



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

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Εκτίμηση Νιτρορύπανσης στην πεδιάδα του Μαραθώνα
και Προσομοίωση Μεταφοράς Νιτρικών Ιόντων
στον προσχωματικό υδροφόρα»**

Χριστοδουλοπούλου Αδαμαντία

Επιβλέπων Καθηγητής

Καλλιώρας Ανδρέας, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Επικουρική Επίβλεψη

Περδικάκη Μάρθα, Μεταδιδακτορική Ερευνήτρια Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2023



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

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Εκτίμηση Νιτρορύπανσης στην πεδιάδα του Μαραθώνα
και Προσομοίωση Μεταφοράς Νιτρικών Ιόντων
στον προσχωματικό υδροφορέα»**

Χριστοδουλοπούλου Αδαμαντία

Επιβλέπων Καθηγητής : Καλλιώρας Ανδρέας, Αναπληρωτής Καθηγητής
Επικουρική Επίβλεψη Περδικάκη Μάρθα, Μεταδιδακτορική Ερευνήτρια

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Καλλιώρας Ανδρέας, Αναπληρωτής Καθηγητής Τομέα Γεωλογικών Επιστημών

Μενεγάκη Μαρία, Καθηγήτρια Τομέα Μεταλλευτικής

Αποστολόπουλος Γεώργιος, Καθηγητής Τομέα Μεταλλευτικής

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2023

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των υδροχημικών χαρακτηριστικών των υπόγειων υδάτων, η διερεύνηση του φαινομένου της νιτρορύπανσης καθώς και η μελέτη υδρογεωλογικού μοντέλου που προσομοιώνει τους παράκτιους υδροφορείς και τη μεταφορά μάζας ρύπων. Η περιοχή μελέτης είναι η λεκάνη του Μαραθώνα Αττικής, εστιάζοντας κυρίως στην έρευνα του αλλουβιακού υδροφορέα. Το θέμα ανατέθηκε από το Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας της Σχολής Μεταλλειολόγων – Μεταλλουργών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και εκπονήθηκε υπό την επίβλεψη του κ. Ανδρέα Καλλιώρα, Επίκουρου Καθηγητή της σχολής Μεταλλειολόγων - Μεταλλουργών Μηχανικών του Ε.Μ.Π.

Οι εργασίες που έλαβαν μέρος για τη διεξαγωγή της διπλωματικής είναι οι ακόλουθες:

- 1) Βιβλιογραφική επισκόπηση στην ελληνική και παγκόσμια βιβλιογραφία, σε θέματα που αφορούν το φαινόμενο της νιτρορύπανσης, τα εννοιολογικά υδρογεωλογικά μοντέλα και τη μαθηματική προσομοίωση των υδροφορέων.
- 2) Συλλογή και επεξεργασία υπαρχόντων γεωλογικών, υδρογεωλογικών, και υδρολογικών στοιχείων της περιοχής έρευνας.
- 3) Έρευνα πεδίου στην παράκτια πεδιάδα του Μαραθώνα, λήψη δειγμάτων νερού τόσο από γεωτρήσεις και πηγάδια του αλλουβιακού όσο και του καρστικού υδροφορέα της περιοχής, και επί τόπου μετρήσεις και χημικές αναλύσεις στο εργαστήριο.
- 4) Επεξεργασία των αποτελεσμάτων των παραπάνω μετρήσεων και παρουσίασή τους σε πίνακες και χάρτες, αποσκοπώντας στην εξαγωγή συμπερασμάτων.
- 5) Μαθηματική προσομοίωση του παράκτιου υδροφόρου του Μαραθώνα, με τη χρήση του κώδικα MODFLOW-2005, όπως και προσομοίωση της μεταφοράς των νιτρικών ιόντων με τη βοήθεια του κώδικα MT3DMS.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή μου κ. Ανδρέα Καλλιώρα, για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο άτομό μου, για την ανάθεση του θέματος της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αλλά και για το αδιάκοπο ενδιαφέρον που επέδειξε καθ' όλη τη διάρκεια της προσπάθειάς μου.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες στη Μεταδιδακτορική Ερευνήτρια Μάρθα Περδικάκη, η οποία με υπομονή και επιμονή μου προσέφερε ουσιαστική καθοδήγηση, με συνόδευσε στις μετρήσεις υπαίθρου, και η καθημερινή βοήθεια και υποστήριξή της αποτέλεσαν καταλυτικό παράγοντα για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Επίσης, οφείλω να ευχαριστήσω την κα. Ελένη Βασιλείου και τον κ. Κωνσταντίνο Μαρκαντώνη, μέλη του Εργαστηριακού Διδακτικού Προσωπικού της Σχολής Μεταλλειολόγων - Μεταλλουργών Μηχανικών του Ε.Μ.Π., για την προσφορά των υδρογεωλογικών τους γνώσεων, τις συμβουλές και τη διάθεσή τους να ανταποκριθούν την οποιαδήποτε απορία μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στους παράκτιους κοκκώδεις σχηματισμούς αναπτύσσονται υπόγεια υδροφόρα συστήματα. Εξαιτίας της υπεράντλησής τους, της χρήσης νιτριούχων λιπασμάτων και άλλων ανθρωπογενών παρεμβάσεων, καθίστανται ευάλωτα ως προς το φαινόμενο της νιτρορύπανσης και κατά συνέπεια, την τελική ποιοτική υποβάθμισή τους. Για το λόγο αυτό καθίσταται απαραίτητη η γνώση των υδρογεωλογικών συνθηκών, ώστε να αναγνωρισθεί το πρόβλημα και να εξυγιανθεί όταν κρίνεται απαραίτητο.

Η παρούσα διπλωματική εργασία, επιχειρεί την παρακολούθηση της ποιότητας των παράκτιων υδροφορέων και στην ανάλυση του φαινομένου της νιτρορύπανσης. Για το σκοπό αυτό, η έρευνα αυτή επικεντρώθηκε στην υδρολογική λεκάνη του Μαραθώνα, που τοποθετείται στο βορειοανατολικό άκρο της Αττικής. Τα στάδια για την ολοκλήρωση της έρευνας αυτής αλλά και την διεξαγωγή συμπερασμάτων περιλαμβάνουν, την εκτενή βιβλιογραφική αναζήτηση σε ζητήματα σχετικά με τη νιτρορύπανση και τις γεωλογικές, υδρογεωλογικές, γεωμορφολογικές συνθήκες της περιοχής μελέτης. Επιπρόσθετα, πραγματοποιήθηκε έρευνα πεδίου με λήψη δειγμάτων, επί τόπου επεξεργασία και μετρήσεις καθώς και χημικές αναλύσεις στο εργαστήριο ως προς τα βασικά ιόντα. Τα αποτελέσματα των προηγούμενων απεικονίστηκαν σε χάρτες και διαγράμματα, βάσει των οποίων εξήχθησαν συμπεράσματα. Στο τελευταίο στάδιο αυτής της εργασίας, πραγματοποιήθηκε μονοετής προσομοίωση του κοκκώδους υδροφόρου συστήματος με τον κώδικα MODFLOW-2005 ενώ στη συνέχεια, προσομοιώθηκε και η μεταφορά των νιτρικών ιόντων στον υδροφόρο, με τη βοήθεια του κώδικα MT3DMS. Και οι δύο κώδικες βρέθηκαν στο λογισμικό πακέτο ModelMuse version 5.0.0.

ABSTRACT

Underground water systems develop in the coastal granular formations. Due to their over-pumping, the use of nitrate fertilisers and other anthropogenic interventions, they are vulnerable to nitrate pollution and consequently to their ultimate quality degradation. For this reason, knowledge of the hydrogeological conditions is essential in order to identify the problem and remediate it when necessary.

This thesis attempts to monitor the quality of coastal aquifers and to analyse the phenomenon of nitrate pollution. For this purpose, this research focused on the Marathon watershed, located in the northeastern tip of Attica. The steps to complete this research and to draw conclusions include the extensive literature search on issues related to nitrate pollution and the geological, hydrogeological, geomorphological conditions of the study area. In addition, a field survey was carried out with sampling, in situ processing and measurements as well as chemical analyses in the laboratory for major ions. The results of the above were illustrated in maps and diagrams, on the basis of which conclusions were drawn. In the last stage of this work, a one-year simulation of the granular aquifer system was performed with the MODFLOW-2005 code and then the transport of nitrate ions in the aquifer was simulated using the MT3DMS code. Both codes were found in the ModelMuse 5.0.0 software package.

Περιεχόμενα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	v
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	vii
ABSTRACT	viii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – Η ΝΙΤΡΟΥΡΥΠΑΝΣΗ ΣΤΟΥΣ ΥΠΟΓΕΙΟΥΣ ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ	3
2.1. ΠΗΓΕΣ.....	3
2.2. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΝΙΤΡΟΥΡΥΠΑΝΣΗΣ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ	6
2.3. Η ΝΙΤΡΟΥΡΥΠΑΝΣΗ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ.....	15
2.4. ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗ ΝΙΤΡΟΥΡΥΠΑΝΣΗ	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	17
3.1. ΓΕΩΓΡΑΦΙΑ – ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	17
3.2. ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ.....	19
3.3. ΓΕΩΛΟΓΙΑ	21
3.4. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑΣ	25
3.4.1. ΤΟ ΦΡΑΓΜΑ ΤΟΥ ΜΑΡΑΘΩΝΑ	25
3.4.2. ΤΟ ΦΡΑΓΜΑ ΤΗΣ ΡΑΠΕΝΤΩΣΑΣ	28
3.4.3. ΤΑΦΡΟΙ ΑΠΟΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ.....	29
3.4.4. ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΑ ΥΔΡΟΜΑΣΤΕΥΤΙΚΑ ΕΡΓΑ.....	29
3.5. ΜΑΚΑΡΙΑ ΠΗΓΗ	30
3.6. ΟΛΥΜΠΙΑΚΟ ΚΩΠΗΛΑΤΟΔΡΟΜΙΟ ΣΧΙΝΙΑ	31
3.7. ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ	32
3.7.1. ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΥΔΡΟΦΟΡΟ ΣΥΣΤΗΜΑ.....	32
3.7.2. ΚΟΚΚΩΔΕΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟ ΣΥΣΤΗΜΑ (ΑΛΛΟΥΒΙΑΚΟ).....	33
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΕΡΕΥΝΑ ΠΕΔΙΟΥ	35
4.1. ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	35
4.2. ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ (SPECIFIC ELECTRICAL CONDUCTIVITY, SEC).....	37
4.3. ΕΝΕΡΓΟΣ ΟΞΥΤΗΤΑ (pH).....	39
4.4. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (TEMPERATURE, T).....	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΥΔΡΟΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	43
5.1. ΝΙΤΡΙΚΑ ΙΟΝΤΑ (NO_3^-).....	46
5.1.1. ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	46
5.1.2. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	49
5.2. ΟΞΙΝΑ ΑΝΘΡΑΚΙΚΑ ΙΟΝΤΑ (HCO_3^-).....	50

5.3. ΙΟΝΤΑ ΧΛΩΡΙΟΥ (Cl ⁻).....	53
5.4. ΥΔΡΟΧΗΜΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ.....	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΝΙΤΡΟΥΡΥΠΑΝΣΗΣ ΣΤΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ.....	65
6.1. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΡΥΠΟΥ ΣΤΟΥΣ ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ	65
6.1.1. ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ (MODFLOW)	65
6.1.2. ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΔΙΑΛΥΜΕΝΗΣ ΜΑΖΑΣ (MT3DMS)	68
6.2. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ	70
6.2.1. ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	70
6.2.2. ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ.....	72
6.2.3. ΧΡΟΝΙΚΗ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ.....	72
6.2.4. ΧΩΡΙΚΗ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ.....	73
6.3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	75
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	77
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	79
ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	79
ΔΙΕΘΝΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	81
ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΟΙ ΤΟΠΟΙ.....	81

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 Επιτόπου μετρήσεις δειγμάτων	36
Πίνακας 2 Ηλεκτρική Αγωγιμότητα αλλουβιακού υδροφορέα Μαραθώνα Μάιος 2023	37
Πίνακας 3 Ηλεκτρική Αγωγιμότητα καρστικού υδροφορέα Μαραθώνα Μάιος 2023 .	38
Πίνακας 4 pH αλλουβιακού υδροφορέα Μαραθώνα Μάιος 2023.....	39
Πίνακας 5 pH καρστικού υδροφορέα Μαραθώνα Μάιος 2023.....	40
Πίνακας 6 Θερμοκρασία αλλουβιακού υδροφορέα Μαραθώνα Μάιος 2023.....	41
Πίνακας 7 Θερμοκρασία καρστικού υδροφορέα Μαραθώνα Μάιος 2023.....	42
Πίνακας 8 Αποτελέσματα χημικών αναλύσεων καρστικού υδροφορέα.....	44
Πίνακας 9 Αποτελέσματα χημικών αναλύσεων αλλουβιακού υδροφορέα.....	45
Πίνακας 10 Νιτρικά Ιόντα αλλουβιακού υδροφορέα Μαραθώνα Μάιος 2023.....	46
Πίνακας 11 Νιτρικά Ιόντα καρστικού υδροφορέα Μαραθώνα Μάιος 2023.....	46
Πίνακας 12 Όξινα ανθρακικά ιόντα αλλουβιακού υδροφορέα Μαραθώνα Μάιος 2023	50

Πίνακας 13 Όξινα ανθρακικά ιόντα καρστικού υσροφορέα Μαραθώνα Μάιος 2023.	50
Πίνακας 14 Χλωριόντα αλλουβιακού και καρστικού υδροφορέα Μαραθώνα Μάιος 2023	53
Πίνακας 15 Υδροχημικός τύπος δειγμάτων	58

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 Διοικητική έκταση Δήμου Μαραθώνα (Πηγή: Περδικάκη,2016).....	17
Εικόνα 2 Γεωμορφολογικός Χάρτης Μαραθώνα (Πηγή: Περδικάκη, 2016)	20
Εικόνα 3 Σχηματική απεικόνιση των απόψεων των κυριότερων ερευνητών για τη λιθοστρωματογραφική δομή της Αττικής (Πηγή: Λόζιος, 1993).....	21
Εικόνα 4 Στρωματογραφική στήλη ΒΑ Αττικής Περιοχή βορειοδυτικού τμήματος του γεωλογικού φύλλου "Ραφήνα", κλίμακας 1:50000 κατά Κατσικάτσο (1991), (Πηγή: Περδικάκη, 2022)	22
Εικόνα 5 Γεωλογικός χάρτης Μαραθώνα (Πηγή: Μαργώνη, 2006).....	24
Εικόνα 6 Φράγμα Μαραθώνα.....	26
Εικόνα 7 Φράγμα Μαραθώνα.....	27
Εικόνα 8 Φράγμα Ραπεντώσας	28
Εικόνα 9 Σημεία Δειγματοληψίας	35
Εικόνα 10 Κατανομή Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας στον αλλουβιακό υδροφορέα του Μαραθώνα	38
Εικόνα 11 Κατανομή pH τον αλλουβιακό υδροφορέα του Μαραθώνα	40
Εικόνα 12 Κατανομή θερμοκρασίας στον αλλουβιακό υδροφορέα του Μαραθώνα ..	42
Εικόνα 13 Κατανομή Νιτρικών Ιόντων στον αλλουβιακό υδροφορέα του Μαραθώνα	47
Εικόνα 14 Κατανομή Νιτρικών Ιόντων στον καρστικό υδροφορέα του Μαραθώνα ...	48
Εικόνα 15 Κατανομή Νιτρικών Ιόντων αλλουβιακού υδροφορέα Μαραθώνα 2016 (Πηγή: Φλώρος Ε.,2016).....	49
Εικόνα 16 Κατανομή Όξινων Ανθρακικών Ιόντων στον αλλουβιακό υδροφορέα του Μαραθώνα	51
Εικόνα 17 Κατανομή Όξινων Ανθρακικών Ιόντων στον καρστικό υδροφορέα του Μαραθώνα	52
Εικόνα 18 Κατανομή Χλωριόντων στον αλλουβιακό υδροφορέα του Μαραθώνα	54
Εικόνα 19 Κατανομή Χλωριόντων στον καρστικό υδροφορέα του Μαραθώνα	55
Εικόνα 20 Διάγραμμα Piper αλλουβιακού υδροφορέα	56
Εικόνα 21 Διάγραμμα Piper καρστικού υδροφορέα	57
Εικόνα 22 Διάγραμμα Duroν αλλουβιακού υδροφορέα.....	60
Εικόνα 23 Διάγραμμα Duroν καρστικού υδροφορέα	61
Εικόνα 24 Διάγραμμα Ludwig- Langelier αλλουβιακού υδροφορέα	62
Εικόνα 25 Διάγραμμα Ludwig - Langelier καρστικού υδροφορέα	63

Εικόνα 26 Διάγραμμα Schoeller αλλουβιακού υδροφορέα	64
Εικόνα 27 Διάγραμμα Schoeller καρστικού υδροφορέα.....	64
Εικόνα 28 Οριακές Συνθήκες για το μοντέλο προσομοίωσης του αλλουβιακού υδροφορέα του Μαραθώνα (Πηγή: Περδικάκη, 2022).....	72
Εικόνα 29 Καθορισμός ζωνών (α) το υπερκείμενο στρώμα, (β) το ενδιάμεσο στρώμα και (γ) το υποκείμενο στρώμα (Πηγή: Περδικάκη, 2022)	73
Εικόνα 30 Αποτελέσματα Αρχικού Σεναρίου-Υφιστάμενη Κατάσταση.....	75
Εικόνα 31 Αποτελέσματα Σεναρίου 1	76

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα υπόγεια ύδατα αν και μη ορατά, αποτελούν ιδιαίτερα σημαντικό κομμάτι του κύκλου του νερού. Περισσότερο από το 95% του γλυκού νερού του πλανήτη, εκτός των παγετώνων και των εκτάσεων πολικών πάγων, βρίσκεται υπό την επιφάνεια του εδάφους. Τα υπόγεια ύδατα αποτελούν τη βασική, σταθερή ροή σε ποτάμια και υδροτόπους. Η διατήρηση της ποσότητας αυτής είναι υψίστης σημασίας για τα οικοσυστήματα των επιφανειακών υδάτων. Επιπλέον, αποτελούν κρίσιμη πηγή πόσιμου νερού, καθώς τροφοδοτούν τα συστήματα υδροδότησης που χρησιμοποιούν περίπου το 75 % των πολιτών της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Παράδειγμα αποτελεί η Δανία, όπου σχεδόν όλη η ποσότητα του πόσιμου ύδατος προέρχεται από την άντληση υπόγειων υδάτων.

Τα υπόγεια ύδατα αυξάνονται και μειώνονται ανάλογα με πολλούς παράγοντες. Οι έντονες βροχοπτώσεις, το λιώσιμο του χιονιού μπορεί να προκαλέσει την αύξηση του υπόγειου υδροφόρου, αντίθετα, η βαριά άντληση των υπόγειων υδάτων μπορεί να προκαλέσει τη μείωσή του. Οι προμήθειες των υπόγειων υδάτων αναπληρώνονται, ή επαναφορτίζονται μέσω της βροχής ή του χιονιού, το οποίο διαρρέει στις ρωγμές καταλήγοντας στο υπέδαφος.

Η έντονη παρέμβαση του ανθρώπου στη ποιότητα του εδάφους, κυρίως μέσω της αγροτικής δραστηριότητας, και κατ' επέκταση στα υπόγεια ύδατα, έχει εμφανίσει σοβαρές επιπτώσεις. Μια από αυτές τις επιπτώσεις είναι η νιτρορύπανση των υδροφόρων. «Ως νιτρορύπανση θεωρείται η άμεση ή έμμεση απόρριψη στο υδάτινο περιβάλλον αζωτούχων ενώσεων, με σημαντικότερες επιπτώσεις την πρόκληση βλαβών στην ανθρώπινη υγεία και την υποβάθμιση των υδατικών οικοσυστημάτων.» (Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας, 2023)

Ορισμένες από τις περιοχές της Ελλάδας που θεωρούνται ευπρόσβλητες ζώνες από νιτρορύπανση γεωργικής προέλευσης είναι το Θεσσαλικό Πεδίο, το Αργολικό Πεδίο, η Πτολεμαΐδα Κοζάνης, η Αταλάντη Φθιώτιδας και ο Μαραθώνας Αττικής (Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας, 2023)

Στη παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται ο υπόγειος υδροφόρος της περιοχής του Μαραθώνα Αττικής ως προς τη ρύπανση από νιτρικά. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε έρευνα πεδίου έρευνα πεδίου στη πεδιάδα του Μαραθώνα,

εντοπίστηκε και καταγράφηκε ένα δίκτυο παρακολούθησης γεωτρήσεων και πηγαδιών, τόσο στον αλλουβιακό όσο στον καρστικό υδροφόρο του υπόγειου υδραυλικού συστήματος της περιοχής.

Η μεθοδολογία εκπόνησης της εργασίας περιλαμβάνει, αρχικά βιβλιογραφική ανασκόπηση για τις πηγές και τους τρόπους αντιμετώπισης της νιτρορύπανσης. Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά σε αντίστοιχες περιπτώσεις εντός της Ελλάδας καθώς και στη νομοθεσία που αφορά το ζήτημα αυτό. Σε επόμενο κεφάλαιο περιγράφεται η γεωλογική, οι γεωμορφολογικές συνθήκες της πεδιάδας του Μαραθώνα, καθώς και οι υδρογεωλογικές συνθήκες που επικρατούν, με τη βοήθεια παλαιότερων μελετών και διατριβών.

Κατά την έρευνα πεδίου που έλαβε χώρα το Μάιο του 2023, εξετάστηκαν συνολικά 50 σημεία από τα οποία αντλούνται το κοκκώδες και το καρστικό υδροφόρο στρώμα. Από αυτά τα 42 αντλούν από τον κοκκώδη υδροφόρο, ενώ τα 8 από τον καρστικό. Ύστερα από τη λήψη των δειγμάτων, και τις σταθμημετρήσεις, όπου ήταν εφικτό, πραγματοποιήθηκαν επί τόπου μετρήσεις των ποιοτικών χαρακτηριστικών του νερού (θερμοκρασία, pH, ηλεκτρική αγωγιμότητα). Ακολούθησε η ανάλυση των δειγμάτων ως προς τα βασικά τους ιόντα στο Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας της σχολής Μεταλλειολόγων – Μεταλλουργών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων αποτυπώθηκαν σε χάρτες κατανομής των ιόντων καθώς και σε διαγράμματα που χαρακτηρίζουν το υπόγειο νερό βάσει της χημικής του σύστασης. Η μελέτη επικεντρώθηκε κυρίως στις συγκεντρώσεις των νιτρικών ιόντων του αλλουβιακού υδροφορέα, οι οποίες αποτελούν ένδειξη νιτρορύπανσης της περιοχής.

Τέλος, για τη βαθύτερη κατανόηση του φαινομένου, επιχειρήθηκε η μαθηματική προσομοίωση του παράκτιου υδροφόρου του Μαραθώνα, με τη χρήση του κώδικα MODFLOW-2005, όπως και προσομοίωση της μεταφοράς των νιτρικών ιόντων με τη βοήθεια του κώδικα MT3DMS.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – Η ΝΙΤΡΟΥΡΥΠΑΝΣΗ ΣΤΟΥΣ ΥΠΟΓΕΙΟΥΣ ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ

2.1. ΠΗΓΕΣ

Το άζωτο κάτω από φυσικές συνθήκες βρίσκεται σε μια δυναμική ισορροπία μεταξύ εδάφους, υδρόσφαιρας και ατμόσφαιρας, δηλαδή όσο ποσότητα δεσμεύεται από την ατμόσφαιρα τόση εκλύεται και προς αυτή. Αυτή η ισορροπία αποσκοπεί στη διατήρηση των νιτρικών ιόντων που εισέρχονται ή παράγονται κατά τον κύκλο του αζώτου σε χαμηλά επίπεδα, ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος για τον άνθρωπο και το περιβάλλον. Ωστόσο, λόγω της συνεχούς παρέμβασης του ανθρώπου στην ισορροπία αυτή, αυξάνονται οι ποσότητες του αζώτου (είτε με τη μορφή νιτρικών είτε όχι) στα φυσικά οικοσυστήματα με αποτέλεσμα τη δημιουργία περίσσειας νιτρικών ιόντων. Όταν αυτές οι ποσότητες εισέρχονται στους υδάτινους αποδέκτες, αποτελούν τη βασική πηγή ρύπανσής τους, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την ποιοτική τους υποβάθμιση.

Βέβαια, πέραν των ανθρωπογενών παρεμβάσεων, υπάρχουν περιπτώσεις όπου η συγκέντρωση των νιτρικών μπορεί να αυξηθεί και από φυσικά αίτια. Κάποια από αυτά είναι τα παρακάτω:

- ορισμένες γεωλογικές αποθέσεις (πχ. ηφαιστειογενή πετρώματα) περιέχουν υψηλές ποσότητες αζώτου,
- η κινητοποίηση συσσωρευμένων νιτρικών αλάτων μέσω της άρδευσης,
- ο μετασχηματισμός σε νιτρικά οργανικής μορφής αζώτου το οποίο παρέμεινε συσσωρευμένο επί χρόνια σε περιοχές (πχ. δασικές).

Παρόλο που τα παραπάνω αίτια χαρακτηρίζονται ως φυσικά, η ανθρώπινη παρέμβαση ευνόησε την αύξηση της συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων στο έδαφος, και κατά συνέπεια και στα υπόγεια ύδατα.

Συνεχίζοντας, οι ανθρωπογενείς πηγές ρύπανσης των υδροφόρων (είτε επιφανειακών είτε υπογείων) είναι οι ακόλουθες :

- Αγροτικές δραστηριότητες όπως είναι η χρήση τεχνητών λιπασμάτων, η εκτροφή ζώων και η διάθεση των αποβλήτων σε καλλιεργούμενες εκτάσεις, η χρήση οργανικών αποβλήτων ως λίπασμα, η άρδευση με

νερό πλούσιο σε νιτρικά καθώς και η καλλιέργεια ψυχανθών φυτών, τα οποία δεσμεύουν το άζωτο της ατμόσφαιρας,

- Αστικές δραστηριότητες, οι οποίες περιλαμβάνουν τις διαρροές δικτύων αποχέτευσης και σηπτικών συστημάτων, τη διήθηση από χώρους διάθεσης ιλύος που προέρχεται από την επεξεργασία των αστικών λυμάτων, την απευθείας διάθεση ανεπεξεργαστων αστικών λυμάτων σε επιφανειακούς και υπόγειους αποδέκτες, την άρδευση με επεξεργασμένα αστικά λύματα, τη λίπανση κήπων και εκτάσεων καλυπτόμενων με γρασίδι (πχ. χλοοτάπητες, γήπεδα γκολφ),
- Βιομηχανικές δραστηριότητες, όπως τα απόβλητα εργοστασίων παραγωγής τροφίμων, υφασμάτων και βαφών καθώς και τα απόβλητα ορυχείων,
- Απόθεση NO_x και NH_x από την ατμόσφαιρα.

Η αγροτική δραστηριότητα αποτελεί την κύρια πηγή νιτρορύπανσης των υπόγειων υδροφορέων. Προφανώς, η ποσότητα των βελτιωτικών που χρησιμοποιείται εξαρτάται από το έδαφος της καλλιεργήσιμης γης και από την απόδοση που αναμένεται, ενώ μπορεί να διαφέρει από καλλιεργητή σε καλλιεργητή. Ανάλογα με το είδος του λιπάσματος, το άζωτο μπορεί να εισέλθει στο έδαφος είτε σε νιτρική μορφή (νιτρικό νάτριο, νιτρική αμμωνία, νιτρικό ασβέστιο) είτε σε αμμωνιακή (νιτρική αμμωνία, θειική αμμωνία, ουρία). Λόγω της μικρής περιεκτικότητας ανόργανων συστατικών στα κτηνοτροφικά απόβλητα, συνήθως απαιτείται η χρήση μεγάλων ποσοτήτων προκειμένου να καλυφθούν οι απαιτούμενες ανάγκες των καλλιεργειών. Ωστόσο αξίζει να σημειωθεί ότι η χρήση τους βοηθά στη βελτίωση της δομής, του αερισμού και της ικανότητας κατακράτησης υγρασίας στο έδαφος, γι' αυτό και κρίνεται απαραίτητη η χρήση τους από τους αγρότες. Παρόλα αυτά, ορισμένοι χρησιμοποιούν ανεξέλεγκτα λιπάσματα ή/και κτηνοτροφικά απόβλητα, στοχεύοντας στη μεγιστοποίηση της παραγωγής τους, με άμεση συνέπεια την αύξηση των συγκεντρώσεων των νιτρικών και άρα της ποιοτικής υποβάθμισης του περιβάλλοντος.

Επιπρόσθετα, η γεωργική ρύπανση ανήκει στην κατηγορία των μη σημειακών ή κατανεμημένων πηγών ρύπανσης, αφού αναπτύσσεται σε μια ευρεία έκταση και έχει ως αποτέλεσμα την επιρροή μεγάλου μέρους των υπόγειων υδατικών συστημάτων. Επίσης, αποτελεί μια σωρευτική και μακράς διάρκειας μορφή

ρύπανσης με σημαντικό αποτύπωμα σε βάθος χρόνου όσον αφορά την ποιότητα των υδροφόρων συστημάτων. Λόγω της πολυπλοκότητας της συστηματικής παρακολούθησης του φαινομένου, η εκτίμηση και ο έλεγχος του ρυπαντικού φορτίου προτιμάται να γίνεται προληπτικά παρά ύστερα στοχεύοντας στην εξυγίανση, που είναι σχεδόν ανέφικτο να πραγματοποιηθεί.

