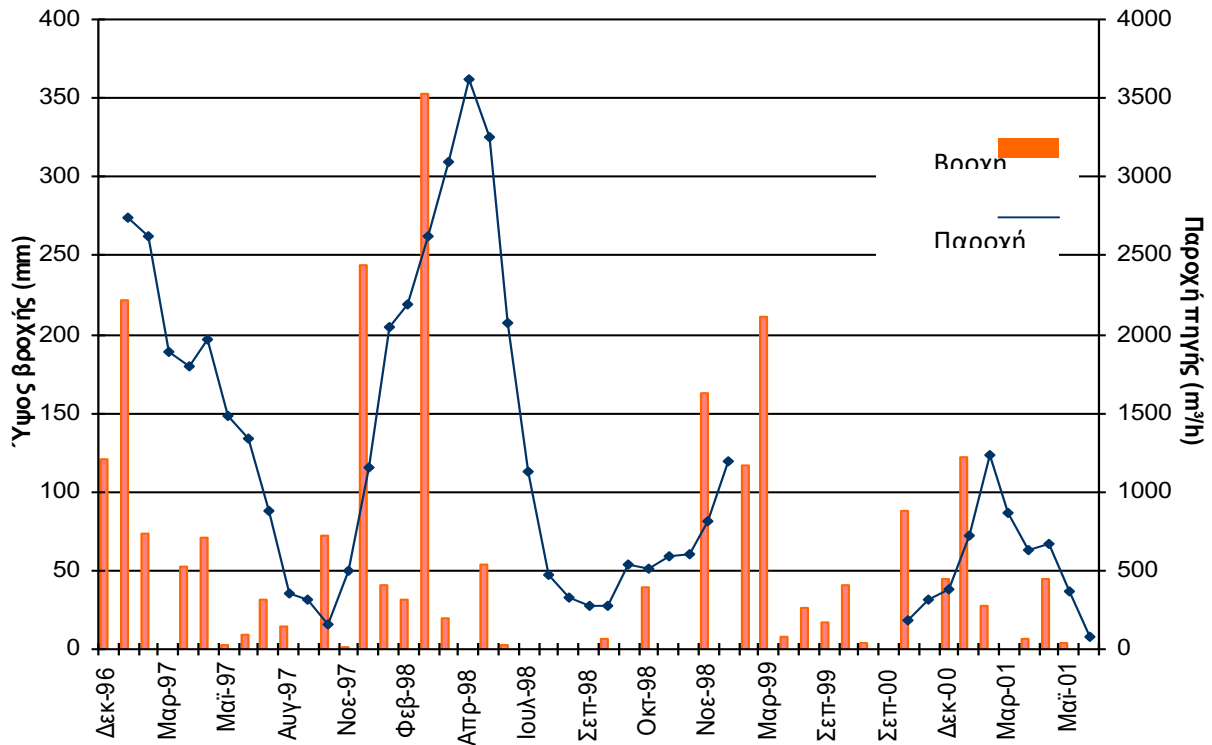
Στα πλαίσια της υδρογεωλογικής μελέτης για το ολυμπιακό κέντρο κωπηλασίας και κανό-καγιάκ (Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε., Περλέρος, 2001α) ο μελετητής αποδέχεται τις παραπάνω υποθέσεις αλλά υποστηρίζει ως εσφαλμένη την υπόθεση περί επικοινωνίας με τα μάρμαρα της Αγίας Μαρίνας λόγω της καλής ποιότητας της καρστικής υδροφορίας που αναπτύσσεται βορειοανατολικά της πηγής (γεωτρήσεις στην περιοχή Πάτημα). Το βορειοανατολικό τμήμα της λεκάνης παρουσιάζει πολύ καλύτερη ποιότητα υπόγειου καρστικού νερού σε όλες τις γεωτρήσεις που έχουν διανοιχτεί εκεί και έχουν συναντήσει μάρμαρο. Το νερό των γεωτρήσεων αυτών παρουσιάζει τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας που κυμαίνεται μεταξύ 800-920 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Αντίθετα στο τμήμα των μαρμάρων μεταξύ Μακαρίας πηγής και Μαραθώνα συναντώνται υπόγεια νερά με περιεκτικότητες χλωριόντων που κυμαίνονται μεταξύ 350-850 $\text{mg}/\text{l Cl}$ και αγωγιμότητες με τιμές από 1700-4200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ στους 25°C. Έτσι, ο μελετητής υποστηρίζει ότι με βάση τα μέχρι σήμερα δεδομένα οι παροχές της Μακαρίας πηγής πρέπει να συνδέονται και με τα μάρμαρα Γραμματικού. Τμήμα των μαρμάρων αυτών πρέπει να επικοινωνούν υδραυλικά με τα αντίστοιχα του Μαραθώνα και να τροφοδοτούν έτσι τη Μακαρία πηγή.

Το σύνολο των μαρμάρων αυτών έκτασης περί τα 30 km^2 πέραν των πηγών Οινόης μέσης ετήσιας εκφόρτισης περί το $1,5 \times 10^6 \text{ m}^3$ δεν εμφανίζουν άλλες πηγές. Η υπόθεση περί πλευρικής τροφοδοσίας των σύγχρονων αποθέσεων της λεκάνης του Μαραθώνα δεν φαίνεται τόσο ισχυρή, πέρα της ζώνης χειμάρρου Χάραδρου όπου επικρατούν οι χονδρόκοκκες αποθέσεις του εξαιτίας της μεγάλης διαφοράς στην υδροπερατότητα των δύο σχηματισμών.

Από το διάγραμμα του σχήματος 5.6 παρατηρείται μια άμεση, με διαφορά μήνα, συσχέτιση των βροχοπτώσεων με την εκφόρτιση της πηγής. Η άμεση αυτή απόκριση της πηγής υποδηλώνει λεκάνη τροφοδοσίας κοντά στην εκφόρτιση, εύκολη και γρήγορη κυκλοφορία των διακινούμενων ποσοτήτων και πιθανή τροφοδοσία από διηθήσεις επιφανειακής απορροής κοντά στο μέτωπο της εκφόρτισης.

Με βάση τα δεδομένα αυτά είναι πιθανή η υδραυλική διασύνδεση υπόγεια των μαρμάρων του Γραμματικού με τα αντίστοιχα του Μαραθώνα, στην περιοχή αμέσως

βόρεια της κωμόπολης του Μαραθώνα, συμβάλλοντας έτσι και στην τροφοδοσία της Μακαρίας πηγής.



Στα μάρμαρα της Αγίας Μαρίνας αναπτύσσεται η καρστική υδροφορία των λόφων της Δρακονέρας, που εκφορτίζεται είτε απευθείας προς τη θάλασσα προς τα ανατολικά, είτε στην επαφή των μαρμάρων με τις τεταρτογενείς αποθέσεις του υγροτόπου του Σχινιά, στα δυτικά, προς το έλος, με μικρές υφάλμυρες πηγές (πηγή Δρακονέρας).

Το νερό της πηγής διαχέεται στην έκταση που καλύπτει το ανατολικό άκρο του υγροτόπου του Σχινιά και στη συνέχεια απορρέει μέσω αποστραγγιστικών αυλάκων στην έξοδο Στόμι μέσω της οποίας καταλήγει στη θάλασσα. Σύμφωνα με υδρομετρήσεις που έγιναν από το Υπουργείο Γεωργίας (Μελισσάρης-Σταυρόπουλος, 1999) έγινε μια εκτίμηση για την συνολική παροχή που προέρχεται από το μέτωπο ανάβλησης των πηγών της Δρακονέρας και η οποία είναι της τάξης των 650 000 m³/έτος.

Γενικά, πρόκειται για μια πηγή με έντονα υφάλμυρο νερό (Cl⁻ > 1500 ppm), χωρίς ιδιαίτερο υδρογεωλογικό ενδιαφέρον, αλλά με οικολογική κυρίως σημασία καθώς στα περιθώρια του έλους δημιουργούνται μικρές ζώνες καλαμιώνων και άλλων υδροχαρών φυτών.

6. ΧΗΜΙΚΕΣ ΚΑΙ ΙΣΟΤΟΠΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

6.1 Ποιότητα Υπόγειων Νερών

6.1.1 Γενικά Στοιχεία

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τόσο των υδροχημικών αναλύσεων, όσο και των συγκεκριμένων υδρογεωλογικών συνθηκών που παρατηρήθηκαν καθώς και των ισοτοπικών αποτυπωμάτων των υπογείων και επιφανειακών νερών. Για τη γραφική απεικόνιση όλων των παραπάνω χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά πακέτα QGIS 2.12.1, ArcMap 10.1, το πακέτο γεωστατιστικών αναλύσεων Surfer 11 και το πακέτο υδροχημικών αναλύσεων AquaChem 4.0. Οι ισοτοπικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν στο TU Darmstadt, Institute for Applied Geosciences (Germany).

6.1.2 Μεθοδολογία

Για τη συλλογή και επεξεργασία των υπόγειων νερών σε μια περιοχή ακολουθείται συγκεκριμένη μεθοδολογία. Ο χρόνος της δειγματοληψίας είναι ένας καθοριστικός παράγοντας, ενώ οι εποχές που προσφέρονται για τη συλλογή των δειγμάτων είναι πριν την έναρξη της αρδευτικής περιόδου για τις γεωργικές καλλιέργειες αλλά και πριν ενταθεί το φαινόμενο της εξατμισοδιαπνοής που γίνεται εντονότερο κατά τους θερινούς μήνες. Επιπλέον, άλλη συνηθισμένη χρονική συγκυρία για τη συλλογή των δειγμάτων είναι περί τα μέσα του Φθινοπώρου, ακριβώς μετά από την περίοδο των αντλήσεων.

Όπως γίνεται κατανοητό από τα παραπάνω οι προσφορότερες περίοδοι για την πραγματοποίηση δειγματοληψιών είναι κατά τις χρονικές στιγμές που οι υδροφόροι βρίσκονται στις οριακές καταστάσεις τους.

Για τους λόγους αυτούς η μελέτη της περιοχής χωρίστηκε σε 3 στάδια:

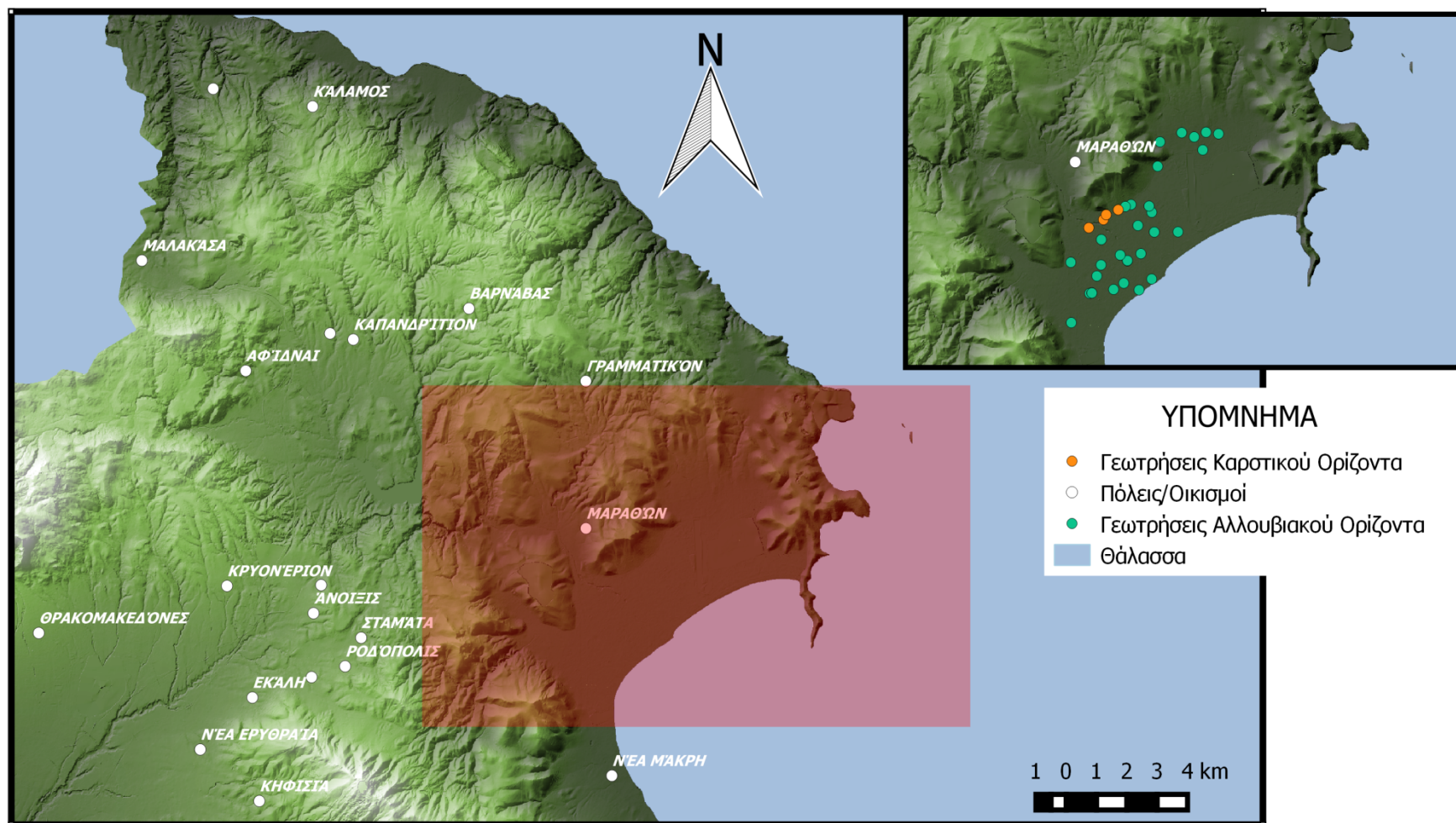
1. Προπαρασκευαστική αναγνώριση της περιοχής και επιλογή των σημείων ενδιαφέροντος με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή τους σε όλη την περιοχή μελέτης.

2. Συλλογή των δειγμάτων από τα επιλεγμένα σημεία, τόσο του αλλουβιακού, όσο και του καρστικού υδροφορέα, βάσει χρονοδιαγράμματος για την επίτευξη ομοιογένειας ως προς την κατάσταση των υδροφόρων. Παράλληλα με τη συλλογή των δειγμάτων πραγματοποιούνταν και επιτόπιες μετρήσεις.

3. Μεταφορά των δειγμάτων στο εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Υδρογεωλογίας της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών του ΕΜΠ, όπου πραγματοποιήθηκε χημική τους ανάλυση ως προς τα βασικά τους ιόντα. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών παρουσιάζονται στα παρακάτω κεφάλαια.

6.1.3 Επι-τόπου μετρήσεις

Για τη διεξαγωγή αντιπροσωπευτικών αποτελεσμάτων, οι μετρήσεις σε κάθε σημείο πραγματοποιήθηκαν τον Οκτώβρη, αμέσως μετά το πέρας της αρδευτικής περιόδου. Τα σημεία στα οποία πραγματοποιήθηκαν οι αντίστοιχες μετρήσεις φαίνονται στον παρακάτω χάρτη (Χάρτης 4).



Γενικός και Δειγματοληπτικός Χάρτης Μαραθώνα

Χάρτης 4: Γενικός και δειγματοληπτικός Χάρτης της Περιοχής μελέτης

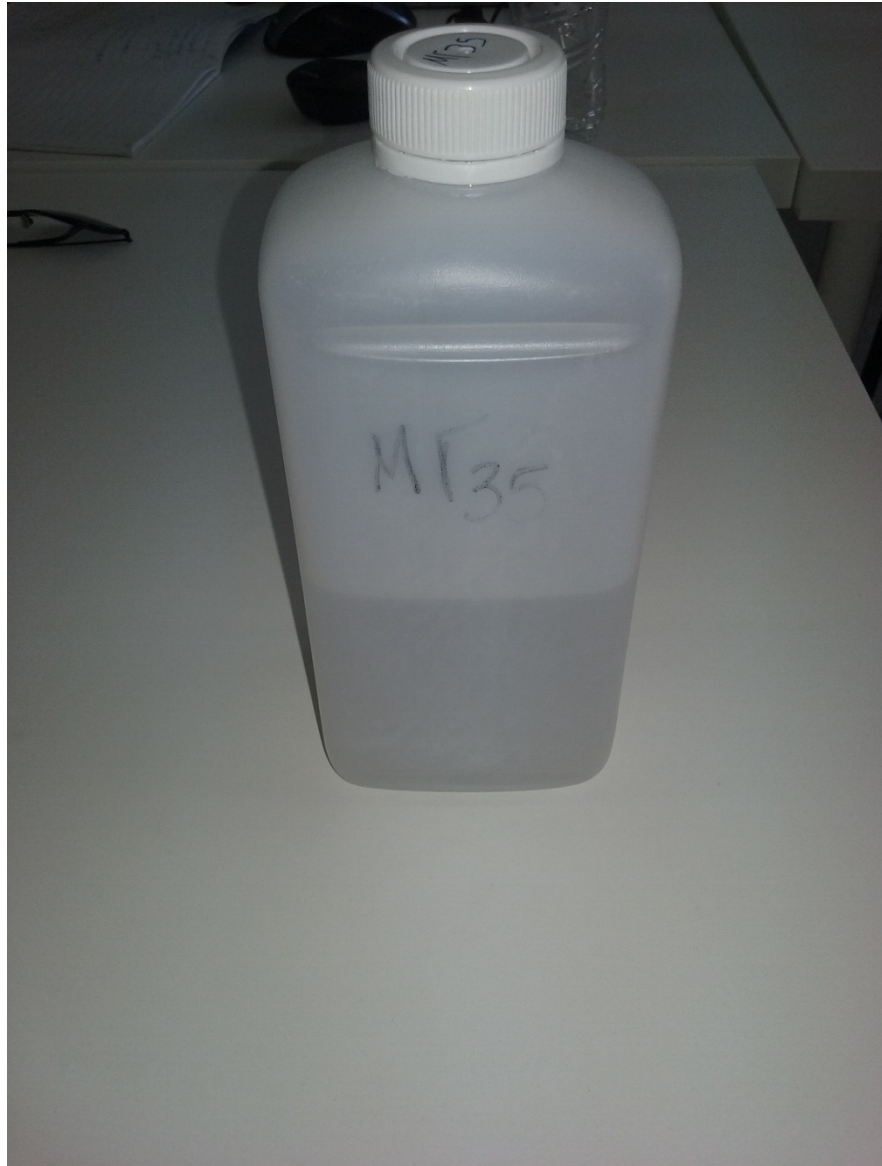
Στη διαδικασία αυτή τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα εξής:

Ο δειγματολήπτης (bailer), όργανο ειδικά διαμορφωμένο ώστε να συλλέγει μικρές ποσότητες νερού από πηγάδια ή γεωτρήσεις χωρίς τη δυνατότητα άντλησης. Αποτελείται από τη μια μη βαθμονομημένη ταινία που καταλήγει σε ένα πλαστικό σωλήνα χωρητικότητας περίπου 0,75 L που περιέχει μια μεταλλική σφαίρα. Ο μηχανισμός λειτουργίας του βασίζεται στην πρόσληψη νερού από το ανώτερο τμήμα του πλαστικού στελέχους, με ταυτόχρονη επισφράγιση του κάτω τμήματος από την μεταλλική σφαίρα.



Εικόνα 2: Δειγματολήπτης

Παράλληλα, κάθε δείγμα τοποθετούνταν σε φιάλη HDPE, ώστε να διατηρείται σε σταθερές συνθήκες και απομονωμένο από το εξωτερικό περιβάλλον, ενώ ταυτόχρονα διευκολύνει και τη χρήση άλλων οργάνων για τις μετρήσεις περαιτέρω χαρακτηριστικών του δείγματος.



Εικόνα 3: Φιάλη φύλαξης δειγμάτων

Ακόμα, η μέτρηση της στάθμης πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας σταθμήμετρο. Το όργανο αυτό αποτελείται από ηλεκτρόδια που επικαλυπτόμενα από μια βαθμονομημένη ταινία, τυλιγμένη σε ειδικά διαμορφωμένη τροχαλία, καταλήγουν σε αισθητήρα ο οποίος παρέχει ειδοποίηση κατά την επαφή του στο νερό.



Εικόνα 4: Σταθμήμετρο

Το βασικότερο όργανο για την πραγματοποίηση επιτόπιων μετρήσεων είναι το πολυπαραμετρικό όργανο. Χάρης στη φορητότητα αλλά και τις ποικίλες δυνατότητες που παρέχει, καθιστά ικανή την επιτόπια μέτρηση του pH, της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας και της θερμοκρασίας σε συνθήκες πεδίου.