Στις κατανεμημένες πηγές ρύπανσης ανήκει και η άρδευση με νερό εμπλουτισμένο σε νιτρικά, καθώς λαμβάνει χώρα σε περιοχή μεγάλου εύρους, η οποία αντιστοιχεί με την έκταση των αρδευόμενων καλλιεργειών. Προφανώς, το μέγεθος του νιτρικού φορτίου που προέρχεται από τη συγκεκριμένη πηγή είναι ανάλογο με την ποσότητα του αρδευόμενου νερού και της ποσότητας νιτρικών που εμπεριέχονται σε αυτό. Αν και, συγκριτικά με τις υπόλοιπες πηγές νιτρορύπανσης, το μέγεθος του νιτρικού φορτίου είναι μηδαμινό, εξακολουθεί να αποτελεί υπολογίσιμη πηγή.

Ιδιαίτερα σημαντικές πηγές νιτρορύπανσης αποτελούν η εκτροφή ζώων και συγκεκριμένα η χώροι αποθήκευσης των ζωικών αποβλήτων, όπως και τα σηπτικά συστήματα των οικισμών τα οποία δέχονται τα οικιακά λύματα όταν δεν υπάρχει αποχετευτικό δίκτυο, οι οποίες ανήκουν στην κατηγορία των σημειακών πηγών. Στις συγκεκριμένες περιπτώσεις, το άζωτο εισέρχεται στο έδαφος με την αμμωνιακή και την οργανική του μορφή, και στη συνέχεια, υπό την επίδραση των επιμέρους βιομηχανικών διεργασιών μετασχηματίζεται σε νιτρικά ιόντα.

Τέλος, ιδιαίτερη επισήμανση οφείλεται να γίνει στη ρύπανση με φορτίο αζώτου που προέρχεται από την ατμόσφαιρα και το οποίο καταφθάνει στο έδαφος είτε μέσω των κατακρημνισμάτων είτε μέσω της απόθεσης των σωματιδίων. Αν και οφείλεται σε φυσικά αίτια, ταξινομείται στις ανθρωπογενείς δραστηριότητες καθώς συνδέονται άμεσα με αυτές. Συγκεκριμένα, η εκτροφή των ζώων, η χρήση λιπασμάτων, και οι αέριες εκπομπές των βιομηχανιών και των μέσων μεταφοράς έχουν προκαλέσει σημαντική αύξηση των ποσοτήτων NO_x και NH_x στην ατμόσφαιρα και κατά συνέπεια στο έδαφος. Όπως γίνεται κατανοητό, και η απόθεση αζωτούχων ενώσεων από την ατμόσφαιρα συμπεριλαμβάνεται στις κατανεμημένες μορφές ρύπανσης (Σιάρκος, 2015).

2.2. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΝΙΤΡΟΡΥΠΑΝΣΗΣ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

Η ρύπανση από νιτρικά είναι ένα πρόβλημα το οποίο συναντάται σε πολλές χώρες παγκοσμίως, ειδικά σε αυτές οι οποίες βασίζονται στον πρωτογενή τομέα. Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (2011), επιπλέον ποσότητες νιτρικών αναμένεται να επιβαρύνουν τους υδροφορείς, ακόμη και σε περίπτωση που υπάρξει μείωση της ποσότητας του φορτίου του αζώτου που εισέρχεται στο έδαφος. Για αυτό το λόγο κρίνεται αναγκαία η αντιμετώπιση του ζητήματος μέσω ενεργειών και τεχνικών, οι οποίες χωρίζονται σε δυο επιμέρους κατηγορίες, τα μέτρα προστασίας και τα μέτρα θεραπείας, τα οποία θα αναλυθούν εκτενώς στη συνέχεια (Σιάρκος, 2015)

2.2.1. ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Όταν μιλάμε για μέτρα προστασίας κατά της νιτρορύπανσης αναφερόμαστε ουσιαστικά σε ενέργειες και δράσεις οι οποίες αποσκοπούν στον έλεγχο και περιορισμό της ποσότητας του νιτρικού φορτίου που καταλήγει στους υπόγειους υδροφορείς. Απώτερος στόχος αυτών των μέτρων, αν απαιτεί αρκετό χρονικό διάστημα έως ότου φανούν τα αποτελέσματα, είναι η μείωση των συγκεντρώσεων των νιτρικών ιόντων και η βαθμιαία ποιοτική αναβάθμιση των υδροφορέων. Τα μέτρα προστασίας χωρίζονται σε τέσσερις επιμέρους βασικές κατηγορίες:

a) Εφαρμογή κατάλληλων διαχειριστικών πρακτικών

Αποτελεί μια από τις σημαντικότερες πολιτικές μείωσης της συγκέντρωσης των νιτρικών στους υπόγειους υδροφορείς και περιλαμβάνει μεθόδους που αποβλέπουν στην παρακολούθηση των πιέσεων και τον περιορισμό του φορτίου αζώτου που εισέρχεται στο έδαφος. Επιπλέον, αφορά τον έλεγχο των μηχανισμών συσσώρευσης του αζώτου και τον περιορισμό της ποσότητας νερού, που μεταφέρει νιτρικά ιόντα, που εισχωρεί στους υπόγειους υδροφορείς.

Σε αυτές τις πρακτικές περιλαμβάνονται όλες οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες (αγροτικές, αστικές, βιομηχανικές) οι οποίες ευθύνονται για τη ρύπανση των υδροφορέων με νιτρικά. Ακολουθεί μερική ανάλυση των βασικότερων από αυτές.

Αγροτικές δραστηριότητες

Λίπανση καλλιεργειών:

- Χρήση συστήματος συμβουλών λίπανσης με λήψη εδαφικού δείγματος
- Συνδυασμένη χρήση τεχνητών λιπασμάτων και κοπριάς
- Μείωση εφαρμοζόμενων ποσοτήτων λίπανσης
- Λίπανση (ποσότητα, χρονική περίοδος) με βάση τις πραγματικές ανάγκες της καλλιέργειας
- Αποφυγή εφαρμογής λίπανσης σε περιοχές και σε χρονικές περιόδους υψηλού κινδύνου
- Ενσωμάτωση λίπανσης εντός του εδάφους
- Αποφυγή διάθεσης υγρών κτηνοτροφικών αποβλήτων σε εδαφικές εκτάσεις με σημαντική κλίση
- Χρησιμοποίηση ουσιών αναστολής της διαδικασίας της νιτροποίησης

Καλλιεργητικές πρακτικές:

- Εναλλαγή καλλιεργειών στην ίδια έκταση - Αμειψισπορά
- Καλλιέργεια κατά ζώνες
- Διατήρηση κάλυψης εδάφους μεταξύ συγκομιδής - νέας σποράς
- Πρωίμιση σποράς των χειμερινών καλλιεργειών
- Επιλογή καλλιεργειών με μεγαλύτερη ικανότητα λήψης θρεπτικών από το έδαφος
- Επιλογή καλλιεργειών λιγότερο ευαίσθητων στην επιφανειακή απορροή
- Ελαχιστοποίηση της άρδευσης

Πρακτικές άρδευσης:

- Τακτική παρακολούθηση και αξιολόγηση του συστήματος άρδευσης
- Βελτίωση του προγράμματος άρδευσης λαμβάνοντας υπόψη παραμέτρους όπως οι βροχοπτώσεις, οι υδατικές ανάγκες των καλλιεργειών (ποσότητα, χρονική περίοδος) και η περιεχομένη υγρασία του εδάφους
- Βελτίωση της υποδομής των υφιστάμενων μεθόδων άρδευσης, ώστε να υπάρχουν οι όσο το δυνατόν λιγότερες απώλειες
- Χρησιμοποίηση όσο το δυνατόν αποδοτικότερων μεθόδων άρδευσης

Ζωική παραγωγή:

- Μείωση αριθμού ζώων
- Περιορισμός αναπαραγωγής ζώων
- Κοπή λειβαδικής βλάστησης και τροφοδότηση ζώων αντί βόσκησης
- Μείωση ημερήσιας χρονικής διάρκειας ή χρονικής περιόδου βόσκησης
- Μείωση αριθμού εκτρεφόμενων ζώων στα λιβάδια όταν τα εδάφη είναι υγρά
- Υιοθέτηση στρατηγικής διατροφής των ζώων με βάση τις πραγματικές τους ανάγκες και χρησιμοποίηση ζωοτροφών με χαμηλότερη περιεκτικότητα σε θρεπτικά συστατικά

Αστικές δραστηριότητες

Δίκτυα αποχέτευσης:

- Τακτική συντήρηση των δικτύων αποχέτευσης ώστε να ελαχιστοποιούνται οι διαρροές
- Αντικατάσταση απαρχαιωμένων ή κατεστραμμένων σωληνώσεων με καινούργιες καλύτερης ποιότητας

Σηπτικά συστήματα:

- Βελτίωση της κατασκευής και ειδικότερα της στεγανοποίησης των σηπτικών συστημάτων
- Εγκατάσταση συστημάτων διαχωρισμού της ουρίας, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη λίπανση των καλλιεργειών
- Εγκατάσταση συστημάτων επεξεργασίας των λυμάτων και απομάκρυνσης του αζώτου μέσω απονιτροποίησης

Αστικά λύματα:

- Εγκατάσταση συστημάτων απομάκρυνσης του φορτίου αζώτου κατά τη διαδικασία επεξεργασίας των λυμάτων
- Αποφυγή διάθεσης ανεπεξεργαστων λυμάτων ή επεξεργασμένων στα οποία δεν έχει πραγματοποιηθεί απομάκρυνση του αζώτου σε ευαίσθητες περιοχές

Χώροι απόθεσης απορριμμάτων:

- Κατασκευή κατάλληλης στεγανοποίησης του πυθμένα του χώρου διάθεσης
- Τακτικός έλεγχος της ποιότητας των διασταλαζόντων υγρών

- Συλλογή και επανακυκλοφορία ή επεξεργασία των διασταλαζόντων υγρών εντός του χώρου απόθεσης

Βιομηχανικές δραστηριότητες

- Βελτιστοποίηση των παραγωγικών διαδικασιών και επαναχρησιμοποίηση του νερού, ώστε να ελαχιστοποιείται η παραγωγή αποβλήτων
- Εγκατάσταση συστημάτων απομάκρυνσης του φορτίου αζώτου
- Ανάμειξη αποβλήτων υψηλής και χαμηλής περιεκτικότητας σε άζωτο
- Χρησιμοποίηση των παραγόμενων αποβλήτων για άρδευση των καλλιεργειών αντί για απευθείας διάθεση στους υπόγειους υδροφορείς

b) Καθορισμός περιοχών προστασίας

Η συγκεκριμένη πρακτική αποσκοπεί τον εντοπισμό των περιοχών οι οποίες χρήζουν ιδιαίτερη προσοχή και στις οποίες οι συγκεντρώσεις νιτρικών ιόντων υπερβαίνουν τα επιτρεπόμενα όρια ή τείνουν να τα υπερβούν. Ύστερα από αυτό το βήμα ακολουθούν οι διαχειριστικές πρακτικές που προαναφέρθηκαν, η επιλογή των οποίων εξαρτάται τόσο από το είδος της πηγής ρύπανσης (σημειακές ή κατανεμημένες) όσο και από τις παρατηρούμενες τιμές συγκεντρώσεων.

c) Αλλαγή χρήσεων γης

Κατά τη συγκεκριμένη πρακτική, πραγματοποιείται παύση των δραστηριοτήτων που προκαλούν αυξημένες συγκεντρώσεις νιτρικών, και στη συνέχεια αντικατάστασή τους με λιγότερο επιβλαβείς. Ως επί το πλείστον καταργούνται καλλιεργήσιμες εκτάσεις οι οποίες είτε χρήζουν συστηματικής λίπανσης είτε απαιτούν σημαντικές ποσότητες λιπασμάτων με σκοπό τη βελτιστοποίηση της παραγωγής. Συνήθως, όταν πραγματοποιείται αλλαγή χρήσης γης, συναντάται είτε μετατροπή των καλλιεργήσιμων εκτάσεων σε χορτολιβαδικές και σε δασικές εκτάσεις, είτε κατασκευή κτηριακών συγκροτημάτων ή πάρκων αναψυχής ή γηπέδων γκολφ.

Από τα παραπάνω, η μετατροπή των καλλιεργήσιμων εκτάσεων σε δασικές, φέρει τα περισσότερα πλεονεκτήματα. Αυτό συμβαίνει γιατί όχι μόνο παρατηρείται σημαντική μείωση του φορτίου του αζώτου που εισέρχεται στο έδαφος, αλλά

ταυτόχρονα μειώνεται και η ήδη υπάρχουσα αποθηκευμένη ποσότητα νιτρικών, η οποία απορροφάται από το ριζικό σύστημα των δένδρων.

Ωστόσο, ενώ με την αλλαγή χρήσης γης παρατηρούνται θετικά αποτελέσματα, αποτελεί την τελική επιλογή μεταξύ των επιμέρους μέτρων προστασίας. Αυτό συμβαίνει καθώς αποτελεί μια μεταβολή μεγάλης κλίμακας και μπορεί να προκαλέσει εντάσεις μεταξύ των εμπλεκόμενων. (Λατινόπουλος, 1999)

d) Λήψη μέτρων οικονομικού ελέγχου

Αυτά αφορούν αγροτικές δραστηριότητες, και κυρίως τη χρήση λιπασμάτων, μέσω των οποίων αυξάνεται η παραγωγικότητα και η απόδοση των καλλιεργειών. Λόγω του χαμηλού κόστους των λιπασμάτων και της αύξησης του εισοδήματος των αγροτών, παρατηρείται η αλόγιστη χρήση τους. Έτσι, ανά καιρούς προτείνονται μέτρα που στοχεύουν σε μια ορθολογική και συνετή εφαρμογή λιπασμάτων, όπου κατ' επέκταση θα οδηγήσουν στην άμβλυνση των επιπέδων των νιτρικών στους υπόγειους υδροφορείς.

Παραδείγματα τέτοιων μέτρων μπορεί να είναι η φορολόγηση της ανεξέλεγκτης χρήσης λιπασμάτων, η χορήγηση επιδοτήσεων σε όσους τα χρησιμοποιούν ορθολογικά, ο περιορισμός της ανά έκταση ποσότητας λιπάσματος κλπ. Μολονότι αυτά τα μέτρα μπορούν να έχουν θετικές επιπτώσεις στη προσπάθεια εξομάλυνσης της περιεκτικότητας νιτρικών ιόντων στους υπόγειους υδροφορείς, είναι δυνατόν να ανακύψουν έντονες αντιδράσεις από τους προσβαλλόμενους, κυρίως αγρότες, ενώ συγχρόνως να μην προκύψουν τα εκτιμώμενα αποτελέσματα (Λατινόπουλος, 1999).

2.2.2. ΜΕΤΡΑ ΘΕΡΑΠΕΙΑΣ

Πέραν των μέτρων προστασίας, υπάρχουν και μέτρα θεραπείας τα οποία αφορούν δράσεις οι οποίες αποσκοπούν είτε στη μη χρησιμοποίηση του ρυπασμένου νερού το οποίο προέρχεται από τους υπόγειους υδροφόρους είτε στη μείωση των συγκεντρώσεων των νιτρικών με σκοπό την ισορροπία στα προκαθορισμένα επιτρεπόμενα όρια. Τα μέτρα θεραπείας εφαρμόζονται όταν οι συγκεντρώσεις έχουν υπερβεί τα επιτρεπόμενα όρια, και το νερό άντλησης χρήζει την εξασφάλιση ποιοτικής επάρκειας, έτσι ώστε να μετριαστεί, αν όχι αποφευχθεί, ο κίνδυνος υπονόμησης του περιβάλλοντος και της ανθρώπινης υγείας. Αυτά τα μέτρα συνήθως εφαρμόζονται από τους αρμόδιους φορείς που είναι υπεύθυνοι για την υδροδότηση οικισμών και πολεοδομικών συγκροτημάτων. Τα μέτρα αυτά περιλαμβάνουν:

a) Την αντικατάσταση του ρυπασμένου νερού

Η αντικατάσταση του ρυπασμένου νερού με νερό καλύτερης ποιότητας μπορεί να επιτευχθεί με ποικίλους τρόπους. Ένας από αυτούς είναι η αξιοποίηση διαφόρων τμημάτων του ήδη εκμεταλλεύσιμου υδροφόρου συστήματος είτε μέσω της ανόρυξης καινούργιων γεωτρήσεων σε σημεία που δεν έχουν υποστεί σημαντική υποβάθμιση, είτε μέσω της επέκτασης των προϋπαρχουσών γεωτρήσεων, με σκοπό την άντληση νερού από τα βαθύτερα και μη ρυπασμένα στρώματα.

Ένας επιπλέον τρόπος αντικατάστασης του ρυπασμένου νερού είναι η σύνδεση του υδρευτικού δικτύου που μεταφέρει το ρυπασμένο νερό σε ένα άλλο δίκτυο που φέρει νερό καλής ποιότητας. Επίσης, μπορεί να κατασκευαστεί ένα εντελώς καινούργιο δίκτυο το οποίο θα προμηθεύεται πόσιμο νερό από πηγές που δεν είναι ποιοτικά υποβαθμισμένες. Το κόστος κατασκευής ή σύνδεσης των δικτύων παίζει σημαντικό ρόλο στην απόφαση εφαρμογής του συγκεκριμένου μέτρου, αφού μπορεί ειδικά στη πρώτη περίπτωση να είναι τόσο υψηλό που να είναι απαγορευτικό.

Βέβαια, υπάρχουν και άλλοι τρόποι αντικατάστασης του ρυπασμένου νερού, όπως είναι η μεταφοράς ποιοτικού νερού μέσω οχημάτων (σε μικρούς οικισμούς), η χρήση εμφιαλωμένου νερού (προσωρινή λύση κυρίως για ευπαθείς ομάδες). (Λατινόπουλος, 1999)

b) Την ανάμειξη νερών διαφορετικής ποιότητας

Κατά την παρούσα πρακτική, πραγματοποιείται ανάμειξη του ρυπασμένου νερού με νερό καλής ποιότητας ώστε να αραιωθεί το πρώτο και κατά συνέπεια να μειωθεί η συγκέντρωση νιτρικών σε αυτό. Ταυτόχρονα, αποτελεί μια ιδιαίτερα οικονομική λύση, όταν βέβαια το νερό καλής ποιότητας βρίσκεται σε κοντινή απόσταση. Σε αντίθετη περίπτωση, και σε αγροτικές περιοχές όπου η ρύπανση παρατηρείται σε όλη την έκταση του υδροφορέα, το κόστος αυξάνεται σημαντικά αφού απαιτείται η κατασκευή υποδομής μέσω της οποίας θα μεταφέρεται το καθαρό νερό σε μεγάλες αποστάσεις και ύστερα θα αναμειγνύεται με το ρυπασμένο. Για τη διασφάλιση της ορθής λειτουργίας αυτού του συστήματος, απαιτείται τόσο η καθημερινή παρακολούθησή του, όσο η συστηματική μέτρηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του μείγματος. (Λατινόπουλος, 1999)

c) Την επεξεργασία ρυπασμένου νερού

Σαν τελευταίο μέτρο θεραπείας κατά της νιτρορύπανσης, αναφέρονται τεχνικές οι οποίες αποσκοπούν στην μείωση της συγκέντρωσης των νιτρικών και κατά συνέπεια στην εξυγίανση των υπόγειων υδάτων. Αυτές οι μέθοδοι μπορεί να είναι φυσικοχημικές ή βιολογικές, όπως για παράδειγμα είναι η ιοντοανταλλαγή (Ion Exchange Process), η αντίστροφη ώσμωση (Reverse Osmosis), η προσρόφηση (adsorption), η βιολογική (biological denitrification) ή χημική απονιτροποίηση (chemical denitrification) κ.ά.. Κατά τις μεθόδους αυτές πραγματοποιείται άντληση του ρυπασμένου νερού, μεταφορά και επεξεργασία του σε ειδικές εγκαταστάσεις, και τέλος χρήση του ή επαναφορά του στον υπόγειο υδροφορέα. Σημειώνεται δε, ότι σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να επιτευχθεί και επί τόπου επεξεργασία και εξυγίανση των νερών εφαρμόζοντας τη μέθοδο της βιολογικής απονιτροποίησης.

Παράγοντες όπως το επιθυμητό επίπεδο επεξεργασίας, τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του υπό επεξεργασία νερού, τη διαχείριση των παραγόμενων αποβλήτων, καθώς και το κόστος κατασκευής, λειτουργίας και συντήρησης των εγκαταστάσεων, καθορίζουν την επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου επεξεργασίας.

2.2.3. ΦΡΑΓΜΑΤΑ ΑΠΟΝΙΤΡΟΠΟΙΗΣΗΣ

Πέραν όλων των προαναφερθέντων, υπάρχουν και τα φράγματα απονιτροποίησης τα οποία συμβάλλουν στον έλεγχο του φορτίου της νιτρορύπανσης που κατευθύνεται προς τα υπόγεια ύδατα. Υπάρχουν τρία είδη φραγμάτων: α) οι τοίχοι απονιτροποίησης – κατασκευάζονται από υλικά πλούσια σε άνθρακα και τοποθετούνται σε ρηχούς υδροφορείς και κάθετα προς τη ροή του νερού, β) κλίνες απονιτροποίησης – είναι δεξαμενές που περέχουν υλικό εμπλουτισμένο με άνθρακα, γ) στρώματα απονιτροποίησης– είναι οριζόντια στρώματα με υλικό εμπλουτισμένο με άνθρακα (Bednarek et al., 2014).

Αυτά τα φράγματα, λόγω της αυξημένης ποσότητας οργανικού άνθρακα που περιέχουν, αυξάνουν την ικανότητα μετατροπής των νιτρικών του νερού σε αέριο άζωτο. Η διαδικασία απομάκρυνσης των νιτρικών που πραγματοποιείται καλείται βιολογική απονιτροποίηση. Συνήθως χρησιμοποιείται πριονίδι ή άλλα απόβλητα της βιομηχανίας ξύλου, ανεπεξέργαστοι σπόροι δημητριακών, άχυρο σιταριού, κομπόστ και φλοιός ρυζιού. Αυτή η τεχνική έχει αποδειχθεί ότι μπορεί να μειώσει τα νιτρικά από 30 έως και 80%.

Η παρούσα τεχνική απονιτροποίησης παρουσιάζει τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

- Χαμηλό κόστος κατασκευής και υλικών
- Ανάλογα με την πηγή και το μέγεθος της ρύπανσης, το φράγμα έχει τη δυνατότητα να προσαρμόζεται
- Αν εφαρμοστεί σωστός σχεδιασμός, η παρεμβολή στο τοπίο είναι ελάχιστη
- Μεγάλος χρόνος λειτουργίας

Ωστόσο, η προσέγγιση αυτή παρουσιάζει και ορισμένους περιορισμούς, οι οποίοι με σωστό σχεδιασμό και διαχείριση μπορούν να ελεγχθούν. Τα απονιτροποιητικά υλικά, που δρουν ως πηγές άνθρακα, δε παρουσιάζουν όλα μακροπρόθεσμα αποτελέσματα.

- Η αποτελεσματικότητα της εφαρμογής εξαρτάται από τις τοπικές υδρογεωλογικές συνθήκες.
- Τα απονιτροποιητικά βακτήρια συναντώνται συνήθως σε ρηχά εδαφικά στρώματα, μέχρι το βάθος των 2m, έτσι η κατασκευή πιο βαθιών φραγμάτων μπορεί να είναι αντισυμβατική.

- Αβιοτικοί παράμετροι που είναι σημαντικοί για την απονιτροποίηση, όπως η θερμοκρασία και το διαλυμένο οξυγόνο, σχετίζονται με τις υδρολογικές και κλιματικές συνθήκες (σε θερμοκρασίες μικρότερες των 5°C, οι ρυθμοί απονιτροποίησης μειώνονται).

2.3. Η ΝΙΤΡΟΥΡΥΠΑΝΣΗ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Η ρύπανση των υπόγειων νερών με νιτρικά αποτελεί μείζον περιβαλλοντικό πρόβλημα που πλήττει τη πλειοψηφία των χωρών, τη καθεμία ωστόσο σε διαφορετικό βαθμό.

Η Ελλάδα, ούσα μια γεωργική χώρα, διαθέτει διάσπαρτες καλλιεργούμενες εκτάσεις. Εξαιτίας της εντατικής εκμετάλλευσης και την ανεξέλεγκτης λίπανσης, έχουν παρουσιαστεί σοβαρά ποιοτικά προβλήματα σε αρκετά υπόγεια υδροφόρα συστήματα, πράγμα που συνεπάγεται τη δυσκολία αντιμετώπισής τους.

Ύστερα από την Οδηγία 91/676/ΕΟΚ και αξιοποιώντας τα αποτελέσματα του Εθνικού Δικτύου Παρακολούθησης της κατάστασης τόσο των επιφανειακών όσο και των υπόγειων υδάτων, καθορίστηκαν οι Ευπρόσβλητες Ζώνες από νιτρορύπανση (ZEN) γεωργικής προέλευσης.

Σύμφωνα με τα τελευταία δεδομένα του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας (Ιούλιος 2023), οι ζώνες που έχουν χαρακτηριστεί ως ευπρόσβλητες είναι οι ακόλουθες: Θεσσαλικό Πεδίο, Κωπαϊδικό Πεδίο, Αργολικό Πεδίο, Λεκάνη Πηνειού Ηλείας, Κάμπος Θεσσαλονίκης Πέλλας Ημαθίας, Λεκάνη Στρυμόνα, Πεδιάδα Άρτας Πρέβεζας, ΛΑΠ Ασωπού Βοιωτίας, Νότιο Τμήμα Ποταμού Έβρου, Πεδιάδα Ανατολικά και Δυτικά Λίμνης Βιστωνίδας, ΛΑΠ Αγγίτη, Βόρεια Κορινθία, Οροπέδιο Τρίπολης, Φιλιατρά Κυπαρισσίας, Λαρισσός Αχαΐας, Λεωνίδιο Αρκαδίας, Μεσογαία Αττικής, Μαραθώνας Αττικής, Βόρειο Τμήμα Ποταμού Έβρου, Σπερχειός Φθιώτιδας, Πάμισος Μεσσηνίας, Τροιζηνίας, Άστρος – Αγ. Ανδρέας Αρκαδίας, Μέγαρα Αλεποχώρι Αττικής, Αταλάντη Φθιώτιδας, Αλμυρός Μαγνησίας, Πτολεμαΐδα Κοζάνης, Επανομή – Μουδανιά Χαλκιδικής, Γεροπόταμος – Μεσσαράς και Αρτάκη Ευβοίας.

2.4. ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗ ΝΙΤΡΟΡΥΠΑΝΣΗ

Λόγω της σοβαρότητας του ζητήματος της υποβάθμισης της ποιότητας των υδάτων, και συγκεκριμένα από νιτρικά ιόντα, πολλοί διεθνείς οργανισμοί έχουν θεσπίσει όρια στη συγκέντρωση του αζώτου και των αζωτούχων ενώσεων στο νερό που χρησιμοποιεί ο άνθρωπος.

Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (2008), η ανώτατη επιτρεπόμενη τιμή νιτρικών στα νερά είναι τα 50 mg/lit. Ωστόσο, η Αμερικανική Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος (2000) ακολουθεί αυστηρότερη γραμμή και ορίζει ως ανώτατη επιτρεπόμενη τιμή τα 10 mg/lit.

Με τη σειρά της, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει εκδώσει οδηγίες σχετικά με το συγκεκριμένο ζήτημα. Αναλυτικά, η Οδηγία 75/440/1975 EC (1975), όπως και η Οδηγία 91/676/ΕΟΚ (1991), ακολουθούν τα όρια του Π.Ο.Υ. για τα νιτρικά ιόντα, τα 50 mg/lit. Το άρθρο 4 της Οδηγίας 91/676/ΕΟΚ, θεσπίστηκε ο 'Κώδικας Ορθής Γεωργικής Πρακτικής για την Προστασία των Νερών από τη Νιτρορύπανση Γεωργικής Προέλευσης'. Σκοπός αυτού του κώδικα είναι να βοηθήσει τους γεωργούς να εφαρμόσουν πρακτικές φιλικές προς το περιβάλλον όσον αφορά τα αζωτούχα λιπάσματα. Η Οδηγία 2000/60/ΕΚ (2000), αφορά τη γενικότερη ποιότητα των υδάτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση, περιλαμβάνει τα όρια των προηγούμενων οδηγιών, ενώ ταυτόχρονα γίνεται αναφορά στην «καλή οικολογική κατάσταση» των υδάτινων σωμάτων.

Η ελληνική νομοθεσία, στην Κ.Υ.Α. Υ2/2600/2001 (2001), ακολουθεί επίσης το ίδιο όριο συγκέντρωσης των 50 mg/lit NO₃, ως ανώτατη επιτρεπόμενη τιμή για το νερό που καταναλώνεται από τον άνθρωπο.

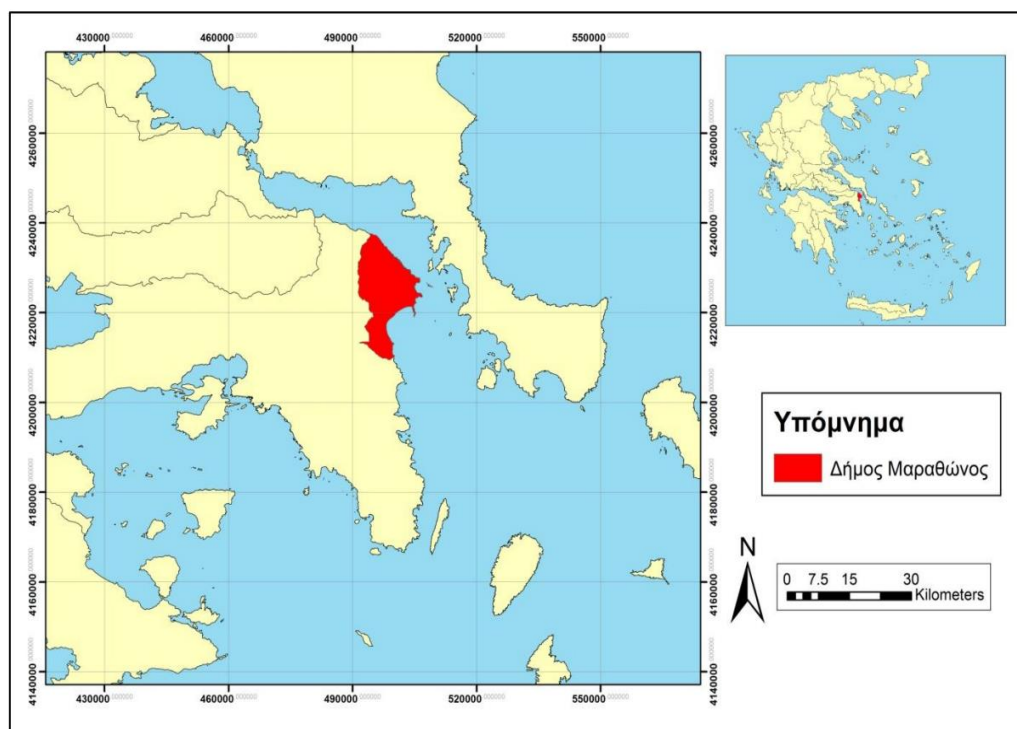
(Ηλίας Ιορδανίδης, 2011)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

3.1. ΓΕΩΓΡΑΦΙΑ – ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η περιοχή έρευνας της παρούσας εργασίας είναι ο Μαραθώνας.