Εικόνα 5: Πολυπαραμετρικό όργανο

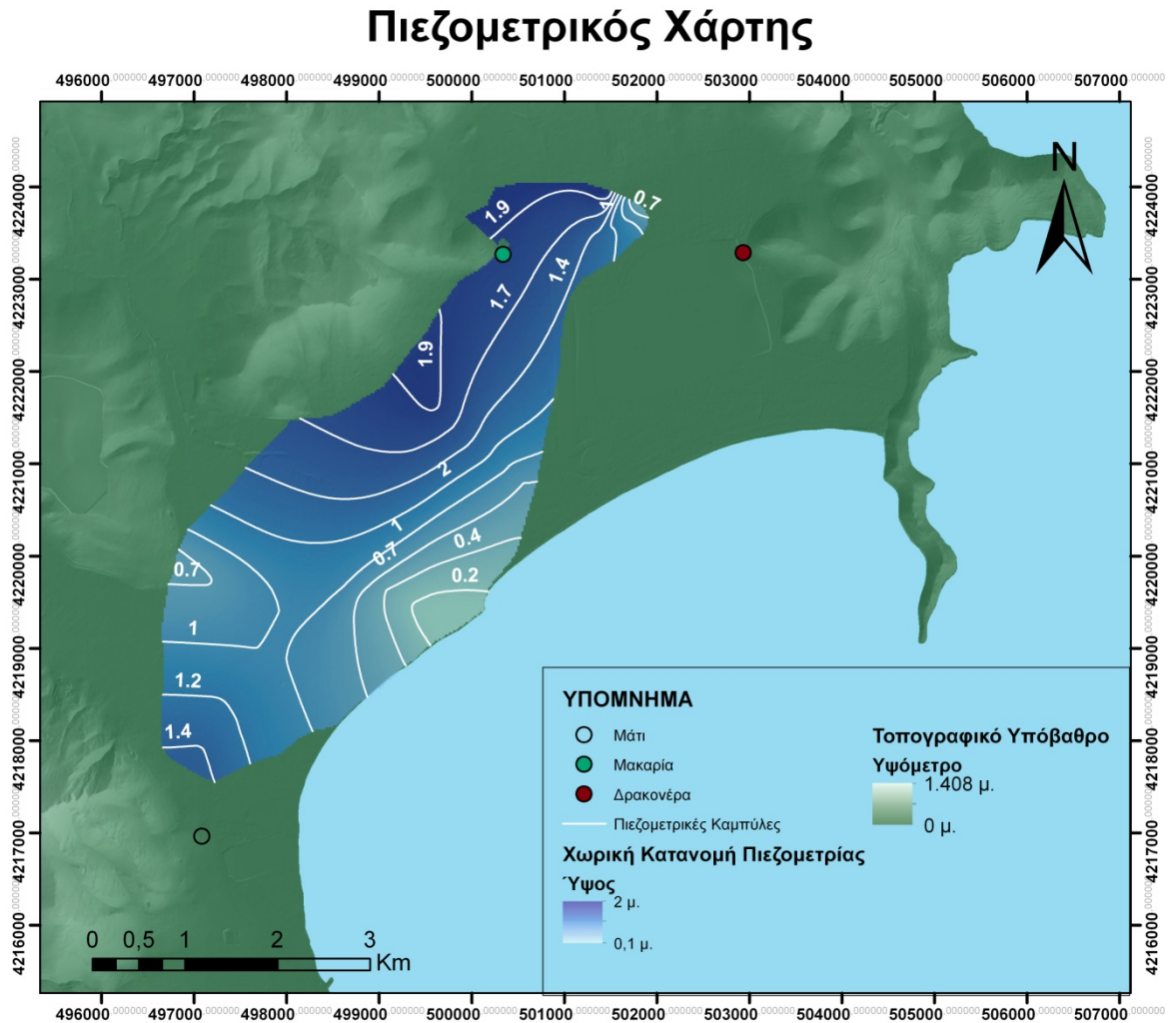
6.1.3.1 Πιεζομετρία

Λόγω των ιδιοτεροτήτων που παρουσιάζει τόσο το ιδιοκτησιακό καθεστώς της περιοχής, με πολλές από τις γεωτρήσεις και τα πηγάδια να είναι ιδιόκτητα, αλλά κυρίως λόγω των χρήσεων της γης για γεωργικές δραστηριότητες υπήρξε δύσκολη η μέτρηση της πιεζομετρίας για όλα τα σημεία δειγματοληψίας. Ωστόσο με κατάλληλη χωρική κατανομή τους κατέστη δυνατόν να κατασκευαστεί ο πιεζομετρικός χάρτης.

Το πιεζομετρικό φορτίο στην περιοχή, κυμαίνεται μεταξύ 0,1 και 2,1 μέτρα, ενώ τα χαμηλότερα υδραυλικά φορτία εντοπίζονται κοντά στην ακτή. Οι γραμμές ροής στην περιοχή που συνορεύει με τα μάρμαρα Μαραθώνα, έχουν διεύθυνση Β-Ν, ενώ στην περιοχή των μαρμάρων Γραμματικού, η διεύθυνση είναι ΒΔ - ΝΑ και στον οτιοδυτικό άκρο ΒΑ - ΝΔ. Από τις γραμμές ροής, συμπεραίνεται ότι ο αλλουβιακός υδροφόρος τροφοδοτείται από τα μάρμαρα που περικλείουν την πεδιάδα, με εξαίρεση τα μάρμαρα Αγ. Μαρίας στα ανατολικά.

Από την κατανομή των ισοπιεζομετρικών γραμμών στο χάρτη γίνεται αντιληπτό ότι στην περιοχή η υδραυλική κλίση δεν είναι ανεστραμμένη και επομένως η θαλάσσια διείδυση είναι παθητική. Αυτό σημαίνει πως η υφάλμυρη ζώνη κινείται αργά προς την ενδοχώρα μέχρις ότου να αποκατασταθεί νέα ισορροπία. Οι συνέπειες της παθητικής

θαλάσσιας διείσδυσης είναι μικρότερες από της ενεργής καθώς η εισχώρηση του θαλασσινού νερού γίνεται με μικρότερους ρυθμούς, χωρίς να δημιουργείται κώνος κατάπτωσης.



Χάρτης 5: Πιεζομετρικός Χάρτης

Παρατηρούνται βασικοί άξονες τροφοδοσίας των αλλουβιακών σχηματισμών από τις περιβάλλουσες καρστικές ενότητες της περιοχής, με υψηλότερα υδραυλικά φορτία να παρατηρούνται στην περιοχή η οποία γειτνιάζει με τη Μακαρία πηγή.

6.1.4 Έρευνα Πεδίου - Επί τόπου μετρήσεις

Τα επιλεγμένα σημεία, βάσει του υδροφόρου από τον οποίο πραγματοποιούν αντλήσεις παρουσιάζονται στην συνέχεια. Όπως προαναφέρθηκε η δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε κατά την έναρξη της υγρής περιόδου (Οκτώβριος 2015). Στο χάρτη 6.1 έχουν απεικονισθεί τα σημεία δειγματοληψίας τόσο του αλλουβιακού (πράσινα) όσο και του καρστικού (πορτοκαλί) υδροφορέα.

Στους παρακάτω πίνακες 3 και 4 εμφανίζονται τα αποτελέσματα των επιτόπιων μετρήσεων που έγιναν στα δείγματα. Οι μετρήσεις αυτές αφορούν την ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα (SEC) εκπεφρασμένη σε $\mu\text{S}/\text{cm}$, τη θερμοκρασία (T) σε βαθμούς Κελσίου, του pH και του διαλυμένου οξυγόνου (DO) που εμπεριέχεται στο νερό σε mg/l .

Πίνακας 3: Επιτόπιες Μετρήσεις δειγμάτων καρστικού υδροφορέα

ID	pH	SEC($\mu\text{S}/\text{cm}$)	T($^{\circ}\text{C}$)
MG 84	7,05	2560	19,7
MG44	6,9	2150	19,7
MG53	7,33	2660	20,5
MG4	7,43	1986	19,4
MG 84	7,05	2560	19,7

Πίνακας 4: Επιτόπιες μετρήσεις δειγμάτων αλλουβιακού υδροφορέα

ID	pH	EC	T
MG71	7,12	2810	20,4
MG24	6,94	4570	19,1
MG73	7,15	4340	23
MG74	6,93	3880	22,5
MG75	7,1	3140	19,7
MG76	7,1	2900	22
MG77	7,01	4030	20,1
MG13	7,24	3310	22,3
MG79	6,9	1905	21,9
MG 36	7,18	1990	20,5
MG 34	7,19	1295	18,5
MG 43	7,042	3310	18,9
MG 82	7,092	3880	18,9
MG 86	6,9	6650	19
MG 88	7,18	2720	20,3
MG48	7,24	3840	19,9
MG2	7,68	2610	19,4
MG57	6,82	3630	21,1
MG100	6,82	4320	18,3
MG101	6,91	3540	20,3
MG102	7,2	2000	19,2
MG11	6,89	3360	20,5
MG103	7,37	2170	20,2
MG104	7,2	1313	20,1
MG8	7,3	1120	19,8
MG9	7,6	1969	20
MG51	7,12	5750	20,1
MG 80	7,76	2320	19,2

6.1.4.1 Ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα (Special Electrical Conductivity, SEC)

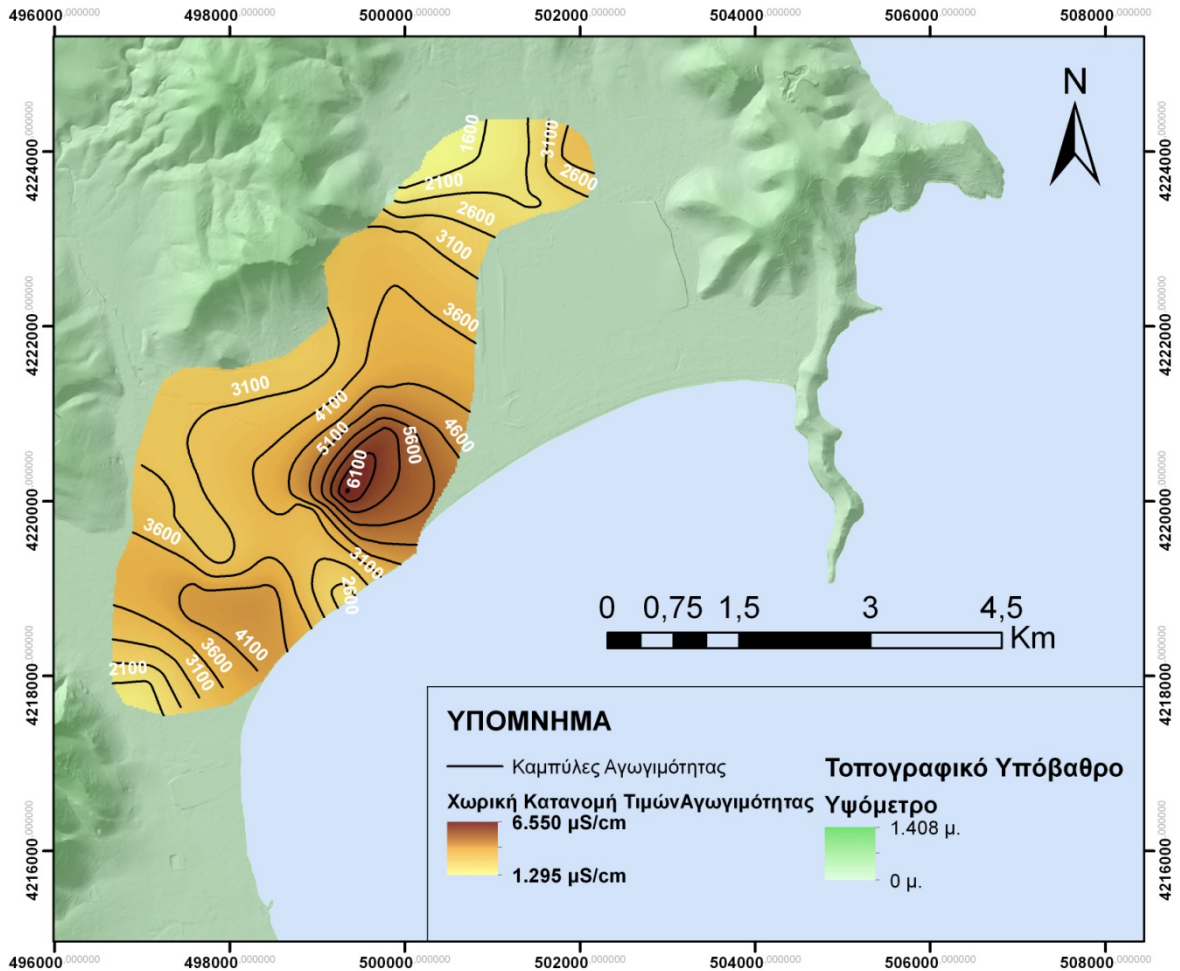
Με την επιτόπια μέτρηση της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας των υδάτων, καθίσταται δυνατή μια απόκτηση μιας πρώτης ασφαλούς ένδειξης για την ποιότητα τους, αλλά και μια επισκόπηση της χημικής τους κατάστασης. Για την πραγματοποίηση της μέτρησης σε συνθήκες πεδίου είναι απαραίτητη η χρήση ειδικού φορητού εξοπλισμού (αγωγιμόμετρο) έτσι ώστε να δύναται η απόκτηση μιας πρώτης εικόνας της ποιοτικής κατάστασης ενός δείγματος νερού. Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα ορίζεται ως η αγωγιμότητα 1 cm^3 σε θερμοκρασία ίση με 25°C . Η φυσική ερμηνεία της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας είναι η ιδιότητα του νερού ως μέσου για τη μετάδοση του ηλεκτρικού ρεύματος. Από αυτό εύκολα συμπεραίνεται πως τόσο η ιδιότητα αυτή, όσο και το μέγεθός της καθορίζονται από τη χημική σύσταση του νερού. Δηλαδή, η συγκέντρωση χημικών ιόντων που ενυπάρχουν στο νερό συνεισφέρουν ουσιαστικά στο εν λόγω μέγεθος (Καλλιώρας, 2008). Για τα γλυκά νερά ισχύει πως το μέγεθος της ειδικής ηλεκτρικής τους αγωγιμότητας δεν ξεπερνά τα $1.000 \mu\text{S}/\text{cm}$, ενώ για τιμές μεγαλύτερες των $1.500 \mu\text{S}/\text{cm}$ συμπεραίνεται πως ο υπόγειος υδροφορέας έχει υποστεί κάποια μορφή ρύπανσης.

Από τις μετρήσεις που παρουσιάστηκαν στους πίνακες 3 και 4, παρατηρείται πως η μέση τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας του υπογείου νερού είναι περίπου $3.000 \mu\text{S}/\text{cm}$ και στα περισσότερα δείγματα είναι ιδιαίτερα αυξημένη, με τις μεγαλύτερες τιμές να παρουσιάζονται στα δείγματα του αλλουβιακού υδροφορέα όπου η υπαλμύριση είναι έντονη λόγω πολυάριθμων γεωτρήσεων και πηγαδιών που αντλούν το υπόγειο νερό. Στον παρακάτω χάρτη 6, παρουσιάζεται η χωρική κατανομή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στο προσχωματικό στρώμα της περιοχής.

Σύμφωνα με τον παρακάτω χάρτη, παρατηρείται μέγιστη μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στο κεντρικό τμήμα της πεδιάδας, με τιμή στα $6.550 \mu\text{S}/\text{cm}$. Σημεία με υψηλή αγωγιμότητα παρατηρούνται ακόμα κατά μήκος της ακτογραμμής, όπου η λεκάνη συνορεύει με τη θάλασσα. Στα σύνορα του υδροφορέα με τα μάρμαρα παρατηρείται μια ελάττωση των αγωγιμοτήτων, που γίνεται εντονότερη ανάντη των πηγών της Μακαρίας και της πηγής Μάτι. Μια πιθανή ερμηνεία της μεταβολής αυτής, έγκειται στο γεγονός πως στα συγκεκριμένα σημεία παρατηρείται τροφοδοσία του αλλουβιακού υδροφορέα από τα νερά του καρστ μέσω της εκφόρτισης των πηγών.

Μια πιθανή εξήγηση της αυξημένης αγωγιμότητας στον υδροφορέα του Μαραθώνα μπορεί να είναι η διείσδυση του θαλασσινού νερού, αφού, όπως αποδεικνύεται από τον πιεζομετρικό χάρτη της περιοχής, το σύστημα συνδέεται και τελικά εκφορτίζεται στη θάλασσα. Η υψηλή αγωγιμότητα αποτελεί μια πρώτη επιβεβαίωση για τον ισχυρισμό αυτό, ωστόσο, στη συνέχεια παρατίθενται κι άλλοι αναγκαίοι δείκτες για την εξακρίβωση της υπαλμύρισης του υδροφορέα.

Χάρτης Αγωγιμοτήτων Υ.Ν

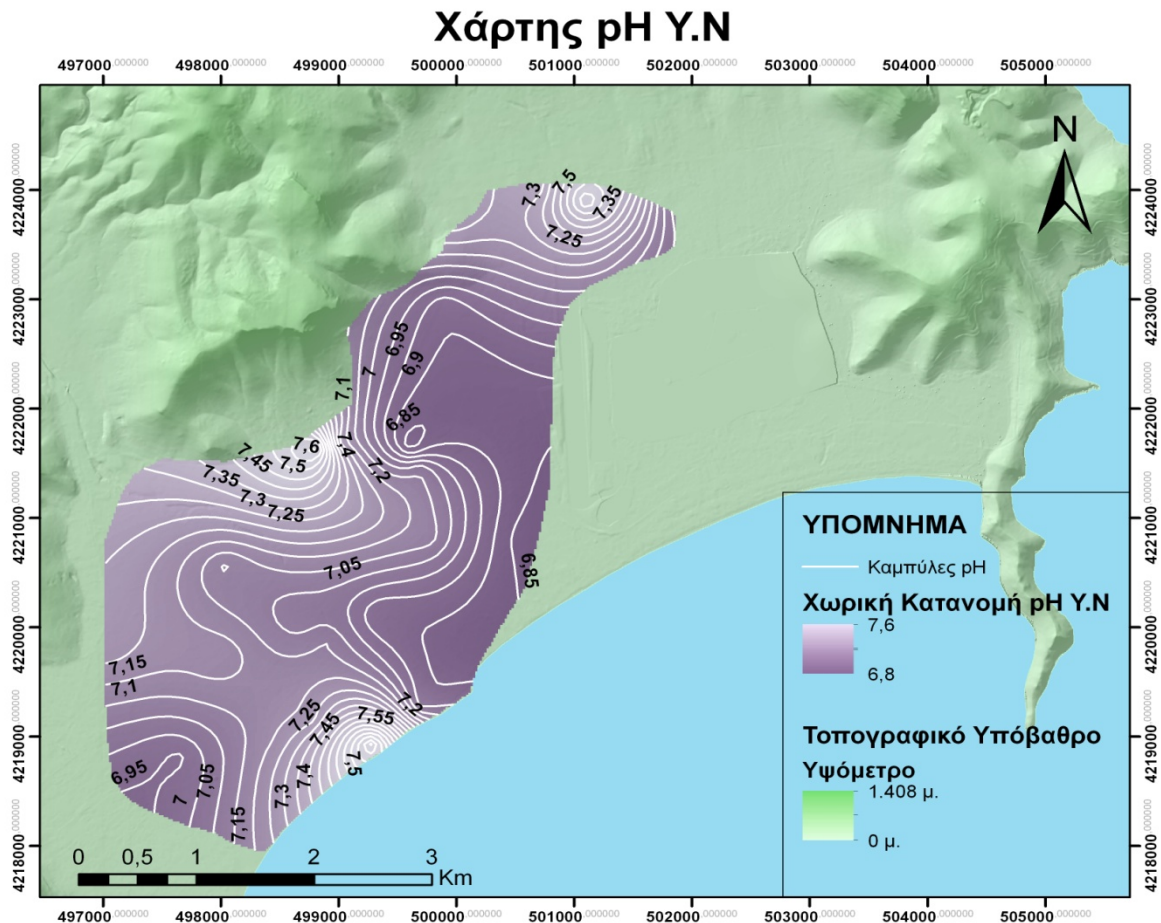


Χάρτης 6: Χάρτης Ειδικής Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας

6.1.4.2 pH

Το pH είναι ένας δείκτης με ιδιαίτερη φυσική σημασία όσον αφορά την ποιότητα του νερού ενός δείγματος, αφού συνδέεται άμεσα με τη φυσικοχημική του κατάσταση. Κατά τον Καλλέργη (2000), η μέτρηση του pH πρέπει να γίνεται στην ύπαιθρο, σε συνθήκες που να αποτρέπουν την ανταλλαγή αερίου του δείγματος νερού με τον ατμοσφαιρικό αέρα καθώς είναι ευαίσθητο στη συγκέντρωση CO_2 . Οι μετρήσεις pH που έγιναν στα δείγματα του Μαραθώνα έχουν μικρές διαβαθμίσεις (από 6,8 έως 7,6) με μέση τιμή 7,14. Τα δείγματα νερού υποδεικνύουν ελαφρώς όξινο έως ελαφρώς αλκαλικό περιβάλλον.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που επισημαίνονται στον πίνακα 7, σχεδιάστηκε η χωρική κατανομή του pH στην περιοχή μελέτης ανάλογα με τη διαβάθμισή του.