Ο Δήμος Μαραθώνα ανήκει στη Περιφέρεια Αττικής, η οποία συστάθηκε με την εφαρμογή του αυτοδιοικητικού Προγράμματος «Καλλικράτης» του νόμου Ν3852/2010, και, γεωγραφικά, βρίσκεται βορειοανατολικά του νομού. Πλέον, ο Δήμος Μαραθώνα αποτελεί συνένωση των Δήμων Νέας Μάκρης και Μαραθώνα, και των Κοινοτήτων Γραμματικού και Βαρνάβα. Ο νέος Δήμος Μαραθώνα είναι πέμπτος σε έκταση Δήμος της Αττικής και από τους μεγαλύτερους σε έκταση Δήμους στη χώρα, έχοντας συνολική έκταση 222,17 km². Σύμφωνα με την απογραφή του 2021 ο πληθυσμός του Δήμου Μαραθώνα ανέρχεται στους 31.331 κατοίκους.



Εικόνα 1 Διοικητική έκταση Δήμου Μαραθώνα (Πηγή: Περδικάκη, 2016)

Η ακτογραμμή του Μαραθώνα αναπτύσσεται σε μήκος περίπου 10 km και ξεκινάει από τη λοφώδη ζώνη της Κυνοσούρας στα ανατολικά ενώ καταλήγει στη Νέα Μάκρη στο νοτιοδυτικό άκρο. Προς τα δυτικά η πεδιάδα οριοθετείται περιμετρικά από ορεινούς όγκους του Πεντελικού Όρους, στα βόρεια οριοθετείται από τους ορεινούς όγκους Κοτρώνι, Στρατή και Τεροκορυφή, στα ανατολικά από τον ορεινό όγκο της

Δρακονέρας και του Μύτικα ενώ στα νοτιοανατολικά από τη χερσόνησο της Κυνοσούρας. Η πεδιάδα έχει ήπιο γεωμορφολογικό ανάγλυφο με υψόμετρο που ξεκινά από 0 m (από τη μέση στάθμη της θάλασσας) στην ακτογραμμή ενώ τα μεγαλύτερα υψόμετρα εντοπίζονται προς την επαφή της πεδιάδας με τους ορεινούς όγκους και δεν ξεπερνούν τα 40 m. Οι κοινότητες που εντοπίζονται στην πεδιάδα είναι η Νέα Μάκρη, ο Μαραθώνας, ο Βρανάς, ο Άγιος Παντελεήμονας και το Κάτω Σούλι.

Οι Κοινότητες Βρανά, Αγίου Παντελεήμονα και Κάτω Σουλίου καταλαμβάνονται κυρίως από αγροτικές καλλιέργειες οι οποίες αρδεύονται ως επί τω πλείστον από τους υδροφορείς της πεδιάδας.

Η περιοχή μελέτης παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον διότι αποτελεί παράδειγμα έντονων γεωμορφολογικών αλλαγών και ανθρωπογενών επεμβάσεων. Η ελάττωση της στερεοπαροχής του ποταμού, λόγω των πολυάριθμων ανθρωπογενών επεμβάσεων, όπως η κατασκευή του φράγματος του Μαραθώνα (1929), η επέκταση του αρδευτικού δικτύου της πεδιάδας, οι εκτεταμένες αμμοληψίες από την κοίτη του ποταμού Οινόη έχουν αλλοιώσει τα φυσιογραφικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της πεδιάδας.

Ο δήμος Μαραθώνα παρουσιάζει πλούσιο φυσικό τοπίο με το 41,5% της έκτασής του να αποτελούν οι δασικές εκτάσεις. Εξαιρετικής σημασίας, τοπικής και υπερτοπικής, αποτελεί το Εθνικό Πάρκο Σχοινιά που βρίσκεται στην πεδιάδα Μαραθώνα και αποτελεί το σημαντικότερο παράκτιο οικοσύστημα της Αττικής με έκταση 13,84 km². Έχει χαρακτηριστεί ως προστατευόμενη περιοχή σύμφωνα με το Νόμο 1650/1986 (άρθρα 18 και 19) ενώ σύμφωνα με το Διάταγμα ΦΕΚ 395/Δ/03.07.2000 έχουν καθοριστεί και περιφερειακές ζώνες προστασίας.

3.2. ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ

Η σημερινή γεωμορφολογική εικόνα της περιοχής είναι το αποτέλεσμα σύνθετων διεργασιών που λάμβαναν και λαμβάνουν χώρα μέσα στη διάρκεια της γεωλογικής περιόδου. Τέτοιες διεργασίες είναι η ενεργός τεκτονική και η συνδυασμένη δράση διάβρωσης και αποσάθρωσης σε συνδυασμό με τη λιθολογία των σχηματισμών. Οι τεκτονικές διεργασίες διαμορφώνουν διαχρονικά την τοπογραφία μιας περιοχής σχηματίζοντας χαρακτηριστικές γεωμορφές. Επομένως μελετώντας τις τεκτονικές γεωμορφές μιας περιοχής, καθίσταται δυνατή η μελέτη των διεργασιών που έχουν λάβει χώρα. Η σύνθετη αυτή δομή αποτυπώνεται και στο υδρογραφικό δίκτυο, που όπως είναι γνωστό διαμορφώνεται ανάλογα από τους παραπάνω παράγοντες.

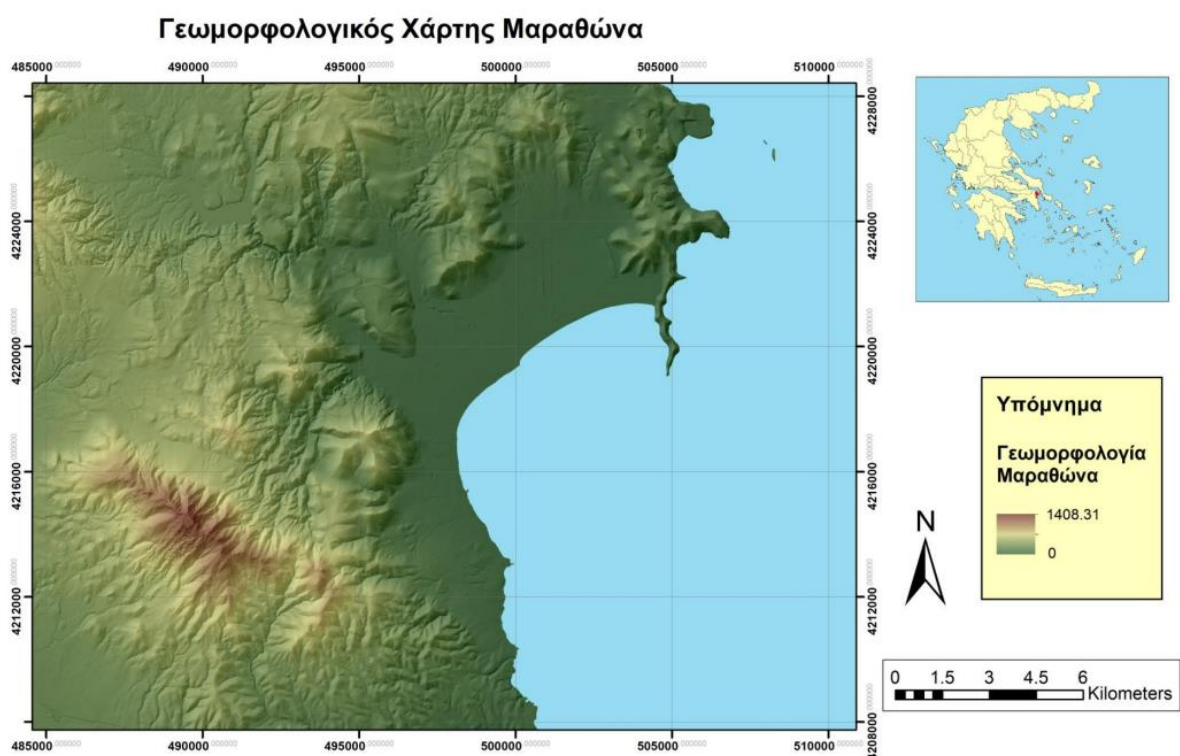
Παράλληλα στη γεωμορφολογική δομή έχουν δράσει καταλυτικά και ανθρωπογενείς διεργασίες και παρεμβάσεις. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η κατασκευή του φράγματος του Μαραθώνα όπως επίσης και η δημιουργία της ομώνυμης τεχνητής λίμνης. Εκτός των ήδη προαναφερθέντων, η γεωμορφολογία της περιοχής έχει επηρεαστεί από την αλλαγή χρήσεων γης, τις επαναλαμβανόμενες πυρκαγιές ανά τα χρόνια όπως και την αύξηση της εδαφικής διάβρωσης.

Κατά τον Σκούντζο (1992), η περιοχή χαρακτηρίζεται ως πεδινή, με κλίση η οποία δεν υπερβαίνει το 4%, ενώ η έκταση του έλους έχει κλίση από 0 έως και 2%. Η πεδιάδα του Μαραθώνα αποτελεί ένα καρστικό-τεκτονικό βύθισμα της λοφώδους ζώνης της Βορειοανατολικής Αττικής. Από την πλευρά της ξηράς οριοθετείται από τη λοφώδη ζώνη της Πεντέλης, ενώ από την πλευρά της θάλασσας από την ακτογραμμή του Όρμου του Μαραθώνα. Πιθανότατα το βύθισμα δημιουργήθηκε κατά το Πλειστόκαινο και με το πέρασμα του χρόνου πληρώθηκε με υλικά, τα οποία προήλθαν από εξωγενείς διεργασίες αποσάθρωσης και διάβρωσης. Τη μορφολογία της περιοχής επηρέασε επίσης η δράση των χειμάρρων Οινόης/Χαράδρου και Κιμπιπούγιου. Ο πρώτος αποστραγγίζει τις Β/ΒΑ υπώρειες της Πάρνηθας, εκφορτίζεται προς την ακτογραμμή του Όρμου του Μαραθώνα και η έκταση της λεκάνης απορροής είναι 58 km² κατάντη της λίμνης του Μαραθώνα. Ο δεύτερος αποστραγγίζει τις ΒΑ υπώρειες της Πεντέλης στη περιοχή της Ραπεντώσας, η λεκάνη απορροής έχει έκταση 30,16 km² και εξέρχεται από τη λοφώδη ζώνη στη περιοχή του Μαραθώνα, δυτικά του Αρχαιολογικού Μουσείου της περιοχής (Μαργώνη, 2006).

Το χερσαίο τμήμα του Μαραθώνα χωρίζεται στις παρακάτω γεωμορφολογικές ενότητες.

- Πεδινό τμήμα πόλης Μαραθώνα
- Πεδινό τμήμα Μαραθώνα
- Πεδινό τμήμα Κάτω Σούλι – Πάτημα
- Περιοχές ελωδών εκτάσεων

Μια απεικόνιση της γεωμορφολογίας της περιοχής παρουσιάζεται στον παρακάτω χάρτη.

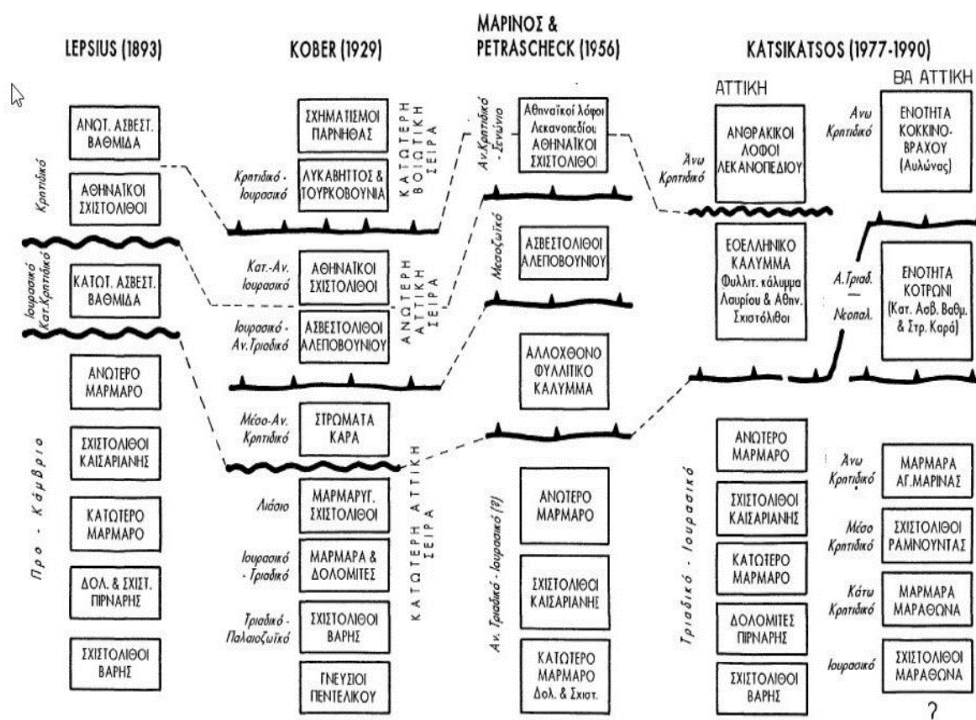


Εικόνα 2 Γεωμορφολογικός Χάρτης Μαραθώνα (Πηγή: Περδικάκη, 2016)

3.3. ΓΕΩΛΟΓΙΑ

Ο Όρμος του Μαραθώνα ανήκει στην Αττικοκυκλαδική μάζα και πιο συγκεκριμένα στα όρια αυτής με τη Πελαγονική (Marinos & Petrascheck, 1956). Έχοντας συλλέξει δεδομένα από πολλούς ερευνητές που έχουν ασχοληθεί με τη δομή της Ανατολικής Αττικής, ο Λόζιος (1993) στη διατριβή του, διατύπωσε σχηματικά τις κύριες απόψεις που αφορούν τη λιθοστρωματογραφική δομή της Αττικής.

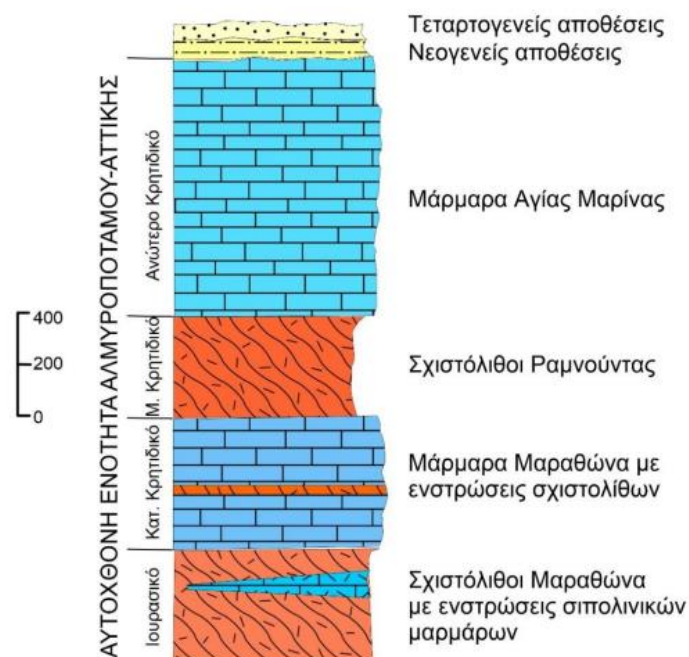
Ο ίδιος χωρίζει στρωματογραφικά τη περιοχή σε δύο μεταμορφωμένες γεωτεκτονικές ενότητες. Συγκεκριμένα, στην Ενότητα «ΒΑ Αττικής», η οποία καταλαμβάνει το μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής και αποτελεί τη σχετικά αυτόχθονη ενότητα, και στην Ενότητα «Αγίου Γεωργίου» που υπέρκειται τεκτονικά της προηγούμενης. Πάνω από τους σχηματισμούς αυτούς βρίσκονται οι αμεταμόρφωτοι σχηματισμοί της Πάρνηθας που αντιπροσωπεύουν τμήμα της Υποπελαγονικής ζώνης η οποία απαρτίζει την Ανατολική Ελλάδα.



Εικόνα 3 Σχηματική απεικόνιση των απόψεων των κυριότερων ερευνητών για τη λιθοστρωματογραφική δομή της Αττικής (Πηγή: Λόζιος, 1993)

Σύμφωνα με τον Κατσικάτσο (1971, 1977), η περιοχή Αττικής – Ν.Ευβοίας χωρίζεται σε δύο ζώνες τύπου «Εσωτερικών Ελληνίδων» λιθοστρωματογραφικά, τη Ζώνη Αττικής και τη Ζώνη Αλμυροποτάμου.

Κατά τον ίδιο (1990), η στρωματογραφία της ΒΑ Αττικής διαμορφώνεται από εναλλαγές μεγάλου πάχους οριζόντων μαρμάρων και σχιστολίθων με ηλικία από το Ιουρασικό έως και το Ανώτερο Κρητιδικό. Αναλυτικότερα, το πρώτο στρώμα που παρουσιάζεται κατά το Ιουρασικό είναι οι σχιστόλιθοι του Μαραθώνα με ενδιάμεσα στρώματα σιπολιτικών μαρμάρων, συνεχίζει ένα στρώμα μαρμάρων Μαραθώνα με ενστρώσεις σχιστολίθων, που χρονολογείται την περίοδο του κατώτερου Κρητιδικού. Ακολουθεί μια στρώση σχιστολίθων Ραμνούντας του μέσου Κρητιδικού, μετά τα μάρμαρα Αγίας Μαρίνας τα οποία καταλήγουν σε Τεταρτογενείς αποθέσεις και Νεογενείς σχηματισμούς στο Ανώτερο Κρητιδικό. Οι σχηματισμοί αυτοί, πλευρικά στην περιοχή της Ευβοίας, εξελίσσονται στους σχηματισμούς του «Αλμυροποτάμου» με ηλικία από το Τριαδικό έως και το Ηώκαινο. Η συγκεκριμένη ενότητα καλείται ως «αυτόχθονη ενότητα Αλμυροποτάμου-Αττικής».



Εικόνα 4 Στρωματογραφική στήλη ΒΑ Αττικής Περιοχή βορειοδυτικού τμήματος του γεωλογικού φύλλου "Ραφήνα", κλίμακας 1:50000 κατά Κατσικάτσο (1991), (Πηγή: Περδικάκη, 2022)

Από την άλλη, ο Παπανικολάου (1984, 1986) χωρίζει την Αττική σε τρεις γεωτεκτονικές ενότητες. Η κατώτερη ενότητα είναι η «Ενότητα Λαυρίου», η οποία

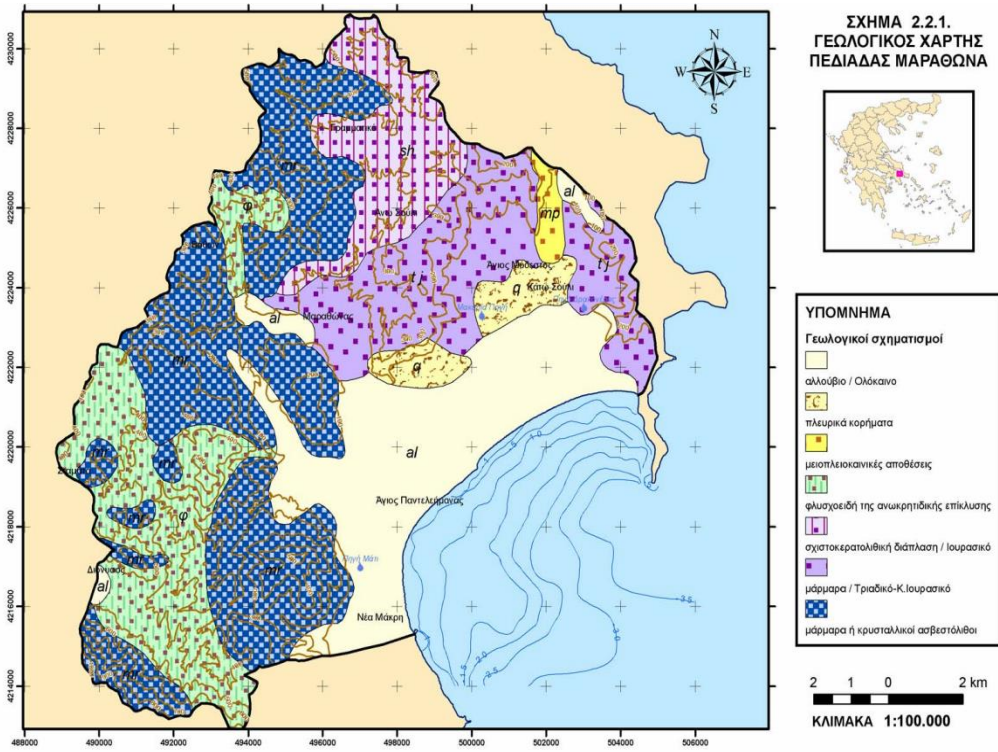
αποτελείται από το φυλλικό κάλυμμα Λαυρίου και του σχηματισμούς του λεκανοπεδίου Αθηνών. Σε αυτή υπέρκειται η «Ενότητα Αττικής» η οποία εντάσσεται στις «Εσωτερικές Ελληνίδες», και τέλος, η ανώτερη ενότητα είναι αυτή του «Ολύμπου – Αλμυροποτάμου – Κερατέας» η οποία εμφανίζεται τόσο στη ΒΑ Αττική, όσο και στην Εύβοια, τον Όλυμπο και τη Σάμο. Και αυτή η ενότητα εντάσσεται στις «Εσωτερικές Ελληνίδες».

Οι Μελισσάρης και Σταυρόπουλος (1999), αναφέρουν τα παρακάτω στρώματα, από κάτω προς τα πάνω, που αφορούν τη στενότερη περιοχή μελέτης.

- Μάρμαρα Πεντέλης: Λευκά, λευκότεφρα, ή κυανού χρώματος μάρμαρα, χονδροκρυσταλλικά, μεσοστρωματώδη έως παχυστρωματώδη και κατά θέσεις δολομιτικά. Αποτελούν τον κατώτερο ορίζοντα των σχηματισμών της ΒΑ Αττικής.
- Σχιστόλιθοι Διονύσου: Πρόκειται για μεταμορφωμένα πετρώματα και εμφανίζονται στη περιοχή της Πεντέλης. Παράδειγμα των πετρωμάτων αυτών είναι οι επιδοτικοί αμφιβολίτες, μοσχοβιτικοί γνεύσιοι και σχιστόλιθοι κ.ά.
- Μάρμαρα Γραμματικού: Τεφρόλευκα, λεπτοστρωματώδη έως μεσοστρωματώδη, αδροκρυσταλλικά μετρίας καρστικότητας, που κατά θέσεις μεταπίπτουν σε σιπολιδικά μάρμαρα και ασβεστιτικούς σχιστολίθους. Είναι ανεπτυγμένα στη δυτική πλαγιά της Πεντέλης, ενώ εμφανίζονται και βορειότερα, στη περιοχή Διονύσου – Γραμματικού.
- Σχιστόλιθοι Μαραθώνα: Πρόκειται για χλωριτικούς και μαρμαρυγιακούς σχιστολίθους με ενστρώσεις μαρμάρων μικρού πάχους που εμφανίζονται στη περιοχή της πόλης του Μαραθώνα.
- Μάρμαρα Μαραθώνα: Αναπτύσσονται στη περιοχή μεταξύ Μαραθώνα και Κάτω Σουλίου. Είναι μικροκρυσταλλικοί σχηματισμοί με φακούς ή/ και λεπτές στρώσεις πυριτολίθων ενώ κατά τόπους εμφανίζονται δολομιτικά μάρμαρα και ενστρώσεις σχιστολίθων.
- Σχιστόλιθοι Ραμνούντας: Πρόκειται για μοσχοβιτικούς, χλωριτικούς, χαλαζιακούς και ανθρακικούς σχιστολίθους, με αραιές ενστρώσεις σιπολιδικών μαρμάρων. Εμφανίζονται μεταξύ των Μαρμάρων Μαραθώνα και Αγίας Μαρίνας και κατά μεγάλο μέρος καλύπτονται από νεογενείς και τεταρτογενείς σχηματισμούς.
- Μάρμαρα Αγίας Μαρίνας: Τεφρά, υπόλευκα και καταθέσεις λευκά μάρμαρα που παρουσιάζονται στη περιοχή της Αγίας Μαρίνας και διακόπτονται από τη θάλασσα του Ευβοϊκού κόλπου. Αποτελούν τα ανώτερα μέρη της σειράς των αυτόχθονων μεταμορφωμένων σχηματισμών.

Οι χαλαροί σχηματισμοί της πεδιάδας του Μαραθώνα αποτελούνται από δύο στρώματα, του Νεογενείς σχηματισμούς και τους Τεταρτογενείς. Οι πρώτοι, αποτελούνται από κλαστικά (κροκαλοπαγή, λατυποπαγή, άργιλοι και άμμοι) και μη κλαστικά ιζήματα

(μαργαίκοι και τραβερτινοειδείς ασβεστόλιθοι), και αποτελούν ποταμολιμναίες, χερσοποτάμιες και λιμναίες αποθέσεις. Οι δε τεταρτογενείς σχηματισμοί αποτελούνται από παράκτιους σχηματισμούς, αλλουβιακές αποθέσεις, πλευρικά κορήματα και χερσαίες αποθέσεις. (Λόζιος, 1993)



Εικόνα 5 Γεωλογικός χάρτης Μαραθώνα (Πηγή: Μαργώνη, 2006)

3.4. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑΣ

3.4.1. ΤΟ ΦΡΑΓΜΑ ΤΟΥ ΜΑΡΑΘΩΝΑ

Εξαιτίας της συνεχούς αύξησης του πληθυσμού της Αττικής, οι υδρευτικές ανάγκες συνεχώς αυξάνονταν. Έτσι, το 1926 ξεκίνησε η κατασκευή του Φράγματος του Μαραθώνα, στοχεύοντας στη κάλυψη των αναγκών αυτών. Ήταν ένα έργο της εταιρίας ULENandCo. USA και η κατασκευή του διήρκησε 3 χρόνια, διαμορφώνοντας τότε τον ταμιευτήρα του Μαραθώνα.

Η λίμνη βρίσκεται στην ΒΑ Αττική σε απόσταση 30 km από την Αθήνα και στα σύνορα των δήμων Μαραθώνα και Ωρωπού. Τα φράγμα κατασκευάστηκε στη συμβολή πολλών ρεμάτων που συγκεντρώνουν τις απορροές της περιβάλλουσας λεκάνης, με κυριότερα το ρέμα Βαρνάβα και τον ποταμό Χάραδρο.

Το φράγμα είναι ένα φράγμα βαρύτητας. Η στατικότητα του εξασφαλίζεται από το βάρος του, ενώ έχει σήμα τόξου για μεγαλύτερη ασφάλεια. Είναι επενδυμένο εξ'ολοκλήρου με πεντελικό μάρμαρο, πράγμα που το καθιστά μοναδικό παγκοσμίως. Κατά την κατασκευή του πρώτα εφαρμόστηκε με την μαρμάρινη επένδυση και κατόπιν γέμισε το εσωτερικό μεταξύ των τοίχων με σκυροκονίαμα. Έχει μέγιστο ύψος τα 54m, μέγιστο πλάτος στη βάση 48m, το πλάτος της στέψης (στο επίπεδο του δρόμου κυκλοφορίας) είναι 4.5m ενώ το μήκος της είναι 285m. Η επιφάνεια του τεχνητού ταμιευτήρα του Μαραθώνα είναι 2.45km στη στάθμη υπερχειλίσης. Η μέγιστη χωρητικότητα του είναι $41 \times 10^6 \text{m}^3$, ενώ ο μέγιστος ωφέλιμος όγκος είναι $34 \times 10^6 \text{m}^3$. Επίσης, η μέση ημερήσια κατανάλωση της Αθήνας είναι 800.000m^3 .

Επιπλέον, προκειμένου να πραγματοποιηθεί η διανομή του νερού στην πρωτεύουσα, κατασκευάστηκε επίσης υδραγωγείο με συνολικό μήκος 21.5km, στο βυθό της λίμνης, που μέσα από την Σήραγγα Μπογιατίου, μεταφέρει το νερό στις Μονάδες Επεξεργασίας Νερού, στο Γαλάτσι και από εκεί στην Πρωτεύουσα. Ωστόσο, λόγω της ραγδαίας αύξησης του πληθυσμού της Αθήνας, το 1959 το σύστημα της λίμνης συνδέθηκε με το υδραγωγείο της φυσικής λίμνης Υλίκης στη Βοιωτία. Από το 1979 όπου κατασκευάστηκε το φράγμα του Μόρνου, ο ταμιευτήρας του Μαραθώνα λειτουργεί ως μια δεξαμενή αποθήκευσης υδάτων τα οποία προέρχονται από την Υλίκη και τον Μόρνο – Εύηνο, με σκοπό τη χρήση του σε περίπτωση ανάγκης.

Ο Δήμος Μαραθώνα βρίσκεται στα κατάντη του φράγματος. Η κατασκευή ενός τέτοιου έργου επηρεάζει τόσο τα επιφανειακά όσο και τα υπόγεια ύδατα σε πολύ μεγαλύτερη έκταση από τη λεκάνη κατάκλυσης του φράγματος. Επίσης, μπορούν να επηρεαστούν τόσο τα πετρώματα, όσο οι χρήσεις γης, οι φυσικοί πόροι και γενικότερα η ανθρώπινη δραστηριότητα της περιοχής. Ανεξαρτήτως του τύπου, του μεγέθους, ή άλλων χαρακτηριστικών του φράγματος, το κύριο αποτέλεσμα είναι η προσωρινή ή και μόνιμη διακοπή της απορροής. Μάλιστα, σε περίπτωση μόνιμης διακοπής υφίσταται και το ζήτημα της αλλαγής του επιπέδου βάσεως, που επηρεάζει το καθεστώς της διάβρωσης στα ανάντη. Εκτός από τα επιφανειακά νερά επηρεάζονται σε μικρό ή μεγαλύτερο βαθμό και τα υπόγεια. Ειδικά σε περιπτώσεις όπου το νερό του φράγματος χρησιμοποιείται για κατανάλωση, υπάρχει ιδιαίτερη διαφοροποίηση των συνθηκών στα κατάντη, αφού η απώλεια νερού είναι δεδομένη (Στουρνάρας, 2007).



Εικόνα 6 Φράγμα Μαραθώνα



Εικόνα 7 Φράγμα Μαραθώνα

3.4.2. ΤΟ ΦΡΑΓΜΑ ΤΗΣ ΡΑΠΕΝΤΩΣΑΣ

Άλλο ένα φράγμα όπου βρίσκεται στη περιοχή είναι αυτό της Ραπεντώσας. Το παρόν φράγμα κατασκευάστηκε για την αντιπλημμυρική προστασία της λεκάνης της Ραπεντώσας από το χείμαρρο Κιμπιπούγιο. Το έργο, που βρίσκεται στη περιοχή του Βρανά, το είχε αναλάβει η Ε.ΥΔ.Α.Π. και ολοκληρώθηκε το 2004.

Σχετικά με τα χαρακτηριστικά του φράγματος, έχει ύψος 39m, μήκος στέψης 145m, όγκο $155.5 \times 10^3 \text{ m}^3$ και η χωρητικότητά του είναι $1.285 \times 10^6 \text{ m}^3$. Το εμβαδόν της λεκάνης απορροής στην οποία βρίσκεται έχει έκταση 24.94 km^2 . Το φράγμα είναι κατασκευασμένο από λιθορριπή με πλάκες στεγανοποίησης ενωμένες με αρμούς στην ανάντη παρειά και μετωπικό υπερχειλιστή πλάτους 20m και ύψους 3m.



Εικόνα 8 Φράγμα Ραπεντώσας

3.4.3. ΤΑΦΡΟΙ ΑΠΟΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ

Εξαιτίας των ελωδών εκτάσεων που εμφανίζονται στη περιοχή του Μαραθώνα (έλος Σχινιά και Μπρεξίζας), η κατασκευή αποστραγγιστικών τάφρων στη περιοχή ήταν απαραίτητη. Ύστερα από ανασκαφές που έλαβαν χώρα στην ευρύτερη περιοχή, εντοπίστηκαν αποστραγγιστικά έργα του έλους της Μπρεξίζας από την εποχή της αρχαιότητας. Ο Ηρώδης ο Αττικός, γνωρίζοντας πως η πεδιάδα του Μαραθώνα ενώνεται με την υπόλοιπη Αττική, κατασκεύασε αποστραγγιστική τάφρο με έξοδο προς τη θάλασσα.

Τα νεότερα χρόνια, ο έλος Μπρεξίζας αποστραγγιζόταν μέσω μίας μεγάλης τάφρου, η οποία οδηγούσε τα νερά της πηγής Μάτι και τα νερά του έλους προς τη θάλασσα. Σήμερα, σε αυτές τις ελώδεις εκτάσεις έχουν κατασκευαστεί τάφροι αποστράγγισης, τα νερά των οποίων οδηγούνται στη θάλασσα.

3.4.4. ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΑ ΥΔΡΟΜΑΣΤΕΥΤΙΚΑ ΕΡΓΑ

Στην ευρύτερη περιοχή του Μαραθώνα, αναπτύσσονται δύο υδροφόρα συστήματα. Το ένα αναπτύσσεται στις προσχωσιγενείς αποθέσεις της πεδιάδας, ενώ στο υπόβαθρό του βρίσκεται ο υπόγειος καρστικός υδροφορέας. Εξαιτίας της πλούσιας αυτής υδροφορίας των δύο συστημάτων, πολλοί κάτοικοι έχουν κατασκευάσει κατακόρυφα πηγάδια και γεωτρήσεις, αποσκοπώντας στην εκμετάλλευσή της. Ωστόσο, η συνεχής και ανεξέλεγκτη άντληση, έχει προκαλέσει σημαντική ελάττωση των αποθεμάτων καθώς και ρύπανση των δύο υδροφορέων. Η νιτρορύπανση, που αποτελεί το βασικό αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα.

3.5. ΜΑΚΑΡΙΑ ΠΗΓΗ

Η Μακαρία Πηγή αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι του οικοσυστήματος του Πάρκου του Σχινιά και της ευρύτερης περιοχής του Μαραθώνα. Πρόκειται για καρστική πηγή, και εκδηλώνεται στην επαφή των μαρμαρών του Μαραθώνα με τις σύγχρονες αργιλοαμμώδεις αποθέσεις της ελώδους περιοχής του Σχινιά, ενώ αναβλύζει στα 2.5 m στη περιοχή του Κάτω Σουλίου.

Στο παρελθόν, το νερό αυτής της πηγής τροφοδοτούσε το έλος του Πάρκου Σχινιά. Σήμερα, μέρος των εκφορτίσεων κατεισδύει στον αλλουβιακό υδροφορέα της περιοχής. Ύστερα από την κατασκευή του κωπηλατοδρομίου το 2004, το μεγαλύτερο ποσοστό του νερού που προέρχεται από τη πηγή, διοχετεύεται μέσω καναλιού στις Ολυμπιακές Εγκαταστάσεις του Σχινιά. Την περίοδο 1974-1982, στο χώρο της Μακαρίας είχε κατασκευαστεί αντλιοστάσιο από την ΕΥΔΑΠ. Έτσι, το νερό από την πηγή χρησιμοποιούνταν για την ενίσχυση της ύδρευσης της Αθήνας. Αυτό το αντλιοστάσιο υπάρχει ακόμα στο χώρο της Μακαρίας, ωστόσο έχει εγκαταλειφθεί.

3.6. ΟΛΥΜΠΙΑΚΟ ΚΩΠΗΛΑΤΟΔΡΟΜΙΟ ΣΧΙΝΙΑ

Κατασκευάστηκε με σκοπό να φιλοξενήσει το άθλημα της κωπηλασίας στους Ολυμπιακούς Αγώνες που έλαβαν χώρα το 2004 στην Αθήνα. Απαρτίζεται από δύο αγωνιστικούς χώρους, τον κύριο αγωνιστικό στίβο κωπηλασίας και τον δευτερεύων στίβο προθέρμανσης και προπόνησης.

Λόγω της μεγάλης έκτασής του, το κωπηλατοδρόμιο αποτελεί μια μεγάλης κλίμακας υδραυλική παρέμβαση στο φυσικό περιβάλλον του Εθνικού Πάρκου Σχινιά. Για να ανταποκριθεί το έργο στους στόχους κατασκευής του, χρειάστηκε η συντήρηση και η αποκατάσταση του υγροτόπου, προκειμένου να εναρμονιστεί με το περιβάλλον. Έτσι, εκτελέστηκαν τα ακόλουθα έργα.

- Διώρυγα Προσαγωγής: Τροφοδοτεί με νερό, που προέρχεται από τη Μακαρία Πηγή, τους στίβους του κωπηλατοδρομίου. Με τη κατασκευή του επιτυγχάνεται η διατήρηση σταθερής στάθμης ώστε να μην υποβαθμιστούν η χλωρίδα και πανίδα της περιοχής. Επιπλέον, αποτρέπονται οι έντονες μεταβολές της στάθμης της κύριας αποστραγγιστικής τάφρου. Τέλος, παρέχεται η δυνατότητα προσαγωγής του νερού με ταχύτητες τέτοιες ώστε η δημιουργία επενδυμένης τάφρου να μη θεωρείται αναγκαία.
- Εκτροπή της κύριας αποστραγγιστικής τάφρου της Μακαρίας Πηγής: Αποσκοπεί στη διατήρηση του υπάρχοντος καθεστώτος ροής.
- Σύστημα Υπερχείλισης: Επιδιώκει την επαναφορά του υγροτόπου στην κατάσταση που ήταν πριν το 1923.

3.7. ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ

Η υπόγεια υδροφορία της περιοχής μελέτης συσχετίζεται άμεσα με το είδος των γεωλογικών σχηματισμών και τα τεκτονικά χαρακτηριστικά αυτών. Η περιοχή ενδιαφέροντος παρουσιάζει δύο διαφορετικούς τύπους υδροφορίας, την καρστική και την προσχωματική. Η κίνηση των υπόγειων υδάτων σε ανθρακικούς σχηματισμούς, πραγματοποιείται μέσω καρστικών αγωγών και ρωγμών. Ελέγχεται από παρεμβολές σχιστολίθων, που εμφανίζονται σε όλη την έκταση της ανθρακικής μάζας, και έτσι δημιουργούνται απομονωμένες ανθρακικές ενότητες. Παράλληλα, σε σύγχρονες αποθέσεις, το υπόγειο νερό κυκλοφορεί μέσω του πορώδους των κόκκων, όταν βέβαια το επιτρέπει η στρωματογραφική δομή. Τόσο οι σχιστόλιθοι, όσο και οι νεογενείς μαργαϊκές αποθέσεις αποτελούν παράκτιους αδιαπέρατους σχηματισμούς (Παπαζώτος, 2015). Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που συναντώνται στην περιοχή του Μαραθώνα διακρίνονται σε υδροπερατούς και σε αδιαπέρατους. Οι αδιαπέρατοι σχηματισμοί της περιοχής είναι οι σχιστόλιθοι και τα στρώματα αργίλων και αργιλοπηλών. Όσον αφορά τους υδροπερατούς σχηματισμούς, σε αυτούς κατατάσσονται τα μάρμαρα και οι προσχωσιγενείς αποθέσεις της παράκτιας πεδιάδας και συναντώνται δύο υδροφόρα συστήματα, το καρστικό και το προσχωματικό.

3.7.1. ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΥΔΡΟΦΟΡΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

Το παρόν καρστικό υδροφόρο σύστημα παρουσιάζει υψηλή υδροπερατότητα και διαμορφώνεται στα ανθρακικά πετρώματα της ΒΑ Αττικής, με έκταση 81km². Οι σχηματισμοί των Μαρμάρων Μαραθώνα, Αγίας Μαρίνας και Γραμματικού έχουν υψηλή υδροπερατότητα, κυρίως λόγω της έντονης καρστικοποίησης που έχουν υποστεί, και του κατακερματισμού των πετρωμάτων από ένα πυκνό δίκτυο ρωγμών και διακλάσεων.

3.7.1.1. Καρστικό σύστημα Μαρμάρων Μαραθώνα

Ο ορεινός όγκος που διαχωρίζει τη πεδινή περιοχή από τους λοφώδεις σχηματισμούς στα βορειοδυτικά του δήμου, είναι τα Μάρμαρα Μαραθώνα. Αυτός ο σχηματισμός εκτείνεται μέχρι την Περιοχή λιμνιών του Ευβοϊκού κόλπου και έχει διεύθυνση Β-Ν. Παρουσιάζει έντονο τεκτονισμό ο οποίος εκδηλώνεται με ρήγματα διεύθυνσης Α-Δ και Β-Ν. Το καρστικό αυτό σύστημα περιβάλλεται από υδατοστεγανούς και ημιπερατούς σχηματισμούς ενώ βόρεια συνορεύει με τη θάλασσα (Περδικάκη, 2016).

Το εν λόγω σύστημα εκφορτίζεται φυσικά στη θάλασσα αλλά και υπογείως τροφοδοτώντας τον κοκκώδη σχηματισμό της πεδιάδας. Ταυτόχρονα, εκφορτίζεται τεχνητά μέσω πληθώρας γεωτρήσεων που έχουν διανοιχτεί στη περιοχή, οι οποίες χρησιμοποιούνται κυρίως για την άρδευση των γεωργικών εκτάσεων της περιοχής. Τέλος, όσον αφορά τη ποιότητά του, χαρακτηρίζεται ως υφάλμυρο.

3.7.1.2. Καρστικό σύστημα Μαρμάρων Γραμματικού

Το καρστικό υδροφόρο σύστημα των Μαρμάρων Γραμματικού βρίσκεται δυτικά της περιοχής μελέτης. Είναι ένας επίσης έντονα καρστικοποιημένος σχηματισμός με έντονο τεκτονισμό, ο οποίος εκδηλώνεται με ρήγματα διεύθυνσης ΝΑ-ΒΔ, Α-Δ και ΝΔ-ΒΑ. Το εν λόγω σύστημα εκφορτίζεται μέσω των καρστικών πηγών της Οινόης (Περδικάκη, 2016).

3.7.1.3. Καρστικό σύστημα Μαρμάρων Αγίας Μαρίνας

Αυτός ο σχηματισμός αναπτύσσεται στο ΒΑ άκρο της πεδιάδας του Μαραθώνα. Αποτελεί επίσης άλλον ένα έντονα καρστικοποιημένο σχηματισμό με έντονο τεκτονισμό σε όλη του την έκταση με παράλληλα ρήγματα διεύθυνσης ΝΑ-ΒΔ. Η βόρεια και ανατολική του πλευρά είναι σε επαφή με τη θάλασσα του Ευβοϊκού και του Όρμου Μαραθώνα. Όσον αφορά τη δυτική του πλευρά, βρίσκεται σε επαφή με ημιπερατούς νεογενείς και τεταρτογενείς σχηματισμούς της πεδιάδας.

Καθώς στο παρόν καρστικό σύστημα ο υδροφόρος βρίσκεται σε άμεση επικοινωνία με τη θάλασσα, παρατηρείται ότι είναι ιδιαίτερα υφάλμυρο. Επιπλέον, το υπόγειο νερό του καρστ εκφορτίζεται απευθείας στη θάλασσα προς την ανατολική πλευρά, ενώ προς τα δυτικά εκφορτίζεται στην επαφή των μαρμάρων με τις αποθέσεις του υγροτόπου στο Σχοινιά με μικρές υφάλμυρες πηγές. Το νερό των πηγών διαχέεται στο άκρο του έλους και στη συνέχεια απορρέει στη θάλασσα μέσω αποστραγγιστικών τάφρων (Περδικάκη, 2016).

3.7.2. ΚΟΚΚΩΔΕΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟ ΣΥΣΤΗΜΑ (ΑΛΛΟΥΒΙΑΚΟ)

Το παράκτιο κοκκώδες υδροφόρο σύστημα του Μαραθώνα, αναπτύσσεται σε σχηματισμούς νεογενών και τεταρτογενών αποθέσεων. Οι σχηματισμοί αυτοί χαρακτηρίζονται λιθολογικά ως ανομοιόμορφοι και παρουσιάζουν συνεχείς στρωματογραφικές εναλλαγές από αργίλους, μάργες, κροκαλοπαγή και ψαμμίτες. Υδρογεωλογικά, ένας κοκκώδης σχηματισμός εξαρτάται από το βάθος και το πάχος του, τη στρωματογραφική διάταξη και τη λιθολογική σύσταση. Το φρεάτιο υδροφόρο

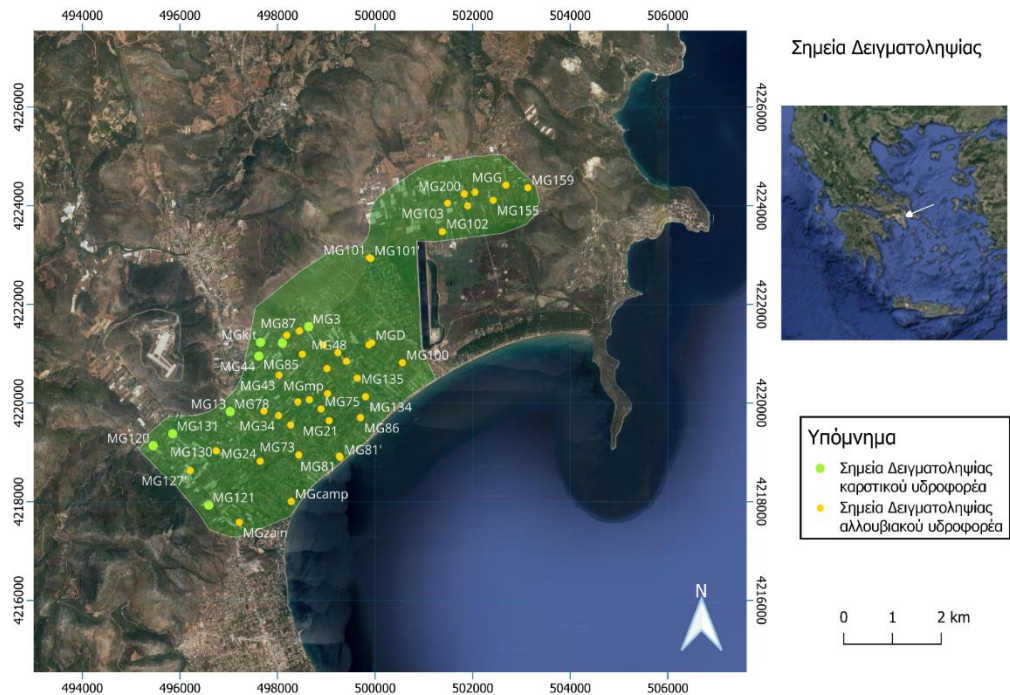
σύστημα που διαμορφώνεται επιτρέπει στον υδροφορέα που αναπτύσσεται να αξιοποιηθεί, ενώ όταν συναντώνται υλικά με υψηλή περιεκτικότητα σε άργιλο, οι περιοχές κρίνονται ως χαμηλής υδροφορίας.

Πραγματοποιείται άμεση τροφοδοσία του υδροφόρου, μέσω της κατείσδυσης των κατακρημνισμάτων, της διήθησης των υδατορευμάτων και των τάφρων, καθώς και μέσω πλευρικών μεταγγίσεων του καρστικού νερού των μαρμάρων. Η εκφόρτιση του υδροφόρου γίνεται μετωπικά προς τη θάλασσα και μέσω πληθώρας γεωτρήσεων και πηγαδιών που έχουν κατασκευαστεί στη περιοχή.

Εξαιτίας της θαλάσσιας διείσδυσης, και λόγω συστηματικής χρήσης αζωτούχων λιπασμάτων κατά τις γεωργικές δραστηριότητες, η ποιότητα του υδροφορέα επιβαρύνεται. Για το λόγο αυτό, κρίθηκε απαραίτητη η πραγματοποίηση έρευνας πεδίου, ώστε να διερευνηθούν περεταίρω οι συνθήκες του παρόντος αλλουβιακού υδροφορέα. Συγκεκριμένα έγινε απογραφή και υδροχημική ανάλυση του νερού το οποίο προέρχεται τόσο από γεωτρήσεις όσο και από πηγάδια σε όλη την έκταση της πεδιάδας του Μαραθώνα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΕΡΕΥΝΑ ΠΕΔΙΟΥ

Για την παρακολούθηση της υφιστάμενης κατάστασης του υδροφόρου, συλλέχθηκαν δείγματα νερού από πηγάδια και γεωτρήσεις που επιλέχθηκαν βάσει της τοποθεσίας τους και της προσβασιμότητάς τους. Στον χάρτη του παρακάτω σχήματος απεικονίζονται τα σημεία δειγματοληψίας.



Εικόνα 9 Σημεία Δειγματοληψίας

4.1. ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Η δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε κατά την αρχή της ξηρής περιόδου (Μάιος 2023), με τη βοήθεια του δειγματολήπτη της εικόνας, και τα δείγματα αποθηκεύτηκαν σε αποστειρωμένα μπουκάλια πολυαιθυλενίου. Ο συνολικός αριθμός δειγμάτων είναι 38, εκ των οποίων 30 ανήκουν στον αλλουβιακό υδροφορέα του Μαραθώνα, και 8 στον καρστικό. Σημειώνεται ότι πραγματοποιήθηκε επίσκεψη σε συνολικά 50 γεωτρήσεις/πηγάδια, ωστόσο στα 12 ήταν δυνατή μόνο η μέτρηση του βάθους τους, και όχι η συλλογή δείγματος. Ύστερα από κάθε συλλογή δείγματος πραγματοποιούνταν επί τόπου μέτρηση ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας (SEC), pH και θερμοκρασίας (T) με ειδικό φορητό εξοπλισμό. Στα δείγματα προστέθηκε μικρή ποσότητα πυκνού νιτρικού οξέος αποσκοπώντας στην συντήρησή τους. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

ID	EC ($\mu\text{S}/\text{sec}$)	T (°C)	pH
ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΑΛΛΟΥΒΙΑΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ			
MG013	2740		6.65
MG024	4050	19.1	6.45
MG034	1990	19.4	6.55
MG035	2060		6.4
MG041	2160	20.7	6.3
MG043	2880		6.35
MG043'	2270	19.8	6.6
MG048	3480		6.3
MG073	3750	18.5	6.7
MG077	2490	19	6.45
MG081	556	20.8	6.8
MG081'	645	18.2	6.6
MG086	3430	18.7	6.4
MG101'	3590	19.5	6.5
MG102	1864	18	6.7
MG103	2160	19.5	6.4
MG127'	2490		6.5
MG130	2790	18.6	6.3
MG135	6430	20.8	6.25
MG136	3060	21.7	6.35

ID	EC ($\mu\text{S}/\text{sec}$)	T (°C)	pH
ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΑΛΛΟΥΒΙΑΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ			
MG151	4250	19.2	6.45
MG153	2780	20.7	6.45
MG155	4140	19.8	6.45
MG159	4020	18	7.1
MG200	2910	19.2	6.5
MGcamp	3560	18	6.35
MGktima	1943	20.8	6.3
MGmp	4930	19.4	6.4
MGon	3580	25.2	6.35
MGzain	1762	19.9	6.3

ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΚΑΡΣΤΙΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ			
MG003	1640	20.8	6.3
MG044	1200	18.5	6.55
MG078	1957		6.35
MG084	2370	19.7	6.4
MG120	1669	17.9	6.4
MG121	1755		6.35
MG131	2360	18.8	6.45
MGkit	2300	18.5	6.55

Πίνακας 1 Επιτόπου μετρήσεις δειγμάτων

4.2. ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ (SPECIFIC ELECTRICAL CONDUCTIVITY, SEC)

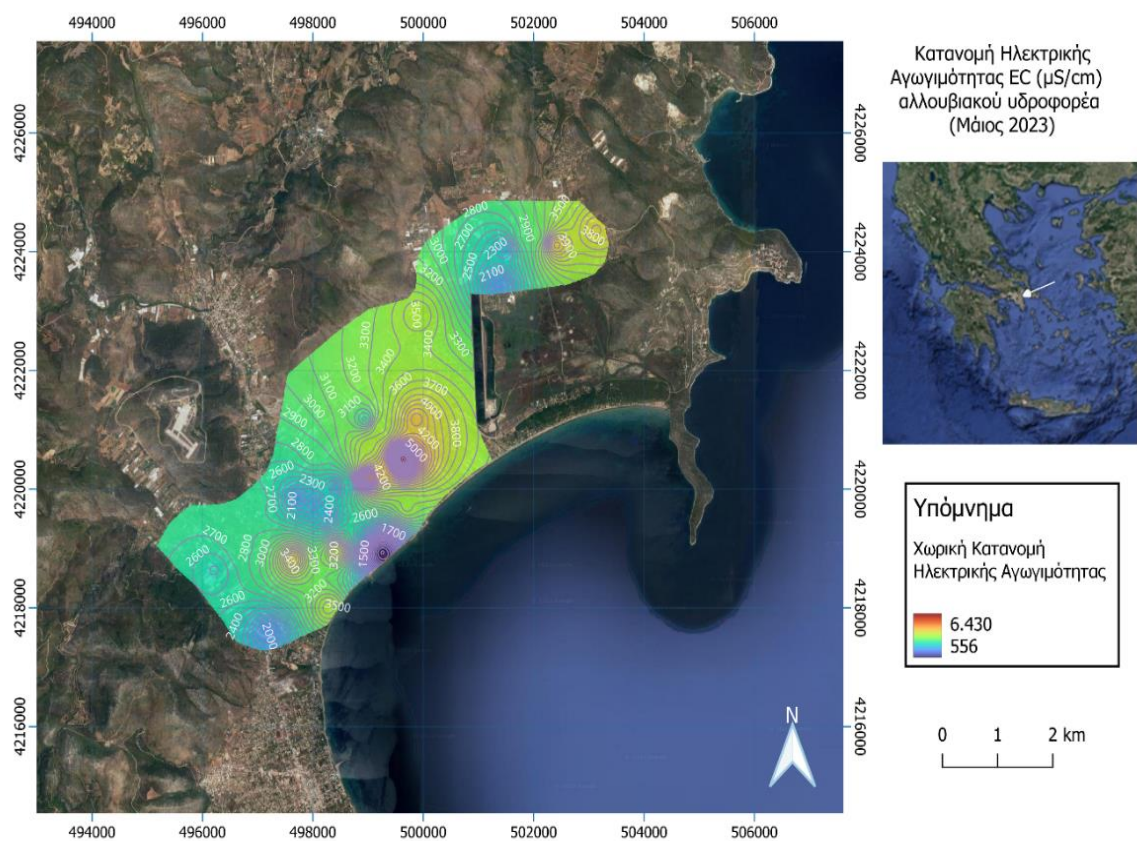
Η Ειδική Ηλεκτρική Αγωγιμότητα (SEC) δηλώνει την ευκολία διέλευσης των ηλεκτρικά φορισμένων σωματιδίων από τη μάζα του νερού. Η μέτρησή κρίνεται απαραίτητη αφού της αποτελεί μια ασφαλή πρώτη ένδειξη της ποιότητας και της χημικής κατάστασης του νερού. Πραγματοποιείται επί τόπου στο πεδίο με τη χρήση αγωγιμομέτρου. Ως ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα ορίζεται η αγωγιμότητα 1cm^3 στους 25°C και μετριέται σε $\mu\text{S}/\text{cm}$. Το γλυκό νερό έχει ηλεκτρική αγωγιμότητα $100\text{-}1000\ \mu\text{S}/\text{cm}$ ενώ όταν η τιμή της ξεπερνά τα $1500\ \mu\text{S}/\text{cm}$ είναι ένδειξη ότι ο υπόγειος υδροφορέας έχει υποστεί κάποια μορφή ρύπανσης.

Ο πίνακας που ακολουθεί περιέχει τα αποτελέσματα των επί τόπου μετρήσεων, σχετικά με την ηλεκτρική αγωγιμότητα των δειγμάτων νερού που ελήφθησαν από τον αλλουβιακό υδροφορέα, τον Μάιο 2023.

ID	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
ΕΛΑΧΙΣΤΟ	556
ΜΕΓΙΣΤΟ	6430
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	2958.67
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	1209.63

Πίνακας 2 Ηλεκτρική Αγωγιμότητα αλλουβιακού υδροφορέα Μαραθώνα Μάιος 2023

Από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν και παρουσιάζονται στον παραπάνω πίνακα, παρατηρείται ότι η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα του υπόγειου νερού στην πλειοψηφία των δειγμάτων είναι ιδιαίτερα αυξημένη. Στον παρακάτω χάρτη αποτυπώνεται η κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας ($\mu\text{S}/\text{cm}$) στη περιοχή μελέτης.