Χάρτης 7: Χάρτης κατανομής pH υπόγειων νερών περιοχής έρευνας.

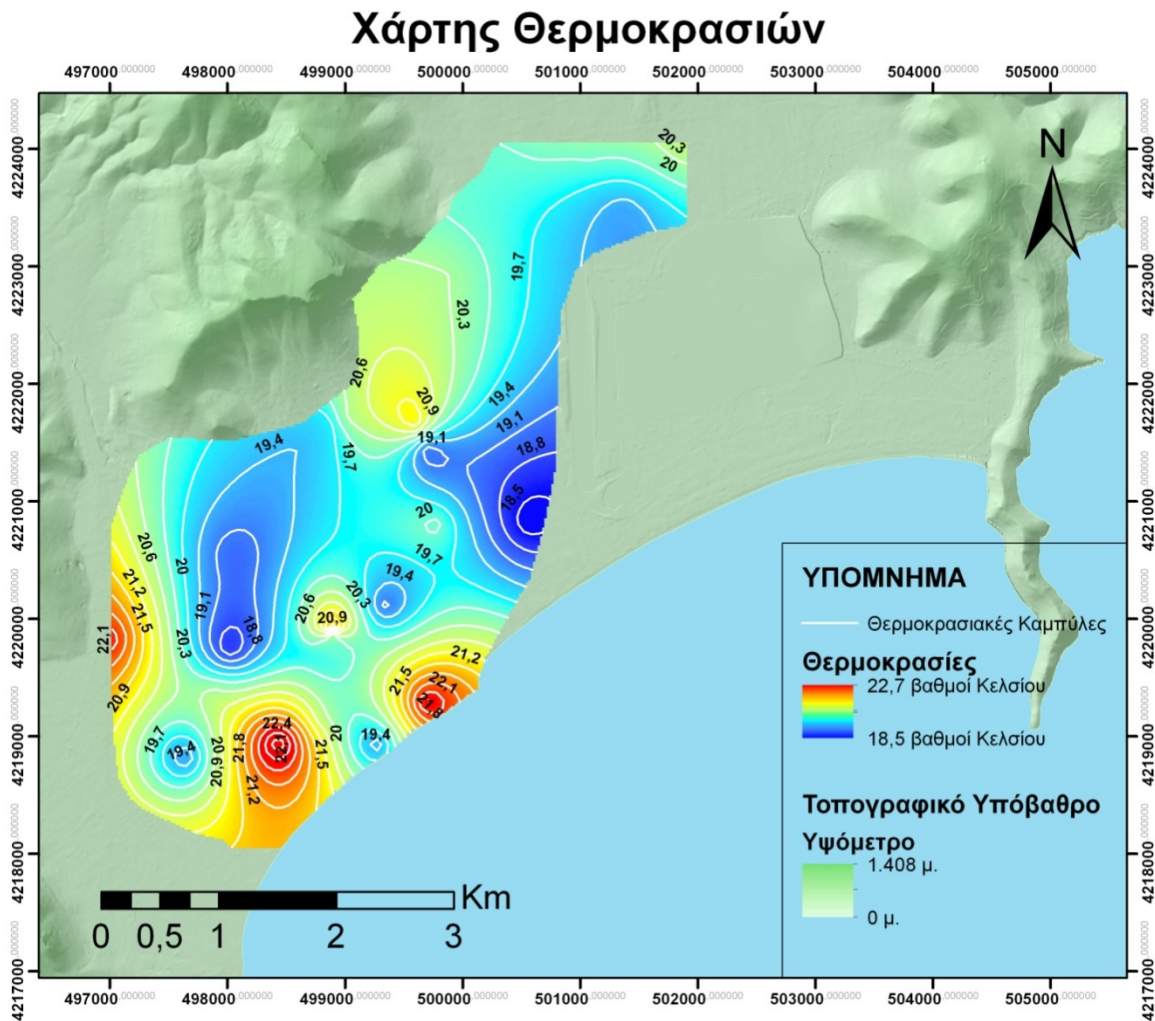
Στο χάρτη διακρίνεται πως οι μεγαλύτερες τιμές του pH (>7) εντοπίζονται στις εκτάσεις που ο υδροφορέας συνορεύει με το καρστικό σύστημα της περιοχής του οποίου τα νερά είναι ουδέτερα ή ελαφρώς βασικά. Μια ανωμαλία που εμφανίζεται στο ΝΔ τμήμα της περιοχής μελέτης όπου τα αντίστοιχα δείγματα που έχει διενεργηθεί η μέτρηση του pH παρουσιάζουν τιμές μεγαλύτερες του 7, παρά το γεγονός πως βρίσκονται πολύ κοντά στην ακτογραμμή.

6.1.4.3 Θερμοκρασία (°C)

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

Σύμφωνα με το Βουδούρη (2009), η θερμοκρασία των υπόγειων νερών επηρεάζεται άμεσα από τη θερμοκρασία των πετρωμάτων που τα φιλοξενούν. Σε γενικές γραμμές, η θερμοκρασία στα υπόγεια νερά παραμένει σταθερή. Στα πιο επιφανειακά, η θερμοκρασία κυμαίνεται ανάλογα με τις μεταβολές της ηλιακής ενέργειας στην επιφάνεια της γης. Ακόμη, η θερμοκρασία στους υπόγειους υδροφορείς αλλάζει σύμφωνα με τις διακυμάνσεις του υδραυλικού φορτίου. Σε βαθύτερα σημεία του υδροφόρου παρατηρούνται μικρότερες θερμοκρασίες από ότι σε λιγότερο βαθιά. (Περδικάκη, 2016)

Βάσει των δεδομένων από τις μετρήσεις, η ελάχιστη θερμοκρασία που καταγράφηκε είναι 18,30°C και η μέγιστη 22,50 °C. Ταυτόχρονα η μέση θερμοκρασία είναι περί τους 20 °C. Στον ακόλουθο χάρτη 8, διακρίνεται η κατανομή της θερμοκρασίας στον προσχωματικό υδροφορέα. Οι χαμηλότερες θερμοκρασίες παρατηρούνται προς το εσωτερικό της πεδιάδας καθώς και στην περιοχή της Μακαρίας πηγής όπου εκφορτίζεται ο καρστικός υδροφορέας. Μεγάλες θερμοκρασίες καταγράφονται και κατά μήκος της ακτογραμμής όπου ο υδροφορέας συνορεύει με τη θάλασσα και επιδρά στις μετρήσεις η έντονη ανάμιξη του γλυκού και αλμυρού νερού. Οι υψηλές μετρήσεις που παρατηρούνται στο δυτικό όριο της περιοχής μελέτης, όπου ο υδροφορέας επαφίεται με τα μάρμαρα, είναι πολύ πιθανό να οφείλονται στο μικρό πάχος του στρώματος, πράγμα που σημαίνει ότι το νερό να βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια του εδάφους.



Χάρτης 8: Καταγραφή της θερμοκρασίας στον προσχωματικό υδροφορέα

Για τα δείγματα του καρστικού υδροφορέα δεν παρατηρούνται σημαντικές μεταβολές. Όπως φαίνεται και στον πίνακα 3 η μέση θερμοκρασία είναι 19,3 °C, ενώ η θερμοκρασία κυμαίνεται από 17,6 °C έως 20,5 °C.

Η θερμοκρασία μπορεί να αποτελέσει αποτελεσματικό ιχνηθέτη για τον εντοπισμό και τον προσδιορισμό της αλληλεπίδρασης μεταξύ υπόγειων και επιφανειακών νερών αλλά και μεταξύ υπόγειων νερών διαφορετικής προέλευσης. Στην περιοχή μελέτης, η κατανομή της θερμοκρασίας επιβεβαιώνει την υδραυλική επικοινωνία μεταξύ του αλλουβιακού και του καρστικού υδροφορέα.

6.1.5 Χημικές Αναλύσεις

Τα δείγματα που συλλέχθηκαν, στη συνέχεια μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο, όπου, όπως προαναφέρθηκε, υποβλήθηκαν σε χημική επεξεργασία ώστε να αναλυθούν ως προς τα βασικά τους ιόντα. Τα αποτελέσματα για τον κάθε υδροφορέα παρουσιάζονται παρακάτω.

Πίνακας 5: Αποτελέσματα Χημικών Αναλύσεων Καρστικού Υδροφορέα

ID	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻
MG 84	288	8,2	243,49	7,78	464	176,9	145	64	0,028
MG44	109,6	14	192,23	7,776	417	296	500	27,9	0,21
MG53	310,4	13,6	161,39	34,26	575	158,6	130	30,8	0,027
MG4	202,8	6,4	147,38	46,66	363	30,5	25	36,9	0,015

Πίνακας 6: Αποτελέσματα Χημικών Αναλύσεων Αλλουβιακού Υδροφορέα

ID	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻
MG71	310,4	12	219,46	41,80	620	439,42	140	46,3	0,03
MG24	548	9,3	387,67	71,93	999	310,61	230	254,6	0,15
MG73	318	8,6	198,64	23,33	568	291,31	230	23,2	0,44
MG74	388	12	313,98	58,32	853	362,32	330	60,7	1,33
MG75	333,6	9,6	222,67	43,74	655	799,1	225	99	0,04
MG76	312	10,4	256,31	11,66	587	716,14	155	76,4	0,02
MG77	450	15	299,56	55,40	870	430,63	300	126,2	0,18
MG13	352	6,8	256,31	46,66	718	423,69	140	156,2	0,14
MG79	116	3,8	237,08	3,89	256	284,32	170	146	0,031
MG 36	183,2	6,8	217,86	23,33	347	423,34	100	36,1	0,02
MG 34	110,4	6	128,15	23,33	187	228,14	95	57,1	0,05
MG 43	344,8	10,4	278,73	36,94	666	483,62	205	96	0,03
MG 82	426,4	11,2	256,31	69,98	884	331,19	300	60,1	0,04
MG 86	620	6,1	211,45	314,93	1720	170,72	420	275,2	0,03
MG 88	318,4	1,2	224,27	15,55	582	381,91	150	43	0,02
MG48	404	12,8	269,12	66,10	898	335,77	220	105,6	0,02
MG2	312,8	8,8	185,82	42,77	548	471,43	125	65,2	0,02

MG57	380	8	358,83	15,55	756	511,31	250	78,6	0,04
MG100	500	9,9	275,53	58,32	1012	545,08	130	28,4	0,04
MG101	440	18,4	253,10	29,16	752	604,32	155	23	0,03
MG102	169,9	6	192,23	46,66	345	498,4	75	118,1	0,03
MG11	173,6	5,2	378,05	69,98	715	322,38	195	218	0,2
MG103	179,2	4	224,27	27,22	395	347,7	125	147	0,06
MG104	115,2	1,6	134,56	34,99	96	580,69	55	99,5	0,03
MG8	68,4	2	269,12	155,52	110	134,2	55	64,5	0,01
MG9	137,6	1,8	211,45	27,22	265	333,69	105	288	0,01
MG51	640	8	379,66	142,88	1405	538,64	440	87,5	1,21
MG 80	104	15,2	224,27	27,22	1264	257	110	64,2	0,06
MG72	674	12	621,55	19,44	1780	55,73	530	6,1	0,37

6.1.5.1 Συγκέντρωση ιόντων χλωρίου (Cl⁻)

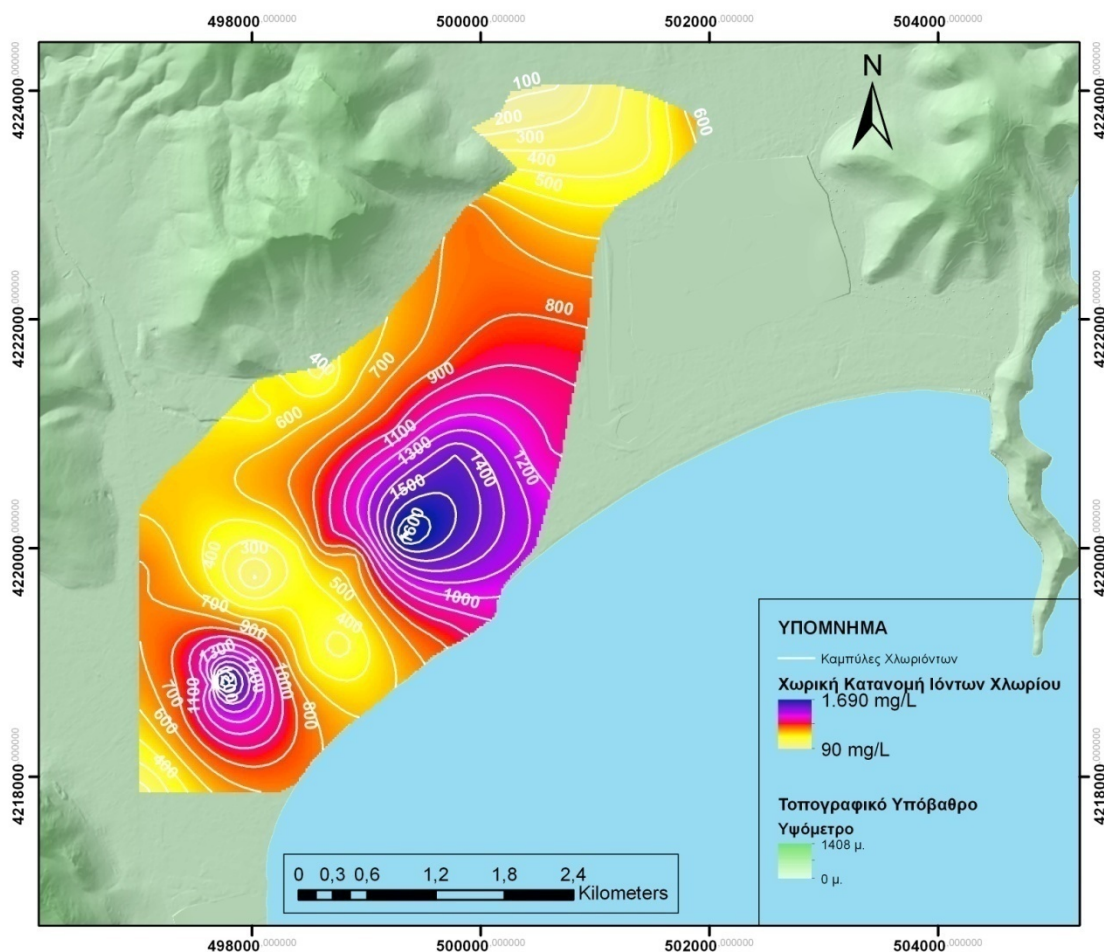
Η υψηλή συγκέντρωση χλωριόντων στις διάφορες υδάτινες μάζες προέρχεται κυρίως από τα ιζηματογενή πετρώματα που περιέχουν αργιλικά ορυκτά θαλάσσιας προέλευσης, τέτοια είναι οι εβαπορίτες και οι θερμές πηγές, ενώ στους παράκτιους υδροφορείς συνδέεται με τη διείδυση της θάλασσας (Βουδούρης 2009). Σύμφωνα με τον Καλλέργη (2000) η ξηρότητα του κλίματος συνδέεται ευθέως με τη συγκέντρωση χλωριόντων. Συγκεκριμένα, στις υγρές περιοχές η συγκέντρωση χλωριόντων φτάνει τα 10 mg/L, ενώ στις ξηρές είναι μεγαλύτερη των 100 mg/L. Ο ανθρώπινος παράγοντας είναι μια ακόμα παράμετρος που καθορίζει τη χημική σύσταση των υδάτων. Δραστηριότητες όπως η απόθεση αλάτων στους δρόμους για αποπαγοποίηση (deicing salts), τα βιομηχανικά, οικιακά και αγροχημικά απόβλητα, οι αλμύρες πετρελαϊκών πεδίων και η θαλάσσια διείδυση λόγω υπεράντλησης (Καλλιώρας, 2008).

Στην περίπτωση του Μαραθώνα, οι ιδιαίτερα υψηλές συγκεντρώσεις χλωριόντων που απεικονίζονται και στον πίνακα 5 και 6, προέρχονται ως επί το πλείστον από την εισχώρηση της θάλασσας στον υδροφόρο. Κατά το φαινόμενο αυτό, όπως έχει επεξηγηθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, το υπόγειο σύστημα της περιοχής συνδέεται υδραυλικά με τη θάλασσα και τελικά απορρέει σε αυτή.

Η αυξημένες τιμές χλωριόντων στην περιοχή οφείλονται στην υπεράντληση των υπόγειων υδατικών πόρων από τα πολυάριθμα πηγάδια και γεωτρήσεις της περιοχής, σε συνδυασμό με τις περιορισμένες βροχοπτώσεις και την ελλιπή πλήρωση των υδροφορέων. Σε τέτοια έκταση έχει μάλιστα προχωρήσει η εν λόγω διαδικασία που αν συγκρίνουμε τις τιμές που παρουσιάζουν τα δείγματά με την ενδεικτική τιμή που μας παρέχει ο Βουδούρης για τις ξηρές περιοχές βλέπουμε πως είναι πολλαπλάσιες.

Η κατανομή των ιόντων χλωρίου φαίνεται αναλυτικά στο χάρτη 9, η οποία ακολουθεί το πρότυπο κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Η μεγαλύτερη συγκέντρωση χλωριόντων σημειώνεται στο κέντρο της πεδιάδας και κατά μήκος της ακτογραμμής, προς το Βορρά και το Νότο, δηλαδή στα όρια του αλλουβιακού και του καρστικού ορίζοντα, οι τιμές είναι αρκετά χαμηλότερες. Ταυτόχρονα, μια δεύτερη εστία αυξημένων τιμών παρουσιάζεται στο Νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης.

Χάρτης Κατανομής Χλωριόντων



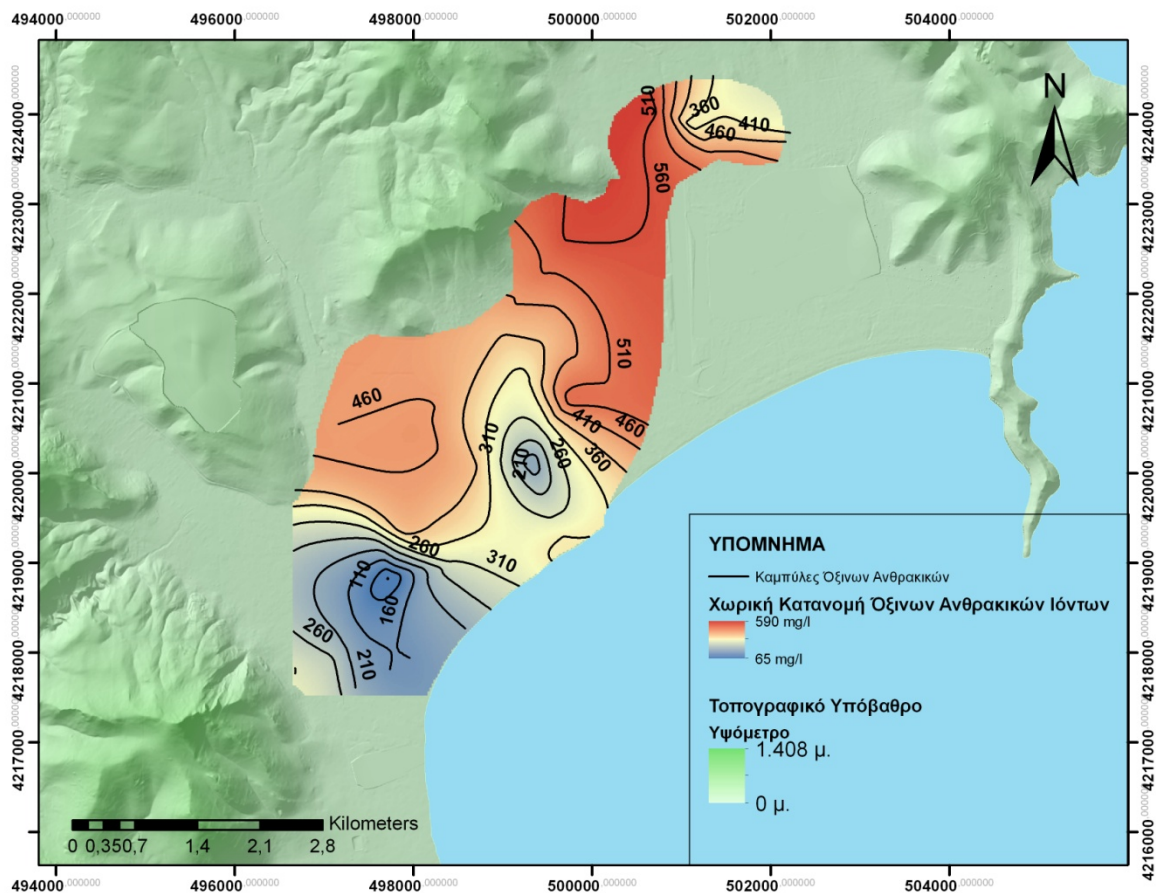
Χάρτης 9: Χάρτης Κατανομής Χλωριόντων στον αλλουβιακό υδροφορέα

Καθίσταται σαφές πως οι συγκεντρώσεις των χλωριόντων του καρστικού υδροφορέα σε σχέση με αυτές του αλλουβιακού κυμαίνονται σε πολύ χαμηλότερα επίπεδα υπαλμύρισης. Μια πιθανή εξήγηση είναι το κατά πολύ μεγαλύτερο δυναμικό υδροφορίας του καρστικού συστήματος από το αλλουβιακό, καθώς και στον περιορισμένο αριθμό βαθών γεωτρήσεων (που θα αντλούσαν από τον υψομετρικά χαμηλότερο καρστικό υδροφορέα) που εντοπίστηκαν στην περιοχή. Τελικά, στην περιοχή από την οποία ελήφθησαν τα καρστικά δείγματα παρουσιάζει μικρότερη ποιοτική υποβάθμιση από την υπόλοιπη πεδιάδα, ακόμα και σε ό,τι αφορά την κατάσταση του αλλουβιακού υδροφορέα.