Εικόνα 10 Κατανομή Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας στον αλλουβιακό υδροφορέα του Μαραθώνα

ID	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
ΕΛΑΧΙΣΤΟ	1200
ΜΕΓΙΣΤΟ	2370
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	1906.38
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	418.74

Πίνακας 3 Ηλεκτρική Αγωγιμότητα καρστικού υδροφορέα Μαραθώνα Μάιος 2023

4.3. ΕΝΕΡΓΟΣ ΟΞΥΤΗΤΑ (pH)

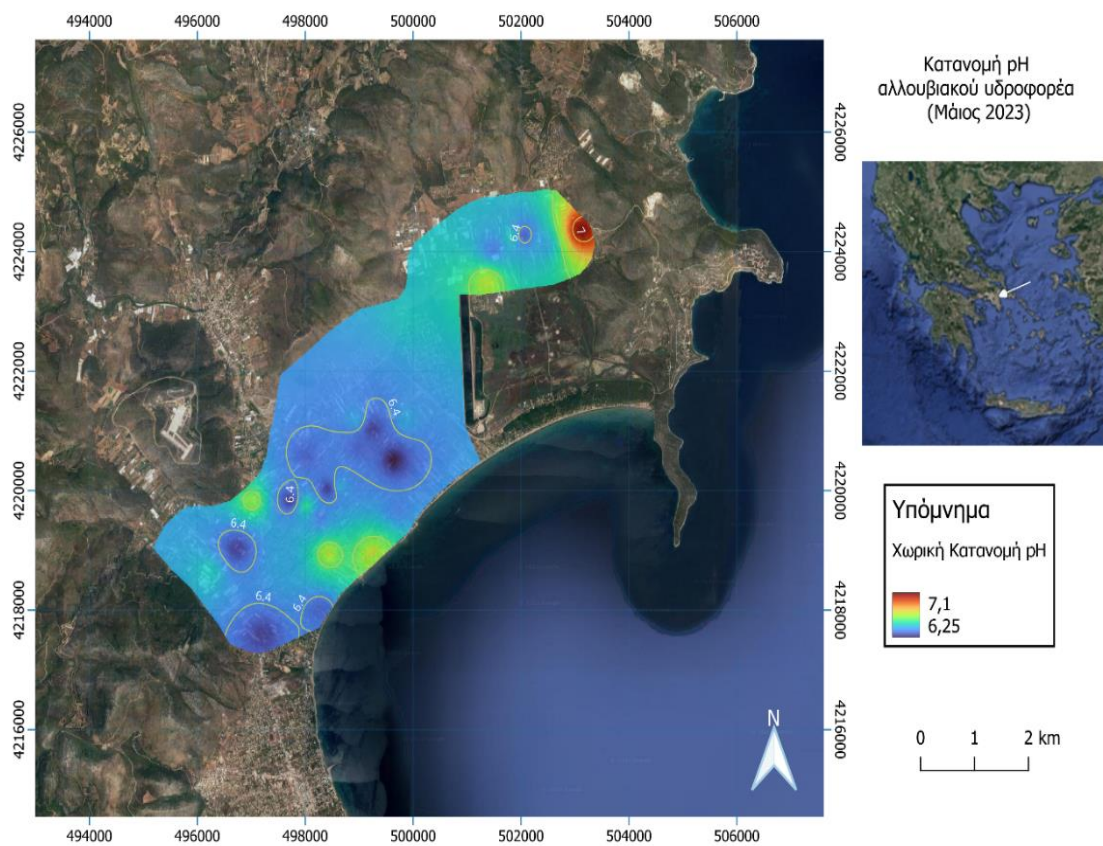
Η ενεργός οξύτητα είναι η συγκέντρωση των ιόντων H_3O^+ που περιέχεται στο διάλυμα και εκφράζεται με το pH. Το pH του υπόγειου νερού καθορίζεται από τις διάφορες χημικές αντιδράσεις και ισορροπίες μεταξύ των διαλυμένων ιόντων μέσα σε αυτό. Επίσης αποτελεί σημαντικό παράγοντα αποσάθρωσης του υπεδάφους. Κατά τον Βουδούρη (2009), όσο πιο όξινο είναι ένα υδατικό περιβάλλον, τόσο περισσότερο ευνοεί την αφαίρεση Fe και Al από τα μητρικά πετρώματα καθώς και τη δημιουργία SiO_2 .

Γενικότερα, το pH των νερών μειώνεται όσο η υδάτινη μάζα ενηλικιώνεται. Μια νέα υδάτινη μάζα είναι συνήθως αλκαλική ($pH > 7$) και σιγά-σιγά με τον χρόνο γίνεται όξινη ($pH < 7$). Αυτό οφείλεται κυρίως στη συγκέντρωση οργανικού υλικού, που ελκύει CO_2 όταν αποσυντίθεται.

Σύμφωνα με τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας, τα αποτελέσματα των οποίων είναι καταγεγραμμένα στο πίνακα, σχεδιάστηκε ο παρακάτω χάρτης.

ID	pH
ΕΛΑΧΙΣΤΟ	6.25
ΜΕΓΙΣΤΟ	7.10
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	6.47
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	0.18

Πίνακας 4 pH αλλουβιακού υδροφορέα Μαραθώνα Μάιος 2023



Εικόνα 11 Κατανομή pH τον αλλουβιακό υδροφορέα του Μαραθώνα

ID	pH
ΕΛΑΧΙΣΤΟ	6.30
ΜΕΓΙΣΤΟ	6.55
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	6.42
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	0.09

Πίνακας 5 pH καρστικού υδροφορέα Μαραθώνα Μάιος 2023

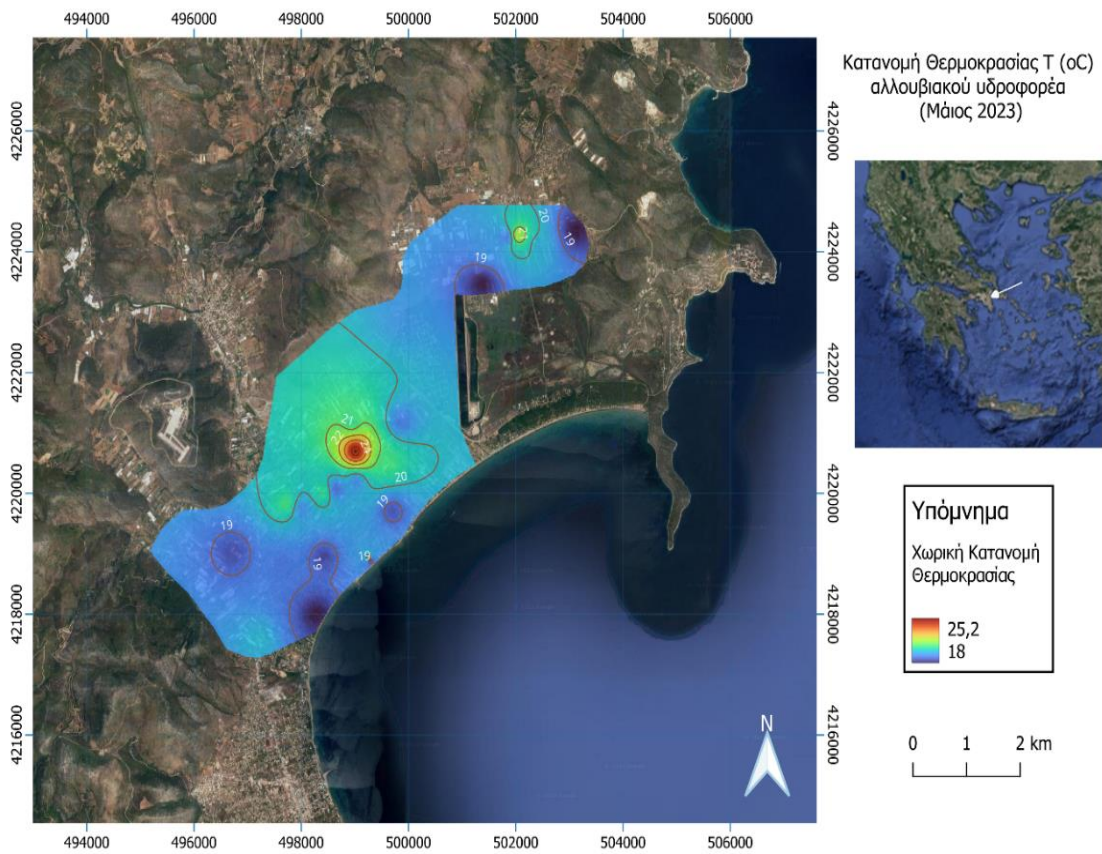
4.4. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (TEMPERATURE, T)

Σύμφωνα με τον Βουδούρη (2009), η θερμοκρασία των υπόγειων υδάτων είναι άμεσα εξαρτώμενη της θερμοκρασίας των πετρωμάτων όπου τα φιλοξενούν. Επίσης, αλλάζει σύμφωνα με τις διακυμάνσεις του υδραυλικού φορτίου. Κατά κύριο λόγο, η θερμοκρασία παραμένει σταθερή στα υπόγεια νερά, ενώ στα επιφανειακά μεταβάλλεται ανάλογα με την ηλιακή ακτινοβολία που απορροφούν. Έχει παρατηρηθεί πως σε βαθύτερα σημεία του υδροφόρου συναντώνται υψηλότερες θερμοκρασίες απ' ότι στα λιγότερο βαθιά.

Ύστερα από μετρήσεις που έγιναν επί τόπου στα δείγματα που ελήφθησαν, η ελάχιστη θερμοκρασία που καταγράφηκε ήταν 17.9°C ενώ η μέγιστη ήταν 21.7°C. Ο παρακάτω χάρτης αποτυπώνει την κατανομή της θερμοκρασίας στη λεκάνη του Μαραθώνα.

ID	T (°C)
ΕΛΑΧΙΣΤΟ	18.00
ΜΕΓΙΣΤΟ	25.20
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	19.70
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	1.53

Πίνακας 6 Θερμοκρασία αλλουβιακού υδροφόρου Μαραθώνα Μάιος 2023



Εικόνα 12 Κατανόμη θερμοκρασίας στον αλλουβιακό υδροφορέα του Μαραθώνα

ID	T (°C)
ΕΛΑΧΙΣΤΟ	17.90
ΜΕΓΙΣΤΟ	20.80
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	19.03
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	1.05

Πίνακας 7 Θερμοκρασία καρστικού υδροφορέα Μαραθώνα Μάιος 2023

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΥΔΡΟΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Το βασικότερο εργαλείο ελέγχου της ποιότητας των υδάτων είναι οι χημικές αναλύσεις. Η χημική σύσταση των υπόγειων νερών εξαρτάται άμεσα από την σύσταση των πετρωμάτων μέσω των οποίων διακινείται στο υπέδαφος.

Στη συνέχεια της έρευνας, τα δείγματα που συλλέχθηκαν, μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π., όπου αναλύθηκαν χημικά ως προς τα βασικά ιόντα.

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι ακόλουθες:

- Για τον προσδιορισμό των νιτρικών και θειικών ιόντων χρησιμοποιήθηκε το φασματοφωτόμετρο DR 2010 της εταιρείας HACH, με δείγμα 25ml και αντιδραστήρια NitraVer 5 και SulfaVer 4 αντίστοιχα.
- Τα ιόντα χλωρίου προσδιορίστηκαν με τιτλοδότηση, σε δείγμα 100ml, με δείκτη Diphenylcarbazone reagent Powder Pillows, και χορήγηση Mercuric Nitrate Titration Cartidge 2,256N με ένεση.
- Τα όξινα ανθρακικά προσδιορίστηκαν επίσης με τιτλοδότηση, σε δείγμα 100ml, με δείκτη Bromcresol Green – Methyl Red Indicator, και χορήγηση Sulfaric Acid Titration Cartidge 1,6N με ένεση.
- Για τον προσδιορισμό των ιόντων ασβεστίου, πραγματοποιήθηκε τιτλοδότηση, σε δείγμα 100ml, χρησιμοποιώντας 2ml Potassium Hydroxide Solution (KOH) 8N, δείκτη CalVer 2, και τιτλοδότη EDTA 0,8M.
- Τα ιόντα μαγνησίου προσδιορίστηκαν με τιτλοδότηση, σε δείγμα 100ml, χρησιμοποιώντας 2ml Buffer Solution, δείκτη ManVer 2, και τιτλοδότη EDTA 0,8m.
- Τέλος, τόσο τα ιόντα νατρίου όσο τα ιόντα καλίου προσδιορίστηκαν με τη βοήθεια του φλωγοφωτόμετρου Digital Flame Analyser της εταιρείας BWB.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν, αποτυπώνονται στους παρακάτω πίνακες.

ID	NO ₃ (mg/l)	NO ₂ (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	HCO ₃ (mg/l)	Cl (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)
MG003	30	6.8	54	344.04	244	120.14	29.16	106.8	2.8
MG044	17.5	3.9	30	331.84	256	122.15	9.72	73	3
MG078	28	4.1	82	353.8	440	164.20	12.15	150	4.5
MG084	23.6	5.3	134	346.48	496	198.24	25.52	169.5	4
MG120	76.4	17.3	118	307.44	224	214.26	9.72	62.4	2.6
MG121	52.4	11.8	112	297.68	324	220.26	29.16	91.2	2
MG131	122.2	27.6	136	222.04	404	274.33	37.67	101.5	1
MGkit	14.3	3.2	78	305	596	162.19	23.09	192	5

Πίνακας 8 Αποτελέσματα χημικών αναλύσεων καρστικού υδροφορέα

ID	NO ₃ (mg/l)	N (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	HCO ₃ (mg/l)	Cl (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)
MG013	62.5	14.1	144	287.92	568	214.26	18.23	214	3
MG024	99	22.4	284	422.12	896	360.43	52.25	332	6
MG034	28.1	6.4	112	366	372	166.20	25.52	151	4
MG035	31.6	7.1	110	378.2	436	200.24	10.94	149	3.5
MG041	34.4	7.8	117	453.84	368	172.21	27.95	157.5	4
MG043	62.8	14.2	168	348.92	628	256.31	13.37	225	5
MG043'	15.9	3.6	122	324.52	504	158.19	23.09	204	6
MG048	77.8	17.7	132	339.16	748	270.32	40.10	273	7
MG073	46	10.4	120	400.16	812	290.35	17.01	280	6
MG077	44.9	10.1	88	387.96	560	198.24	43.74	194	4
MG081	6.8	1.5	57	197.64	140	72.09	15.80	26.8	1.7
MG081'	2.5	0.6	45	178.12	128	58.07	15.80	29	0.4
MG086	77.8	17.6	96	283.04	784	294.35	49.82	234	4
MG101'	12.4	2.8	124	370.88	920	148.18	61.97	332	10
MG102	79	17.9	136	307.44	312	248.30	4.86	106	2
MG103	95.7	21.6	150	326.96	384	218.26	20.66	108.4	2
MG127'	305.4	69	272	287.92	224	358.43	27.95	52	1.6
MG130	118.5	26.8	142	258.64	552	296.36	7.29	125.6	4
MG135	123.6	27.9	380	356.24	1548	652.78	46.17	430	4
MG136	121.1	27.3	236	285.48	664	292.35	74.12	135	9
MG151	41.2	9.3	200	358.68	884	312.37	82.62	318	8
MG153	75.7	17.1	76	334.28	436	216.26	29.16	217	6
MG155	97.3	22	288	339.16	1020	362.43	64.40	272	6
MG159	37.5	8.5	276	265.96	1048	194.23	120.29	313	3
MG200	259.6	58.6	240	217.16	544	388.47	25.52	92	17

MGcam ρ	73.9	16.7	152	336.72	676	242.29	47.39	273	6
MGktim α	31.5	7.1	104	341.6	564	166.20	23.09	138.5	4
MGmp	151	34	210	366	1108	448.54	58.32	342	4
MGon	62	14	176	346.48	756	336.40	29.16	265	3
MGzain	138	31.2	36	312.32	192	202.24	25.52	74.4	3.4

Πίνακας 9 Αποτελέσματα χημικών αναλύσεων αλλουβιακού υδροφορέα

5.1. ΝΙΤΡΙΚΑ ΙΟΝΤΑ (NO₃⁻)

5.1.1. ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Οι ενώσεις του αζώτου εμφανίζονται πολύ συχνά στη φύση, αφού προέρχονται από τη φυσική αποσύνθεση οργανικών αζωτούχων ενώσεων φυτικής ή ζωικής πρωτεΐνης. Εκτός αυτού, τα λιπάσματα και τα ζωικά περιττώματα αποτελούν επίσης πηγές νιτρικών ιόντων. Επίσης, ειδικά τα υπόγεια ύδατα, παρουσιάζουν ήδη μεγαλύτερη κινητικότητα νιτρικών.

Οι συνήθεις συγκεντρώσεις τους στα φυσικά υπόγεια ύδατα είναι μικρότερες των 10 mg/l. Ωστόσο, παρατηρείται ότι στα δείγματα που ελήφθησαν τον Μάιο του 2023, οι συγκεντρώσεις των νιτρικών ιόντων είναι ιδιαίτερα υψηλές. Η μέση τιμή των συγκεντρώσεων των δειγμάτων του αλλουβιακού υδροφορέα είναι 80.45 mg/l, πράγμα που εκδηλώνει ότι πάνω από το 50% των δειγμάτων είχαν τιμή μεγαλύτερη των 50 mg/l που είναι με το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο από τη βιβλιογραφία. Παράλληλα, η μέση τιμή της συγκέντρωσης των νιτρικών του καρστικού υδροφορέα της ίδιας περιοχής είναι 45.55 mg/l.

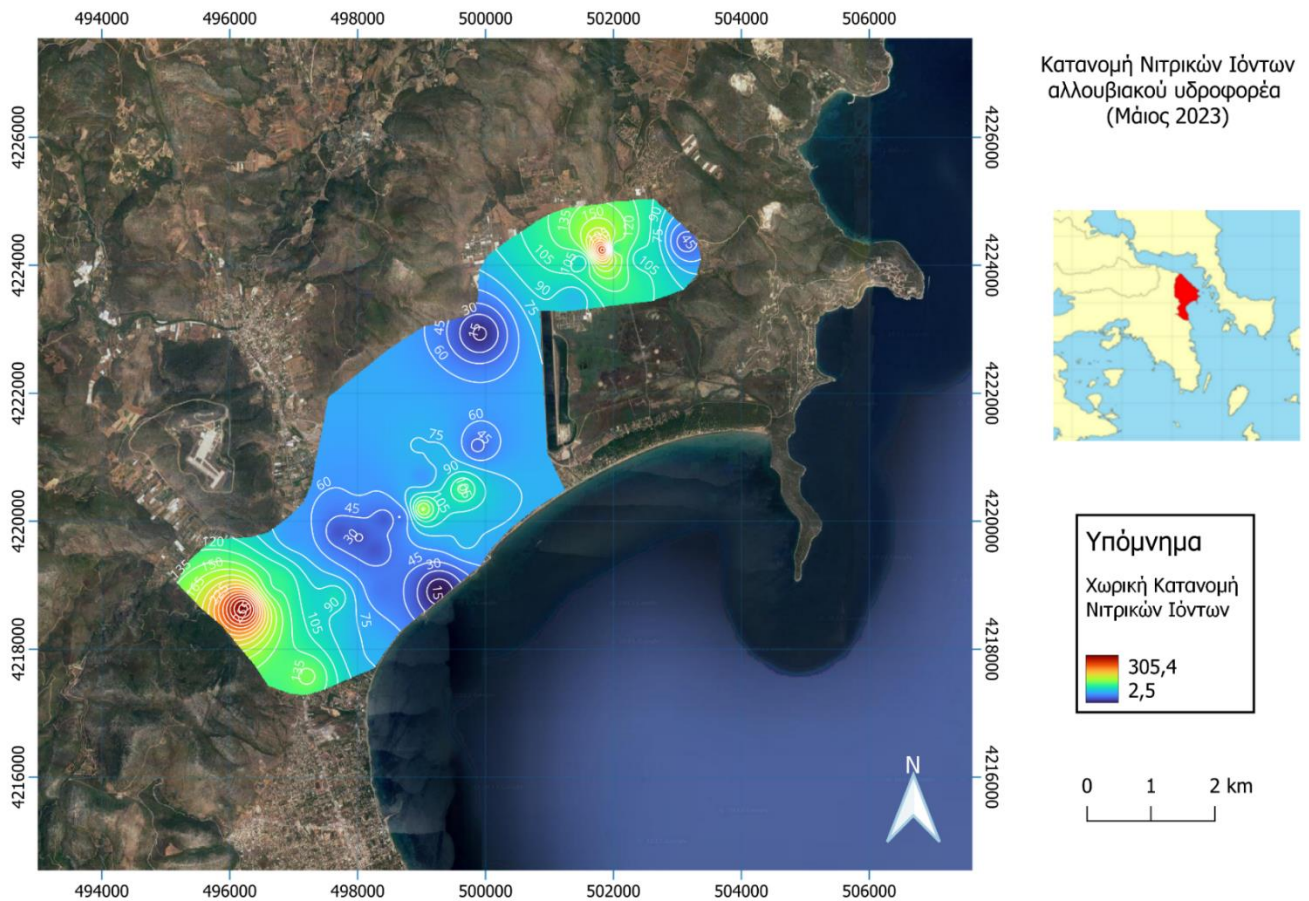
ID	NO ₃ (mg/l)
ΕΛΑΧΙΣΤΟ	2.50
ΜΕΓΙΣΤΟ	305.40
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	80.45
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	67.88

Πίνακας 10 Νιτρικά Ιόντα αλλουβιακού υδροφορέα Μαραθώνα Μάιος 2023

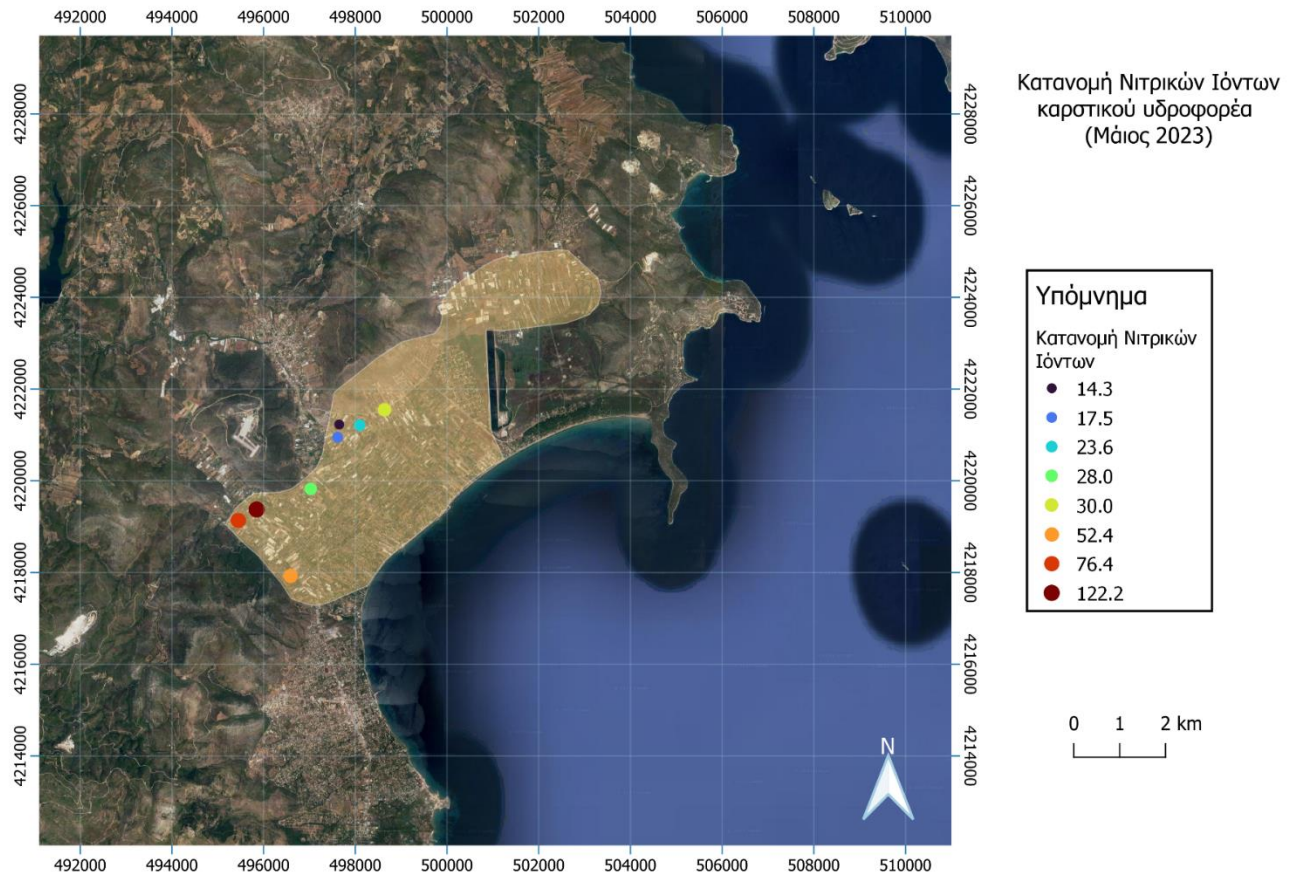
ID	NO ₃ (mg/l)
ΕΛΑΧΙΣΤΟ	14.30
ΜΕΓΙΣΤΟ	122.2
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	45.55
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	37.17

Πίνακας 11 Νιτρικά Ιόντα καρστικού υδροφορέα Μαραθώνα Μάιος 2023

Η κατανομή των νιτρικών ιόντων στην περιοχή μελέτης , τόσο για τον αλλουβιακό υδροφόρα όσο για τον καρστικό υδροφόρα απεικονίζεται στους παρακάτω χάρτες.



Εικόνα 13 Κατανομή Νιτρικών Ιόντων στον αλλουβιακό υδροφόρα του Μαραθώνα



Εικόνα 14 Κατανομή Νιτρικών Ιόντων στον καρστικό υδροφορέα του Μαραθώνα

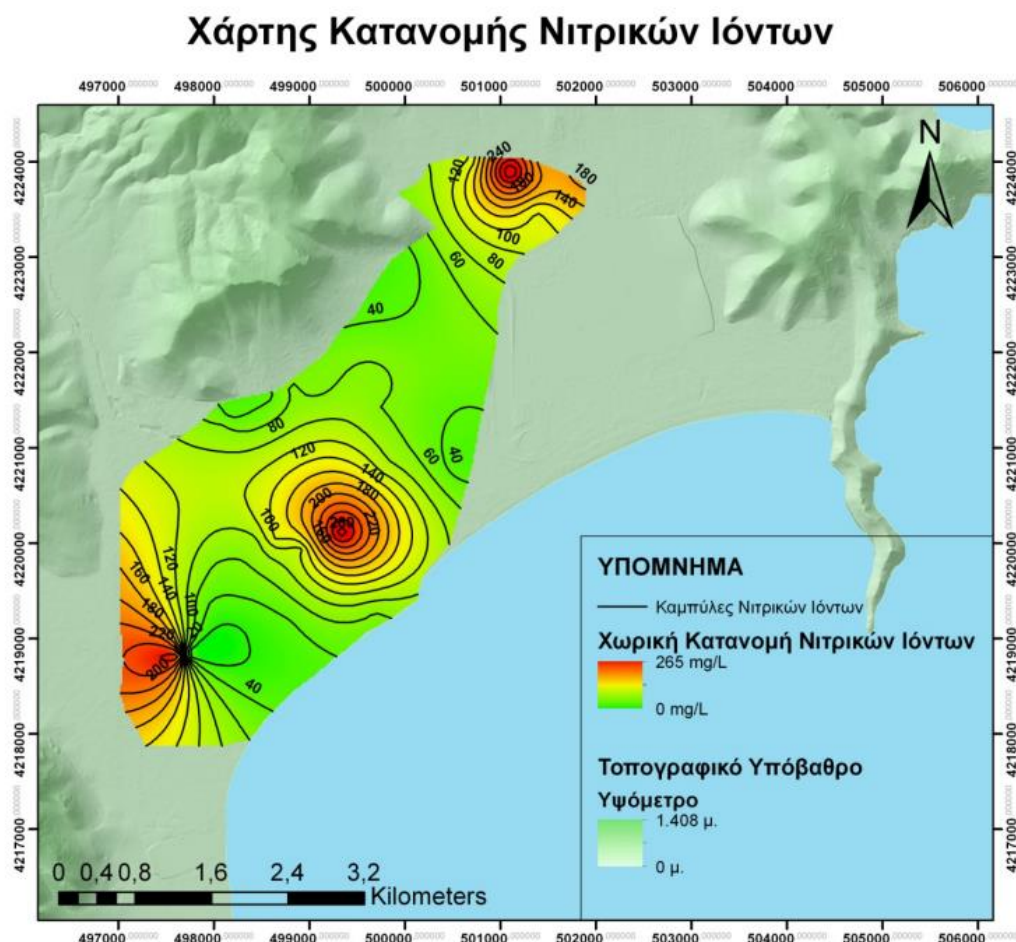
Σύμφωνα με τον χάρτη της εικόνας 13, που αφορά την χωρική κατανομή των νιτρικών ιόντων στον αλλουβιακό υδροφορέα, παρατηρείται πως η περιοχή στο σύνολό της κυμαίνεται σε τιμές υψηλότερες του ορίου των 50mg/lit . Συγκεκριμένα, σχηματίζονται τρεις κώνοι εντός της περιοχής μελέτης, στο νοτιοδυτικό τμήμα της πεδιάδας Μαραθώνα, στο Κάτω Σούλι και στο κεντρικό Μαραθώνα, όπου οι τιμές συγκέντρωσης των νιτρικών είναι από διπλάσιες έως και εξαπλάσιες του ορίου. Αυτό προκαλείται από ένα συνδυασμό μιας χρόνιας κακοδιαχείρισης των υδατικών πόρων, εκτεταμένης χρήσης φυτοφαρμάκων στις καλλιέργειες καθώς και έλλειψης αγρανάπαυσης. Άξιο επισήμανσης αποτελεί το γεγονός πως η περιοχή η οποία διαρρέεται από την Μακαρία πηγή, παρουσιάζει ανθεκτικότητα στη συγκέντρωση νιτρικών ιόντων.

Όσον αφορά τα νιτρικά ιόντα του καρστικού υδροφορέα, μόνο στα νοτιοδυτικά της περιοχής μελέτης παρουσιάζονται τιμές οι οποίες ξεπερνούν το όριο των 50 mg/lit.

5.1.2. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Παρακάτω παρατίθεται ο χάρτης που διαμορφώθηκε μετά από μετρήσεις το 2016 από τον Φλώρο Ε. Παρατηρείται πως σχηματίζονται τρεις κώνοι με αρκετά αυξημένες τιμές νιτρικών ιόντων. Επισημαίνεται πως στον κώνο στο κέντρο της πεδιάδας Μαραθώνα οι συγκεντρώσεις είναι αρκετά υψηλότερες συγκριτικά με τα φετινά αποτελέσματα των μετρήσεων. Γενικότερα, συγκρίνοντας τα φετινά δεδομένα με αυτά του 2016 (Φλώρος, 2016), υπάρχει αισθητή μείωση στη συγκέντρωση των νιτρικών, σε αρκετά από τα σημεία δειγματοληψίας.

Αυτό υποδηλώνει πως υπήρξε ευαισθητοποίηση των κατοίκων για το ζήτημα, και βελτίωση κάποιων διαδικασιών που ακολουθούσαν. Βεβαία, απαιτούνται αρκετές αλλαγές ακόμα, οι οποίες θα αντέξουν στο χρόνο, για να θεωρηθεί η πεδιάδα του Μαραθώνα μια ζώνη που δε πλήττεται από νιτρορύπανση.



Εικόνα 15 Κατανομή Νιτρικών Ιόντων αλλουβιακού υδροφορέα Μαραθώνα 2016 (Πηγή: Φλώρος Ε., 2016)

5.2. ΟΞΙΝΑ ΑΝΘΡΑΚΙΚΑ ΙΟΝΤΑ (HCO_3^-)

Τα όξινα ανθρακικά ιόντα είναι τα επικρατέστερα ανιόντα των υπόγειων υδάτων (Βουδούρης, 2009). Προέρχονται από την ύπαρξη CO_2 στην ατμόσφαιρα, από την έκλυση του ίδιου αερίου κατά την αποσύνθεση οργανικής ύλης στο έδαφος, καθώς επίσης και από τη διάλυση των ανθρακικών πετρωμάτων που συναντώνται στη περιοχή. Τέτοια πετρώματα είναι οι ασβεστόλιθοι και οι δολομίτες.

Η συγκέντρωση των όξινων ανθρακικών ιόντων είναι ανάλογη της αλκαλικότητας των νερών, δηλαδή την ικανότητά τους να εξουδετερώνουν ένα οξύ. Αυτό σημαίνει ότι όσο αυξημένη είναι η συγκέντρωσή τους στο νερό, τόσο αυξημένη και η τιμή της αλκαλικότητας. Συνήθως, η τιμή τους είναι μικρότερη των 500 mg/l, ενώ σπάνιες είναι οι φορές όπου ξεπερνούν τα 1000 mg/l.

Στη παρούσα έρευνα, η μέση τιμή των HCO_3^- τόσο στον αλλουβιακό όσο στον καρστικό υδροφόρο είναι 326 mg/l και 257 mg/l αντιστοίχως.

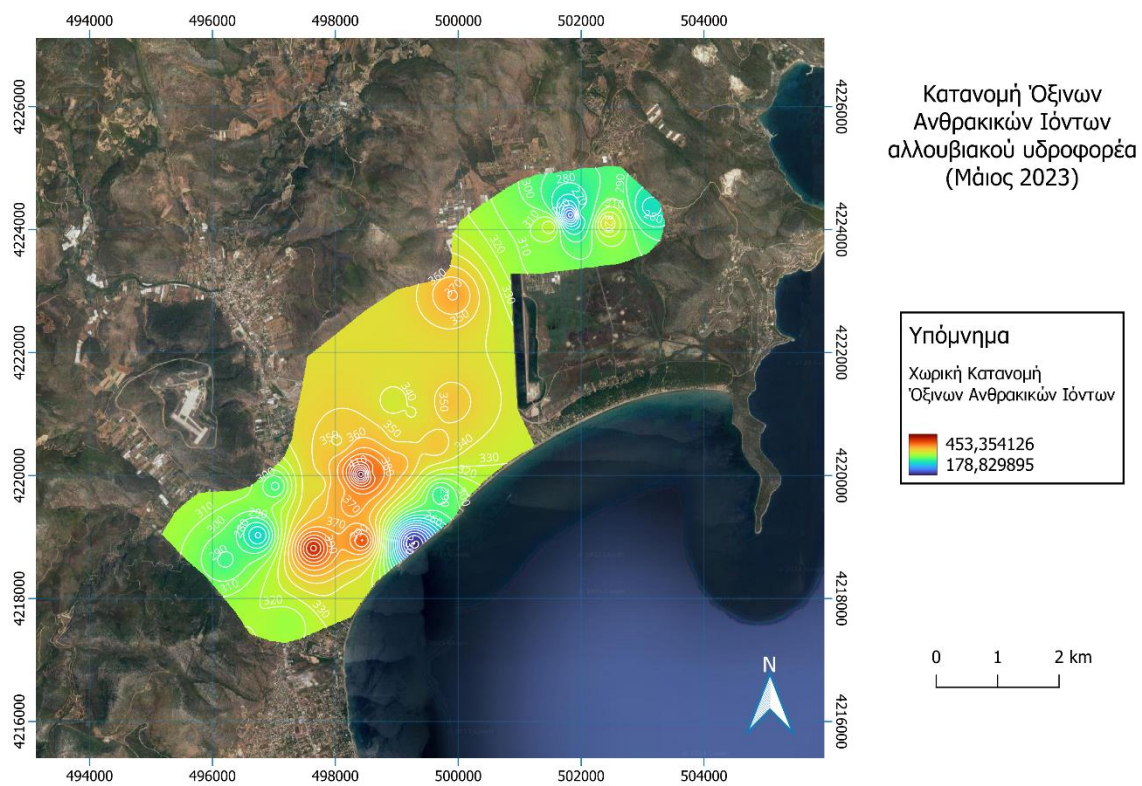
ID	HCO_3^- (mg/l)
ΕΛΑΧΙΣΤΟ	178.12
ΜΕΓΙΣΤΟ	453.84
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	325.98
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	62.09

Πίνακας 12 Όξινα ανθρακικά ιόντα αλλουβιακού υδροφόρου Μαραθώνα Μάιος 2023

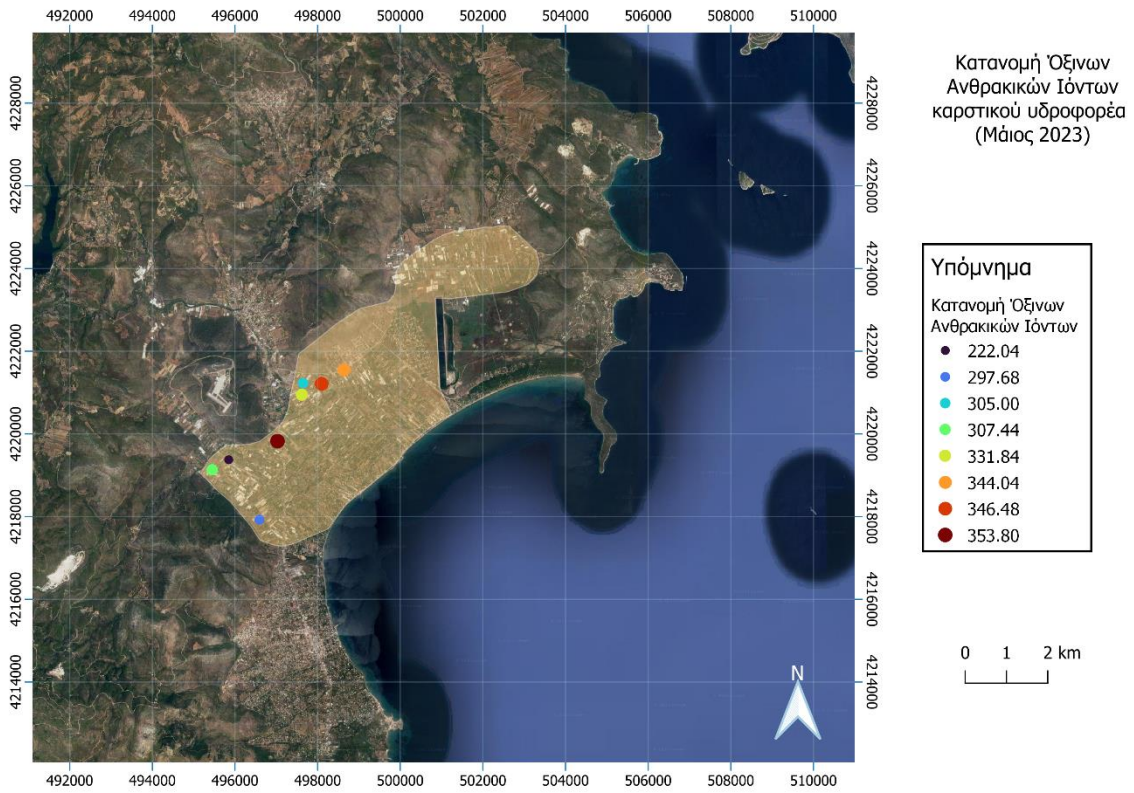
ID	HCO_3^- (mg/l)
ΕΛΑΧΙΣΤΟ	222.04
ΜΕΓΙΣΤΟ	353.8
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	257
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	42.60

Πίνακας 13 Όξινα ανθρακικά ιόντα καρστικού υδροφόρου Μαραθώνα Μάιος 2023

Ακολουθούν οι χάρτες κατανομής των όξινων ανθρακικών ιόντων στην περιοχή του Μαραθώνα. Παρατηρείται πως στις περιοχές όπου ο αλλουβιακός υδροφορέας τροφοδοτείται από τα μάρμαρα, οι συγκεντρώσεις των HCO_3 είναι υψηλότερες. Ιδιαίτερα στο κεντρικό τμήμα της πεδιάδας του Μαραθώνα, καθώς και στην περιοχή όπου διέρχεται το κανάλι της Μακαρίας πηγής, οι τιμές συναντούν το μέγιστό τους. Αυτό πιθανότατα να οφείλεται και στην εκφόρτιση της συγκεκριμένης πηγής. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα αυτά με άλλα παλαιότερων ετών (Περδικάκη, Φλώρος, 2016) παρατηρείται μια συνέχεια του φαινομένου, χωρίς αξιοσημείωτες μεταβολές.



Εικόνα 16 Κατανομή Όξινων Ανθρακικών Ιόντων στον αλλουβιακό υδροφορέα του Μαραθώνα



Εικόνα 17 Κατανομή Όξινων Ανθρακικών Ιόντων στον καρστικό υδροφορέα του Μαραθώνα

5.3. ΙΟΝΤΑ ΧΛΩΡΙΟΥ (Cl⁻)

Τα ιόντα χλωρίου που συναντώνται στις υδάτινες μάζες προέρχονται κυρίως από τα ιζηματογενή πετρώματα που περιέχουν αργιλικά ορυκτά θαλάσσιας προέλευσης. Στην περίπτωση των παράκτιων υδροφορέων, η υψηλή συγκέντρωση χλωριόντων συνδέεται με τη θαλάσσια διείσδυση (Βουδούρης, 2009). Επιπλέον, η ξηρότητα του κλίματος και η συγκέντρωση χλωριόντων αποτελούν ανάλογα μεγέθη (Καλλέργης, 2000).

Παράγοντες όπως η ρίψη άλατος για την αποπαγοποίηση των δρόμων, βιομηχανικά, οικιακά και αγροχημικά απόβλητα, αλμύρες πετρελαϊκών πεδίων, όπως και η θαλάσσια διείσδυση εξαιτίας της υπεράντλησης υδάτων, ευθύνονται επίσης για την όξυνση της υφαλμύρισης (Καλλιώρας, 2008). Σημειώνεται πως το χλώριο χαρακτηρίζεται από εξαιρετικά μεγάλο χρόνο παραμονής στο νερό και η απομάκρυνσή του είναι μια αρκετά δύσκολη διαδικασία.

Στην περιοχή μελέτης, παρουσιάζονται ιδιαίτερα υψηλές τιμές συγκεντρώσεις χλωριόντων. Αυτό συνδέεται άμεσα με το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης, καθώς το υπόγειο σύστημα της περιοχής συνδέεται υδραυλικά με τη θάλασσα και τελικά απορρέει σε αυτή. Αποσκοπώντας στην κατανόηση της έκτασης του φαινομένου, αρκεί να αναφερθεί η σημείωση του Βουδούρη (2009) πως μια συγκέντρωση της τάξης των 100 mg/lt χρησιμοποιείται ως δείκτης θαλάσσιας εισβολής. Επιπλέον, η υπεράντληση των υπόγειων υδάτινων πόρων, μέσω γεωτρήσεων και πηγαδιών, εντείνει το φαινόμενο αυτό.

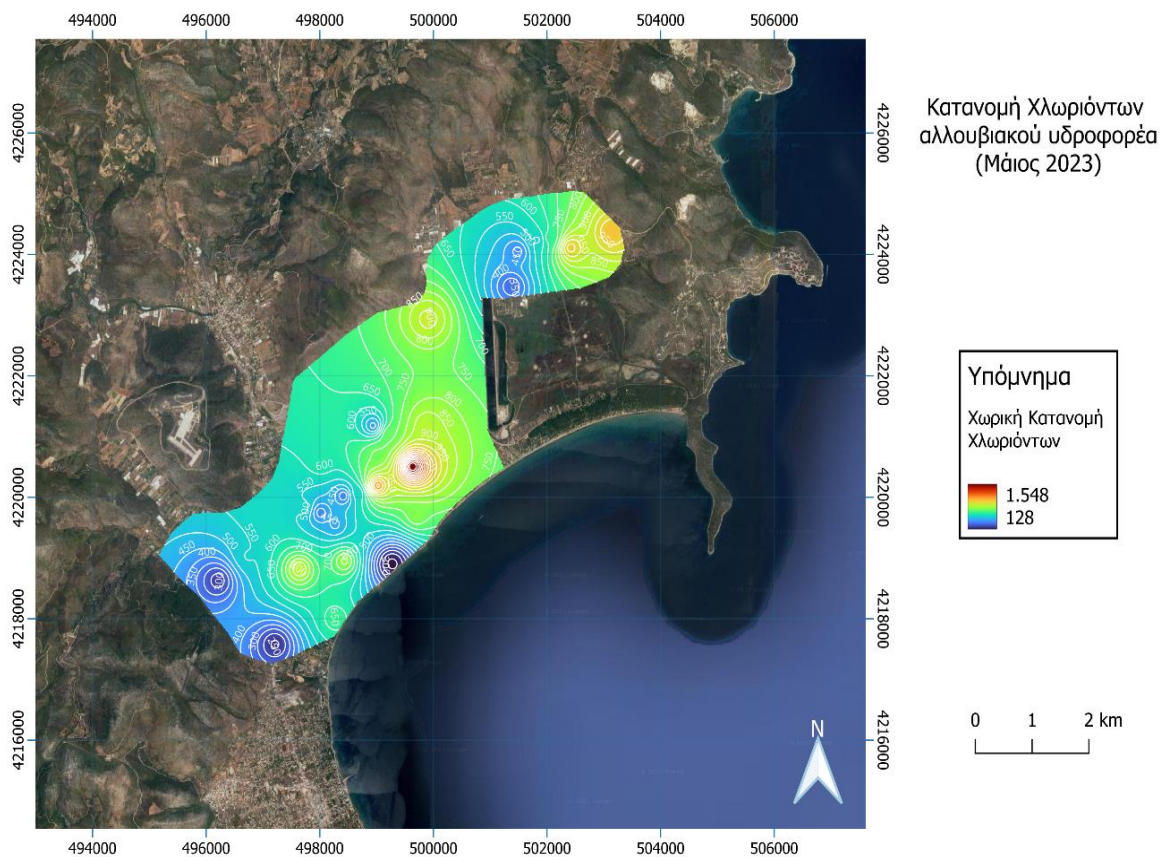
ID	Αλλουβιακός	Καρστικός
	Υδροφορέας	Υδροφορέας
	Cl (mg/l)	Cl (mg/l)
ΕΛΑΧΙΣΤΟ	128.00	224.00
ΜΕΓΙΣΤΟ	1548.00	596.000
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	625.87	373.00
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	320.03	133.76

Πίνακας 14 Χλωριόντα αλλουβιακού και καρστικού υδροφορέα Μαραθώνα Μάιος 2023

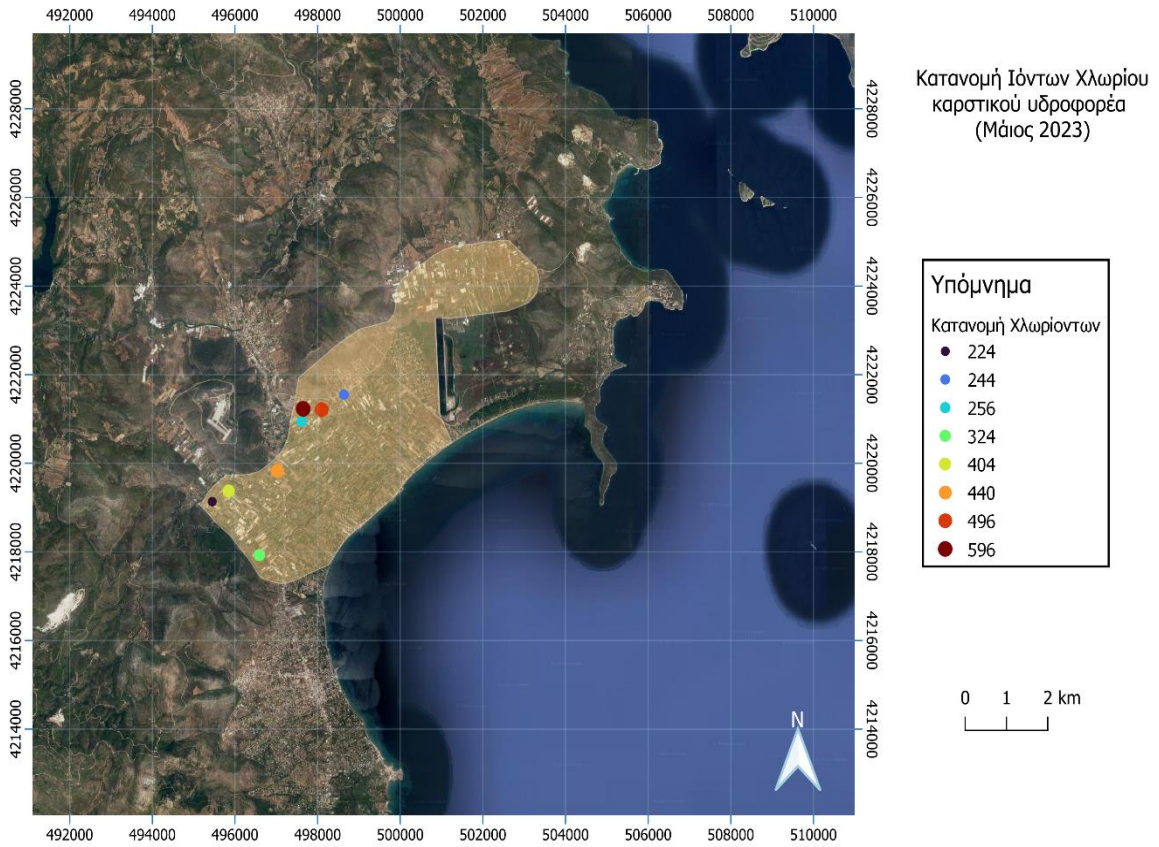
Η μέση τιμή των χλωριόντων στον αλλουβιακό υδροφορέα είναι 626 mg/l, ενώ στον καρστικό 373 mg/l για την περίοδο του Μαΐου του 2023. Παρατηρείται πως ο καρστικός υδροφορέας είναι λιγότερο επιβαρυσμένος από υφαλμύριση από τον

αλλουβιακό. Αυτό αιτιολογείται από τον μικρό αριθμό γεωτρήσεων που αντλούν από αυτό, συγκριτικά με τον αλλουβιακό, καθώς και από το μεγαλύτερο δυναμικό υδροφορίας του συστήματος αυτού. Επίσης πρέπει να συνεκτιμηθεί το γεγονός ότι ο καρστικός υδροφορέας είναι πιο απομακρυσμένος από τον κόλπο του Μαραθώνα συγκριτικά με τον προσχωματικό.

Σύμφωνα με τον παρακάτω χάρτη, είναι εμφανές πως η συγκέντρωση των χλωριόντων αυξάνεται στο κεντρικό τμήμα της πεδιάδας, όπως επίσης και στα βορειοανατολικά της περιοχής μελέτης. Παράλληλα, οι τιμές στα όρια του αλλουβιακού με τον καρστικό υδροφορέα είναι χαμηλότερες, πάντα όμως χαρακτηριστικές της έντονης υφαλμύρισης.



Εικόνα 18 Κατανομή Χλωριόντων στον αλλουβιακό υδροφορέα του Μαραθώνα



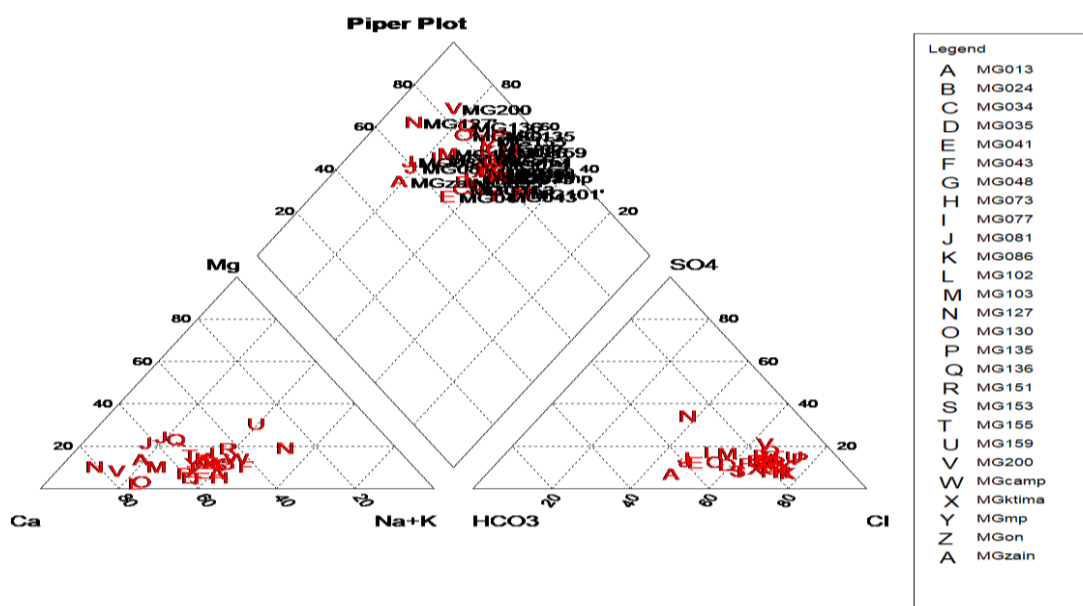
Εικόνα 19 Κατανομή Χλωριόντων στον καρστικό υδροφορέα του Μαραθώνα

5.4. ΥΔΡΟΧΗΜΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

Τα υδροχημικά διαγράμματα χρησιμοποιούνται προκειμένου να συγκριθούν αποτελέσματα δειγμάτων νερού που προέρχονται είτε από το ίδιο σημείο και σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, είτε από πολλά σημεία ταυτόχρονα. Τα συμπεράσματα που εξάγονται αφορούν τον χαρακτηρισμό του νερού, ενώ παρέχουν και τη δυνατότητα ταξινόμησης των δειγμάτων και τον προσδιορισμό της υδροχημικής τους φάσης. Στη παρούσα διατριβή θα συγκριθούν τα αποτελέσματα των δειγμάτων νερού από πολλά σημεία στην ίδια χρονική περίοδο. Τα διαγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν αναλύονται παρακάτω.

Ταξινόμηση κατά Piper

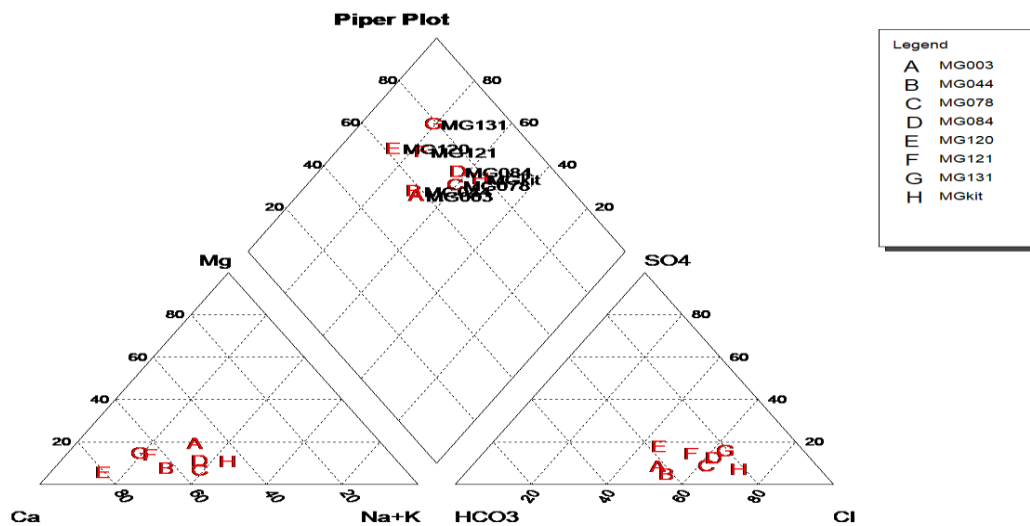
Τα διαγράμματα Piper απαρτίζονται από δύο τριγωνικά διαγράμματα, και από ένα ενδιάμεσο ρομβικό. Στα τριγωνικά απεικονίζονται οι συγκεντρώσεις (mg/l) των ιόντων σε ποσοστά %, στο ένα τα κατιόντα και στο άλλο τα ανιόντα. Τα σημεία που προκύπτουν, προβάλλονται στο ρόμβο, ενώ η τομή των προβολών αντιπροσωπεύει την υδροχημική φάση του δείγματος. Με τη βοήθεια αυτών των διαγραμμάτων εντοπίζεται ο υδροχημικός τύπος του υπόγειου νερού. Παρακάτω απεικονίζονται τα διαγράμματα κατά Piper που σχεδιάστηκαν για τον αλλουβιακό και τον καρστικό υδροφορέα της περιοχής μελέτης με τη βοήθεια του προγράμματος AquaChem, λαμβάντας υπόψη τις τιμές συγκέντρωσης των κατιόντων Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ και K^+ , και των ανιόντων Cl^- , HCO_3^- και SO_4^{2-} .



Εικόνα 20 Διάγραμμα Piper αλλουβιακού υδροφορέα

Όσον αφορά το διάγραμμα του αλλουβιακού υδροφορέα, παρατηρείται μια συσσώρευση των σημείων στο τμήμα των χλωριόντων, όπως επίσης και στο τμήμα ανάμειξης των χλωριόντων και των όξινων ανθρακικών ιόντων (κάτω δεξί τρίγωνο). Ταυτόχρονα, συσσωρεύονται σημεία στο τμήμα ανάμειξης των κατιόντων ασβεστίου και νατρίου-καλίου, με αρκετά από τα δείγματα να κλίνουν περισσότερο προς τα ασβεστούχα ιόντα (κάτω αριστερό τρίγωνο).

Παρατηρώντας το ρομβικό τμήμα του διαγράμματος, το νερό των δειγμάτων που λήφθηκαν θεωρείται υφάλμυρο, το οποίο είναι προφανές λόγω της θαλάσσιας διείσδυσης.



Εικόνα 21 Διάγραμμα Piper καρστικού υδροφορέα

Τα δείγματα του καρστικού υδροφορέα, σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα ανήκουν επίσης στα υφάλμυρα υπόγεια νερά.

Στον παρακάτω πίνακα, αναγράφεται ο υδροχημικός τύπος κάθε δείγματος ξεχωριστά, τόσο για τον αλλουβιακό υδροφορέα, όσο για τον καρστικό.

ΑΛΛΟΥΒΙΑΚΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑΣ	
ID	WATER-TYPE
MG013	Ca-Na-Cl-HCO ₃
MG024	Ca-Na-Cl
MG034	Ca-Na-Cl-HCO ₃
MG035	Ca-Na-Cl-HCO ₃
MG041	Ca-Na-Cl-HCO ₃
MG043	Ca-Na-Cl-HCO ₃
MG043'	Ca-Na-Cl-HCO ₃
MG048	Ca-Na-Cl-HCO ₃
MG073	Ca-Na-Cl-HCO ₃
MG077	Ca-Na-Cl-HCO ₃
MG081	Ca-Cl-HCO ₃
MG081'	Ca-Cl-HCO ₃
MG086	Ca-Na-Cl
MG101'	Na-Ca-Cl
MG102	Ca-Na-Cl-HCO ₃
MG103	Ca-Na-Cl-HCO ₃
MG127	Ca-Cl-SO ₄ - HCO ₃
MG130	Ca-Na-Cl
MG135	Ca-Na-Cl

ΑΛΟΥΒΙΑΚΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑΣ	
MG136	Ca-Mg-Na-Cl
MG151	Ca-Na-Cl
MG153	Ca-Na-Cl- HCO ₃
MG155	Ca-Na-Cl
MG159	Na-Ca-Mg-Cl
MG200	Ca-Cl
MGcamp	Ca-Na-Cl
MGktima	Ca-Na-Cl- HCO ₃
MGmp	Ca-Na-Cl

ΚΑΡΣΤΙΚΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑΣ	
ID	WATER-TYPE
MG003	Ca-Na-Cl- HCO ₃
MG044	Ca-Na-Cl- HCO ₃
MG078	Ca-Na-Cl- HCO ₃
MG084	Ca-Na-Cl- HCO ₃
MG120	Ca-Cl-HCO ₃
MG121	Ca-Na-Cl- HCO ₃
MG131	Ca-Na-Cl
MGkit	Na-Ca-Cl- HCO ₃

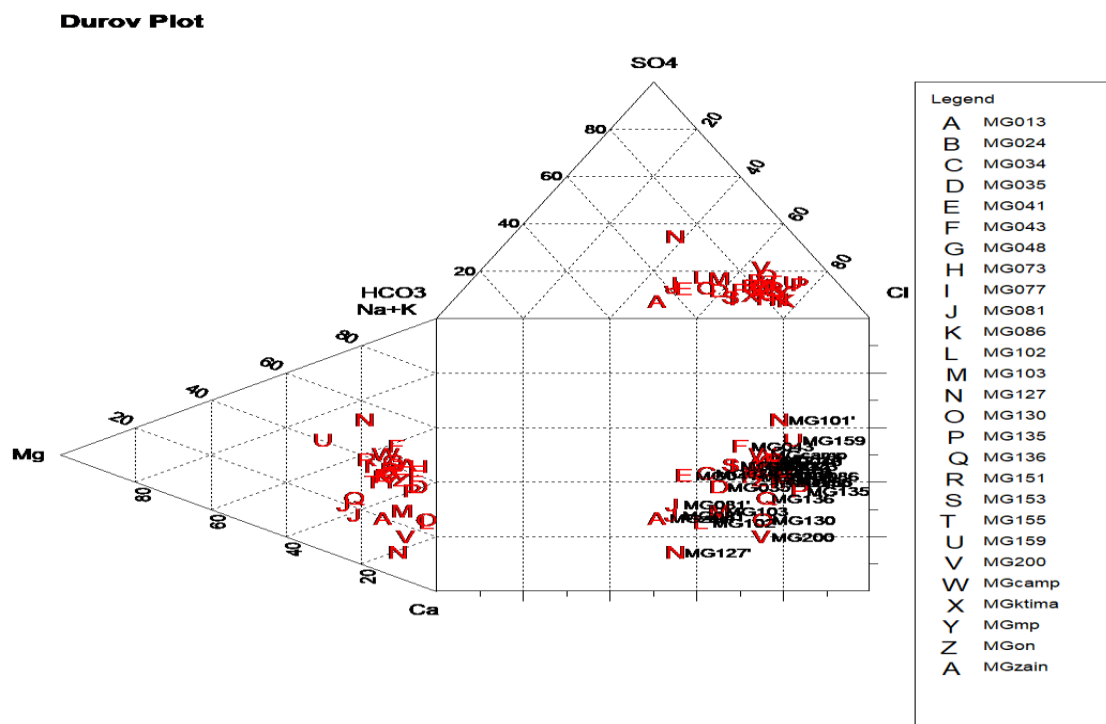
Πίνακας 15 Υδροχημικός τύπος δειγμάτων

Τα νερά με υδροχημικό τύπο Ca-HCO₃ προέχονται από την αλληλεπίδραση του μετεωρικού νερού με τα πετρώματα, τα οποία είναι πλούσια σε ορυκτά με ασβέστιο. Στην περιοχή μελέτης εντοπίζονται λόγω των μαρμάρων που συναντώνται. Όλα τα δείγματα των καρστικών, εκτός ενός (MG131), έχουν στον τύπο τους Ca-HCO₃. Επίσης όλα τα δείγματα, τόσο του καρστικού όσο του προσχωματικού υδροφόρου παρουσιάζουν εμφανή επικράτηση κατιόντων νατρίου Na⁺ και ανιόντων χλωρίου Cl⁻, γεγονός που οφείλεται στην υπαλμύριση εξαιτίας της θαλάσσιας διείσδυσης.