6.1.5.2 Συγκέντρωση όξινων ανθρακικών ιόντων(HCO_3^-)

Κατά τον Βουδούρη (2009), τα όξινα ανθρακικά ιόντα είναι το επικρατέστερο ανιόν στο γλυκό νερό. Η προέλευση τους είναι αποτέλεσμα της ύπαρξης ατμοσφαιρικού CO_2 ή από την έκλυση του ίδιου αερίου κατά την αποσύνθεση της οργανικής ύλης στο έδαφος. Από την άλλη ο Καλλέργης (2000) αναφέρει ότι κύρια πηγή των ανθρακικών (CO_3^{2-}) και των όξινων ανθρακικών (HCO_3^-) αποτελούν οι ασβεστόλιθοι και οι δολομίτες, ενώ η τιμή τους είναι συνήθως μικρότερη των 500 mg/L και λίγες είναι οι φορές που ξεπερνά τα 1000 mg/L.

Στην περιοχή μελέτη η κατανομή των όξινων ανθρακικών ιόντων ακολουθεί την κάτωθι κατανομή.



Χάρτης Κατανομής Όξινων Ανθρακικών Ιόντων

Χάρτης 10: Κατανομή Όξινων Ανθρακικών Ιόντων στον Αλλουβιακό Υδροφορέα

Η παραπάνω κατανομή δείχνει την επίδραση του καρστικού υδροφορέα στη συγκέντρωση των όξινων ανθρακικών ιόντων. Στις επαφές του υπόγειου υδροφορέα με τα Μάρμαρα Μαραθώνα, Γραμματικού παρατηρούνται υψηλές τιμές. Το φαινόμενο γίνεται εντονότερο στην κοιλάδα του Μαραθώνα στην περιοχή που διαπερνάται από το κανάλι της Μακαρίας και στο Κάτω Σούλι. Η αύξηση κατά πάσα πιθανότητα οφείλεται στην εκφόρτιση της Μακαρίας πηγής με ταυτόχρονη τροφοδοσία του κοκκώδους συστήματος.

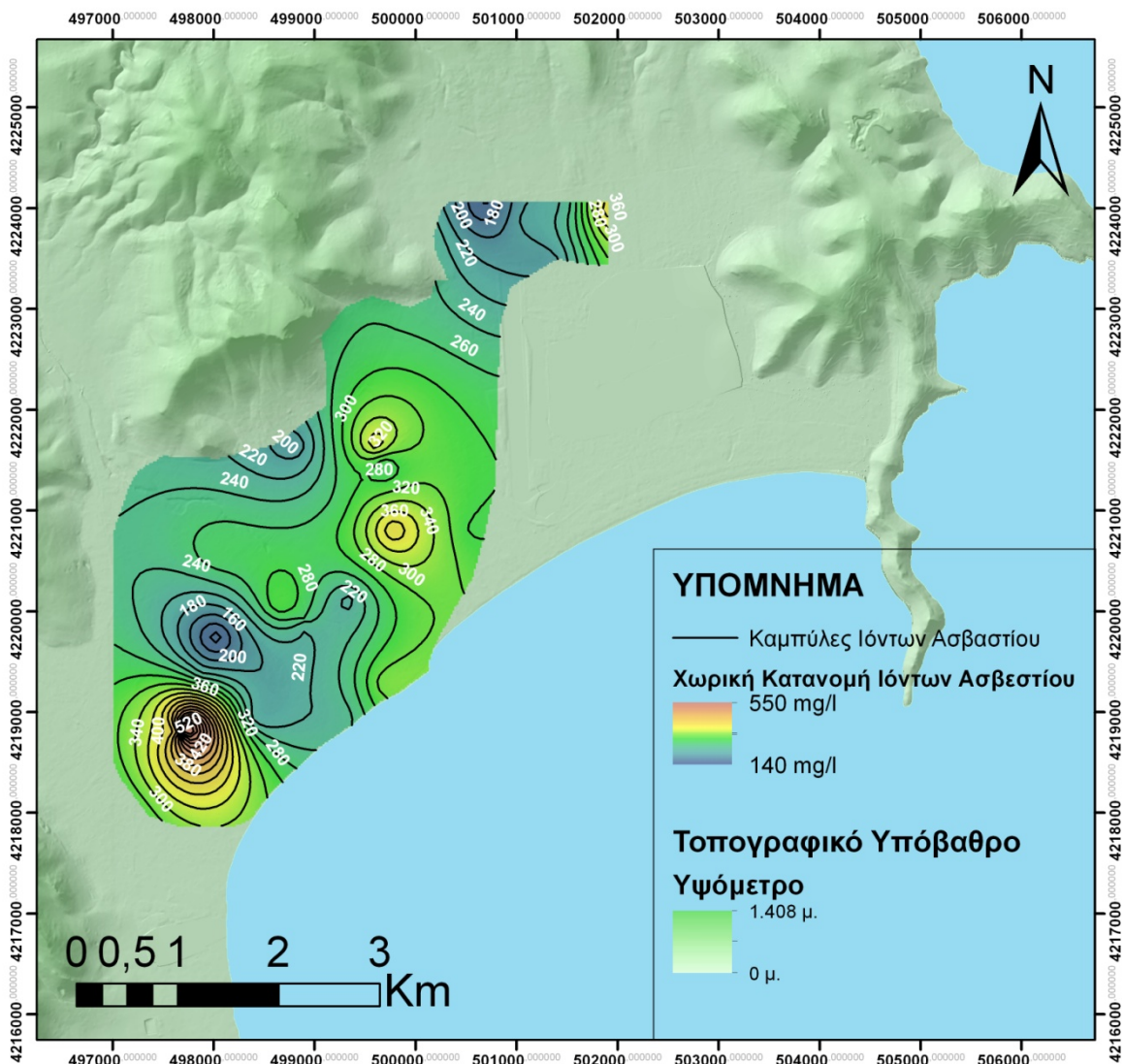
6.1.5.3 Συγκέντρωση Ιόντων Ασβεστίου (Ca^{2+}) και Μαγνησίου (Mg^{2+}) - Σκληρότητα νερού

Η σκληρότητα των νερών προέρχεται από την παρουσία δισθενών μεταλλικών κατιόντων, εκ των οποίων τα πιο συνηθισμένα είναι το Ca^{2+} και το Mg^{2+} . Ο προσδιορισμός της σκληρότητας έχει μεγάλη σημασία γιατί αποτελεί κριτήριο καταλληλότητας για πολλές χρήσεις των νερών γιατί δείχνει την τάση για σχηματισμό ανθρακικών επικαθίσεων στους λέβητες και τις ψυκτικές δεξαμενές, την ικανότητα δέσμευσης σαπώνων και χρωμάτων. Η σκληρότητα του πόσιμου νερού μεταξύ των άλλων συνδέεται και με την υγεία του ανθρώπου και συγκεκριμένα σχετίζεται με καρδιακές παθήσεις.

Η κύρια προέλευση του ασβεστίου (Ca) είναι τα ανθρακικά ιζηματογενή πετρώματα και τα μάρμαρα. Επίσης, προέρχεται από τους ασβεστονατριούχους άστριους, τη γύψο, τους πυρόξενους, τους αμφιβόλους, καθώς και σε ορυκτά της ομάδας του επίδοτου. Το μαγνήσιο (Mg^{2+}) απαντάται στον ολιβίνη (Mg, Fe) SiO_4 , μαγνησίτη, δολομίτη και τους χλωρίτες. Επίσης, στα ανθρακικά πετρώματα, στα οποία είναι περισσότερο άφθονο όταν περιέχουν μαγνησίτη ($MgCO_3$) και δολομίτη ($CaCO_3, MgCO_3$). Προέρχεται και από τη διάλυση αργιλικών ορυκτών, όπου βρίσκεται προσροφημένο στο πλέγμα τους. Ο λόγος Ca/Mg στο θαλασσινό νερό είναι περίπου 0,25, σε υφάλμυρα νερά 1,5-3,7, ενώ σε ασβεστολιθικά νερά 1,6 και σε δολομιτικά νερά 1,25 (Βουδούρης, 2006).

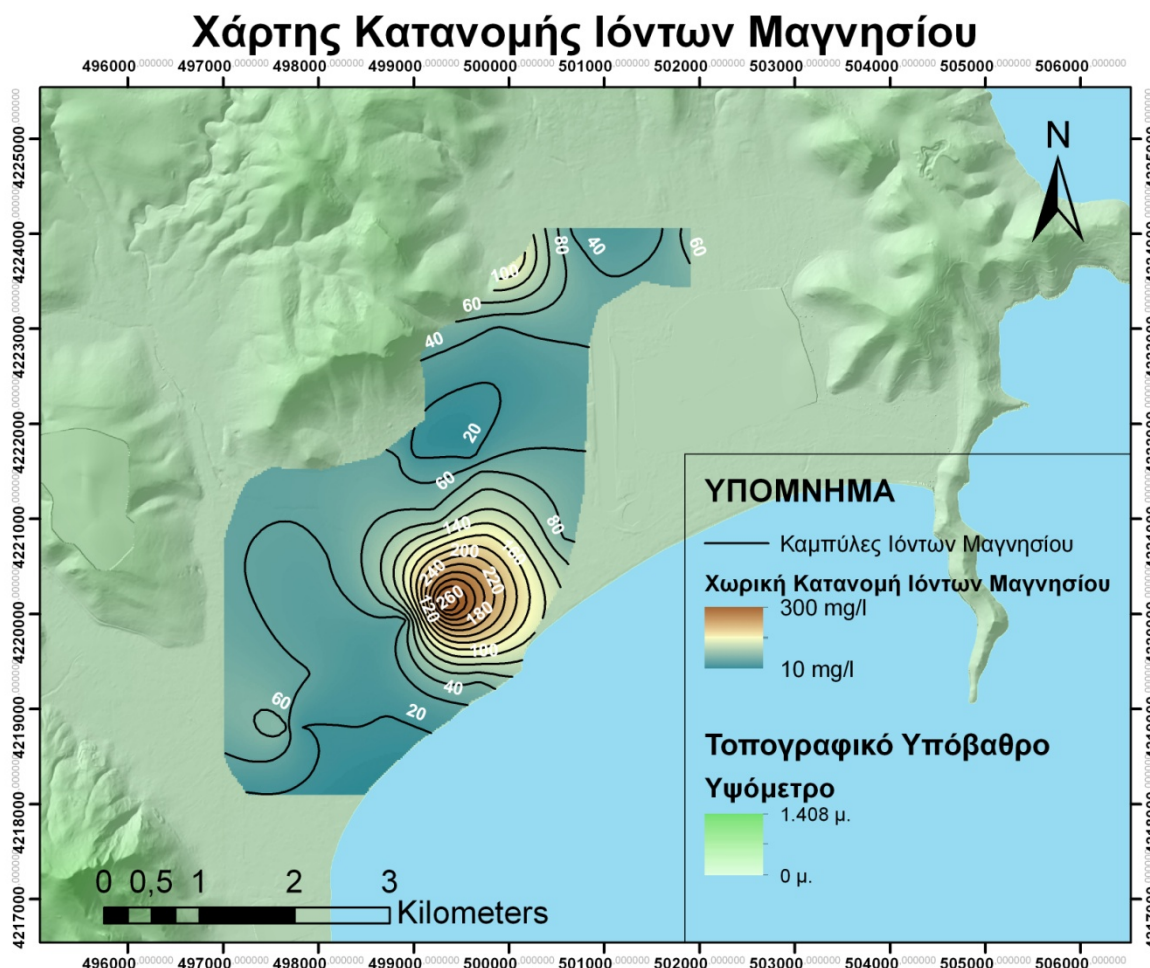
Η χωρική κατανομή του ασβεστίου και του μαγνησίου παρουσιάζεται στους παρακάτω χάρτες.

Χάρτης Κατανομής Ιόντων Ασβεστίου



Χάρτης 11: Χάρτης Χωρικής Κατανομής Κατιόντων Ασβεστίου στον αλλουβιακό Υδροφόρα

Συμπερασματικά, η περιοχή στο κέντρο της πεδιάδας εμφανίζει σχετικά αυξημένες τιμές συγκέντρωσης κατιόντων ασβεστίου, το ίδιο και η περιοχή στο Νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης.



Χάρτης 12: Χάρτης Χωρικής Κατανομής Ιόντων Μαγνησίου στον αλλουβιακό υδροφόρα

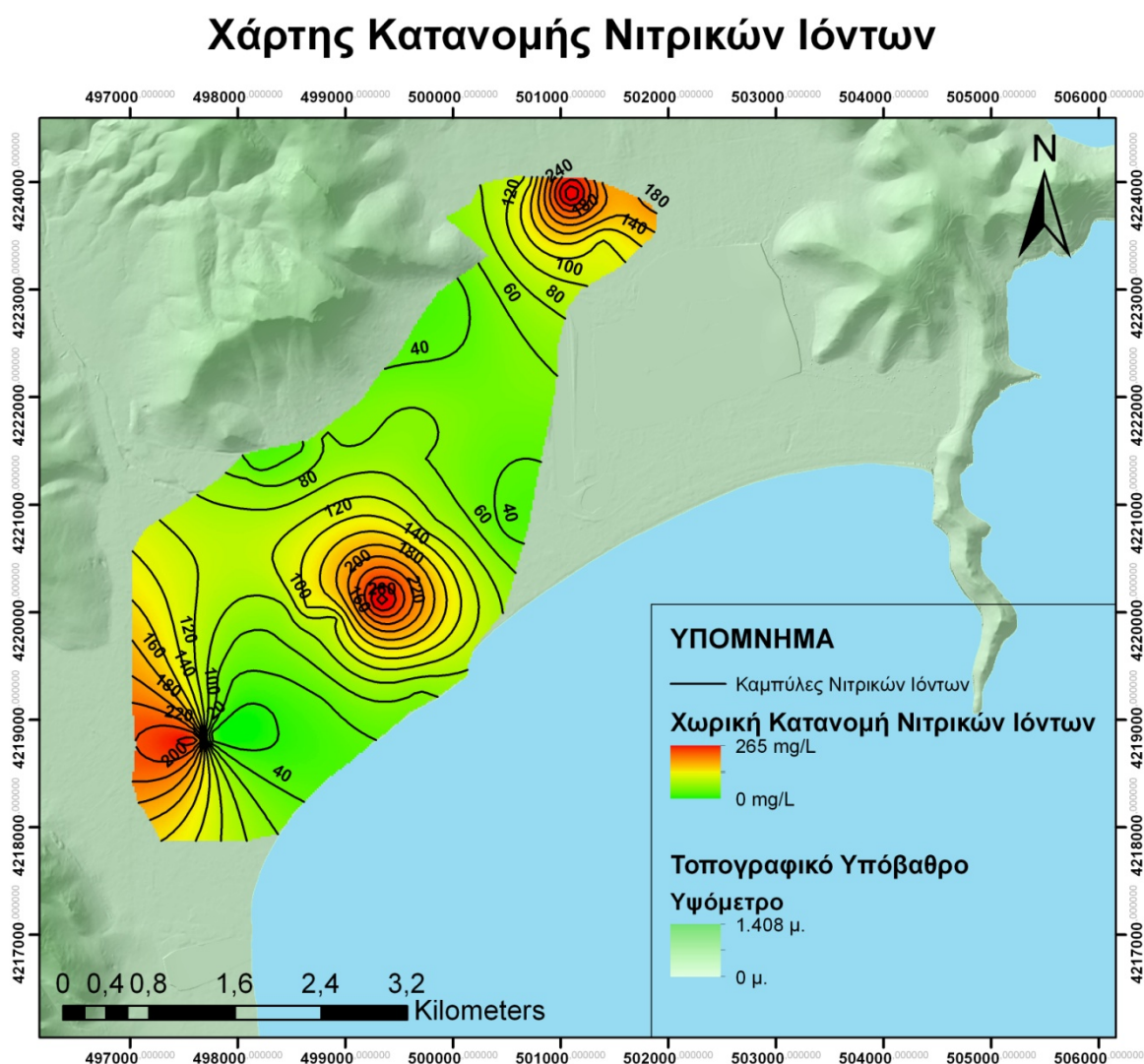
Σε ό,τι αφορά την κατανομή των ιόντων μαγνησίου το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην περιοχή στο κέντρο της πεδιάδας αλλά και Νότια της περιοχής μελέτης. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της κατανομής του μαγνησίου με αυτά της κατανομής του ασβεστίου παρατηρείται η παρακάτω ιδιαιτερότητα. Το Νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης παρουσιάζει υψηλή συγκέντρωση ασβεστίου, χωρίς όμως να παρατηρείται αντίστοιχη συγκέντρωση μαγνησίου. Ένα τέτοιο δεδομένο οδηγεί στο συμπέρασμα πως τα ύδατα της περιοχής είναι υφάλμυρα.

Ακόμα, στο κεντρικό τμήμα της κοιλάδας παρατηρούνται εξίσου υψηλές συγκεντρώσεις ασβεστίου (≈ 360 mg/L) και μαγνησίου (≈ 260 mg/L). Ο λόγος Ca/Mg είναι περίπου ίσος με 1,4, οπότε στη συγκεκριμένη περιοχή διαπιστώνεται μια έντονη πρόσμιξη θαλασσινού νερού στον υδροφόρα, γεγονός που επιβεβαιώνεται κι από το Χάρτη Κατανομής Χλωριόντων (≈ 1.600 mg/L στο ίδιο σημείο). Οι μεγάλες συγκεντρώσεις των μαγνησίου και ασβεστίου είναι ακόμα ένας δείκτης της πιθανής μεγάλης ολικής σκληρότητας που παρουσιάζουν τα ύδατα του συγκεκριμένου τμήματος.

6.1.5.4 Συγκέντρωση Νιτρικών Ιόντων (NO_3^-)

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

Η χωρική κατανομή των νιτρικών ιόντων της πεδιάδας του Μαραθών καταγράφεται στον παρακάτω χάρτη.