Ταξινόμηση κατά Durov

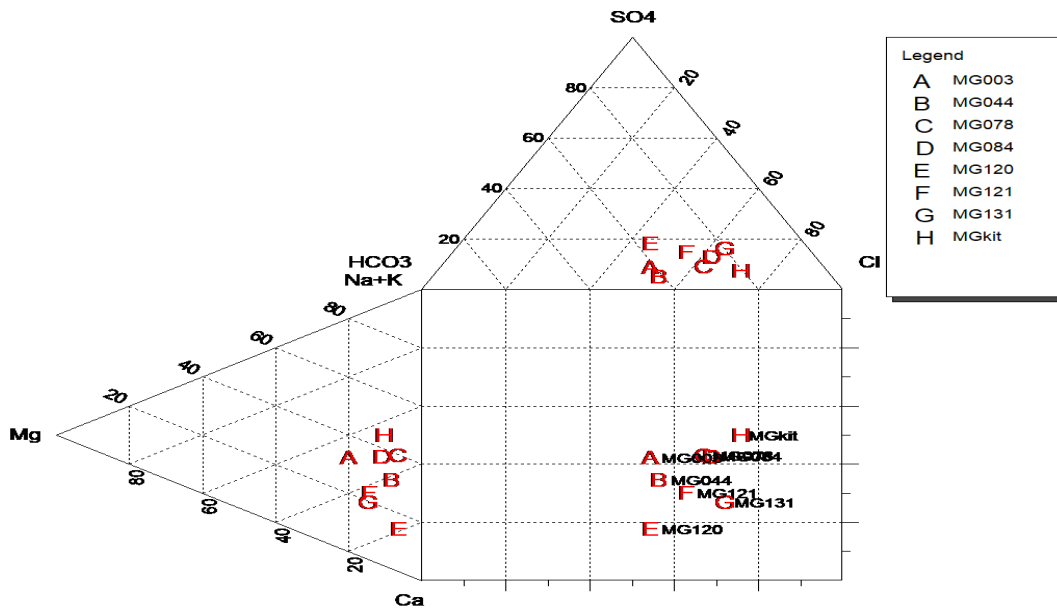
Τα διαγράμματα Durov, με τη σειρά τους, απαρτίζονται από δύο τριγωνικά διαγράμματα τα οποία συνδέονται με ένα τετραγωνικό. Τα δύο τριγωνικά αντιστοιχούν στα ανιόντα και τα κατιόντα, όμοια με τα διαγράμματα Piper, ενώ το κεντρικό τετραγωνικό, αντιστοιχεί σε συγκεκριμένες κατηγορίες νερού. Σε αυτό το διάγραμμα τα δείγματα ταξινομούνται βάσει της χημικής τους σύστασης και του επικρατέστερου ανιόντος και κατιόντος. Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα Durov του αλλουβιακού και καρστικού υδροφορέα του Μαραθώνα αντιστοίχως.

Παρατηρείται πως η πλειοψηφία των δειγμάτων έχει ως βασικό χαρακτηριστικό την επικράτηση των ιόντων χλωρίου. Αυτό συνεπάγεται πως σε αυτά τα υπόγεια νερά το φαινόμενο της αντίστροφης ανταλλαγής κατιόντων βρίσκεται σε εξέλιξη. Ένα δείγμα μονάχα παρατηρείται πως αποτελεί προϊόν διαλυτοποίησης και δεν επικρατεί κάποιο ιόν.



Εικόνα 22 Διάγραμμα Durov αλλουβιακού υδροφορέα

Durov Plot

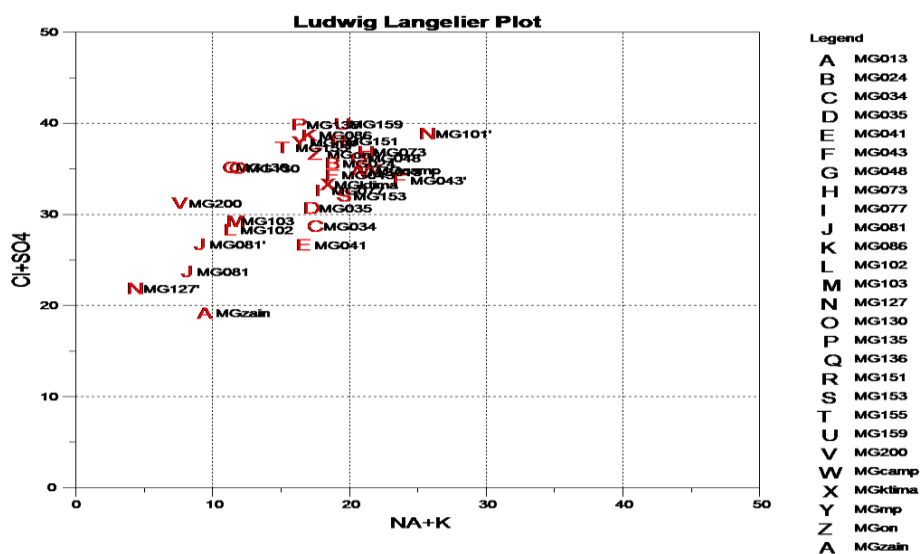


Εικόνα 23 Διάγραμμα Durov καρστικού υδροφορέα

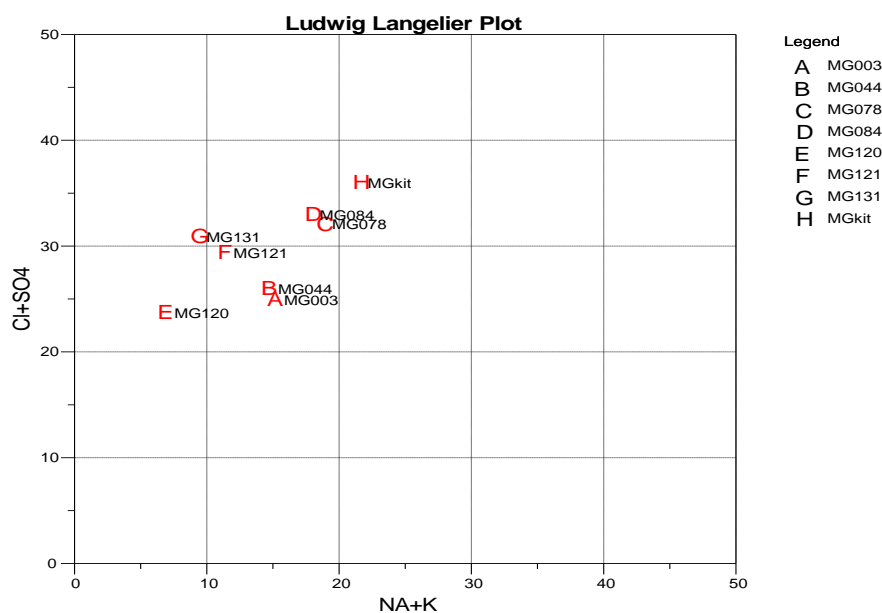
Ταξινόμηση κατά Ludwig-Langelier

Στα συγκεκριμένα διαγράμματα τα νερά κατανέμονται ανάλογα με την επικράτηση των ιόντων νατρίου, καλίου, χλωρίου και θειικών. Τα δείγματα χαρακτηρίζονται ανάλογα με την απόστασή τους από την αρχή των αξόνων και την απόστασή τους από έναν από τους δύο άξονες. Συγκεκριμένα, όταν ένα δείγμα πλησιάζει τον άξονα Cl + SO₄, χαρακτηρίζεται ως χλωριο-θειικό, ενώ όταν πλησιάζει τον άξονα Na + K, επικρατεί ο καλιο-νατριούχος χαρακτήρας. Σε ειδικές περιπτώσεις όπου το δείγμα ισαπέχει από τους δύο άξονες, χαρακτηρίζεται ως ισομερώς χλωριο-θειικό και καλιο-νατριούχο.

Τα δείγματα του αλλουβιακού υδροφορέα παρουσιάζουν διακύμανση στα ποσοστά, με κάποια να ξεκινούν από αρκετά μικρά ποσοστά και άλλα να καταλήγουν σε μεγαλύτερα. Απ' ό,τι φαίνεται από το διάγραμμα Ludwig-Langelier παρακάτω, τα δείγματα παρουσιάζουν μεγάλη ομοιογένεια μεταξύ τους με σχετικά μέτριες τιμές ποσοστών ως προς τον άξονα των Na + K, και υψηλότερες ως προς τον άξονα Cl + SO₄. Για το λόγο αυτό τα δείγματα χαρακτηρίζονται ως χλωριο-θειικά. Ίδιες συνθήκες επικρατούν και για τα δείγματα του καρστικού υδροφορέα, όπως φαίνεται και το δεύτερο διάγραμμα.



Εικόνα 24 Διάγραμμα Ludwig- Langelier αλλουβιακού υδροφορέα

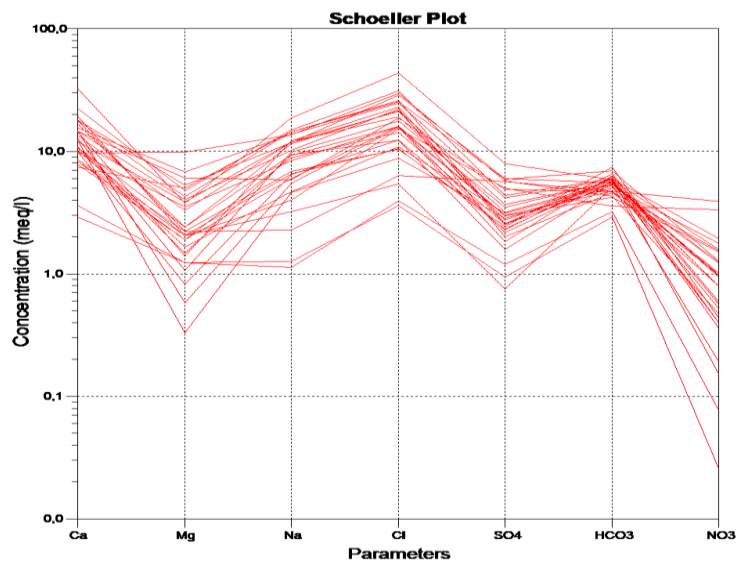


Εικόνα 25 Διάγραμμα Ludwig - Langelier καρστικού υδροφορέα

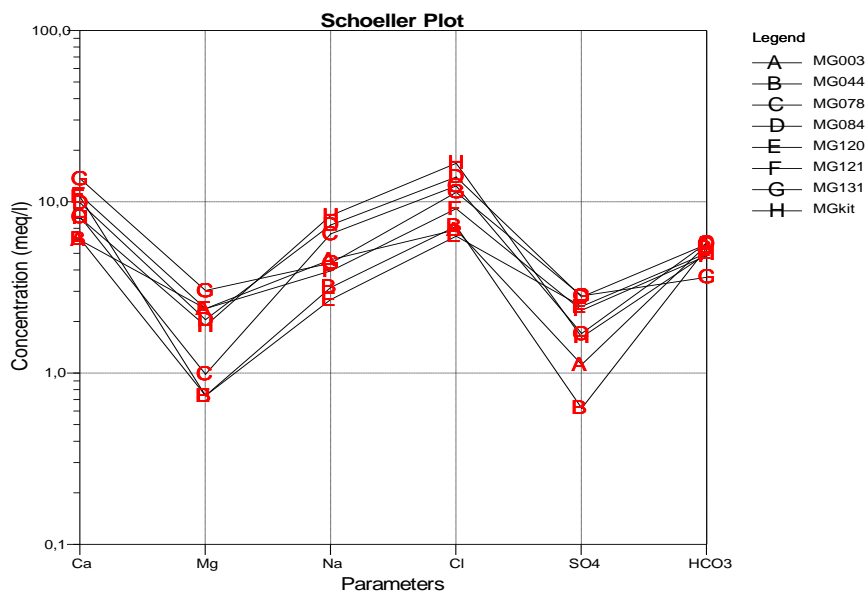
Ταξινόμηση κατά Schoeller

Το διάγραμμα Schoeller αποτελείται από δύο άξονες. Στον κατακόρυφο άξονα αποτυπώνονται οι τιμές των διαφόρων ιόντων σε ημιλογαριθμική κλίμακα, ενώ στον οριζόντιο αποτυπώνονται τα ιόντα Ca, Mg, Na+K, Cl, SO₄, HCO₃ κατά αυτή τη σειρά και σε δεκαδική κλίμακα. Οι καμπύλες που αποτυπώνονται ενώνουν τις τιμές των ιόντων των δειγμάτων. Αναλυτικότερα, όταν τα κοίλα είναι στραμμένα άνω, το νερό χαρακτηρίζεται ως γλυκό, ενώ όταν τα κοίλα είναι στραμμένα προς τα κάτω, έχουμε υφάλμυρο νερό. Τέλος, όσο πιο ψηλά βρίσκεται η θέση της καμπύλης, τόσο υψηλότερη είναι η περιεκτικότητα σε ιόντα.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, το νερό όλων των υδροσημείων από τα οποία ελήφθησαν δείγματα είναι υφάλμυρο, πράγμα αναμενόμενο από τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων.



Εικόνα 26 Διάγραμμα Schoeller αλλουβιακού υδροφορέα



Εικόνα 27 Διάγραμμα Schoeller καρστικού υδροφορέα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΝΙΤΡΟΥΡΥΠΑΝΣΗΣ ΣΤΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ

6.1. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΡΥΠΟΥ ΣΤΟΥΣ ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ

6.1.1. ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ (MODFLOW)

Ο κώδικας MODFLOW (A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model) αναπτύχθηκε από τον φορέα Γεωλογικών Ερευνών των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής (United States Geological Survey – USGS). Αποτελεί ένα τρισδιάστατο αριθμητικό μοντέλο ροής, το πλέον χρησιμοποιούμενο, το οποίο χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, αρχικά προσομοιώνει μόνο την κίνηση του υπόγειου νερού στην κορεσμένη ζώνη πορώδους μέσου. Στη συνέχεια, συγχρονίστηκαν με τον κώδικα και άλλα εργαλεία προσομοίωσης υπόγειων αλλά και επιφανειακών συστημάτων ροής της ακόρεστης ζώνης, μεταφοράς ρύπου (MT3DMS, Zheng&Wang 1999), ροής μεταβαλλόμενης πυκνότητας (SEAWAT, Langevin 2003), εκτίμησης παραμέτρων (UCODE_2014), και διαχείρισης υπόγειων νερών. Η τόσο διαδεδομένη χρήση του οφείλεται στην ελεύθερη διάθεσή του, στους αναλυτικούς οδηγούς, στη συνεχή ανάπτυξη νέων πακέτων και εφαρμογών με σκοπό τη προσομοίωση διεργασιών, αλλά και στο γεγονός ότι επιδέχεται μορφοποιήσεις και βελτιώσεις.

Το μοντέλο βασίζεται στην αριθμητική επίλυση της κύριας διαφορικής εξίσωσης που περιγράφει τα χαρακτηριστικά της υπόγειας ροής, προκύπτει από την εφαρμογή της εξίσωσης δαιτήρησης της μάζας και του νόμου του Darcy. Η κύρια αυτή διαφορική εξίσωση, περιγράφει την τρισδιάστατη κίνηση υπόγειου νερού σταθερής πυκνότητας, υπό συνθήκες μη μόνιμης ροής, διαμέσου ενός ετερογενούς και ανισότροπου πορώδους μέσου και είναι η εξής (McDonald & Harbaugh, 1988) :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.1)$$

Όπου:

K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} = οι τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας κατά τη διεύθυνση των αξόνων x, y, z αντίστοιχα, οι οποίοι συμπίπτουν με τους κύριους άξονες της υδραυλικής αγωγιμότητας (LT^1),

h = το υδραυλικό φορτίο (L),

W = η ογκομετρική ροή ανά μονάδα όγκου, η οποία αντιπροσωπεύει τις πηγές εισροής και εκροής νερού στο υδροφόρο σύστημα (T^{-1}),

S_s = η ειδική αποθηκευτικότητα του πορώδους υλικού (L^{-1}) και

t = ο χρόνος (T).

Η εξίσωση 2.1 σε συνδυασμό με τον καθορισμό της ροής, των αρχικών τιμών του υδραυλικού φορτίου (αρχικές συνθήκες), και των τιμών του στα όρια του υδροφόρου συστήματος (οριακές συνθήκες), αποτελούν τη μαθηματική αναπαράσταση των συστημάτων υπόγειων ροών. Λύση αυτής της εξίσωσης αποτελεί μια αλγεβρική έκφραση του πιεζομετρικού φορτίου $h(x, y, z, t)$ όπου όταν οι παράγωγοί του ως προς τον χώρο και τον χρόνο αντικατασταθούν στην εξίσωση να ικανοποιούνται οι αρχικές και οριακές συνθήκες του προβλήματος (McDonald & Harbaugh, 1988, Harbaugh, 2005).

Η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών που χρησιμοποιείται για την επίλυση της εξίσωσης έχει ως στόχο την απλοποίηση της εξίσωσης και τη τροποποίησή της σε όσο το δυνατόν απλούστερες γραμμικές αλγεβρικές εξισώσεις. Σημειώνεται όμως ότι απαραίτητη προϋπόθεση για την επίτευξη του παραπάνω στόχου αποτελεί η χωρική διακριτοποίηση του υπό εξέταση υδροφόρου συστήματος, δηλαδή η διαμόρφωση ενός ορθογωνικού δικτύου (κάναβο). Προφανώς, όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των κελιών του δικτύου, με τόση μεγαλύτερη ακρίβεια θα πραγματοποιηθεί η προσομοίωση.

Η βασική εξίσωση της υπόγειας ροής επιλύεται για κάθε ένα από τα κελιά του κανάβου σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, λαμβάνοντας υπόψη την ισορροπία εισροών και εκροών νερού. το εξαγόμενο αποτέλεσμα μετά το πέρας των υπολογισμών είναι η κατανομή του υδραυλικού φορτίου σε αντιπροσωπευτικά σημεία του κάθε κελιού στις συγκεκριμένες χρονικές στιγμές. Αυτά τα σημεία τοποθετούνται στο κέντρο κάθε κελιού, έτσι ο κώδικας MODFLOW ως ένας κώδικας «κεντροβαρικής» διάταξης.

Σύμφωνα με τον Oude Essink (2000), μερικές από τις βασικές αρχές που διέπουν τον κώδικα είναι οι εξής:

- Το υδρογεωλογικό σύστημα μπορεί να προσομοιωθεί για σταθερή κατάσταση αλλά και για συνθήκες μεταβαλλόμενης ροής.

- Το μαθηματικό υπόβαθρο στηρίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών για το κέντρο κάθε κελιού του μοντέλου.
- Δεν υπάρχει ροή έξω από τα όρια του μοντέλου.
- Το μέσο το οποίο προσομοιώνεται μπορεί να είναι ανισότροπο.
- Το μέσο το οποίο προσομοιώνεται μπορεί να είναι ανομοιογενές.
- Το σύστημα ροής μπορεί να έχει ακανόνιστο σχήμα και να περικλείει συνδυασμούς υδροφόρων στρωμάτων. Συνήθως, όταν υπάρχει συνδυασμός υδροφόρων στρωμάτων, το ανώτερο στρώμα σχεδιάζεται ως ελεύθερο.
- Η ροή μπορεί να προσομοιωθεί πλήρως σε τρισδιάστατη απεικόνιση.

6.1..2. ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΔΙΑΛΥΜΕΝΗΣ ΜΑΖΑΣ (MT3DMS)

Ο κώδικας MT3DMS (Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model) είναι η εξέλιξη του τρισδιάστατου μοντέλου μεταφοράς διαλυμένης μάζας MT3D, και αρχικά αναπτύχθηκε από τον Zheng το 1990, ενώ στη συνέχεια τεκμηριώθηκε από τον Ερευνητικό Εργαστήριο Περιβάλλοντος της Υπηρεσίας Προστασίας Περιβάλλοντος των Η.Π.Α. . Αυτό το μοντέλο μεταφοράς προσομοιώνει τη διάχυση, τη διασπορά και τις χημικές αντιδράσεις διαφόρων ειδών ρύπων μέσα σε συστήματα υπογείων νερών. Οι χημικές αντιδράσεις που περιέχονται στον κώδικα MT3DMS αφορούν την περίπτωση μιας κατηγορίας ρύπου, σε αντίθεση με άλλα πιο σύνθετα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση σύνθετων χημικών διεργασιών μεταξύ διαφόρων ειδών ρυπαντικών ουσιών (Zheng & Wang, 1999).

Η διαφορική εξίσωση, στην οποία βασίζεται η αριθμητική επίλυση του κώδικα, περιγράφει τα χαρακτηριστικά της κίνησης των ρύπων στα υπόγεια νερά, όταν οι ρύποι είναι διαλυτοί στο νερό και κινούνται μαζί με αυτό. Αυτή η μερική διαφορική εξίσωση περιγράφει τη μεταφορά ενός ρύπου είδους k σε τρεις διαστάσεις, σε σύστημα ροής υπόγειων νερών και είναι η εξής (Zheng & Wang, 1999):

$$\frac{\partial(\theta C^k)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta D_{ij} \frac{\partial C^k}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i C^k) + q_s C_s^k + \sum R_n \quad (2.2)$$

Όπου:

θ = το πορώδες του μέσου (αδιάστατο),

C^k = η συγκέντρωση των διαλυμένων ουσιών (ML^{-3}),

t = ο χρόνος (T),

$x_{i,j}$ = η απόσταση κατά μήκος του αντίστοιχου καρτεσιανού άξονα συντεταγμένων (L),

D_{ij} = ο συντελεστής υδροδυναμικής διασποράς (L^2T^{-1}),

v_i = η ταχύτητα ροής του υπόγειου νερού (LT^{-1}),

q_s = η παροχή εισόδου ή εξόδου ανά μονάδα όγκου του πορώδους μέσου (T^{-1}),

C_s^k = η συγκέντρωση των ρύπων στη πηγή εισόδου ή εξόδου του νερού (ML^{-3}),

$\sum R_n$ = ο όρος για τις διάφορες χημικές αντιδράσεις ($ML^{-3}T^{-1}$).

Η αριθμητική επίλυση της εξίσωσης μεταφοράς είναι αρκετά περίπλοκη, λόγω της συνύπαρξης στη θεμελιώδη εξίσωση μεταφοράς της πρώτης παραγώγου του όρου συναγωγής και της δεύτερης παραγώγου του όρου διασποράς. Ενώ πολλές τεχνικές έχουν αναπτυχθεί κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, ακόμη δεν υπάρχει μια ενιαία μέθοδος που να μπορεί να παρέχει πλήρως ικανοποιητικές λύσεις στο πλαίσιο γενικών υδρογεωλογικών συνθηκών.

Οι περισσότερες αριθμητικές μέθοδοι που εφαρμόζονται για την επίλυση της εξίσωσης συναγωγής – διασποράς ανήκουν στις μεθόδους των Euler & Lagrange. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί άλλη μια μέθοδος επίλυσης της εξίσωσης μεταφοράς, η οποία ορίζεται ως η Μέθοδος Πεπερασμένου Όγκου (Total Variation Diminishing Method –TVD), και χρησιμοποιείται κυρίως στον τομέα της ρευστοδυναμικής. Συγκρίνοντας αυτή τη μέθοδο με άλλες τυποποιημένες μεθόδους πεπερασμένων διαφορών, διαπιστώθηκε ότι είναι πιο ακριβής στην επίλυση προβλημάτων στα οποία κυριαρχεί η συναγωγή. Βέβαια σε σύγκριση με τη μέθοδο Lagrange είναι λιγότερο αποτελεσματική ως προς την αριθμητική εξάλειψη της διασποράς (Zheng & Wang, 1999).

Ο κώδικας MT3DMS βασίζεται στην παραδοχή ότι το πορώδες μέσο, στο οποίο λαμβάνει χώρα η μεταφορά των ρύπων, αποτελείται από δυο ξεχωριστά πεδία. Το πρώτο είναι το ασταθές, όπου η μεταφορά των ρύπων βασίζεται κατά κύριο λόγο στη διεργασία συναγωγής, ενώ το δεύτερο είναι το σταθερό, στο οποίο η μεταφορά των ρύπων προκαλείται λόγω της υδροδυναμικής διασποράς. Η συγκεκριμένη παραδοχή θεωρείται περισσότερο κατάλληλη για περιπτώσεις προσομοίωσης μεταφοράς ρύπων σε πορώδη μέσα με εξαιρετικά έντονη ετερογένεια, καθώς και σε καρστικούς υδροφορείς. Βασική προϋπόθεση για την ισχύ αυτής της παραδοχής είναι να μπορούν να προσδιοριστούν οι δύο διαφορετικές τιμές του πορώδους καθώς και ο ειδικός συντελεστής μεταφοράς μάζας, ο οποίος καθορίζει τη σύνδεση του ασταθούς και σταθερού πεδίου μεταξύ τους.

Η δομή του κώδικα είναι παρόμοια αυτής του τρισδιάστατου μοντέλου πεπερασμένων διαφορών «κεντροβαρικής» διάταξης MODFLOW. Αυτή η ομοιότητα μεταξύ του κώδικα MT3DMS και του MODFLOW αποσκοπεί στη διευκόλυνση του χρήστη.

6.2. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Για την προσομοίωση του μοντέλου και την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων έγινε χρήση της πλατφόρμας ModelMuse της USGS. Είναι ένα ελεύθερο πρόγραμμα το οποίο ενσωματώνει πολλούς κώδικες της USGS, όπως είναι ο MODFLOW-2005 που θα χρησιμοποιηθεί στη παρούσα διπλωματική εργασία, όπως επίσης και ο κώδικας MT3DMS που θα χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση μεταφοράς ρύπου.

6.2.1. ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Προκειμένου να σχεδιαστεί το μοντέλο, χρησιμοποιήθηκαν ορισμένες υδρολογικές οριακές συνθήκες οι οποίες θα αναλυθούν παρακάτω.

1. Όριο καθορισμένου φορτίου (συνθήκες Dirichlet)

- Time – Variant Specified – Head Package – CHD

Το συγκεκριμένο πακέτο χρησιμοποιήθηκε για την αναπαράσταση της ακτογραμμής. Ως αρχικό και τελικό φορτίο ορίστηκαν τα 0 m καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης και η οριακή συνθήκη εκχωρείται και στα τρία στρώματα. Παράλληλα, το όριο CHD ορίστηκε το μέτωπο που εκφορτίζεται η Μακαρία πηγή, με μέσο υψόμετρο τα 2 m. Ακόμη, οι εισροές από τον υγρότοπο του Σχοινιά ορίστηκαν με συνθήκες σταθερού φορτίου, ενώ το ύψος του υδραυλικού φορτίου ορίστηκε από μετρήσεις στάθμεων από γεωτρήσεις του ΙΓΜΕ ανάντι και κατάντι της περιοχής του υγροτόπου.

2. Όριο καθορισμένης παροχής (συνθήκες Neumann)

- Well package (WEL)

Χρησιμοποιήθηκε ως εκροή του υδροφόρου συστήματος για τις αντλήσεις από τις γεωτρήσεις και τα αρδευτικά πηγάδια της περιοχής. Με τη βοήθεια της Ειδικής Γραμματείας Υδάτων Αττικής, αλλά και με επί τόπου παρατηρήσεις στο ύπαιθρο, καθορίστηκε η χωρική κατανομή των σημείων όπου μελετήθηκαν. Η ποσότητα άντλησης προσδιορίστηκε από τη μελέτη του Υπουργείου Γεωργίας των Μελλισάρη & Σταυρόπουλου (1999). Το δε ετήσιο ποσό των αντλήσεων κατανεμήθηκε σε όλη τη διάρκεια του χρόνου, βάσει παρατηρήσεων από εκστρατείες μέτρησης στάθμης της πεδιάδας. Καθώς υπάρχουν θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις στην περιοχή, ο υδροφορέας αντλείται

καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου. Το παρόν πακέτο χρησιμοποιήθηκε επίσης για τη καταχώρηση σημείων εισπίεσης καθαρού νερού στο αρχικό σενάριο, για τη πραγματοποίηση βελτιωτικού σεναρίου.