Χάρτης 13: : Χωρικής Κατανομής Νιτρικών Ιόντων στον αλλουβιακό υδροφορέα της πεδιάδας του Μαραθώνα

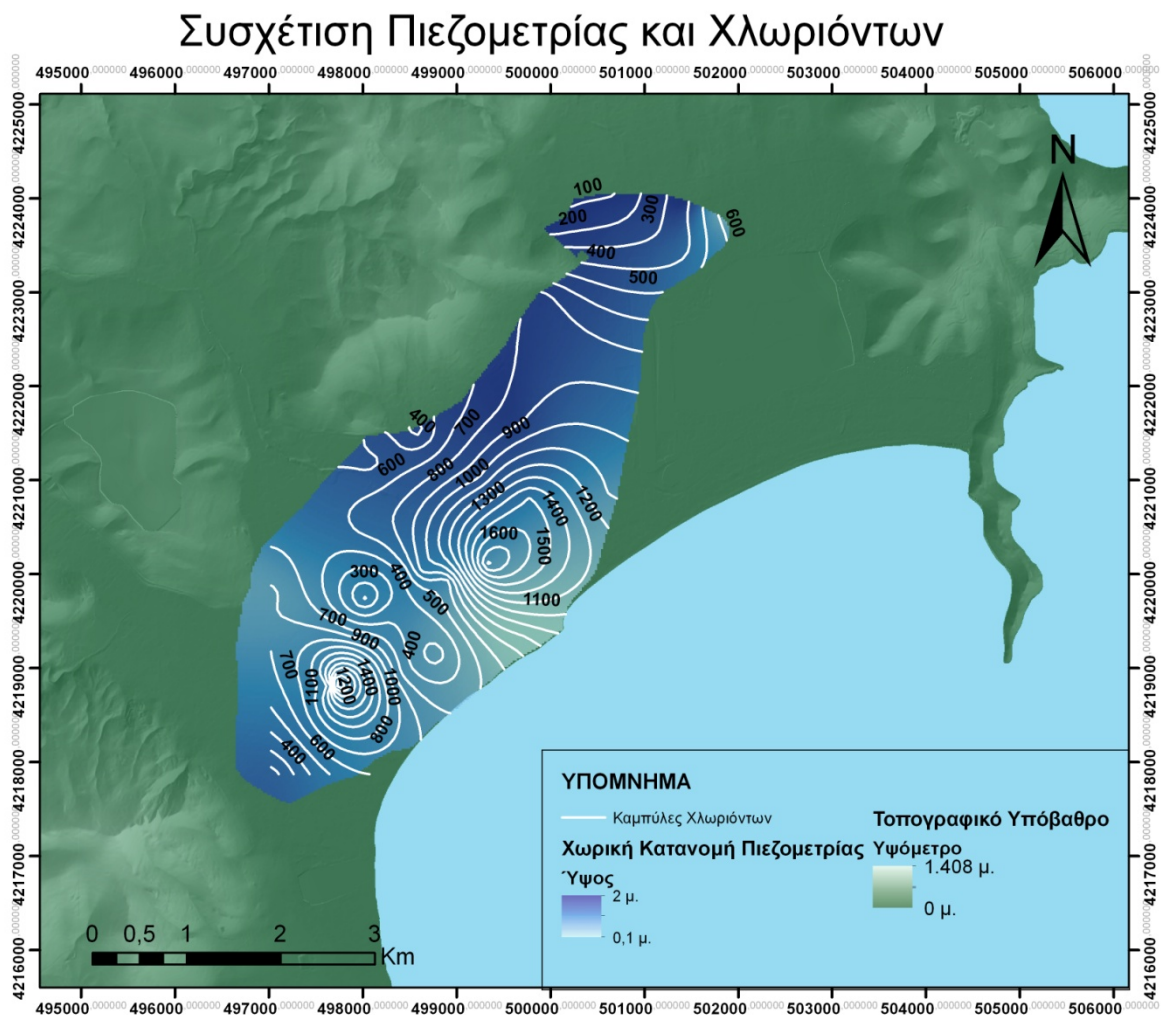
Η εκτεταμένη γεωργική παραγωγή δείχνει πως έχει επηρεάσει σε υπερθετικό βαθμό τη συγκέντρωση νιτρικών ιόντων στον αλλουβιακό ορίζοντα. Πιο συγκεκριμένα, μόνο η περιοχή που διαρρέεται από το ρεύμα της Μακαρίας δείχνει ανθεκτικότητα στη συγκέντρωση νιτρικών ιόντων, ενώ στο σύνολο της η περιοχή κυμαίνεται σε επίπεδα

πολύ υψηλότερα του ορίου των 50mg/L. Άλλη μια παράμετρος είναι και η παρουσία του οικισμού στο συγκεκριμένο τμήμα που περιορίζει την παρουσία καλλιεργήσιμων εκτάσεων. Το αποκορύφωμα παρουσιάζεται σε 3 σημεία της περιοχής μελέτης, στο Βορρά, τον οικισμό του Μαραθώνα και το Νότο, όπου οι τιμές της συγκέντρωσης νιτρικών είναι σχεδόν 5πλάσιες του κανονικού ορίου.

Η παρούσα εικόνα του υδροφορέα ενδεχομένως εδράζεται σε μια χρόνια κακοδιαχείριση των υδατικών πόρων της περιοχής αλλά και την πιθανή έλλειψη προγράμματος αγρανάπαυσης με ταυτόχρονη εκτεταμένη χρήση φυτοφαρμάκων για τις καλλιέργειες.

6.1.5.5 Επίδραση της πιεζομετρίας στην κατανομή των ιόντων Χλωρίου (Cl⁻)

Για τη διαπίστωση του μεγέθους της ρύπανσης του υδροφόρου εν συνόλω, από το θαλασινό νερό, αποτελεί χρήσιμο εργαλείο η συσχέτιση της πιεζομετρίας και της κατανομής των χλωριόντων. Τα σημεία του υδροφόρου με μικρή πιεζομετρία είναι γενικώς πιο ευάλωτοι στη θαλάσσια διείσδυση, με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές συγκέντρωσης χλωριόντων. Για την πεδιάδα του Μαραθώνα η συσχέτιση αυτή επιτυγχάνεται στον παρακάτω χάρτη.



Χάρτης 14: Χάρτης Συσχέτισης Πιεζομετρίας και Ιόντων Χλωρίου

Στο χάρτη καταγράφεται η αναμενόμενη συμπεριφορά της καταγραφής αυξημένων τιμών χλωριόντων στα σημεία με τη χαμηλότερη καταγεγραμμένη πιεζομετρία. Οι τιμές των χλωριόντων πλησίον των παραλίων είναι υψηλότερες εξαιτίας της επιδείνωσης του φαινομένου της θαλάσσιας διείσδυσης. Η πραγματικότητα αυτή δυσχεραίνεται και από το

γεγονός πως στις περιοχές αυτές καταγράφονται χαμηλότερες πιεζομετρίες.

6.1.5.6 Συγκεντρώσεις Κατιόντων Καλίου (K^+) και Νατρίου (Na^+)

Τα αλκάλια Na και K συνδέουν την παρουσία τους με τους αστρίους. Το μεν νάτριο στον αλβίτη ($NaAlSi_3O_8$), το δε κάλιο στο ορθόκλαστο και στον μικροκλινή ($KAlSi_3O_8$). Το Na απαντά επίσης στους νατριούχους αμφιβόλους (γλαυκοφανή) και στον αλίτη ($NaCl$) και το K στον συλβίνη (KCl). Το κάλιο σχετίζεται επίσης και με καλιούχα λιπάσματα. Η παρουσία των αλκαλίων σχετίζεται και με τη διείδυση της θάλασσας σε παράκτιους υδροφόρους ορίζοντες ή με αερομεταφερόμενα σταγονίδια από τη θάλασσα. Το ενδεικτικό επίπεδο συγκέντρωσης νατρίου στα υπόγεια νερά είναι τα 20 mg/L. Στο θαλασσινό νερό ανέρχεται σε 10.000 mg/L. Περισσότερο από 50 mg/L νατρίου και καλίου προκαλούν σαπνωποίηση που επιταχύνει τη διάβρωση στους λέβητες, δημιουργώντας κρούστα. Σε μικρές περιεκτικότητες το νάτριο και το κάλιο συμμετέχουν στην ωσμωτική ισορροπία του κυττάρου. Μεγάλες συγκεντρώσεις ιόντων νατρίου στο πόσιμο νερό επιφέρουν προβλήματα στην υγεία των ανθρώπων που το χρησιμοποιούν (αυξάνει την αρτηριακή πίεση). (Βουδούρης, 2006)

6.1.5.7 Συγκέντρωση Νιτρωδών Ανιόντων (NO_2^-)

Τα νιτρώδη ανιόντα εμφανίζονται ως ενδιάμεσο στάδιο της βιολογικής ανασύνθεσης από ενώσεις που περιέχουν οργανικό άζωτο και είναι εξαιρετικά ασταθή. Η αμμωνία μετατρέπεται κάτω από αερόβιες συνθήκες σε νιτρώδη με τη βοήθεια βακτηριδίων.

Η παρουσία νιτρώδων αλλά και αμμωνίας υποδηλώνει ρύπανση από λύματα. Σαν ανώτατη αποδεκτή συγκέντρωση έχουν ορισθεί τα 0,1 mg/L. Στα επιφανειακά νερά η παρουσία των νιτρωδών είναι περιορισμένη γιατί οξειδώνονται σε νιτρικά με την παρουσία φωτός και βακτηριδίων.

Στον παρακάτω πίνακα σημειώνονται τα δείγματα του αλλουβιακού και καρστικού υδροφόρου που παρουσιάζουν μη αποδεκτές συγκεντρώσεις νιτρωδών ιόντων.

Πίνακας 7: Τιμές Νιτρωδών Ιόντων Αλλουβιακού και Καρστικού Υδροφορέα

ID(alluvial)	NO ₂ ⁻ (mg/L)
MG 71	0,03
MG 24	0,15
MG 73	0,44
MG 74	1,33
MG 75	0,04
MG 76	0,02
MG 77	0,18
MG 13	0,14
MG 79	0.031
MG 36	0,02
MG 34	0,05
MG 43	0,03
MG 82	0,04
MG 86	0,03
MG 88	0,02
MG 48	0,02
MG 2	0,02
MG 57	0,04
MG 100	0,04
MG 101	0,03
MG 102	0,03
MG 11	0,2
MG 103	0,06
MG 104	0,03
MG 8	0,01
MG 9	0,01
MG 51	1,21
MG 80	0,06
MG 72	0,37
ID(karst)	NO ₂ ⁻ (mg/L)
MG 84	0,03
MG 44	0,21
MG 53	0,03
MG 4	0,02

Παρατηρείται πως σε 8 δείγματα του αλλουβιακού υδροφόρου εμφανίστηκαν μη αποδεκτές τιμές νιτρικών ιόντων, ενώ και σε ένα δείγμα του καρστικού υδροφόρου βρέθηκαν υψηλές τιμές νιτρικών ιόντων.

6.1.6 Υδρογεωχημικά Διαγράμματα και Δείκτες

Με τα άνωθεν αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν στα δείγματα, δημιουργήθηκε η βάση δεδομένων που στη συνέχεια οδήγησε στην εύρεση του χημικού τύπου του νερού. Με τις δυνατότητες που παρέχει το λογισμικό Aquachem 4.0 κατέστη δυνατή η περιγραφή των υδρογεωχημικών ιδιοτήτων κάθε δείγματος.

6.1.6.1 Υδροχημικός χαρακτηρισμός υδάτων

Οι χημικοί τύποι των υδάτων που προέκυψαν από την ανάλυσή τους παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 8: Υδροχημικός τύπος δειγμάτων αλλουβιακού υδροφορέα

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

Πίνακας 9: Υδροχημικός τύπος δειγμάτων καρστικού υδροφορέα

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

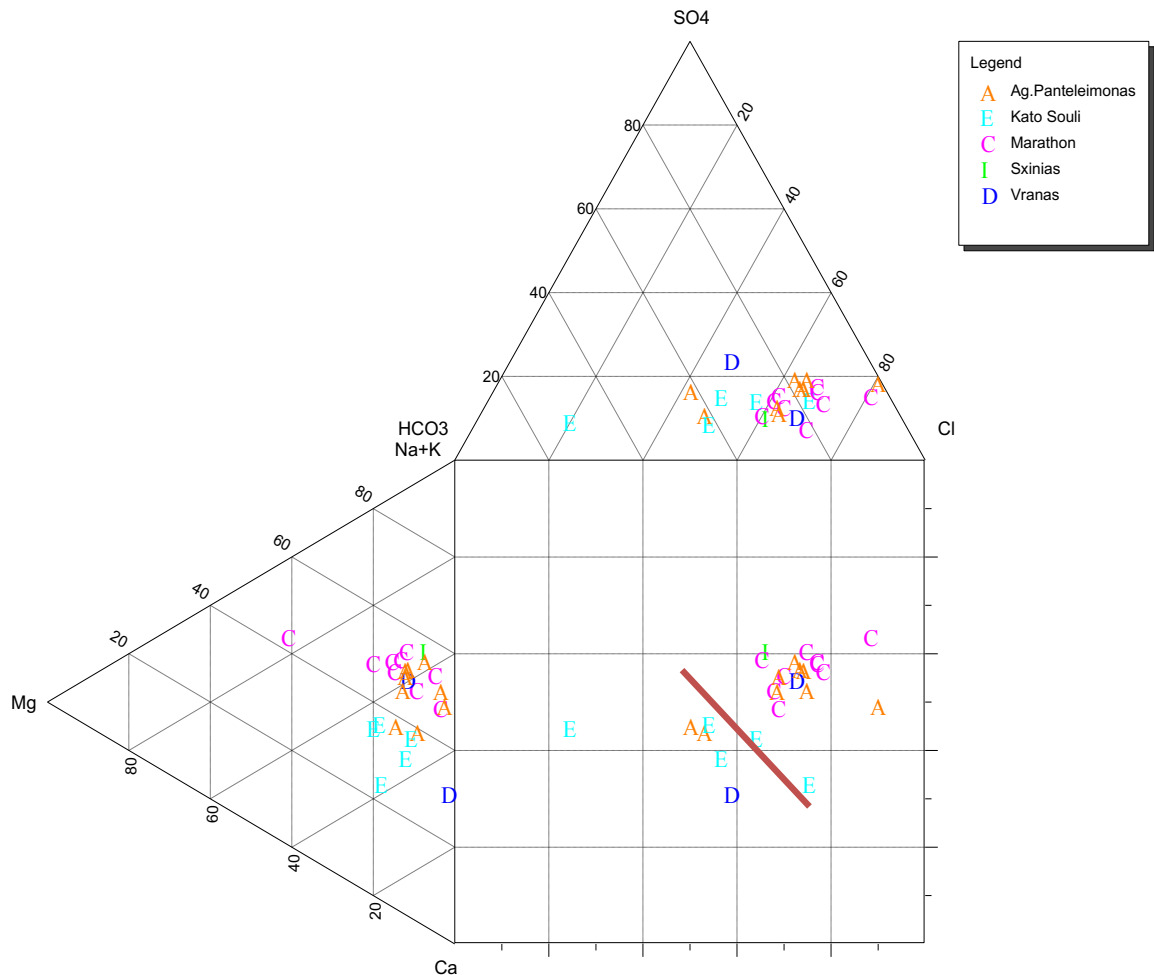
Τα νερά με υδροχημικό τύπο Ca-HCO₃, προέρχονται από την αλληλεπίδραση του μεταωρικού νερού με τα πετρώματα, που είναι πλούσια σε ορυκτά με ασβέστιο, όπως γάββρους και βασάλτες (Oze et al, 2007). Τέτοια νερά στην περιοχή μελέτης εντοπίζονται

εξαιτίας της ύπαρξης μαραμάρων. Από τους πίνακες παρατηρείται πως όλα τα δείγματα καρστικών νερών έχουν στον τύπο τους Ca-HCO_3 , και μεγάλο μέρος των δειγμάτων του κοκκώδους σχηματισμού. Όλα τα δείγματα παρουσιάζουν εμφανή επικράτηση των κατιόντων Νατρίου (Na^+) και ανιόντων χλωρίου (Cl^-), γεγονός που οφείλεται στην υφαλμύριση των νερών εξαιτίας της θαλάσσιας διείσδυσης. Η ύπαρξη SO_4^{2-} σε δύο από τα δείγματα νερού έχει πιθανές καταβολές στη χρήση γεωργικών λιπασμάτων στην περιοχή ή ακόμα και σε ανεπεξέργαστα λύματα κτηνοτροφικών μονάδων.

6.1.6.2 Ταξινόμηση κατά Durov

Το διάγραμμα Durov είναι ο πιο διαδεδομένος τρόπος για την άμεση ταξινόμηση των υπογείων νερών σε διάφορους τύπους (επωνομαζόμενους και ως φάσεις). Το εν λόγω διάγραμμα αποτελείται από δύο απλά τρίγωνα, ανιόντων και κατιόντων, που η τομή των προεκτάσεων τους προβάλλεται σε κεντρικό ορθογώνιο διάγραμμα. Τα δείγματα ταξινομούνται, ανάλογα με τη χημική τους σύσταση και το επικρατέστερο ανιόν και κατιόν. Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται τα διαγράμματα που κατασκευάστηκαν για τον αλλουβιακό και καρστικό υδροφορέα.

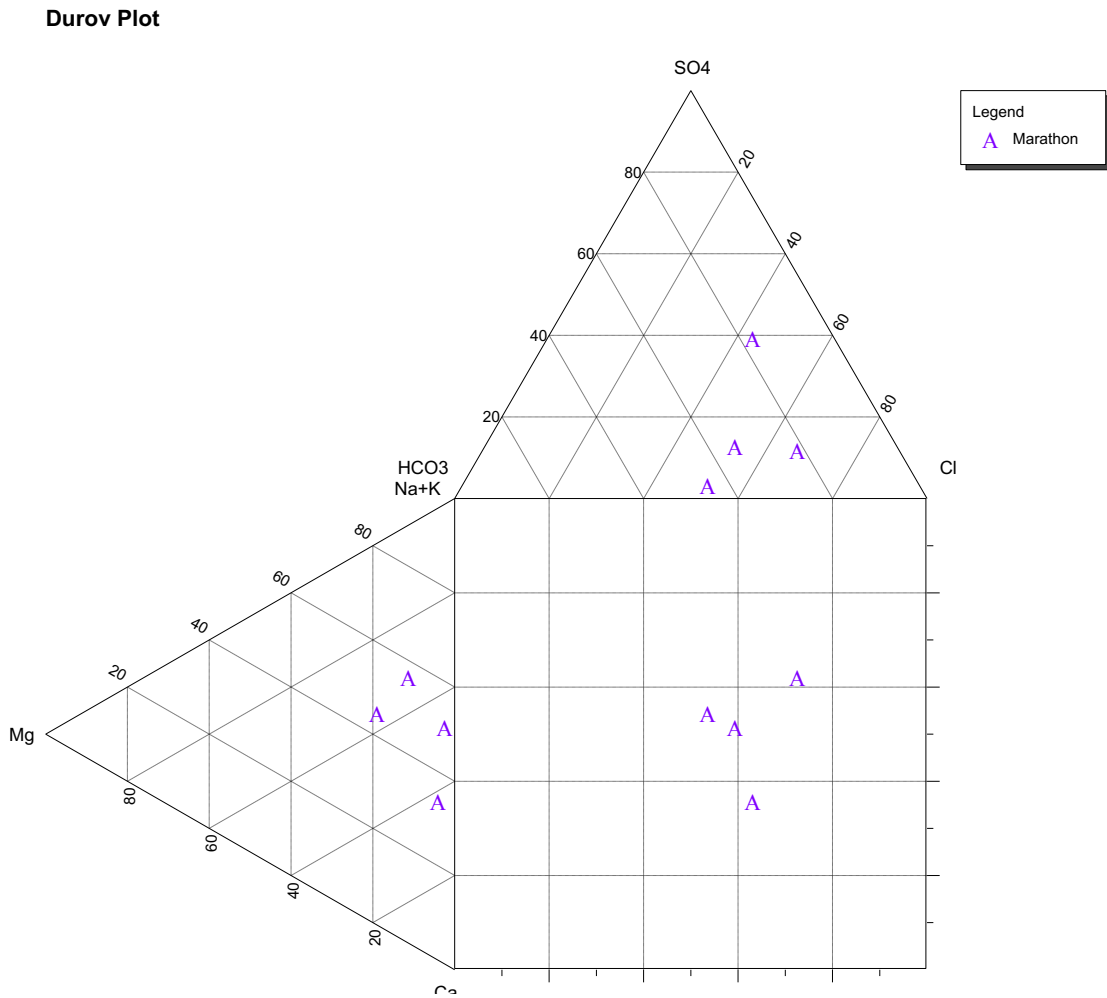
Durov Plot



Διάγραμμα 4: Διάγραμμα Durov για τα δείγματα του αλλουβιακού υδροφορέα

Τα δείγματα του αλλουβιακού υδροφορέα μπορούν να διαιρεθούν σε 2 κατηγορίες, που στο κατά Durov διάγραμμα οριοθετούνται από την κόκκινη γραμμή. Η πλειοψηφία των δειγμάτων τοποθετούνται άνωθεν της γραμμής έχουν ως βασικό χαρακτηριστικό την

επικράτηση των ιόντων Cl⁻. Πρόκειται για υπόγεια νερά στα οποία το φαινόμενο της αντίστροφης ανταλλαγής κατιόντων βρίσκεται σε πλήρη εξέλιξη. Στην κατηγορία αυτή συναντώνται τα περισσότερα δείγματα που συλλέχθηκαν από την Περιοχή του οικισμού του Μαραθώνα και τον Αγ. Παντελεήμονα, περιοχές που επηρεάζονται έντονα από το φαινόμενο της υφαλμύρισης. Στην παρακάτω κατηγορία τα νερά δε χαρακτηρίζονται μεμονωμένα από κάποιο ιόν αλλά πρόκειται για μικτά νερά ή νερά διαλυτοποίησης.