- Recharge package (RCH)

Το παρόν πακέτο χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της επαναφόρτισης του υδροφορέα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, το πακέτο χρησιμοποιήθηκε για τις εισροές των κατακρημνισμάτων στον υδροφορέα.

3. Όριο ροής εξαρτώμενης από το υδραυλικό φορτίο ή όριο μικτού τύπου (συνθήκες Cauchy)

- General Head Boundary (GHB)

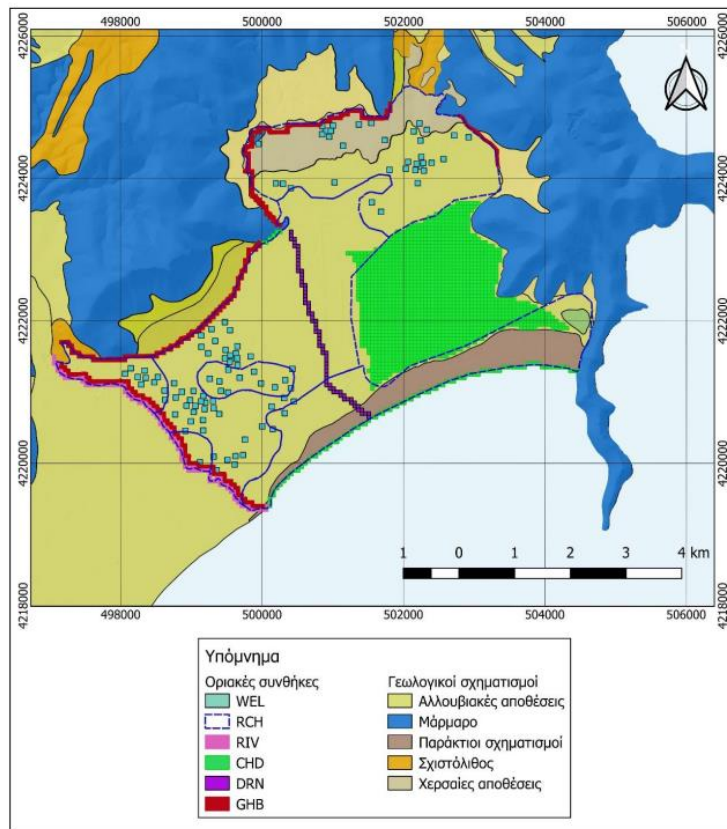
Το συγκεκριμένο πακέτο εκχωρήθηκε στην επαφή του κοκκώδους σχηματισμού της πεδιάδας του Μαραθώνα με τα καρστικά μάρμαρα του Μαραθώνα όπως και στην επαφή του σχηματισμού με τα Μάρμαρα της Αγίας Μαρίνας. Επιπλέον, εκχωρήθηκε στο δυτικό άκρο των ενεργών κελιών, αντιπροσωπεύοντας τις εισροές από τον παρακείμενο υδροφορέα της πεδιάδας. Το αρχικό και τελικό φορτίο κάθε περιόδου φόρτισης συμπληρώθηκε ύστερα από τις μετρήσεις του υδραυλικού φορτίου κατά την έρευνα πεδίου που πραγματοποίησε η Περδικάκη Μ. (2015).

- Drain Package (DRN)

Το πακέτο αυτό αναπαριστά την εκροή του συστήματος υπόγειων νερών. Η προσομοίωση του αποστραγγιστικού καναλιού της Μακαρίας που παράλληλα αποστραγγίζει ποσότητα υπόγειων νερών προς τη Μεσόγειο Θάλασσα, πραγματοποιήθηκε με αυτό.

- River Package (RIV)

Τέλος, το παρόν πακέτο χρησιμοποιείται για την προσομοίωση του νερού που είτε εκρέει είτε εισέρχεται στο σύστημα σύμφωνα με το υψόμετρο του ορίου σε σχέση με τη στάθμη του υδροφορέα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, το ρέμα του Χαράδρου προσομοιώθηκε με τη χρήση αυτού του πακέτου.



Εικόνα 28 Οριακές Συνθήκες για το μοντέλο προσομοίωσης του αλλουβιακού υδροφορέα του Μαραθώνα (Πηγή: Περδικάκη, 2022)

6.2.2. ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Ως αρχικές συνθήκες χρησιμοποιήθηκε η κατανομή του υδραυλικού φορτίου της περιοχής, ύστερα από μετρήσεις στάθμης το 2015 (Περδικάκη).

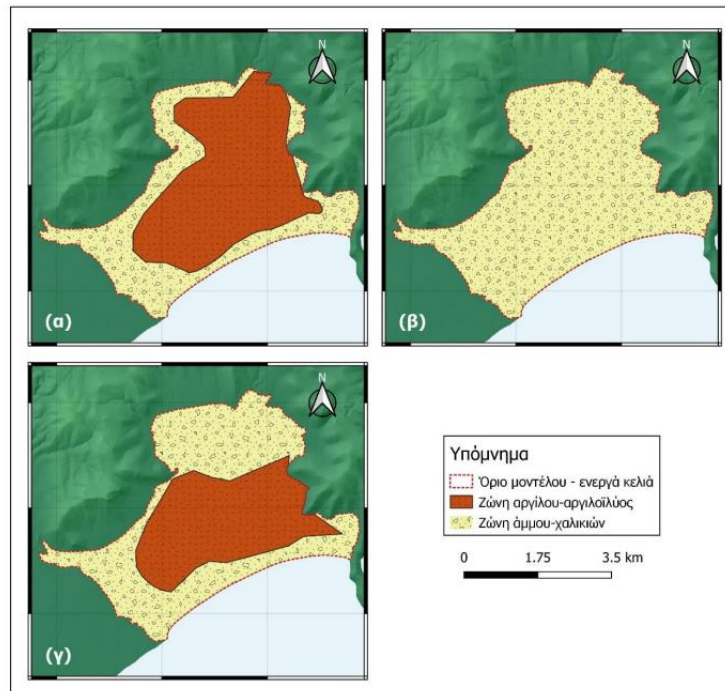
6.2.3. ΧΡΟΝΙΚΗ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ

Για τις ανάγκες της ανάλυσης ευαισθησίας, ρύθμισης και τελικά της προσομοίωσης του παράκτιου υδροφορέα, δημιουργήθηκαν 13 περίοδοι φόρτισης. Ως μονάδα μέτρησης του χρόνου καταχωρήθηκε η ημέρα (day). Η πρώτη περίοδος φόρτισης έλαβε μέρος σε συνθήκες μόνιμης ροής και ισοδυναμεί με 1 ημέρα, ενώ οι υπόλοιπες 12 περίοδοι φόρτισης αντιπροσωπεύουν 1 μήνα, και προσομοιώνονται υπό συνθήκες μη μόνιμης ροής. Το χρονικό βήμα κάθε περιόδου φόρτισης αντιστοιχεί στον αριθμό των ημερών κάθε μήνα. Η συνολική διάρκεια όπου θα τρέξει το μοντέλο είναι 1 έτος, δηλαδή τον Οκτώβρη του 2015 έως τον Οκτώβρη του 2016, χρησιμοποιώντας δεδομένα που είχαν συλλεχθεί το 2015 από την Περδικάκη Μάρθα.

6.2.4. ΧΩΡΙΚΗ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ

Η έκταση της ενεργής περιοχής του μοντέλου ισοδυναμεί με 19,67 km², και χωρίζεται σε πλέγμα 50 m x 50 m. Συνολικά δηλαδή έχουν δημιουργηθεί 7868 ενεργά κελιά ανά στρώμα. Η μονάδα μέτρησης μήκους που χρησιμοποιήθηκε είναι το μέτρο (m). Το μέγεθος των κελιών του κανάβου θεωρείται επαρκές προκειμένου να απεικονίζονται οι χωρικές μεταβολές που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης του αλλουβιακού υδροφορέα του Μαραθώνα.

Χρησιμοποιώντας ως γνώμονα τον γεωλογικό χάρτη της πεδιάδας του Μαραθώνα, ορίστηκαν η έκταση και τα όρια του μοντέλου του κοκκώδους σχηματισμού, τα οποία ταυτίζονται με τα όρια των αλλουβιακών αποθέσεων. Σύμφωνα με την Περδικάκη (2022), ως οροφή του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM) του Εθνικού Κτηματολογίου με ανάλυση 5x5m, το πάχος των αποθέσεων ορίστηκε από τις γεωφυσικές διασκοπήσεις των Μελισσάρη & Σταυροπούλου (1999), ενώ τα αποτελέσματα επικυρώθηκαν με δεδομένα υφιστάμενων γεωτρήσεων από την Ειδική Γραμματεία Υδάτων της Περιφέρειας Αττικής.

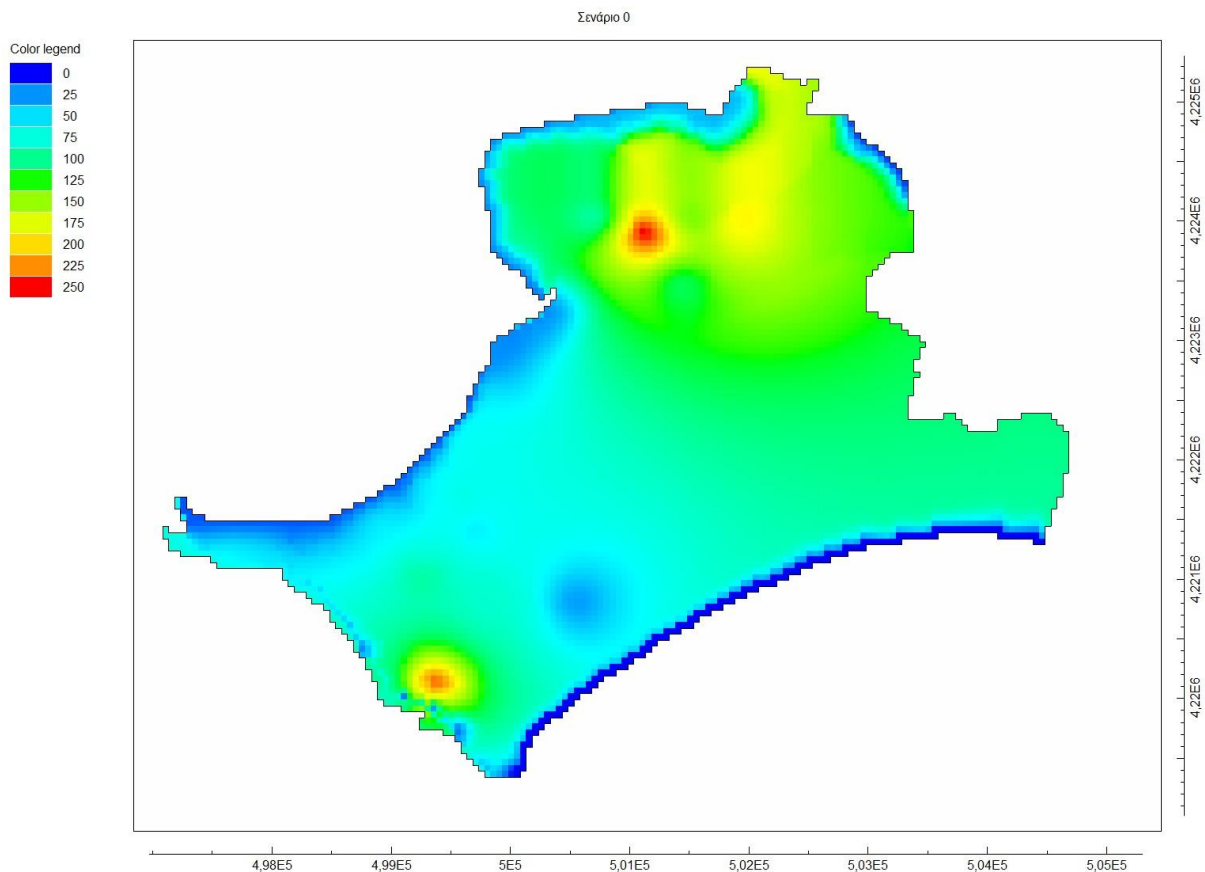


Εικόνα 29 Καθορισμός ζωνών (α) το υπερκείμενο στρώμα, (β) το ενδιάμεσο στρώμα και (γ) το υποκείμενο στρώμα (Πηγή: Περδικάκη, 2022)

Όπως διαφαίνεται στον χάρτη παραπάνω, ο προσχωματικός υδροφορέας χωρίστηκε σε τρία στρώματα, όπου το ανώτερο και κατώτερο στρώμα αντιστοιχούν σε δύο διαφορετικές ζώνες αργίλου-αργιλοϊλύος και άμμου-χαλικιών, και το μεσαίο στρώμα αντιστοιχεί σε αδρομερές υλικό άμμου-χαλικιών. Ο καρστικός υδροφορέας, ο οποίος βρίσκεται στο υπόβαθρο του προσχωματικού υδροφορέα, δε θα μελετηθεί στη παρούσα διπλωματική εργασία.

6.3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα που παράχθηκαν από τη προσομοίωση του μοντέλου MT3DMS, αναπαρίστανται στους παρακάτω χάρτες. Στην Εικόνα 30 απεικονίζεται η αρχική κατάσταση του υδροφόρου όπου επιδρούν τα νιτρικά ιόντα. Παρουσιάζονται δυο κώνοι με υψηλές συγκεντρώσεις νιτρικών, πράγμα που συμπίπτει με τα δεδομένα που έχουν ληφθεί και επεξεργαστεί τη συγκεκριμένη περίοδο μελέτης.

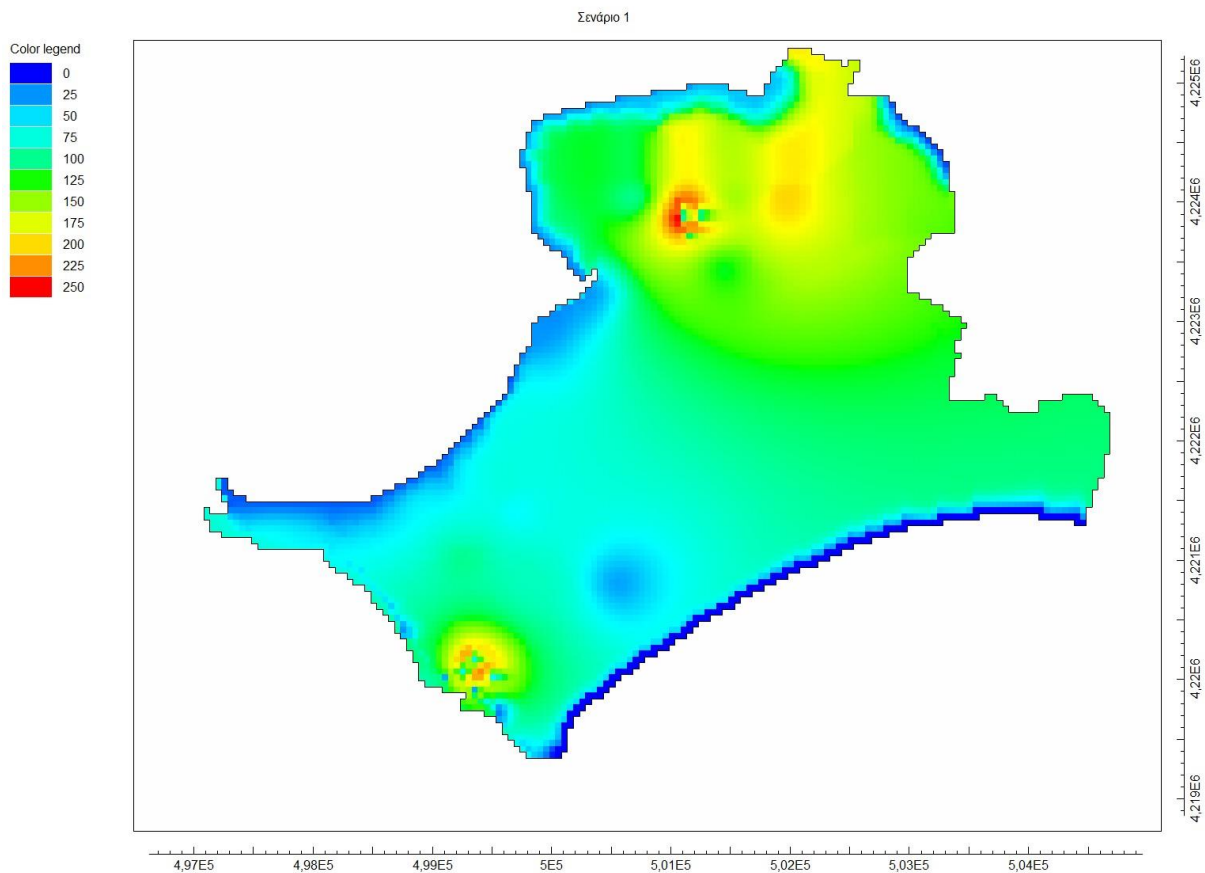


Εικόνα 30 Αποτελέσματα Αρχικού Σεναρίου-Υφιστάμενη Κατάσταση

Ύστερα από το αρχικό σενάριο μελετήθηκε ένα δεύτερο σενάριο κατά το οποίο πραγματοποιείται τεχνητός εμπλουτισμός. Αυτό αποσκοπεί στην εξυγίανση της υφιστάμενης κατάστασης και πραγματοποιήθηκε με την ακόλουθη διαδικασία. Εισπιάστηκε καθαρό νερό όγκου $50 \text{ m}^3/\text{day}$ σε 4 σημεία περιμετρικά των επιβαρυμένων περιοχών. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο χάρτη της Εικόνας 31 είναι αρκετά ευοίωνα.

Συγκεκριμένα, όσον αφορά τη περιοχή που βρίσκεται στα βορειοανατολικά της πεδιάδας Μαραθώνα, παρατηρείται ότι οι συγκεντρώσεις των νιτρικών ιόντων σε

αυτά τα σημεία έχουν βελτιωθεί σημαντικά. Οι συγκεντρώσεις στις εν λόγω περιοχές πριν τον εμπλουτισμό είχαν τιμές: 265 mg/l, 237 mg/l, 216 mg/l και 220 mg/l ενώ μετά τον εμπλουτισμό οι συγκεντρώσεις μειώθηκαν σε: 97 mg/l, 110 mg/l, 118 mg/l και 180 mg/l αντίστοιχα. Αντίστοιχη μείωση στις τιμές παρατηρείται και στη δεύτερη περιοχή, στα νοτιοδυτικά της πεδιάδας, όπου, οι αρχικές συγκεντρώσεις ήταν: 200 mg/l, 250 mg/l, 180 mg/l και 207 mg/l, ενώ οι τελικές ήταν: 70 mg/l, 76mg/l, 62 mg/l και 180 mg/l αντίστοιχα. Υπάρχουν, δηλαδή, σημεία όπου η συγκέντρωση μειώθηκε στο 1/3 της αρχικής.



Εικόνα 31 Αποτελέσματα Σεναρίου 1

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Για την περάτωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, προκύπτουν κάποια βασικά συμπεράσματα, αλλά και προβληματισμοί, που παρατίθενται παρακάτω.

Η πεδιάδα του Μαραθώνα, βρίσκεται βορειοανατολικά της Αττικής, ενώ αποτελεί μια παράκτια ζώνη που παρουσιάζει ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον. Εξαιτίας των ανθρωπογενών παρεμβάσεων που έχουν λάβει χώρα από το παρελθόν έως και σήμερα, όπως για παράδειγμα τα φράγματα που έχουν κατασκευαστεί στην ευρύτερη περιοχή, το κωπηλατοδρόμιο, αλλά κυρίως τα υδρομαστευτικά έργα σε όλη την πεδινή έκταση, το υδρολογικό και υδρογεωλογικό σύστημα της περιοχής έχει μεταβληθεί.

Μέσω της βιβλιογραφικής ανασκόπησης σε παλαιότερες μελέτες για το καθεστώς του υπόγειου νερού της πεδιάδας φαίνεται ότι τόσο ο καρστικός όσο και ο αλλουβιακός υδροφορέας της περιοχής έχει υποβαθμιστεί τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά. Παράλληλα, δεν παρατηρούνται σημαντικές αλλαγές στη πιεζομετρία και κυρίως τη συγκέντρωση ιόντων τα τελευταία περίπου 30 χρόνια.

Βάσει της παρούσας έρευνας επιβεβαιώνεται ότι στην περιοχή τα σημαντικότερα προβλήματα είναι το χαμηλό υδραυλικό φορτίο, η θαλάσσια διείσδυση και η νιτρορύπανση, ενώ η υποβάθμιση είναι εντονότερη στον αλλουβιακό υδροφορέα της πεδιάδας. Η αιτία αυτής της υποβάθμισης είναι οι έντονες και ανεξέλεγκτες αντλήσεις, η υδραυλική επικοινωνία το υδροφορέα με τη θάλασσα καθώς και η υπέρμετρη χρήση αζωτούχων λιπασμάτων.

Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά τα νιτρικά ιόντα που συναντώνται στη περιοχή μελέτης, παρατηρούνται τρεις ζώνες με πολύ υψηλή συγκέντρωση νιτρικών ιόντων έως και 305 mg/l. Οι ζώνες αυτές εντοπίζονται στα δυτικά της πεδιάδας (Βρανάς), στα κεντρικά (Αγ. Παντελεΐμονας), και στα βορειοανατολικά (Κάτω Σούλι). Οι περιοχές με τις χαμηλότερες συγκεντρώσεις εντοπίζονται πλευρικά της κοίτης του Χαράδρου και στα βόρεια του κεντρικού τμήματος της πεδιάδας όπου ο αλλουβιακός υδροφορέας τροφοδοτείται από τα Μάρμαρα Βορειοανατολικής Αττικής αλλά και από τη Μακαρία Πηγή. Αξίζει να σημειωθεί πως, συγκριτικά με τα παλαιότερα δεδομένα, οι χημικές αναλύσεις που διεξήχθησαν για τη παρούσα διατριβή έδειξαν σημαντική βελτίωση στη συγκέντρωση των νιτρικών ιόντων, στα κεντρικά της πεδιάδας (Αγ. Παντελεΐμονας).

Επιπλέον, η εφαρμογή των μαθηματικών μοντέλων ροής και μεταφοράς μάζας υπογείου νερού μπορεί να αποδειχθεί χρήσιμο εργαλείο για τη πρόγνωση της μελλοντικής κατάστασης του υδροφορέα και την εφαρμογή διαχειριστικών πρακτικών για τη μελλοντική εξυγίανσή του. Μέσω του Μοντέλου Μεταφοράς Μάζας (MT3DMS) προσομοιώθηκε η κίνηση των νιτρικών ιόντων στον αλλουβιακό υδροφορέα. Παρατηρήθηκε ότι τα αποτελέσματα του

μοντέλου, ταυτίζονται με τις μελετημένες από τις χημικές αναλύσεις τιμές νιτρικών ιόντων. Τέλος, το διαχειριστικό σενάριο που πραγματοποιήθηκε για την περίοδο της προσομοίωσης αποδεικνύει πως με την εφαρμογή Τεχνητού Εμπλουτισμού στον υδροφορέα είναι δυνατό η συγκέντρωση νιτρικών ιόντων να βελτιωθεί ακόμη και έως στο 1/3 της αρχικής συγκέντρωσης μέσα σε ένα υδρολογικό έτος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

91/676/ΕΟΚ (1991) Οδηγία του Συμβουλίου για την προστασία των υδάτων από τη νιτρορύπανση γεωργικής προέλευσης.

2000/60/ΕΚ (2000) Οδηγία 2000/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου για τη θέσπιση κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων. ΕΕC (Ed.)

Βουδούρης Κ. (2009) Υδρογεωλογία Περιβάλλοντος, Υπόγεια νερά και Περιβάλλον, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη

Ιορδανίδης Η. (2011) Διερεύνηση της νιτρορύπανσης λεκάνης απορροής από αγροτικές δραστηριότητες. Διδακτορική Διατριβή. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη

Καλλέργης Γ. (2000) Εφαρμοσμένη – Περιβαλλοντική υδρογεωλογία, 2η Έκδοση, Τόμος Β', Αθήνα: Έκδοση Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας.

Καλλιώρας Α., (2008) Διαχείριση υπόγειων υδατικών πόρων σε υδροφόρους που υπόκεινται σε καθεστώς θαλάσσιας διείσδυσης. Η περίπτωση του δυτικού παράκτιου τμήματος του Ν. Ροδόπης. Διδακτορική Διατριβή. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Δ.Π.Θ

Κατσικάτσος Κ., (1977) Γεωλογικός Χάρτης Ραφήνας, ΙΓΜΕ

Κατσικάτσος Κ., (1994-1997) Γεωλογικός Χάρτης Κηφισιάς, ΙΓΜΕ

Κωνσταντινίδης Χ. (2020) Νιτρορύπανση Υπόγειων Υδάτων και Κλιματική Αλλαγή. Διπλωματική Εργασία, Σχολή Θετικών Επιστημών & Τεχνολογίας Ε.Α.Π., Πάτρα

Λατινόπουλος Π. (1999) Το πρόβλημα της ρύπανσης υπόγειων νερών από νιτρικά και η αντιμετώπιση του στην Ευρωπαϊκή Ένωση, Πρακτικά Συνεδρίου HELLECO 99, Τόμος Ι, 3-6 Ιουνίου, Θεσσαλονίκη

Λόζιος Σ. (1993) Τεκτονική ανάλυση μεταμορφωμένων σχηματισμών βορειοανατολικής Αττικής. Διδακτορική διατριβή. Τμήμα Γεωλογίας, ΕΚΠΑ, Αθήνα

Μαγκλαράς Κ., Χρηστίδης Κ. (2021) Τρωτότητα του κοκκώδους υδροφόρου ορίζοντα στην περιοχή του Μαραθώνα. Διπλωματική Εργασία, ΕΚΠΑ, Αθήνα

Μαργώνη Σ. (2006) Έρευνα των περιβαλλοντικών διεργασιών εξέλιξης των υγροτόπων και της πεδιάδας του Μαραθώνα κατά το ολόκαινο με τη χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (G.I.S.). Διδακτορική διατριβή. Τμήμα Γεωλογίας, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη

Μελισσάρης Π., Σταυρόπουλος Ξ. (1999) Υδρογεωλογική Μελέτη Κάμπου Μαραθώνα Ν.Αττικής. Υπουργείο Γεωργίας, Αθήνα

Παπαζώτος Π. (2015) Υδρογεωλογικό καθεστώς στη λεκάνη του Μαραθώνα με έμφαση στη πεδινή ζώνη. Μεταπτυχιακή Διατριβή. Ε.Μ.Π., Αθήνα

Παπανικολάου Δ. (1984) Tectonic Evolution of the Cycladic Blueschist Belt (Aegean Sea, Greece), Αθήνα

Περδικάκη Μ. (2016) Εννοιολογικό Υδρογεωλογικό Μοντέλο Κοκκώδους Παράκτιου Υδροφορέα – Η περίπτωση του Μαραθώνα. Μεταπτυχιακή Διατριβή. Ε.Μ.Π., Αθήνα

Περδικάκη Μ. (2022) Προσομοίωση και βέλτιστη διαχείριση παράκτιων υπόγειων υδατικών συστημάτων. Διδακτορική Διατριβή. Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών Ε.Μ.Π., Αθήνα

Σιάρκος Η. (2015) Ανάπτυξη μεθοδολογικού πλαισίου με χρήση μαθηματικών μοντέλων προσομοίωσης για τη διερεύνηση της λειτουργίας παράκτιων υδροφόρων συστημάτων: εφαρμογή στον υδροφορέα των Ν. Μουδανιών. Διδακτορική Διατριβή. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη

Σκούντζος Φ. (1992) Υδρογεωλογική Μελέτη περιοχής Μαραθώνα Αττικής. Διπλωματική Εργασία. Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών Ε.Μ.Π., Αθήνα

Στουρνάρας Γ. (2006) Νερό – Περιβαλλοντική διάσταση και διαδρομή, Εκδόσεις Τζιόλα, Αθήνα

Φλώρος Ε. (2016) Χρήση ισοτοπικών και υδροχημικών χαρακτηριστικών υπογείων νερών για τη διερεύνηση της υπόγειας υδρολογίας του παράκτιου συστήματος του Μαραθώνα. Διπλωματική Εργασία. Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών Ε.Μ.Π., Αθήνα

ΔΙΕΘΝΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

75/440/EEC (1975) Council Directive concerning the quality required of surface water intended for the abstraction of drinking water in the Member States. EEC (Ed.).

Bednarek A. et al. (2014) "Nitrogen pollution removal from areas of intensive farming-comparison of various denitrification biotechnologies", Ecohydrology and Hydrobiology

Essink Gualbert H. P. Oude (2001) Density Dependent Groundwater Flow, Academic Publishing of Utrecht University

Harbaugh AW (2005) The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model — the Ground-Water Flow Process. US Geol Surv Tech Methods 6-A16 253

Mcdonald MG, Harbaugh AW (1988) A MODULAR THREE-DIMENSIONAL FINITE-DIFFERENCE GROUNDWATER FLOW MODEL

Psychoyou M. et al. (2006) Groundwater hydrochemistry at balkan coastal plains – the case of Marathon of Attica, Greece. Agricultural University of Athens

US Environment Protection Agency (2000) Nutrient Criteria, Technical Guidance Manual: Rivers and Streams. Washington, DC.

World Health Organization (2008) Guidelines for drinking-water quality. Geneva, World Health Organization.

Zheng C, Wang P (1999) MT3DMS: A Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion, and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems Documentation and User 's Guide. US Army Corps of Engineers-Engineer Research and Development Center

ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΟΙ ΤΟΠΟΙ

<https://www.kallikratis.org/apografi-2021-o-plithysmos-tis-elladas/>

<https://ypen.gov.gr/perivallon/ydatikoi-poroi/nitrorypansi/>