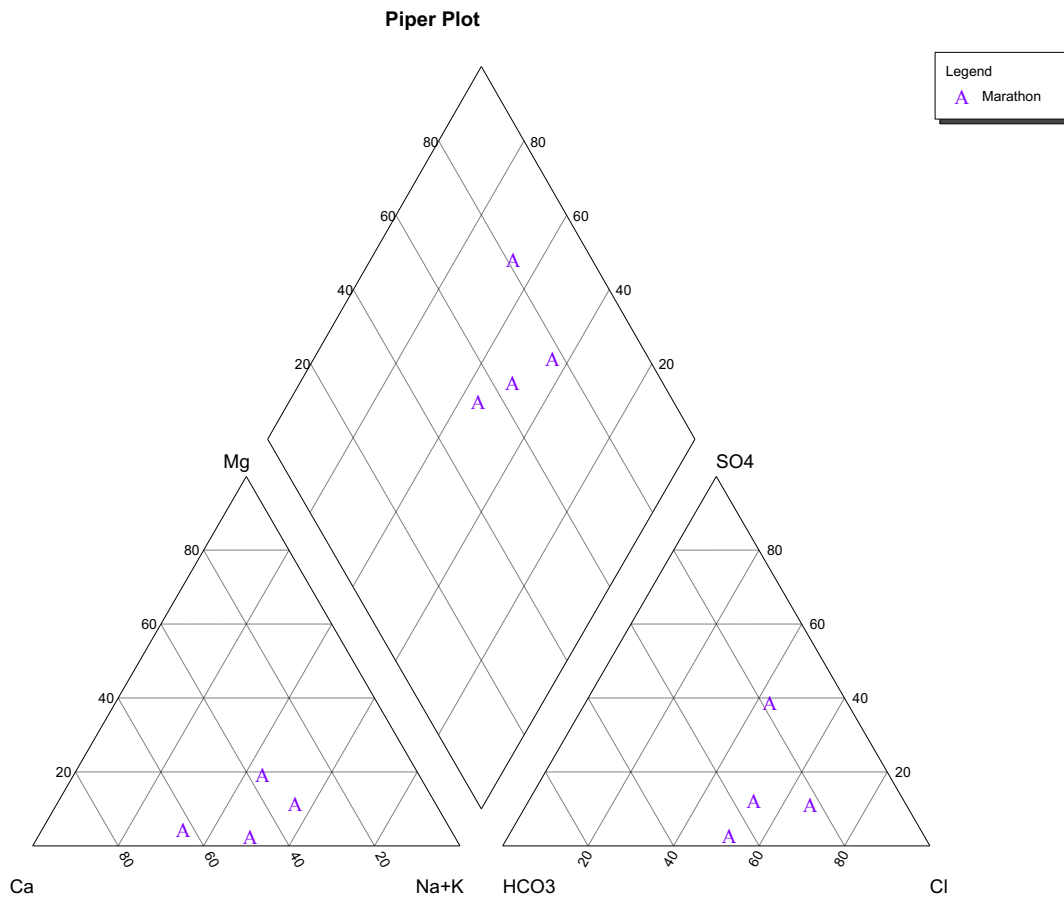


Διάγραμμα 5: Διάγραμμα Durov για τα δείγματα του καρστικού υδροφορέα

Πέραν ενός δείγματος όπου κύριο είναι το ανιόν χλωρίου, τα υπόλοιπα δείγματα αποτελούν προϊόν διαλυτοποίησης όπου δεν επικρατεί κάποιο ιόν.

6.1.6.3 Ταξινόμηση κατά Piper

Τα τριγωνικά διαγράμματα κατά Piper (1944) περιλαμβάνουν τη σύνθεση των κύριων ανιόντων και κατιόντων των δειγμάτων υπογείων νερών, τα οποία προβάλλονται σε ανεξάρτητα τρίγωνα. Το αποτέλεσμα είναι η αναγωγή της χημικής σύστασης του υπόγειου νερού σε μεμονωμένα σημεία τα οποία αντιπροσωπεύουν την ποσοστιαία συγκέντρωση (σε meq/L) κάθε ανιόντος ή κατιόντος. Η συγκεκριμένη μέθοδος κατάταξης, αποδεικνύεται χρήσιμη για τον εντοπισμό του υδροχημικού τύπου και για την ερμηνεία υδροχημικών σχέσεων μεταξύ των υπόγειων νερών. Τα παρακάτω σχήματα παρουσιάζουν τα διαγράμματα κατά Piper για τα δείγματα του αλλουβιακού και καρστικού υδροφορέα.



Διάγραμμα 7: Διάγραμμα Piper για τα δείγματα του καρστικού υδροφορέα

Στον καρστικό υδροφορέα παρατηρείται πως τα περισσότερα δείγματα εμπεριέχονται στη ζώνη υφαλμισρισμένων δειγμάτων. Πρόκειται για υφάλμυρα υπόγεια νερά.

6.1.6.4 Δείκτης SAR και ταξινόμηση κατά Wilcox

Ο δείκτης SAR (Sodium Adsorption Ratio ή Συντελεστής Προσρόφησης Νατρίου) περιγράφει την τάση των κατιόντων νατρίου να ανταλλαχθούν με άλλα ιόντα κατά την ιοντοεναλλαγή. Τα νερά με χαμηλή περιεκτικότητα νατρίου δίνουν γενικώς και χαμηλές τιμές στο δείκτη SAR. Ο δείκτης SAR ισούται με τη συγκέντρωση ιόντων νατρίου, εκπεφρασμένη σε meq/L, προς την τετραγωνική ρίζα του ήμισυ του αθροίσματος των συγκεντρώσεων Ca^{2+} και Mg^{2+} στο νερό.

$$S.A.R = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{1}{2}(Ca^{2+} + Mg^{2+})}}$$

Όπου, Na^+ η συγκέντρωση κατιόντων νατρίου στο νερό σε meq/L,

Ca^{2+} η περιεκτικότητα του νερού σε κατιόντα ασβεστίου σε meq/L

και Mg^{2+} η περιεκτικότητα του νερού σε κατιόντα μαγνησίου σε meq/L.

Ανάλογα με την τιμή του δείκτη SAR τα δείγματα κατηγοριοποιούνται με βάση τη δυνατότητα ανακύκλωσης και περαιτέρω χρήσης τους. Ο κανόνας με τον οποίο κατηγοριοποιούνται παρατίθεται παρακάτω.

Πίνακας 10: Κατηγοριοποίηση των υδάτων με βάση το δείκτη SAR

Κίνδυνος χρήσης του νερού	SAR	Σχόλια
Κανένας	<3.0	Κανένας κίνδυνος επανάχρησης του νερού
Μικρός έως Μέτριος	3.0 -9.0	Για τιμές 3.0 – 6.0 θα πρέπει να αποφεύγεται η χρήση σε ευαίσθητες καλλιέργειες. Για τιμές 6.0 – 9.0 θα πρέπει να διενεργείται ετήσιος έλεγχος για την καταγραφή των διακυμάνσεων στην περιεκτικότητα νατρίου.
Πολύ μεγάλος	>9.0	Ακατάλληλα νερά, έχουν υποστεί μεγάλη αλλοίωση.

Παρακάτω παρατίθεται ο δείκτης SAR για τα δείγματα του αλλουβιακού και καρστικού υδροφόρου.

Πίνακας 11: Τιμές δείκτη SAR για τα δείγματα του αλλουβιακού και του καρστικού υδροφόρου

ID	SAR
MG71	5,03
MG24	6,71
MG73	5,69
MG74	5,28
MG75	5,35
MG76	5,18
MG77	6,267
MG13	5,31
MG79	2,05
MG 36	3,15
MG 34	2,36
MG 43	5,15
MG 82	6,09
MG 86	6,32
MG 88	5,55
MG48	5,72
MG2	5,38
MG57	5,34

MG100	7,14
MG101	6,98
MG102	2,85
MG11	2,15
MG103	3,01
MG104	2,29
MG8	0,82
MG9	2,37
MG51	7,11
MG 80	1,75
MG72	7,26
ID (karst)	SAR
MG 84	4,95
MG44	2,10
MG53	5,79
MG4	3,73

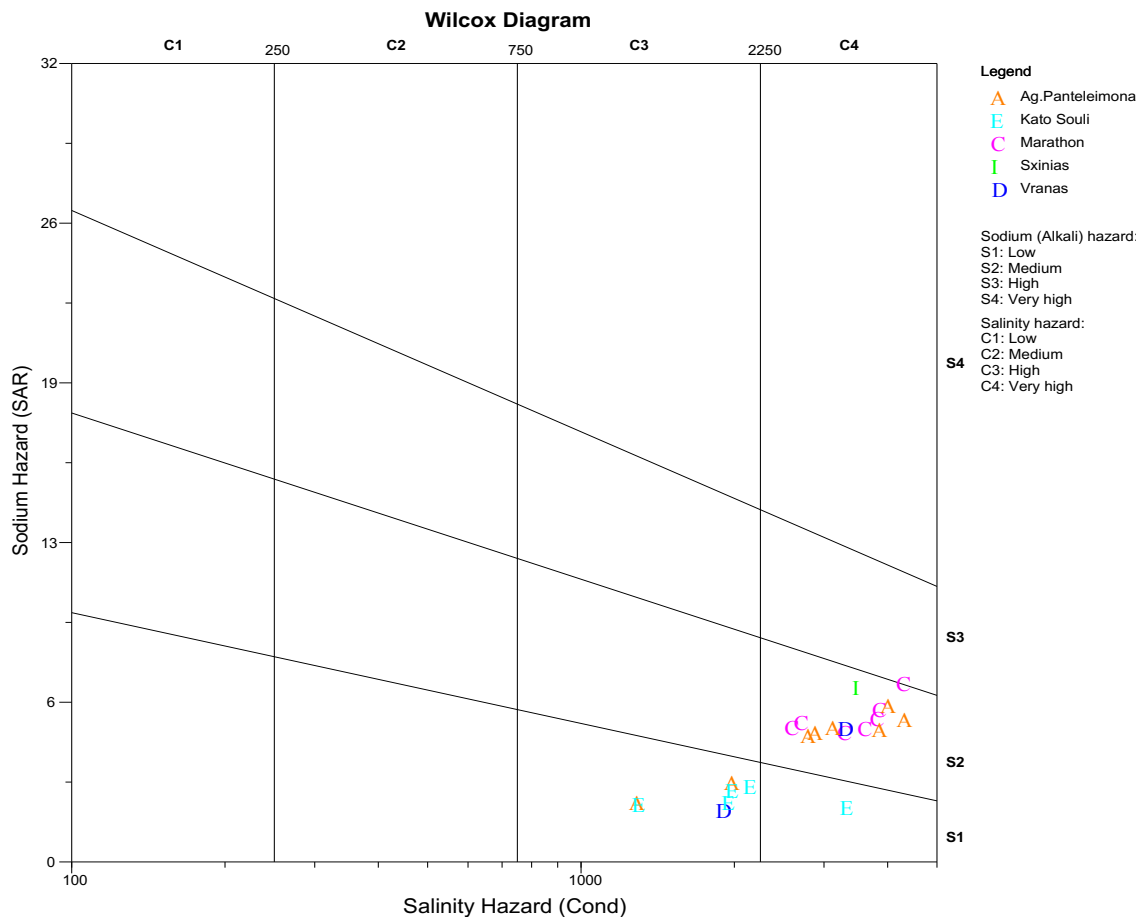
Παρατηρείται πως όλα τα δείγματα κινούνται στην περιοχή εντός των αποδεκτών ορίων. Περίπου το 1/3 των δειγμάτων του αλλουβιακού υδροφορέα αξιολογείται ως έτοιμο για ανακύκλωση, ενώ μόλις ένα δείγμα του καρστικού υδροφορέα κρίνεται άμεσα ανακυκλώσιμο.

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

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

Πίνακας 12: Κατηγορίες υδάτων κατά Wilcox

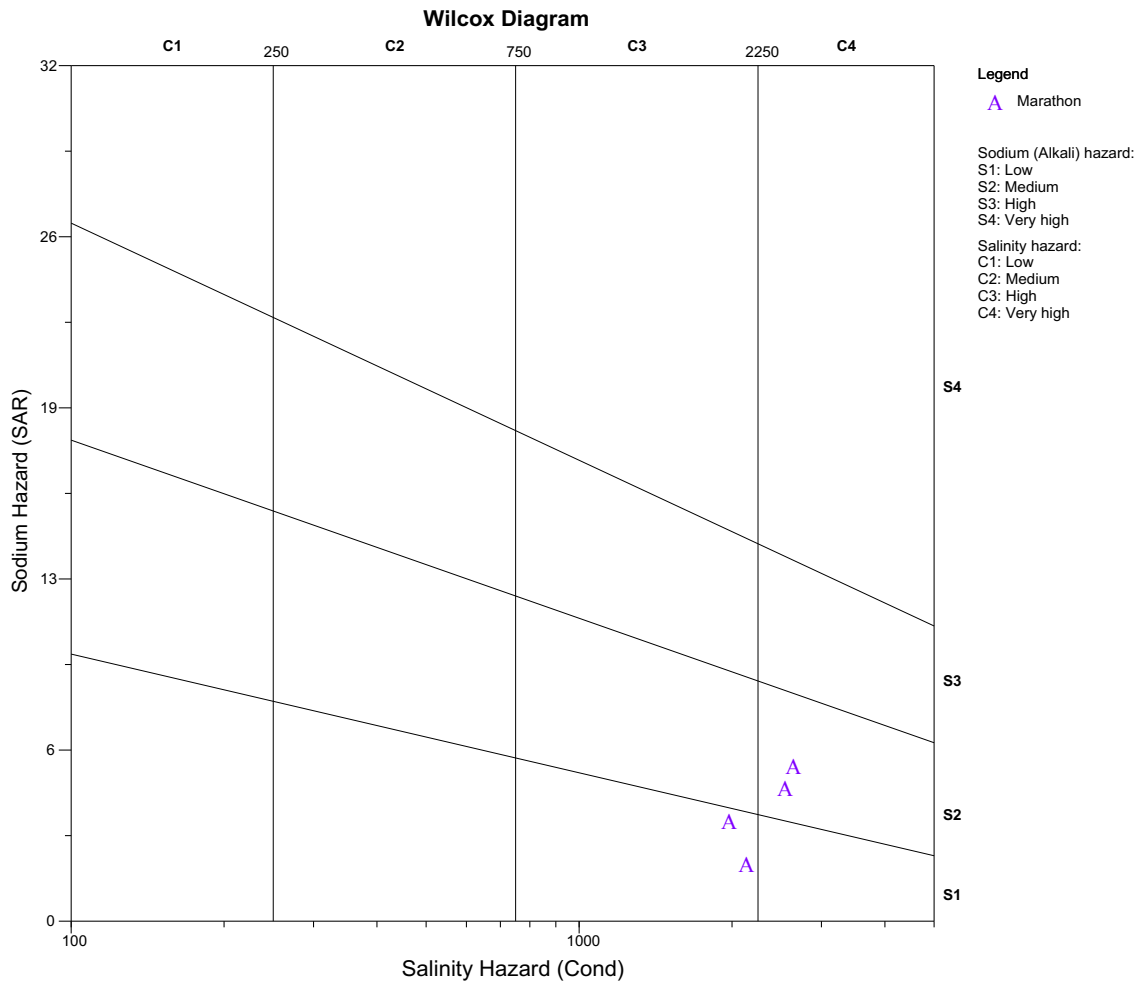
Τα διαγράμματα κατά Wilcox για τον αλλουβιακό και καρστικό υδροφορέα καταγράφονται ως εξής:



Διάγραμμα 8: Διάγραμμα Wilcox για την κατανομή δειγμάτων του αλλουβιακού υδροφορέα

Βάσει του σχήματος παρατηρείται πως η πλειοψηφία των δειγμάτων κατατάσσεται στην κατηγορία S2 - C4 όπου χαρακτηρίζονται ως μέτριας επικινδυνότητας ως προς την περιεκτικότητά τους σε νάτριο, αλλά πολύ υψηλό κίνδυνο λόγω αλατότητας. Στην κατηγορία αυτή εμπεριέχονται η πλειοψηφία των δειγμάτων του Μαραθώνα, τα περισσότερα του Αγ. Παντελεήμονα και ένα από την περιοχή του Βρανά.

Τα υπόλοιπα δείγματα χαρακτηρίζονται με βάση την παραπάνω κατηγοριοποίηση ως υψηλού κινδύνου εξαιτίας της αλατότητας και χαμηλού κινδύνου όσον αφορά την περιεκτικότητα νατρίου. Ανήκουν δηλαδή στην κατηγορία S1 – C3. Το εναπομένον δείγμα από την περιοχή του Κάτω Σουλίου ανήκει στην κατηγορία πολύ υψηλού κινδύνου λόγω αλατότητας και χαμηλού κινδύνου λόγω περιεκτικότητας σε νάτριο, S1 – C4.



Διάγραμμα 9: Διάγραμμα Wilcox για την κατανομή των δειγμάτων του καρστικού υδροφορέα

Τα δείγματα του καρστικού υδροφορέα είναι ισοκατανεμημένα σε 2 κατηγορίες, σε αυτά της κατηγορίας S2 – C4 και αυτά της S1 – C3.

6.1.6.5 Δείκτης Revelle

Ο λόγος του Revelle, είναι μια επικρατούσα μέθοδος για τον χαρακτηρισμό της θαλάσσιας διείσδυσης σε μια περιοχή. Ο τύπος από τον οποίο προκύπτει ο δείκτης Revelle είναι ο παρακάτω:

$$R = \frac{Cl^-}{(CO_3^{2-} + HCO_3^{2-})}$$

Όπου Cl^- η συγκέντρωση ιόντων του χλωρίου εκπεφρασμένη σε meq/l,

CO_3^{2-} η συγκέντρωση ιόντων του τριοξειδίου του άνθρακα εκπεφρασμένη σε meq/l και

HCO_3^- η συγκέντρωση των όξινων ανθρακικών ιόντων σε meq/l.

Για τιμές του λόγου R μεγαλύτερες από 1, έχουμε ένδειξη θαλάσσιας διείσδυσης. Οι κατηγοριοποιήσεις για τα ύδατα με βάση το δείκτη Revelle αναγράφονται στον παρακάτω πίνακα 13 (Καλλέργης, 2001)

Πίνακας 13: Κατηγοριοποίηση των υδάτων βάσει του λόγου Revelle

Προτεινόμενες οριακές τιμές	Επιρροή θαλάσσιας Διείσδυσης
<1	Υπόγειο νερό καλής ποιότητας
1 - 2	Μικρό επίπεδο Θ.Δ.
2 - 6	Μέτριο επίπεδο Θ.Δ.
6 - 10	Σοβαρό επίπεδο Θ.Δ.
10 - 150	Επικίνδυνο επίπεδο Θ.Δ.
>150	Θαλασσινό νερό

Ο παρακάτω πίνακας 14, παραθέτει τις τιμές του δείκτη Revelle για τα δείγματα του καρστικού και αλλουβιακού υδροφορέα.

Πίνακας 14: Τιμές του λόγου Revelle για τα δείγματα του καρστικού και αλλουβιακού υδροφορέα

ID(alluvial)	REVELLE
MG 71	2,43
MG 24	4,15
MG 73	3,36
MG 74	4,05
MG 75	4,71
MG 76	3,63
MG 77	3,48
MG 13	2,92
MG 79	1,55
MG 36	1,43
MG 34	0,97
MG 43	2,37
MG 82	4,59
MG 86	17,34
MG 88	2,62
MG 48	4,60
MG 2	2,00
MG 57	2,54
MG 100	3,20
MG 101	2,14
MG 102	1,19
MG 11	3,82
MG 103	1,96

MG 104	0,28
MG 8	1,41
MG 9	1,37
MG 51	4,49
MG 80	8,47
MG72	54,97
ID(karst)	REVELLE
MG 84	4,44
MG 44	2,42
MG 53	6,24
MG 4	20,48

Από τα παραπάνω στοιχεία αποκομίζεται η εντύπωση πως το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης στην περιοχή είναι αρκετά έντονο. Μόλις σε δύο σημεία της δειγματοληψίας παρουσιάζονται τιμές για τον δείκτη Revelle κάτω της μονάδας. Στα υπόλοιπα σημεία οι τιμές κυμαίνονται από 1-4 με λίγες εξαιρέσεις, όπου τα νερά εμφανίζονται να έχουν υποστεί σοβαρές επιπτώσεις λόγω της θαλάσσιας διείσδυσης. Η συνολική εικόνα, ωστόσο, που παρουσιάζει ο αλλουβιακός υδροφορέας κρίνεται μέτρια προς καλή, σε αντίθεση με τη μέτρια προς κακή εικόνα του καρστικού υδροφορέα.

6.1.7 Ιοντικοί Λόγοι

Επίσης χρήσιμοι για τη διάγνωση της υφαλμύρισης των υπογείων νερών είναι οι ιοντικοί λόγοι των συγκεντρώσεων που παρουσιάζουν τα δείγματα σε συγκεκριμένα ιόντα. Οι ιοντικοί λόγοι σε συνδυασμό με τους δείκτες που αναλύθηκαν πρωτίτερα αποτελούν ενδείξεις για τη ρύπανση ενός υδροφορέα από το θαλασσινό νερό.

Παρακάτω παρατίθενται οι εξής ιοντικοί λόγοι:

- Ο λόγος Na^+/Cl^- : ο λόγος Na^+/Cl^- για ύδατα που έχουν αναμειχθεί με το θαλασσινό νερό είναι μικρότερος από αυτόν του θαλασσινού νερού. Έτσι, συνδυάζοντας τον με άλλες γεωχημικές παραμέτρους, αποτελεί δείκτη για την ένδειξη της θαλάσσιας διείσδυσης, ακόμα και αν το φαινόμενο έχει εξελιχθεί σε μικρό βαθμό.
- Οι λόγοι $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ και $\text{Ca}^{2+}/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^-)$: ο εμπλουτισμός ενός παράκτιου υδροφόρου με Ca^{2+} σε συνδυασμό με τους λόγους $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ και $\text{Ca}^{2+}/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^-)$ μεγαλύτερους του 1, αποτελούν ακόμα μία ένδειξη που επιβεβαιώνει την υφαλμύριση.

Οι παραπάνω συγκεντρώσεις είναι όλες εκπεφρασμένες σε meq/l. Παρακάτω παρατίθεται ο πίνακας 15 με τους προαναφερθέντες ιοντικούς λόγους για τα δείγματα του καρστικού και αλλουβιακού υδροφόρου.

Πίνακας 15: Ιοντικοί λόγοι δειγμάτων αλλουβιακού και καρστικού υδροφορέα

ID(alluvial)	Na ⁺ /Cl ⁻	Ca ²⁺ /Mg ²⁺	Ca ²⁺ /(HCO ₃ ⁻ +SO ₄ ⁻)
MG 71	0,772	3,185	1,083
MG 24	0,846	3,269	1,670
MG 73	0,863	5,165	1,037
MG 74	0,701	3,266	1,224
MG 75	0,785	3,088	1,292
MG 76	0,820	13,330	1,643
MG 77	0,798	3,280	1,124
MG 13	0,756	3,332	1,298
MG 79	0,699	36,990	1,443
MG 36	0,814	5,665	1,216
MG 34	0,910	3,332	0,862
MG 43	0,798	4,578	1,141
MG 82	0,744	2,222	1,096
MG 86	0,556	0,407	0,915
MG 88	0,844	8,748	1,193
MG 48	0,694	2,470	1,332
MG 2	0,880	2,636	0,898
MG 57	0,775	13,996	1,318
MG 100	0,762	2,866	1,181
MG 101	0,902	5,265	0,962
MG 102	0,759	2,499	0,986
MG 11	0,374	3,277	2,020
MG 103	0,700	4,999	1,349
MG 104	1,850	2,333	0,630
MG 8	0,959	1,050	4,016
MG 9	0,801	4,713	1,379
MG 51	0,702	1,612	1,054
MG 80	0,127	4,999	1,722
MG 72	0,584	19,395	2,598
ID(karst)	Na ⁺ /Cl ⁻	Ca ²⁺ /Mg ²⁺	Ca ²⁺ /(HCO ₃ ⁻ +SO ₄ ⁻)
MG 84	0,957	18,995	2,037
MG 44	0,405	14,996	0,629
MG 53	0,832	2,857	1,519
MG 4	0,861	1,916	7,211

6.2 Ισοτοπικές υπογραφές δειγμάτων Υ.Ν. & Ε.Ν.

6.2.1 Εργαστηριακά στοιχεία ισοτοπικής υδρολογίας

Τα σταθερά ισότοπα δεν αναφέρονται με τις απόλυτες τιμές του ισοτοπικού λόγου R , διότι, σύμφωνα με τον Mook (2005):

- Ο φασματογράφος μάζας, ο οποίος χρησιμοποιείται στις ισοτοπικές αναλύσεις, παρά το γεγονός ότι παρουσιάζει μεγάλη ακρίβεια ανίχνευσης, δεν μπορεί να μετρήσει απόλυτους λόγους με ικανοποιητική αξιοπιστία.
- Η χρήση των ισοτοπικών λόγων θα οδηγούσε στην παρουσίαση αποτελεσμάτων με πολλά δεκαδικά ψηφία (5 ή 6).
- Υπάρχει ανάγκη για διεθνή σύγκριση των αποτελεσμάτων και οι απόλυτες τιμές διαφοροποιούνται για τα διάφορα μηχανήματα ανά τον κόσμο.
- Οι μετρήσεις των απόλυτων τιμών από την ίδια τη συσκευή μπορεί να διαφοροποιούνται όταν γίνονται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές λόγω μεγάλης ευαισθησίας του φασματογράφου μάζας στις περιβαλλοντικές συνθήκες.

Για τους παραπάνω λόγους, είναι απαραίτητο σε κάθε μέτρηση να γίνεται σύγκριση με ένα κοινό πρότυπο αναφοράς (standard), έτσι ώστε τα σφάλματα να μειωθούν σημαντικά. Κατά συνέπεια, ορίστηκε η παράμετρος δέλτα (δ) (McKinney *et al.* 1950) η οποία εκφράζει το λόγο της διαφοράς του ισοτοπικού λόγου στο δείγμα από τον ισοτοπικό λόγο του standard προς τον ισοτοπικό λόγο του προτύπου, δηλαδή:

$$\delta = \frac{R_x - R_{st}}{R_{st}} 10^3 (\text{‰}), \delta = \left(\frac{R_x}{R_{st}} - 1 \right) 10^3 (\text{‰})$$

όπου R_x είναι ο ισοτοπικός λόγος του δείγματος
και R_{st} είναι ο ισοτοπικός λόγος του προτύπου.

Επειδή το R_x δεν διαφέρει σημαντικά από το R_{st} , το κλάσμα R_x/R_{st} που προκύπτει είναι μικρός αριθμός. Για πρακτικούς λόγους γίνεται πολλαπλασιασμός με το 1000, έτσι ώστε να είναι πιο ευδιάκριτη η διαφοροποίηση της τιμής δ που σημαίνει ότι το ποσοστό επί τοις χιλίοις (‰) δεν αποτελεί μονάδα μέτρησης και επομένως η παράμετρος δ είναι αδιάστατη. (Ματιάτος Ιωάννης, , 2010)

Υπάρχει συσχέτιση των συγκεντρώσεων ^{18}O και ^2H στο μετεωρικό νερό με τη γραμμική σχέση που τις συνδέει είναι της μορφής $\delta^2\text{H} = \alpha\delta^{18}\text{O} + d$.

Σε αυτό το συμπέρασμα κατέληξε το 1961 ο Harmon Craig, ο οποίος διαπίστωσε ότι οι τιμές $\delta^{18}\text{O}$ και $\delta^2\text{H}$ των σύγχρονων επιφανειακών νερών που δεν έχουν υποστεί δευτερογενή εξάτμιση, συνδέονται μεταξύ τους σε παγκόσμια κλίμακα σύμφωνα με τη σχέση $\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10\text{‰}$ SMOW2 (Craig 1961b). Η εξίσωση αυτή αντιπροσωπεύει μια ευθεία η οποία είναι γνωστή και ως «Παγκόσμια Ευθεία του Μετεωρικού Νερού» από τα αρχικά GMWL (Global Mean Water Line). Η ευθεία του Craig είναι στην ουσία μια μέση κατάσταση πολλών τοπικών ή περιφερειακών γραμμών μετεωρικού νερού που διαφοροποιούνται από την παγκόσμια γραμμή λόγω κλιματικών και γεωγραφικών παραμέτρων.

Η παράμετρος $d = \delta^2\text{H} - 8\delta^{18}\text{O}$ ονομάζεται «περίσσεια Δευτερίου» και αντιπροσωπεύει πρακτικά το σημείο τομής της ευθείας του μετεωρικού νερού με τον άξονα δD . Η τιμή της περίσσειας δευτερίου σε μια περιοχή εξαρτάται από τις επικρατούσες κλιματικές συνθήκες και κυρίως από τη σχετική υγρασία στην πηγή προέλευσης των υδρατμών που, κατά κύριο λόγο, είναι η θάλασσα, με την οποία μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα. Η τιμή της

περίσσειας δευτερίου στα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα σε εύκρατα ηπειρωτικά κλίματα κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 0‰ και +20‰ (Rozanski *et al.* 1993) με μέση παγκόσμια τιμή το +10‰. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε μια μέση σχετική υγρασία πάνω από τους ωκεανούς της τάξης του 81% (Sharp 2007). Αποκλίσεις προς θετικότερες τιμές λαμβάνουν χώρα σε περιοχές με ξηρότερα κλίματα και χαμηλή σχετική υγρασία (<81%)όπως για παράδειγμα συμβαίνει στην Ανατολική Μεσόγειο.

Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας 16 δείχνει τις ισοτοπικές υπογραφές των δειγμάτων για τα ισότοπα οξυγόνου ^{18}O και ^2H στη λεκάνη του Μαραθώνα.

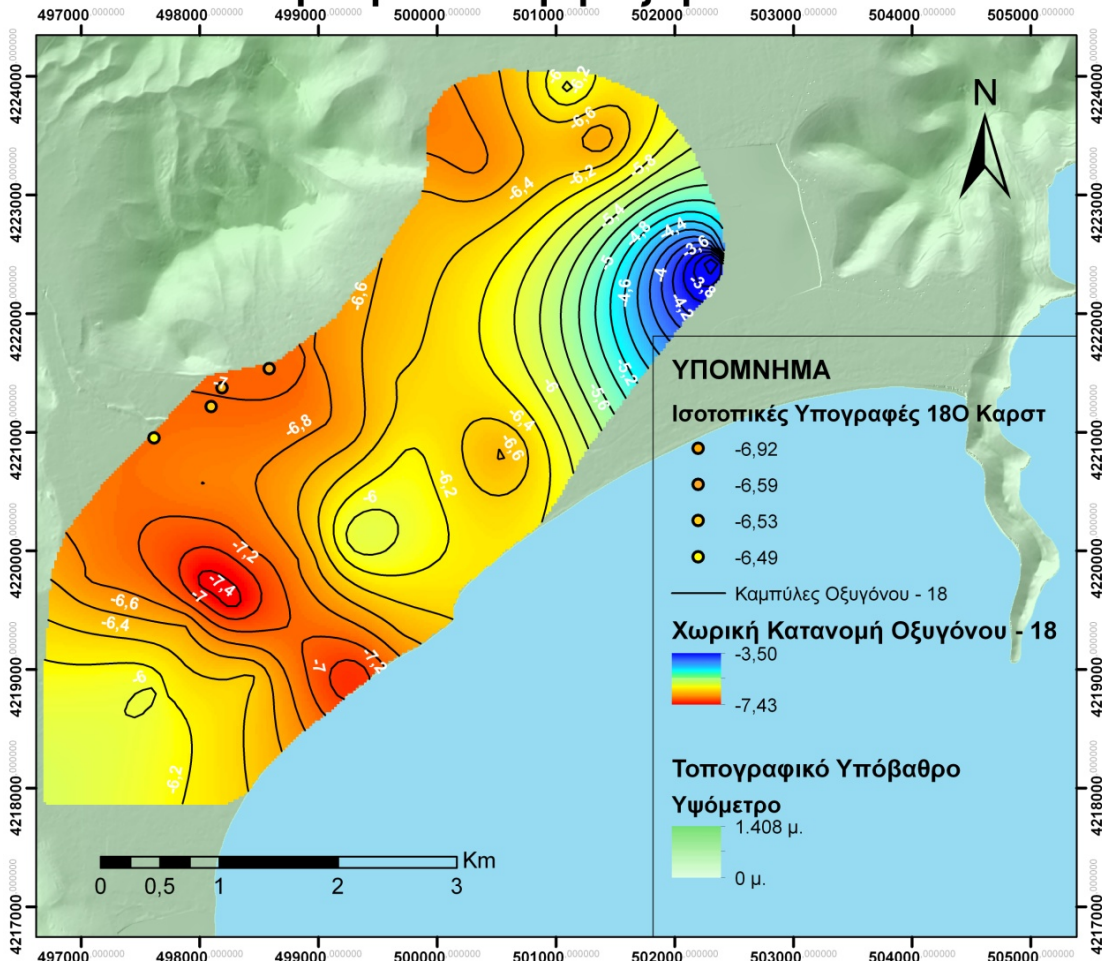
Πίνακας 16: Ισοτροπικές υπογραφές δειγμάτων αλλουβιακού και καρστικού υδροφορέα στην πεδιάδα του Μαραθώνα

ID(Alluvial)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	Deuterium excess/Περίσσεια Δευτερίου
MG2	-7,12	-38,26	18,72
MG8	-6,88	-35,37	19,70
MG9	-5,94	-36,00	11,50
MG11	-6,19	-32,70	16,82
MG13	-6,74	-34,68	19,20
MG24	-5,95	-33,14	14,47
MG34	-7,47	-42,93	16,87
MG35	-7,49	-39,92	20,00
MG36	-6,96	-37,92	17,73
MG41	-6,99	-38,98	16,93
MG43	-6,79	-37,50	16,85
MG48	-6,75	-36,17	17,85
MG51	-6,15	-35,25	13,99
MG57	-6,52	-37,02	15,14
MG71	-6,61	-37,26	15,63
MG72	-6,28	-34,59	15,64
MG73	-6,37	-35,47	15,46
MG74	-6,61	-35,20	17,68
MG75	-6,71	-38,83	14,86
MG76	-6,79	-38,66	15,69
MG77	-6,86	-35,96	18,91
MG78	-6,88	-36,05	18,97
MG79	-6,10	-32,12	16,68
MG80	-7,40	-47,42	11,79
MG82	-6,37	-34,83	16,13
MG86	-5,79	-30,80	15,52
MG88	-6,70	-34,78	18,83
MG100	-6,65	-34,94	18,22

MG101	-6,53	-34,06	18,15
MG102	-6,77	-36,79	17,37
MG103	-6,29	-35,98	14,36
MG104	-6,50	-34,29	17,71
MG118	-6,18	-34,90	14,52
MG119	-6,04	-35,22	13,06
MG120	-6,57	-34,20	18,35
ID(Karst)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	Deuterium excess/Περίσσεια Δευτερίου
MG84	-6,53	-37,23	15,00
MG44	-6,49	-36,56	15,33
MG53	-6,92	-38,43	16,96
MG4	-6,59	-36,68	16,07
ΜΑΚΑΡΙΑ	-6,87	-38,81	16,18

Παρατηρείται πως η μέση τιμή της περίσσειας Δευτερίου για τη λεκάνη του Μαραθώνα κυμαίνεται στα 16,5, δηλαδή μια τυπική τιμή για ηπειρωτικό κλίμα. Μια τέτοια ένδειξη μπορεί να οφείλεται στην περίοδο της δειγματοληψίας (τέλη Σεπτεμβρίου, αρχές Οκτώβρη), όπου λόγω ψύχους τα φαινόμενα εξάτμισης είναι λιγότερο έντονα και άρα η συγκέντρωση σε ισότοπα μικρότερη.

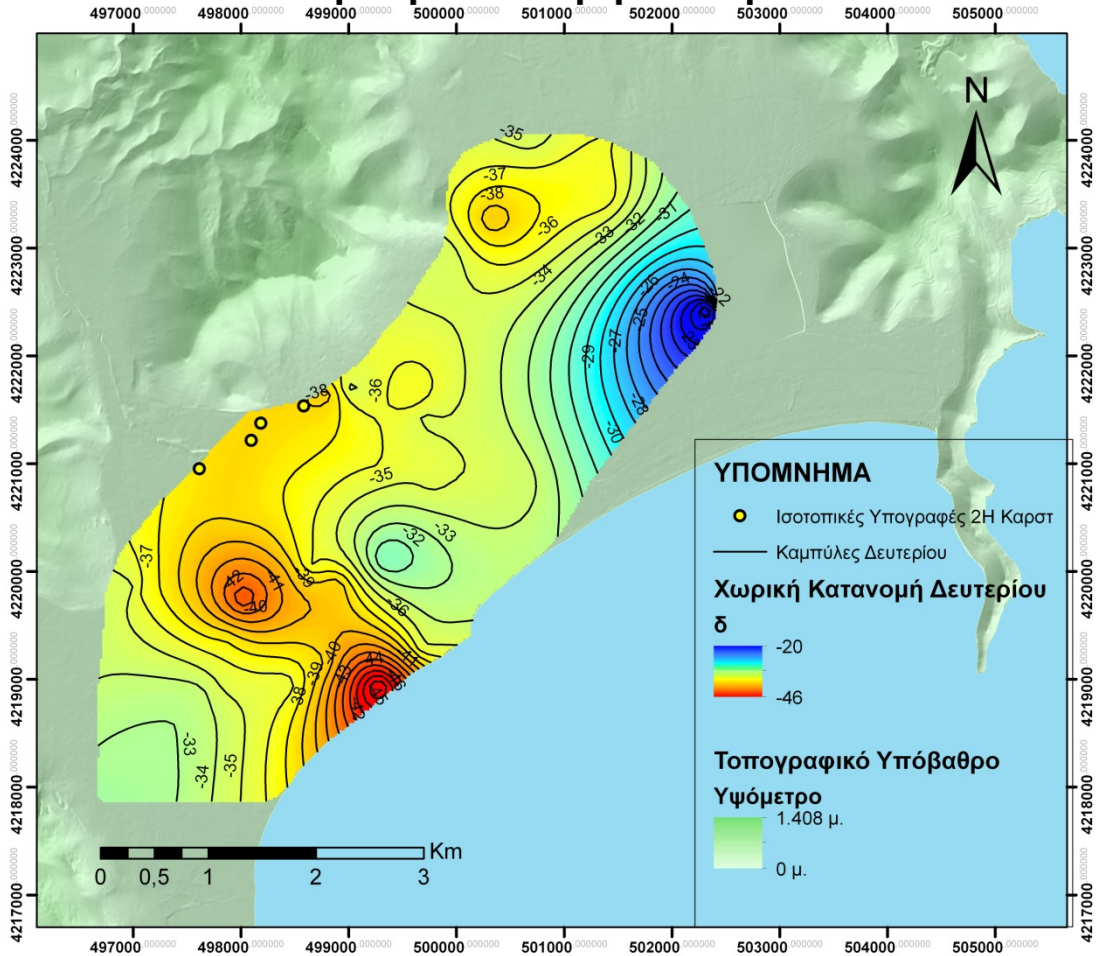
Χωρική Κατανομή Οξυγόνου - 18



Χάρτης 15: Κατανομή σταθερών ισοτόπων οξυγόνου-18 για τα Υ.Ν. της περιοχής έρευνας

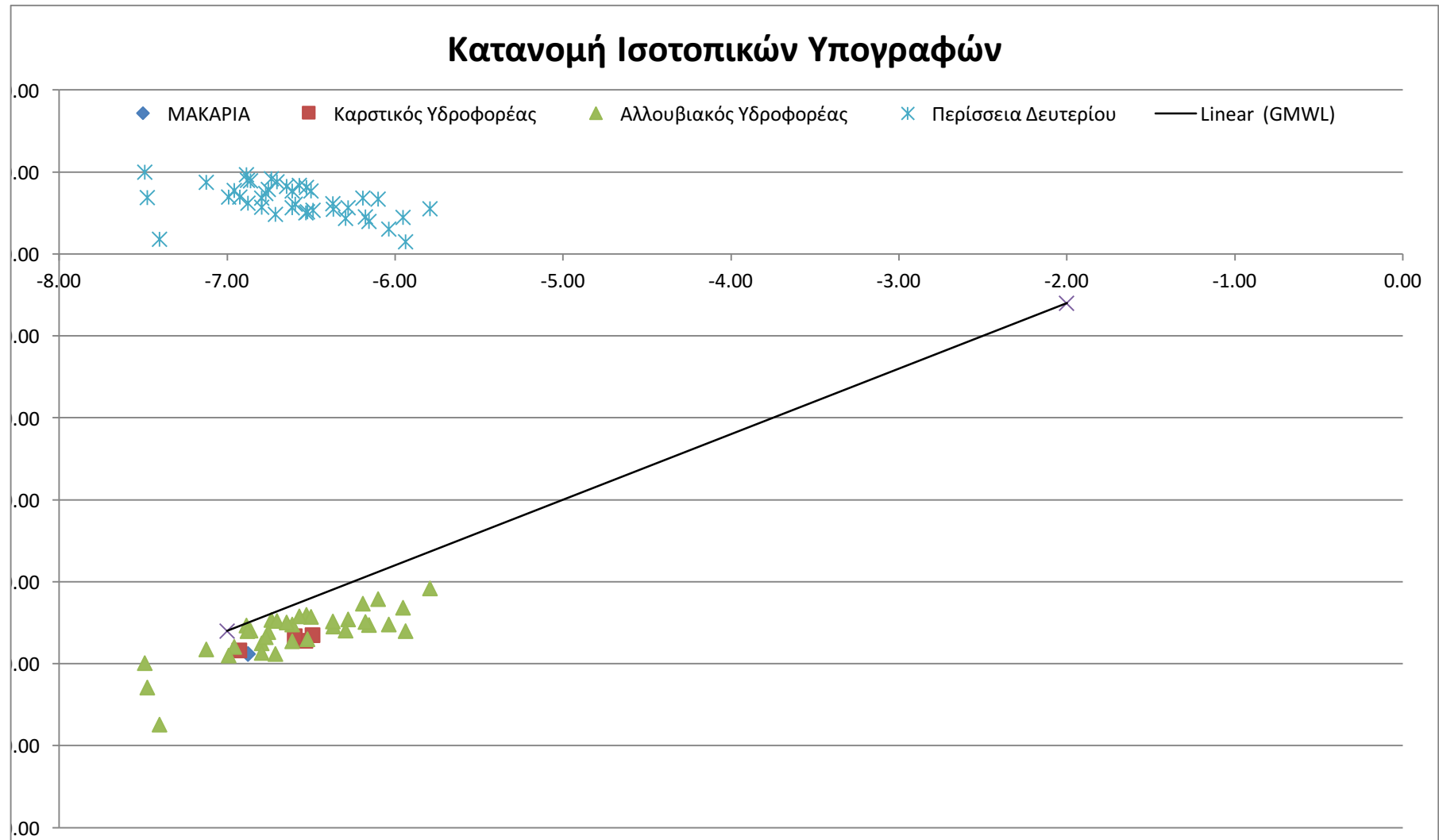
Οι χάρτες χωρικής κατανομής των ισοτοπικών υπογραφών των δειγμάτων που παρατίθενται παρακάτω συνηγορούν στο γεγονός πως υπάρχει υδραυλική επικοινωνία μεταξύ του αλλουβιακού και καρστικού υδροφόρου. Οι τιμές των υδάτων προερχόμενα από το καρστ παρουσιάζουν παραπλήσιες τιμές σε ^2H και ^{18}O με τα γειτονικά δείγματα που προέρχονται από τον προσχωματικό υδροφόρα. Επαναλαμβάνοντας τη διαπίστωση πως η πεδιάδα του Μαραθώνα τροφοδοτείται από τις ενότητες μαρμάρων που την εμπερικλείουν, εξάγεται το συμπέρασμα πως ιδιαίτερα η ενότητα μαρμάρων του Μαραθώνα αποτελεί ενιαία ζώνη τροφοδοσίας για την πεδιάδα. Το συμπέρασμα αυτό επαληθεύεται και από την πιεζομετρία της περιοχής. Ακόμα, οι τιμές των ισοτοπικών υπογραφών ανάντη της Μακαρίας εμφανίζονται παρόμοιες με εκείνες των μαρμάρων, γεγονός που μπορεί να υποδηλώνει πως από Βορρά η τροφοδοσία της πεδιάδας είναι κοινή, μια τέτοια διαπίστωση όμως χρήζει περαιτέρω έρευνας. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί η συμβολή του Ολυμπιακού Κωπηλατοδρομείου σαν χώρο καταβολής και αποθήκευσης των υδάτων προερχόμενων από τη Μακαρία πηγή. Οι τιμές των $\delta^2\text{H}$ και $\delta^{18}\text{O}$ που σημειώνονται στα ανατολικά της πεδιάδας, είναι αποτέλεσμα ακριβώς αυτής της συμβολής.

Χωρική Κατανομή Δευτερίου



Χάρτης 16: Κατανομή σταθερών ισοτόπων Δευτερίου για τα Υ.Ν. της περιοχής έρευνας

Στο διάγραμμα 10 παρατίθεται η γραφική απεικόνιση της συγκέντρωσης των δειγμάτων σε οξυγόνο ^{18}O και δευτέριο ^2H συγκριτικά με την καμπύλη GMWL.



Διάγραμμα 10: Γραφική απεικόνιση της Κατανομής των ισοτοπικών υπογραφών των δειγμάτων του αλλουβιακού και καρστικού υδροφόρα

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κατά την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας προκύπτουν κάποια βασικά συμπεράσματα και προβληματισμοί που παρατίθενται παρακάτω.

Στα παράκτια υδρογεωλογικά συστήματα, η υδραυλική επικοινωνία των υδροφορέα με τη θάλασσα και οι απώλειες σε γλυκό νερό, αλλά και η ανάμιξη του γλυκού και αλμυρού νερού στη ζώνη υφαλμύρισης αποτελούν ουσιώδη προβλήματα για την εκπόνηση ενός σχεδίου εξυγίανσης και προγραμματισμού των αντλήσεων. Το πρόβλημα αυτό συνεχώς εντείνεται εξαιτίας της συνεχούς και άνευ προγραμματισμού εκμετάλλευσης των υπόγειων υδατικών πόρων, με αποτέλεσμα όλο και μεγαλύτερες ποσότητες θαλασσινού νερού να διεισδύουν στους παράκτιους υδροφορείς.

Σημαντικό εργαλείο στην κατανόηση του υδρογεωλογικού καθεστώτος μιας περιοχής είναι η χρήση υδροχημικών παραμέτρων των υπόγειων νερών αλλά και η ιχνηθέτηση με ισότοπα, μια τεχνική που αποκτά διαστάσεις τα τελευταία χρόνια. Με τη μέτρηση των σταθερών ισότοπων του νερού είναι δυνατή η επιβεβαίωση της υδραυλικής επικοινωνίας μεταξύ των διαφόρων υδροφορέων. Ακόμα, η τιμές των υδάτων σε σταθερά ισότοπα υποδηλώνουν την προέλευσή τους.

Για την κατανόηση του μεγέθους του προβλήματος της θαλάσσιας διείσδυσης, είναι απαραίτητη η ανάπτυξη ενός δικτύου παρακολούθησης του υπό εξέταση υδροφόρου με τακτικές μετρήσεις του πιεζομετρικού φορτίου, της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας (SEC), των βασικών ιόντων και των ισότοπικών υπογραφών των δειγμάτων.

Ο Μαραθώνας συγκεντρώνει αρκετά σημεία ενδιαφέροντος, που καθιστούν την περιοχή μοναδική φυσιογραφικά. Η πεδιάδα του Μαραθώνα, έκτασης περίπου 40 km², περιλαμβάνει το δημόσιο πάρκο της Ραπεντόζας και το μεγάλο υδροβιότοπο του Εθνικού πάρκου Σχοινιά. Το Εθνικό πάρκο περιλαμβάνει το Ολυμπιακό Κωπηλατοδρόμιο, το δάσος στο Βορειοανατολικό άκρο, με τα σπάνια είδη μεσογειακής βλάστησης και την περιοχή της Μακαρίας πηγής.

Στην ευρύτερη περιοχή του δήμου Μαραθώνα συναντώνται σημαντικά υδρομαστευτικά έργα, αλλά και ανθρωπογενείς παρεμβάσεις μεγαλύτερης ή μικρότερης κλίμακας που διαμορφώνουν και μετασχηματίζουν το υδρογεωλογικό καθεστώς της περιοχής. Συνοπτικά, αυτά είναι τα φράγματα του Μαραθώνα και της Ραπεντώζας, τα εκτεταμένα αποστραγγιστικά έργα και η κατασκευή του κωπηλατοδρομίου, η άναρχη δόμηση σε συνδυασμό με τις εκατοντάδες γεωτρήσεις.

Αναφορικά με τη λιθοστρωματογραφική διάρθρωση της περιοχής, το σύνολο της επιστημονικής κοινότητας συναινεί στο γεγονός πως η βορειοανατολική Αττική προσομοιάζεται με μία συνεχή στήλη συνεχών εναλλαγών μαρμάρων και σχιστολίθων.

Αναφορικά με τη στρωματογραφία της περιοχής, η επιστημονική κοινότητα εμφανίζεται πιο συνεκτική. Στην ευρύτερη περιοχή μελέτης εμφανίζονται μεταλπικοί σχηματισμοί που διακρίνονται σε τεταρτογενείς και νεογενείς αποθέσεις. Οι τεταρτογενείς αποθέσεις περιλαμβάνουν σχηματισμούς που επιδρούν τα μέγιστα στην τροφοδοσία των υδροφόρων τόσο από το θαλάσσιο μέτωπο, όσο και από ορεινούς χείμαρρους. Οι νεογενείς αποθέσεις έχουν διαμορφώσει το ανάγλυφο της περιοχής που οριοθετείται από την Πάρνηθα, το Βαρνάβα και το Γραμματικό. Οι αλπικοί σχηματισμοί περιλαμβάνουν τα Μάρμαρα και τους Σχιστόλιθους που οριοθετούν την πεδιάδα του Μαραθώνα από βόρεια και βορειοδυτικά. Πρόκειται για τους κύριους σχηματισμούς τροφοδοσίας των υδροφορέων της πεδιάδας του Μαραθώνα.

Από τεκτονικής πλευράς, η περιοχή του Μαραθώνα ανήκει στην Αττικό – Κυκλαδική ζώνη. Το βόρειο τμήμα της περιοχής που εκτείνεται από την Αγία Μαρίνα μέχρι τους Αγίους Αποστόλους αντιπροσωπεύει και το ενεργότερο τμήμα. Μεγάλες ρηξιγενείς ζώνες με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ διατάσσονται παράλληλα με τη γραμμή του νότιου Ευβοϊκού κόλπου.

Μικρότερα ρήγματα με την ίδια διεύθυνση ή ΒΑ – ΝΔ, αναπτύσσονται ανάμεσα στις μεγαλύτερες ζώνες τεμαχίζοντας περαιτέρω την περιοχή.

Η έντονη τεκτονική καταπόνηση με τον τρόπο που αυτή προσλαμβάνεται από τη διαφορετική λιθολογία της περιοχής μελέτης, έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη διαφορετικών υδρογεωλογικών συστημάτων. Το καρστικό υδροφόρο σύστημα, αναπτύσσεται στα ανθρακικά πετρώματα της περιοχής, δηλαδή στα Μάρμαρα της Αγίας Μαρίνας, Μαραθώνα και Γραμματικού. Ο υδροφόρος αυτός είναι που παρέχει και την τροφοδοσία του προσχωματικού υδροφόρου. Στις αλλουβιακές αποθέσεις, αναπτύσσεται ελεύθερος υδροφόρος που εκμεταλλεύονται και οι κάτοικοι της περιοχής.

Κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας αναπτύχθηκε πυκνό υδρογραφικό δίκτυο παρακολούθησης πηγαδιών και γεωτρήσεων στο πεδινό τμήμα του Μαραθώνα. Ακολούθησε η επιλογή των σημείων υδροληψίας ώστε να πληρούν τα κριτήρια της ομοιόμορφης κατανομής σε όλο το μήκος και πλάτος της πεδιάδας. Από αυτά συλλέχτηκαν δείγματα νερού και μετρήθηκε η στάθμη και τα επιτόπια χαρακτηριστικά τους. Τα δείγματα υποβλήθηκαν σε χημικές και ισοτοπικές αναλύσεις για τη διαπίστωση των συγκεντρώσεων ως προς τα βασικά ιόντα αλλά και τις ισοτοπικές υπογραφές.

Η γραφική αναπαράσταση των συγκεντρώσεων των ιόντων πραγματοποιήθηκε χάρης στα λογισμικά ArcGIS και QGIS. Κατά αυτή τη διαδικασία εντοπίστηκαν τα σημεία με τη μεγαλύτερη καταπόνηση λόγω υπεράντλησης. Η συνολική εικόνα των δύο υδροφόρων παρουσιάζεται παρόμοια, ωστόσο, παρατηρείται μια επιπλέον σημειακή καταπόνηση του κοκκώδους υδροφορέα.

Η κατάταξη των νερών κατέσται δυνατή με τη βοήθεια του λογισμικού Aquachem 4.0. Από το διάγραμμα Duroν διακρίνεται η επικυριαρχία του ανιόντος χλωρίου Cl⁻ ως βασικό ιόν και άρα και η έντονη επίδραση της ζώνης υπαλμύρωσης στα δείγματα. Γεγονός το οποίο, για την πλειοψηφία των δειγμάτων, επαληθεύεται και από το διάγραμμα Piper. Τέλος, από το διάγραμμα Wilcox διαπιστώνεται η μέτρια προς κακή ποιότητα των νερών για αρδευτικούς λόγους.

Η κατάταξη των νερών με βάση τους υδροχημικούς δείκτες παρουσιάζει την εικόνα αισθητής θαλάσσιας διείσδυσης στους υδροφόρους. Ο δείκτης Revelle κατέγραψε αξιολόγησε μικρό έως και σοβαρό το επίπεδο της θαλάσσιας διείσδυσης, ενώ κατά περίπτωση διακρίνονται μέχρι και επικίνδυνα επίπεδα. Οι ιοντικοί λόγοι συνηγορούν στο γεγονός της επίδρασης της θαλάσσιας διείσδυσης στους υδροφορείς.

Οι ισοτοπικές αναλύσεις, παρουσίασαν χαμηλότερες τιμές από τα αναμενόμενα τυπικά αποτελέσματα για μια Μεσογειακή λεκάνη, όπως η περίπτωση της κοιλάδας του Μαραθώνα.

Δεδομένων των αποτελεσμάτων της ανά χείρας διπλωματικής εργασίας, δίνεται έναυσμα για περαιτέρω έρευνα του υδρογεωλογικού καθεστώτος της περιοχής που θα μπορούσε να εστιάσει στα εξής:

1. Στην ανάπτυξη σταθερού δικτύου καταγραφής των γεωτρήσεων για την παρακολούθηση των διακυμάνσεων στα χαρακτηριστικά του υδροφόρου ορίζοντα. Η ανάπτυξη υδρογεωλογικού μοντέλου που θα καταλήξει στη διαμόρφωση ενός προγράμματος αντλήσεων για τη συμβολή στην εξυγίανση του αλλουβιακού υδροφόρου.

2. Στην μελέτη των γειτονικών έργων του φράγματος του Μαραθώνα και του Κωπηλατοδρομίου καθώς και των υδραυλικών συνθηκών που διαμορφώνουν κατά την αλληλεπίδρασή τους με τον προσχωματικό υδροφόρο. Επιπρόσθετα, η γεωλογική έρευνα για την περιοχή μεταξύ της πεδιάδας του Μαραθώνα και του φράγματος χρήζει μελέτης καθώς πρέπει να εξακριβωθεί η υδροπερατότητα των σχηματισμών, για να υπολογιστεί και το μέγεθος της τροφοδοσίας της πεδιάδας.

3. Στην εμπάθυνση των ισοτοπικών αναλύσεων στον καρστικό υδροφόρο για τη διαπίστωση της προέλευσης των υδάτων που καταλήγουν στον αλλουβιακό ορίζοντα.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Βουδούρης Κ., Τεχνική Υδρογεωλογία, Υπόγεια Νερά, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσ/νίκη 2013.
- Βουδούρης Κ., Υδρογεωλογία Περιβάλλοντος, Υπόγεια νερά και Περιβάλλον, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2009.
- Βουδούρης Κ., Θέματα Υδρογεωλογίας Περιβάλλοντος, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη, 2006.
- Baeteman, C., Late Holocene geology of the Marathon Plain (Greece). Journal of Coastal Research, 1985.
- Chester D. Rail, Groundwater Contamination, Technomic Publishing Company, Μάρτιος 1989.
- Clement B., Katsikatsos G.: Etudes géologique d'un secteur des zones internes des Hellénique: L'Attique septentrionale (Grèce continentale). Annales de la Société géologique du Nord, v. 51, 1982
- Craig, H., Isotopic variations in meteoric waters, Science, 133, 1961b.
- ΕΛΣΤΑΤ, <http://www.statistics.gr/2011-census-pop-hous>
- ΕΛΣΤΑΤ, <http://www.statistics.gr/el/interactive-map>
- <http://www.bvsde.ops-oms.org/muwww/fulltext/repind46/ground/ground.html>
- <http://slideplayer.com/slide/6888662/>
- <http://www.hosessa.com/products/flexible-riser/boreline/applications/salt-water-barriers/>
- <http://www.solinst.com/resources/papers/101c4salt.php>
- ΙΤΙΑ, https://users.itia.ntua.gr/nikos/hydrology/EduMaterial/ydr_ypgia_10.pdf
- Hubbert M.King, THE THEORY OF GROUND-WATER MOTION, Columbia University, Νοέμβριος – Δεκέμβριος 1940.
- Καλλέργη Γ.Α, Εφαρμοσμένη - Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία, Εκδόσεις ΤΕΕ, Τόμος Γ', Αθήνα 2001.
- Καλλιώρας Α., Διαχείριση υπόγειων υδατικών πόρων σε υδροφόρους που υπόκεινται σε καθεστώς θαλάσσιας διείσδυσης. Η περίπτωση του δυτικού παράκτιου τμήματος του Ν. Ροδόπης, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Δ.Π.Θ, 2008.
- Κατσικάτσος Γ., Γεωλογικός χάρτης Κηφισιάς, ΙΓΜΕ, 1994 –1997.
- Κατσικάτσος Γ., Primolivsilva L, Kollmann H., Zapfe, H., Sauvage I., Bruijn,de,H., Meulen,der,V., Brother P.: Γεωλογικός Χάρτης της Ελλάδας σε κλίμακα 1:50.000. Φύλλο "Αλιβέρι", Εκδ. ΙΓΜΕ, Αθήνα, 1990.
- Κατσικάτσος Γ.,Kollmann H., Zarpfe H., Brother P.: Γεωλογικό χάρτης της Ελλάδας σε κλίμακα 1:50.000. Φύλλο "Ραφήνα". Εκδ. ΙΓΜΕ, Αθήνα, 1990.
- Κατσικάτσος Γ., Γεωλογικός χάρτης Ραφήνας ΙΓΜΕ, 1977.
- Κουμαντάκης Ι.: «Κεφάλαια Υδρογεωλογίας», Αθήνα, 1997.
- Λόζιος Σ., Τεκτονική ανάλυση των μεταμορφωμένων σχηματισμών της Νοτιοανατολικής Αττικής. Διδακτορική Διατριβή. Πανεπιστήμιο Αθηνών, 1993.
- Ματιάτος Ιωάννης, Υδρογεωλογικές και Ισοτοπικές Μελέτες στις Περιοχές της Χερσονήσου της Αργολίδας, Αθήνα, 2010.
- Μελισσάρης Π., Σταυρόπουλος Ξ., Υδρογεωλογική μελέτη της πεδιάδας του Μαραθώνα, Διεύθυνση Γεωλογίας – Υδρογεωλογίας, Υπουργείο Γεωργίας, Αθήνα.
- Mandel S. and Shifan Z.L., Groundwater Resources: Investigation and development, Israel, 1981.

- Mazor E., Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology, Third Edition - Books in Soils, Plants, and the Environment, 2003.
- Milanović T.P., Karst Hydrogeology, Water Resources Publications, 1981.
- Mook W.G., Introduction to Isotope Hydrology, CRC Press, 2005.
- Ξανθάκης & Ξανθόπουλος, Προσδιορισμός Αλλαγών Χρήσεων Γης στην περιοχή του Μαραθώνα κατά τη διάρκεια ενός αιώνα με τη χρήση GIS, Πρακτικά 13^{ου} Δασολογικού Συνεδρίου, Τόμος II, Αθήνα 2007.
- Παπαδέας Γ., Νεότερα πορίσματα στη γεωλογική – τεκτονική εξέλιξη των μεταμορφωμένων πετρωμάτων της Αττικής και στη βαρίσκια μεταλλοφορία, Πρακτ. Ακαδ. Αθηνών, τομ. 66, Αθήνα, 1991.
- Παπαδέας Γ., Γεωλογική - Τεκτονική εξέλιξη στην Αττική και η βαρίσκιος μεταλλοφορία μικτών θειούχων και άλλων ορυκτών στην Ελλάδα. Πρακτ. Ακαδ. Αθηνών, 1987.
- Παπανικολάου Δ., Tectonic Evolution of the Cycladic Blueschist Belt (Aegean Sea, Greece), 1984, Αθήνα.
- 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, Θεσσαλονίκη, 2002.
- Περδικάκη Μ., Εννοιολογικό – Υδρογεωλογικό Μοντέλο Κοκκώδους Παράκτιου Υδροφορέα, Η Περίπτωση του Μαραθώνα Αττικής, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Δ.Π.Μ.Σ Επιστήμης και Τεχνολογίας Υδατικών Πόρων Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2016.
- Περγέρης κ.α, Παλαιογεωγραφική εξέλιξη της πεδιάδας του Μαραθώνα κατά το Μέσο-Ανώτερο Ολόκαινο, 2001.
- Πρακτικά 9ου Πανελληνίου Συνεδρίου της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, Εκδόσεις Τζιόλα, 2003.
- Pearson F.J. Jr., se of ¹³C/¹²C ratios to correct radiocarbon ages of materials initially diluted by limestone, Pullman, Washington, 1965.
- Pinder, G.F., and Cooper, H. H., Jr., A numerical technique for calculating the transient position of the saltwater front., 1970.
- Ranjan, Effect of Climate Change and Land Use Change on Saltwater Intrusion, Πριγιάνθα, 2007.
- Rozanski, K., Araguás-Araguás L. & Gonfiantini, R., Isotopic patterns in modern global precipitation, in Climate Change in Continental Isotopic Records, Geophys. Monogr. Ser., 78, pp. 1-36, 1993.
- Στεφανόπουλος Κ., Προσδιορισμός της Ζώνης Υφαλμύρωσης στην Περιοχή Χερσονήσου – Ηρακλείου Κρήτης με Χρήση Προσομοίωσης και Μετρήσεων Πεδίου, Χανιά, Οκτώβριος 2004.
- Sharp, Z., Stable Isotope Geochemistry, Pearson Education, USA, 2007.
- David Keith Todd, Larry W. Mays , Groundwater Hydrology, 3rd Edition, November 2005.
- Vogel I., Isotope Hydrology, Carbon – 14 dating of groundwaters, Vienna, 1970.
- Φωτόπουλος Ν., Υδρογεωλογικό καθεστώς πεδιάδας Μαραθώνα και επιδράσεις από τα ολυμπιακά έργα. Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2004.
- Fetter C.W., Applied Hydrogeology, 4th edition, University of Winsconsin,, Prentice – Hall, 2001.

